

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

О.А. АГЕЕВ, В.М. МАМИКОНОВА, В.В. ПЕТРОВ,
В.Н. КОТОВ, О.Н. НЕГОДЕНКО

**МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Таганрог 2000

УДК 621.382.8 (075.8)

Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В., Котов В.Н., Негоденко О.Н. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин: Учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 153 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 55.11.00 “Проектирование и технология РЭС” и специальностям 220500 “Конструирование и технология ЭВС”, 200800 “Проектирование и технология РЭС”, 200200 “Микроэлектроника и полупроводниковые приборы”, 3302 “Инженерная защита окружающей среды”.

Содержит обобщенную и систематизированную информацию о классификации, принципах работы, конструкции и технологии изготовления наиболее распространенных датчиков физических величин – магнитного поля, давления, химического состава газовых смесей и влажности.

В пособии представлены также оригинальные разработки авторов.

Рекомендовано к изданию учебно-методическим Советом по направлению 55.11.00 и учебно-методическими комиссиями по специальностям 200800 и 220500.

Табл. 10. Ил. 115. Библиогр.: 79 назв.

Печатается по решению ред.-изд. совета Таганрогского государственного радиотехнического университета

Рецензенты:

Отдел функциональной электроники ОКБ космического приборостроения Азербайджанского Национального Аэрокосмического Агентства. Ф.Д.Касимов зав. отделом, д-р физ.-мат. наук,

Г.А. Мустафаев, д-р техн. наук, профессор Кабардино-Балкарского государственного университета

© Таганрогский государственный
радиотехнический университет, 2000

СОДЕРЖАНИЕ		Стр.
	ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.	ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДАТЧИКОВ.....	4
2.	МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	6
2.1.	Преобразователи магнитного поля на основе эффекта Хол-	6
2.1.1.	Эффект Холла.....	6
2.1.2.	Пленочные датчики Холла.....	10
2.1.3.	Кремниевые интегральные ДХ.....	13
2.2.	Магниторезистивные преобразователи.....	18
2.2.1.	Магниторезистивный эффект.....	18
2.2.2.	Конструкции магниторезисторов.....	19
2.2.3.	Параметры магниторезисторов.....	19
2.3.	Гальваномагнитные преобразователи на активных элементах.	20
2.3.1.	Магнитодиоды.....	20
2.3.2.	Магнитотранзисторы.....//.....	21
2.4.	Гальваномагниторекомбинационные преобразователи.....	23
2.4.1.	Гальваномагниторекомбинационный (ГМР) эффект.....	23
2.4.2.	Гальваномагниторекомбинационный преобразователь (ГМРП)	27
2.4.3.	Кремниевые интегральные ГМРП.....	28
2.5.	Магниточувствительные интегральные схемы.....	31
2.5.1.	Магнитокоммутируемые ИС на основе эффекта Холла.....	31
2.5.2.	Линейные магниточувствительные ИС.....	35
3.	ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ.....	38
3.1.	Тензорезистивный эффект в полупроводниках.....	38
3.2.	Первичные тензопреобразователи.....	47
3.3.	Классификация интегральных тензопреобразователей давле- ния.....	49
3.3.1.	Пути интеграции тензопреобразователей.....	49
3.3.2.	Классификация структур интегральных тензопреобразова- телей.....	53
3.3.3.	Технологические этапы изготовления интегральных тензопреобразователей.....	55

3.4.	Принципы размещения тензорезисторов на мембранах полупроводниковых интегральных тензопреобразователей давления (ИТП).....	56
3.5.	Функция преобразования тензопреобразователей давления.....	61
3.6.	Примеры интегральных преобразователей давления.....	62
3.6.1.	Интегральные тензопреобразователи, изготавливаемые в НИИ МВС ТРТУ.....	62
3.6.2.	Интегральные преобразователи давления с профилированной мембраной фирмы ENDEVCO.....	65
3.6.3.	X-ducer фирмы Motorola.....	66
3.6.4.	Датчик давления типа MBS фирмы Danfoss.....	66
4.	МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГАЗОВ.....	68
4.1.	Адсорбция на поверхности твердых тел.....	68
4.1.1.	Роль электронов и дырок при адсорбции.....	70
4.1.2.	Взаимодействие поверхности с объемом.....	72
4.1.3.	Химические реакции на поверхности полупроводников.....	73
4.2.	Датчики на основе окислов металлов.....	78
4.3.	Датчики на органических полупроводниках.....	78
4.4.	Каталитические датчики.....	80
4.5.	Электрохимические газовые датчики.....	80
4.6.	Датчики на основе МДП-структур.....	82
4.7.	Газовые датчики с барьером Шоттки.....	85
4.8.	Газовые датчики на основе приборов, чувствительных к изменению массы.....	87
4.9.	Оптические газовые датчики.....	88
5.	ВЛАГОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СЕНСО-	90
5.1.	Единицы измерения влажности.....	91
5.2.	Методы измерения влажности.....	93
5.3.	Температурно-градиентные датчики влажности.....	93
5.3.1.	Психрометрические датчики.....	93
5.3.2.	Конденсационные датчики.....	94
5.4.	Микроэлектронные сорбционные датчики влажности.....	97
5.4.1.	Кулонометрические датчики.....	98
5.4.2.	Сорбционно-импедансные датчики.....	99
5.4.3.	Пьезосорбционные датчики.....	110

6.	АВТОГЕНЕРАТОРНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ АНАЛОГОВ НЕГАТРО-	112
6.1.	Транзисторные аналоги негатронов.....	112
6.2.	Пьезоэлектрические датчики.....	122
6.3.	Датчики электромагнитных полей.....	125
6.4.	Датчики температуры с частотным выходом.....	130
6.5.	Датчики магнитного поля с частотным выходом.....	131
6.6.	Датчики на основе индуктивных балансных сенсоров и аналогов негатронов.....	132
6.7.	Радиопарные датчики.....	142
	ЛИТЕРАТУРА.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование автоматизированных систем контроля, измерения и управления технологическими процессами является одним из необходимых условий нормального функционирования и перспективного развития промышленности.

Важнейшими звеньями автоматизированных технологических систем (АТС) являются датчики. По мере развития АТС датчики приобретают все большее значение. Это связано с необходимым ростом номенклатуры датчиков физических величин, расширением областей их применения и усложнением решаемых с их помощью задач [1].

Недооценка роли и значения датчиков (основных источников информации, дающей возможность прогнозирования развития опасных ситуаций, и, следовательно, предотвращения их) для современных энергетических установок и систем, в том числе и ракетно-космических, приводит в лучшем случае к необоснованным материальным затратам и недостижению поставленных целей, как это было в 60-х годах с отечественным проектом запуска ракеты на Луну, а в худшем - к катастрофам, произошедшим на Чернобыльской АЭС и с ракетно-космической системой «Space Shuttle»-«Challenger».

С другой стороны, хорошая укомплектованность ракетно-космического носителя «Энергия» с орбитальным кораблем «Буран» средствами измерений (более 3500 различных датчиков для телеизмерений и локальных систем управления) обеспечили достаточно полную отработку программы в наземных условиях, в период предстартовой подготовки и в полетном режиме.

В последнее десятилетие достаточно интенсивно решаются задачи по проектированию и производству датчиков для АТС таких подотраслей пищевой промышленности, как сахарная, мясоперерабатывающая, кондитерская, хлебопекарная и т.п. Кроме того, разрабатываются и выпускаются датчики для медицинской, нефтяной, газовой промышленности, производства химических волокон, для совершенствования систем управления коммунальным хозяйством и, в первую очередь, водо- и теплоснабжения.

Датчики служат источником информации и состоят из чувствительного элемента, схемы обработки полученного сигнала, а также АЦП или светового табло (т. е. индикатора).

Основным элементом этой триады является чувствительный элемент, называемый *первичным преобразователем*, или *сенсором* (с лат. - чувство) [2].

Примером простейшего датчика может служить обыкновенный ртутный термометр, чувствительным элементом которого является ртуть, расширяющаяся при нагревании; капилляр, в котором происходит расширение ртути - схема преобразования; шкала, к которой он прикреплен - индикатор. Однако показания термометра невозможно автоматически ввести в анализирующую или управляющую машину, т.к. это величина не электрическая.

Для сопряжения с АТС необходимо использовать такие чувствительные элементы, в которых под влиянием внешних воздействий меняется один из электрических параметров.

С другой стороны, требования, предъявляемые к современной РЭА, такие как: повышение надежности и помехоустойчивости, снижение цены, габаритов, потребляемой мощности - распространяются и на датчики.

Выполнение этих условий становится возможным при использовании микроэлектронных схемотехники и технологии, поскольку, во-первых, электрофизические свойства полупроводников и полупроводниковых приборов, на которых основана микросхемотехника, сильно зависят от внешних воздействий, во-вторых, микроэлектронная технология основана на групповых методах обработки материалов для изготовления приборов, что снижает их себестоимость, габариты, потребляемую мощность и ведет к повышению надежности и помехоустойчивости.

Кроме того, при использовании *полупроводникового сенсора* или сенсора, изготовление которого совместно с технологическим процессом создания интегральных микросхем (ИМС), сам сенсор и схемы обработки полученного сигнала могут быть изготовлены в едином технологическом цикле, на едином полупроводниковом или диэлектрическом кристалле.

Наука, занимающаяся разработкой первичных преобразователей и схем обработки полученных от них сигналов в микроэлектронном исполнении, получила название *микроэлектронной сенсорики*.

Таким образом, одной из основных задач микроэлектронной сенсорики является изучение влияния на полупроводниковые структуры различных внешних воздействий и выявление принципов создания на основе этих физических эффектов первичных преобразователей различных неэлектрических величин в электрический сигнал.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДАТЧИКОВ

На датчик могут одновременно воздействовать различные факторы (давление, температура, влажность, вибрация, радиация и т.д.), но воспринимать он должен только одну величину, называемую *естественно измеряемой величиной* A [1].

Функциональную зависимость выходной величины B датчика от естественной измеряемой величины A в статических условиях, выраженную аналитически, таблично или графически, называют статической характеристикой датчика.

Статическая чувствительность представляет собой отношение малых приращений выходной величины к соответствующим малым приращениям входной величины в статических условиях:

$$S = \frac{\Delta B}{\Delta A} = \frac{dB}{dA}.$$

Понятие статической чувствительности аналогично понятию коэффициента усиления, градиента, коэффициента чувствительности.

Понятие чувствительности можно распространить на динамические условия работы. При этом под *динамической чувствительностью* подразумевают отношение скорости изменения выходного сигнала к соответствующей скорости изменения входного сигнала:

$$S_d = \frac{dB/dt}{dA/dt}.$$

Под *порогом чувствительности* понимают минимальное изменение измеряемой величины (входного сигнала), вызывающее изменение выходного сигнала.

Нормальными условиями эксплуатации датчика являются: температура окружающей среды $+25 \pm 10$ °С, атмосферное давление 750 ± 30 мм. рт. ст., относительная влажность окружающего воздуха $65 \pm 15\%$, отсутствие вибрации и полей, кроме гравитационного.

Дополнительные погрешности датчика - это погрешности, вызываемые изменением внешних условий по сравнению с нормальными. Они выражаются в процентах, отнесенных к изменению неизмеряемого параметра (например, температурная погрешность 1% на 5°С; погрешность от магнитного поля 0.5% на 5 Э и т.д.)

Существуют различные подходы к классификации датчиков при их разработке.

Во-первых, датчики можно классифицировать по технологии изготовления, гибридно - пленочные, твердотельные биполярные, твердотельные МДП и т.д.

Во-вторых, они могут быть классифицированы по выходному электрическому параметру: емкостные, резистивные, индуктивные и т.д..

В-третьих, классификацию можно проводить по измеряемому параметру: датчики температуры, давления, тензодатчики, фотометрические датчики, датчики перемещения, магнитного поля, радиации и т.д.

Таким образом, параметров, измеряемых с помощью датчиков, множество, однако в основе всех современных микроэлектронных датчиков лежат полупроводниковые сенсоры, работающие на нескольких фундаментальных эффектах - это влияние на полупроводник:

- 1) магнитного поля;
- 2) деформации, давления;
- 3) окружающей газовой среды;
- 4) температуры, света и т.д..

2. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Кинетические явления, имеющие место при одновременном воздействии на полупроводник электрического и магнитного полей, называются гальваномагнитными эффектами. К ним относятся: эффект Холла; магнито-резистивный и гальваномагниторекомбинационный эффекты.

На основе этих эффектов в настоящее время работает широкий спектр гальваномагнитных преобразователей (ГМП), которые с успехом применяются в автоматике, вычислительной технике, электротехнике, автомобильной электронике и других областях, причем возможности их использования постоянно расширяются.

Данная глава посвящена описанию физических основ этих эффектов и принципов разработки и конструирования ГМП.

2.1. Преобразователи магнитного поля на основе эффекта Холла

Высокая чувствительность и линейность характеристики датчиков Холла (ДХ) позволяют использовать их для измерения слабых магнитных полей, в том числе магнитного поля Земли. ДХ также применяются в бесколлекторных двигателях постоянного тока, отличающихся тем, что коммутация тока в их обмотках осуществляется не посредством щеток, а с помощью электронной схемы [1-4].

Наряду с техническими применениями эффект Холла является мощным инструментом при исследовании фундаментальных свойств полупроводников [5]. Температурная зависимость эффекта Холла может дать важную информацию о ширине запрещенной зоны полупроводника, энергии ионизации и механизме рассеяния носителей заряда, причем даже в таких, традиционно трудных для исследования материалах, как поликристаллические полупроводники [6].

2.1.1. Эффект Холла

Сущность эффекта Холла, открытого еще в конце прошлого века, заключается в появлении поперечного электрического поля в образце полупроводника, помещенного в перпендикулярное магнитное поле, при пропускании вдоль него электрического тока.

Рассмотрим брусок полупроводника n-типа проводимости прямоугольной формы, по которому протекает ток I под действием электрического поля E (рис.1). Плотность этого тока \vec{j} определится формулой

$$\vec{j} = -qn\vec{V}_x = \sigma\vec{E}_x, \quad (1)$$

где q -заряд электрона, n -концентрация электронов, σ - удельная проводимость полупроводника, \vec{V}_x - скорость электронов в электрическом поле \vec{E}_x .

Если полупроводник однородный, то в отсутствие магнитного поля эквипотенциальные поверхности будут перпендикулярны вектору напряженно-

сти электрического поля, а следовательно, и силовым линиям тока. В этом случае, при расположении точек А и В на одной эквипотенциальной поверхности, т.е. строго напротив друг друга, напряжение между ними равно нулю.

Поместим теперь образец в магнитное поле с индуктивностью \vec{B} , перпендикулярной плоскости рисунка и направлению электрического поля. При этом на носители тока в образце начинает действовать сила Лоренца

$$\vec{F} = \pm q [\vec{V}_x \cdot \vec{B}], \quad (2)$$

направленная перпендикулярно дрейфовой скорости \vec{V}_x и индукции магнитного поля \vec{B} , причем знак (+) соответствует дырке, а знак (-) - электрону.

С другой стороны, дрейфовую скорость \vec{V}_x можно записать в виде

$$\vec{V}_x = \pm \mu \vec{E}_x, \quad (3)$$

где (+) соответствует дырке, а (-) - электрону, в результате чего

$$\vec{F} = q\mu [\vec{E}_x \cdot \vec{B}],$$

т.е. направление силы Лоренца не зависит от знака носителя, а значит и электроны, и дырки под действием силы Лоренца будут отклоняться в одну сторону (к точке А на рис. 1, а). Полученный результат становится очевидным, если учесть, что при изменении знака носителя меняется и направление его движения в электрическом поле. Из вышеизложенного следует, что в полупроводнике n-типа проводимости и основные, и неосновные носители отклоняются к точке А и накапливаются около нее, но поскольку основных носителей много больше, чем неосновных, то в точке А будет избыток электронов, а в точке В их недостаток. Таким образом, между точками А и В возникает дополнительное электрическое поле, направленное от В к А (в случае акцепторного полупроводника направление этого поля будет противоположным). Возникающее электрическое поле перпендикулярно как вектору магнитной индукции, так и направлению протекания тока и носит название поля Холла (\vec{E}_H).

Поле \vec{E}_H будет расти до тех пор, пока не скомпенсирует силу Лоренца

$$-q \cdot \vec{E}_H = q [\vec{V}_x \cdot \vec{B}]. \quad (4)$$

После достижения этого условия носители потекут по полупроводнику только под действием внешнего электрического поля, т.е. магнитное поле при этом как бы отсутствует. Однако суммарная напряженность поля в образце станет $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_H$, а ее вектор окажется повернут относительно

исходного поля на некоторый угол θ , называемый углом Холла (рис. 1, б). В результате этого эквипотенциальные поверхности также оказываются повернутыми относительно силовых линий тока на тот же угол, и точки А и В окажутся теперь на разных эквипотенциальных поверхностях, следовательно,

между ними возникнет разность потенциалов, называемая ЭДС Холла или холловским напряжением, которое в случае $\vec{V}_x \perp \vec{B}$ и с учетом (1) запишется в виде

$$U_H = E_H \cdot W = -V_x \cdot B \cdot W = \frac{1}{qn} j \cdot B \cdot W = R_H \cdot j \cdot B \cdot W, \quad (5)$$

где w – ширина образца, $R_H = 1/qn$ – постоянная Холла, определяемая концентрацией основных носителей тока в полупроводнике. Для полупроводника n -типа она определяется приведенной формулой и имеет знак минус, а для полупроводника p -типа она положительна и запишется как $R_H = 1/qp$.

Как видно из рис. 1, б,

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_H}{E_x} = \frac{U_H}{U} \cdot \frac{L}{W} \quad (6)$$

и определяется отношением длины элемента к его ширине. Расчеты показывают, что оптимальным оказывается соотношение $L/W = 1,5-3$. Выбор такого малого значения отношения обусловлен тем, что с ростом L для сохранения постоянной плотности тока через образец необходимо увеличивать также и прикладываемое напряжение U . Если рост L ведет к увеличению угла Холла, то увеличение приложенного напряжения приводит к его уменьшению, т.е. зависимость $\operatorname{tg} \theta$ от L/W имеет насыщение при $L/W > 3$.

С другой стороны, из (1) и (5) следует, что

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_H}{E_x} = \frac{R_H \cdot j \cdot B}{E_x} = R_H \cdot \sigma \cdot B. \quad (7)$$

Учитывая, что $\sigma = qn$ – удельная проводимость полупроводника, а $R_H = 1/qn$, то из (7) можно получить

$$\operatorname{tg} \theta = \mu_H B, \quad R_H = \operatorname{tg} \theta / \sigma B. \quad (8)$$

Таким образом, угол Холла, а следовательно, R_H и U_H тем больше, чем больше подвижность носителей в полупроводнике и меньше его удельная проводимость. Отсюда следует, что для использования в датчиках Холла следует выбирать полупроводники n -типа проводимости с высокой подвижностью носителей и малой концентрацией примеси.

Используемая в формуле (8) величина μ_H называется холловской подвижностью, она отличается от дрейфовой подвижности μ и записывается в виде

$$\mu_H = \sigma \cdot R_H. \quad (9)$$

На самом деле, коэффициент Холла в приведенном выше виде неточен, поскольку в нем не учтена разница между полной скоростью электронов, входящей в выражение (2), и дрейфовой скоростью, которую электрон приобретает под действием электрического поля. Кроме того, не учитывается распределение электронов по скоростям и механизм рассеяния носителей. Более строгое выражение для коэффициента Холла имеет вид

$$R_H = \pm r_H / qn, \quad (10)$$

где r_H – холл-фактор, являющийся характеристикой данного твердого тела и зависящий от механизма рассеяния носителей. Например в [7] приведен расчет холл-фактора для атомных полупроводников типа Ge и Si при одновременном действии двух механизмов рассеяния – на акустических колебаниях атомной решетки и на ионах примеси.

Подвижность, определенная с помощью формулы (9), является холловской подвижностью. Учет более точного выражения (10) для коэффициента Холла показывает ее отличие от дрейфовой подвижности:

$$\mu_H = \sigma R_H = r_H \mu. \quad (11)$$

Таким образом, измерив холловскую подвижность и зная механизм рассеяния, можно определить дрейфовую подвижность μ_d .

Если полупроводник имеет смешанную проводимость, то коэффициент Холла принимает следующий вид:

$$R_H = \frac{r_p p \mu_p^2 - r_n n \mu_n^2}{q(p \mu_p + n \mu_n)^2}, \quad (12)$$

или, полагая, что $r_n = r_p = r_H$, $n/p = a$ и $\mu_n/\mu_p = b$, можно записать

$$R_H = \frac{r_H (1 - ab^2)}{qp (1 + ab)^2}. \quad (13)$$

Нетрудно убедиться, что если $n \rightarrow 0$ или $p \rightarrow 0$, то выражение (13) переходит в (10), а если $ab^2 = 1$ (в частном случае, когда $n = p$ и $\mu_n = \mu_p$), то коэффициент Холла, а следовательно и ЭДС Холла будут равны нулю. В случае собственного полупроводника, когда $n = p$ и $a = 1$, выражение (13) упрощается и принимает вид

$$R_H = \frac{r_H (1 - b)}{qp (1 + b)}. \quad (14)$$

Отсюда видно, что в области собственной проводимости знак ЭДС Холла соответствует знаку того типа носителей, подвижность которых больше.

В случае смешанной проводимости выражение для электропроводности имеет вид

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) = qp\mu_p(1 + ab), \quad (15)$$

а для собственной проводимости –

$$\sigma = qp\mu_p(1 + b). \quad (16)$$

Выражение (13), как и (15), показывает, что относительный вклад более подвижных носителей заряда в образование холловского поля определяется величиной ab^2 , в то время когда их вклад в проводимость определяется величиной ab , т.е. носители заряда с большей подвижностью играют более значительную роль в эффекте Холла, чем в проводимости.

Если в проводимости участвуют два типа носителей с разными эффек-

тивными массами, как это имеет место в р-германии, то выражения для электропроводности и коэффициента Холла принимают вид [8]

$$\sigma = q p_1 \mu_1 \left(1 + \frac{n_2 \mu_2}{n_1 \mu_1} \right), \quad (17)$$

$$R_H = \frac{3\pi}{8qp} \frac{1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^2}{\left[1 + \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right) \right]^2}, \quad (18)$$

где индексы 1 и 2 относятся к тяжелым и легким дыркам. Соответственно выражение для холловской подвижности имеет вид

$$\mu_H = \sigma R_H = \frac{3\pi}{8} \mu_1 \frac{1 + \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^2}{1 + \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)}. \quad (19)$$

Более подробные сведения об эффекте Холла в монокристаллах и тонких пленках можно получить из монографий [9,10].

2.1.2. Пленочные датчики Холла

Подставляя в (5) вместо плотности тока j_x его значение I получаем выражение напряжения Холла через практически измеряемые параметры:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d}, \quad (20)$$

где d – толщина образца.

Из этого уравнения видно, что для получения высокой чувствительности к изменениям магнитной индукции ($\gamma = \Delta U_H / \Delta B$) необходимо применять как можно более тонкие образцы полупроводников с высокими значениями коэффициента Холла и подвижности носителей заряда.

Первоначально применение тонких пленок для изготовления ДХ не давало ожидаемого улучшения параметров ввиду того, что при этом вследствие вклада поверхностных эффектов в механизм рассеяния носителей заряда происходило резкое уменьшение значений подвижности по сравнению с теми же значениями для объемных образцов.

С развитием технологии эпитаксиального выращивания тонких совершенных пленок полупроводников появились условия для изготовления высокочувствительных и стабильных ДХ [13]. Для получения тонких пленок применяют методы наращивания с помощью жидкофазной, газотранспортной, вакуумной и молекулярной эпитаксий [14].

В настоящее время наиболее широко используемыми пленочными полупроводниками для создания ДХ являются эпитаксиальные пленки арсенида галлия. Сочетание таких факторов, как большая ширина запрещенной

зоны ($E_g = 1.7$ эВ), высокие значения коэффициента Холла и подвижности носителей ($\mu_n = 0.85$ м²/В·с), возможность автоэпитаксиального выращивания тонких слоев на полужолирующих подложках обусловили применение этого материала для разработки ДХ.

Освоенные в промышленности арсенид галлиевые ДХ (ХАГ-П) обладают широким рабочим диапазоном температур (от -60°C до $+300^\circ\text{C}$) и высокой чувствительностью к магнитному полю (выходной сигнал при магнитной индукции 0.5 Тл не менее 1 В).

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к подложкам ДХ, являются монокристалличность, хорошие изолирующие свойства, минимальные микро- и макронеоднородности по площади подложки, близость коэффициентов термического расширения подложки и пленки.

Датчики ХАГ-П изготавливаются выращиванием эпитаксиальной пленки толщиной 5-10 мкм на полужолирующих подложках GaAs, GaP или InP, причем последний обеспечивает минимальное рассогласование параметров решетки при эпитаксии. Однако он характеризуется большими микро- и макронеоднородностями распределения электрофизических параметров, поэтому наиболее предпочтительным материалом для подложек является все же GaAs [4]. В качестве легирующих донорных примесей обычно используют олово, теллур, селен или серу.

Конструкция ДХ представляет собой прямоугольную пластину с размерами 4×2 мм, расположенную на гибкой печатной плате и помещенную в металлический корпус из нержавеющей стали (рис.2).

Для получения надежных омических контактов используются олово, серебро, золото, германий или никель, а также их сплавы.

Серебро образует легкоплавкую эвтектику с n-GaAs, имеет высокую тепло- и электропроводность и сравнительно медленно диффундирует в GaAs, но применение одного серебра не дает омических контактов, поэтому его используют с добавками металлов, дающих n^+ -проводимость, например 93%Ag + 7%Sn.

Напыление сплава Ag-Sn проводится через металлическую маску при вакууме 10^{-3} Па с последующим вжиганием при температуре 550-600°C в течение 5-10 минут.

Применение выводов в виде проводников гибкой печатной платы на основе полиимидно-фторопластовой композиции (индекс 3 на рис.2) позволяет повысить прочность и надежность конструкции и уменьшить механические напряжения, приводящие к временным дрейфам параметров ДХ.

Важной операцией при изготовлении ДХ является снижение (доводка) остаточного напряжения U_o , т.е. напряжения на холловских выводах в отсутствие магнитного поля. Причиной возникновения этого эффекта может служить как несимметричность расположения холловских контактов, так и искажение эквипотенциальных поверхностей из-за локальных неоднородностей полупроводниковой пленки. Первоначально операция снижения U_o у кристаллических ДХ проводилась вручную, путем изменения геометрии пласти-

ны с помощью абразивных материалов. В настоящее время операция снижения U_0 механизирована и производится локальным выжиганием полупроводниковой пленки в области холловских контактов сфокусированным лазерным лучом [4].

Герметизация производится полимеризацией компаунда ЭП-514 на основе эпоксидной смолы Д-20 в камере тепла при $T=140^\circ\text{C}$ в течение 4 часов.

На рис. 3 приведены зависимости холловского напряжения от величины управляющего тока для различных типов арсенид-галлиевых ДХ.

Наряду с GaAs арсенид индия также является традиционным материалом для изготовления пленочных ДХ. Гетероэпитаксиальные пленки InAs получают в основном методами жидкофазной и газофазной эпитаксий в хлоридно-гидридной системе. В качестве подложек используют полуизолирующий GaAs с удельным сопротивлением $\rho=10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $T=300\text{K}$.

Подвижность носителей заряда в пленке InAs, выращенной газофазной эпитаксией, имеет значения в диапазоне $13200\div17600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ для толщин пленок $7\div18 \text{ мкм}$, что обеспечивает высокую магнитную чувствительность ДХ. Как видно из рис. 4, выходной сигнал арсенид индиевых ДХ имеет значения порядка 0.5 В при индукции 0.6 Тл, причем чувствительность датчиков монотонно повышается с уменьшением толщины пленки согласно формуле (20).

Однако вблизи подложки ход зависимости меняется и U_H датчиков резко уменьшается при дальнейшем утончении пленки. На рис. 5 показано влияние толщины пленки арсенида индия на полуизолирующем GaAs на холловскую подвижность электронов [15]. Значение μ не изменяется в интервале толщин $6\div10 \text{ мкм}$, но быстро падает с уменьшением толщины пленки до $1\div2 \text{ мкм}$, что свидетельствует о роли переходного слоя, возникающего вблизи границы эпитаксиальная пленка-подложка, ввиду несоответствия параметров решеток.

Поэтому для правильного конструирования датчиков необходимо знать не только электрофизические параметры пленки, но и оптимальное значение ее толщины.

По магнитной чувствительности арсенид индиевые ДХ превосходят германиевые, но уступают арсенид галлиевым. Однако, несмотря на довольно высокую чувствительность и низкие значения остаточного напряжения U_0 ($\approx\pm0.1 \text{ мВ}$), арсенид индиевые ДХ не нашли широкого применения ввиду трудности получения высокой однородности выращиваемых пленок, что приводит к нестабильности параметров.

Широкое техническое использование явления сверхпроводимости выдвинуло проблему измерения сильных магнитных полей (до 10 Тл) при сверхнизких температурах. Для создания ДХ, работоспособных при таких температурах, необходимо использовать полупроводники с узкой запрещенной зоной. Использование эпитаксиальной технологии получения тонких слоев позволило получать пленки антимонида индия ($E_g=0.13\text{В}$) с высокой однородностью на полуизолирующих подложках из GaAs.

Одним из распространенных методов получения пленок антимионда индия является жидкофазная эпитаксия, которая позволяет получать наиболее совершенные пленки, причем процесс выращивания проводится всего при 300 °С. Этим способом формируются пленки InSb толщиной $1.8 \div 9$ мкм с концентрацией электронов $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $55000\text{--}58000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Другим известным способом является термическое напыление с последующим отжигом при 500-600 °С, позволяющее получать практически монокристаллические плёнки InSb на i-GaAs с концентрацией электронов $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. ДХ на таких пленках нашли применение для измерения сильных магнитных полей (до 14 Тл) в широком температурном диапазоне (4,2-350 К).

Для получения достаточно высокой чувствительности следует использовать возможно меньшие толщины пленок, но в то же время они должны быть способны пропускать большой управляющий ток (100-200 мА). Это обстоятельство предъявляет особые требования к омическим контактам ДХ. Обычно в качестве материала для контактов к InSb используется In. Однако при подпайке выводов к индиевым контактам часто происходит растекание припоя, ухудшающее электрические характеристики приборов.

Поэтому в качестве контактов для ДХ на основе InSb используется трехслойная металлизация: подслой ванадия (для улучшения адгезии), проводящий слой меди и защитное покрытие из никеля.

Для обеспечения линейной зависимости $U_H = f(B)$ датчика ХИС (датчик Холла из InSb) отношение длины к ширине активной части датчика выбирается равным трем, а сама пленка формируется в виде крестообразной структуры, исключающей влияние токовых контактов на основные характеристики (рис.6), так как они вынесены за пределы активной области элемента Холла.

2.1.3. Кремниевые интегральные ДХ

Широкое применение дискретных ДХ все-таки ограничивается высокой стоимостью полупроводниковых материалов класса $A^{III}B^V$. Использование микроэлектронной технологии кремниевых ИС позволяет располагать на едином кристалле как ДХ, так и схемы усиления и обработки сигналов, что компенсирует низкую чувствительность кремния и удешевляет стоимость приборов, вследствие применения групповых методов обработки. Параметры ДХ при этом определяются конструктивно-технологическими особенностями изготовления ИС обработки сигналов.

Как известно, в биполярной технологии изготовления кремниевых ИС существуют два основных типа изоляции элементов: обратнo смещенным р-п-переходом и различные виды диэлектрических изоляций, самым

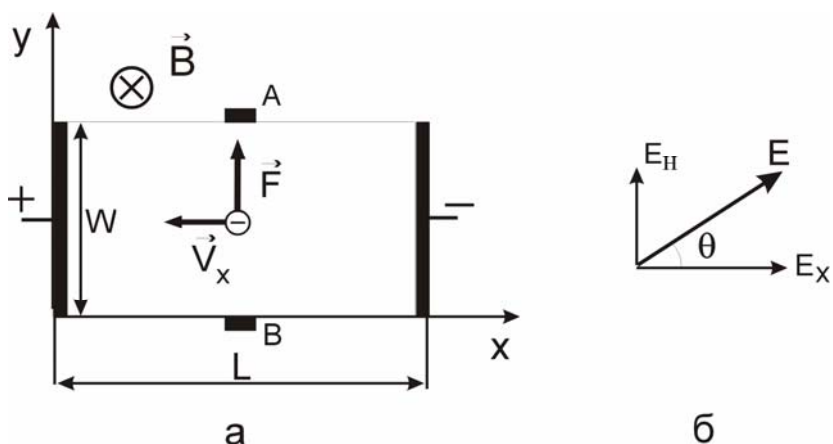


Рис.1. Возникновение поля Холла (а) и результирующее электрическое поле в образце (б)

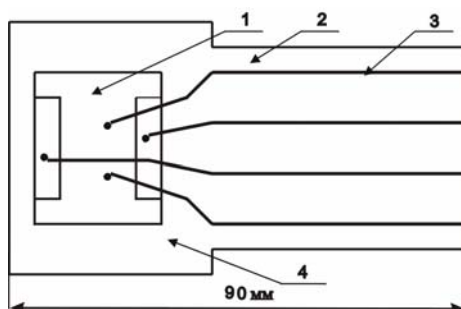


Рис.2. Конструкция пленочного арсенид галлиевого датчика Холла ХА1-П: 1 - эпитаксиальная структура; 2 - гибкая печатная плата на основе полиимидно-фторопластовой композиции; 3-проводники; 4 - металлический немагнитный корпус

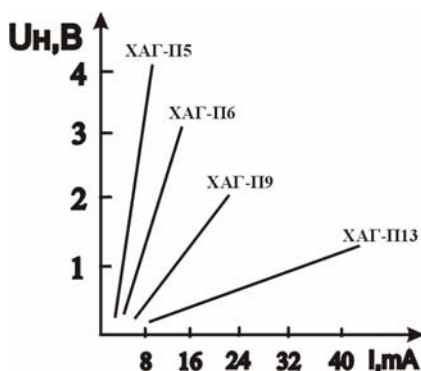


Рис.3. Зависимость напряжения Холла от управляющего тока при $B=0,5$ Тл и $T=20^\circ\text{C}$

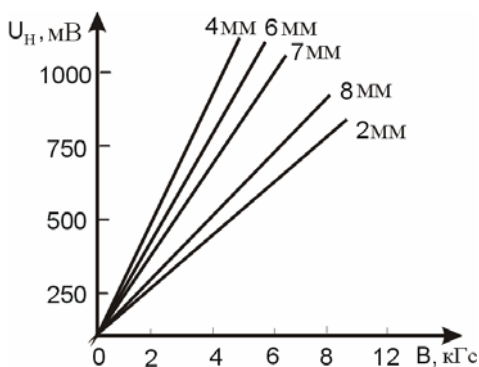


Рис.4. Зависимость напряжения Холла U_H от магнитной индукции B при различных толщинах пленки

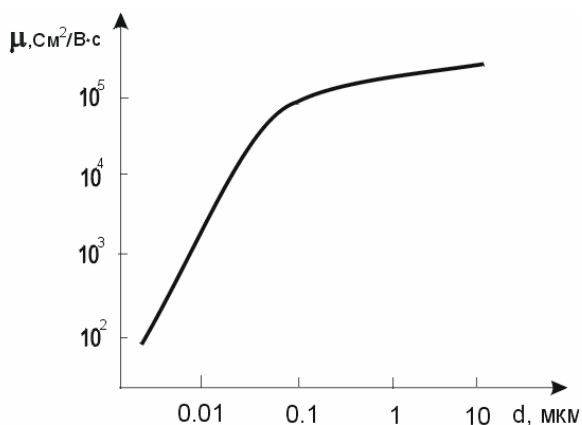


Рис.5. Влияние толщины пленок арсенида индия на полуизолирующем арсениде галлия на холловскую подвижность электронов

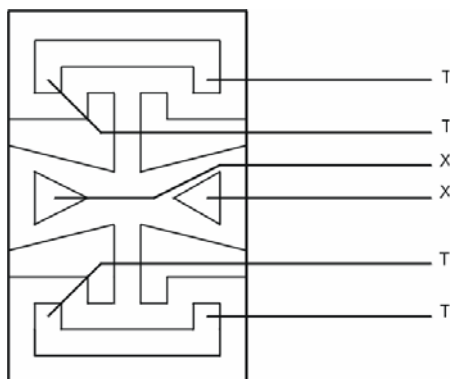


Рис.6. Датчик Холла ХИС, вид со стороны эпитаксиального слоя (Т, Х - токовые и холловские выводы соответственно)

распространенным из которых является технология кремниевых структур с диэлектрической изоляцией (КСДИ).

Попытки создать кремниевые ДХ по технологии КСДИ ни к чему не привели, так как приборы обладали большими временными и температурными дрейфами остаточного напряжения, связанными с упругими механическими напряжениями, возникающими в КСДИ в процессе их формирования вследствие различия термических коэффициентов расширения окисла, моно- и поликристаллических пленок кремния. При протекании через ДХ даже сравнительно небольших токов происходит его саморазогрев, приводящий к перераспределению упругих механических напряжений, что в свою очередь влечет за собой непредсказуемый дрейф U_0 [16].

Влияние упругих механических напряжений на остаточное напряжение ДХ объясняется тем, что кремний является тензочувствительным материалом, а ДХ представляет собой резистивный мост, состоящий из двух пар одинаковых резисторов: между положительным и отрицательным токовыми контактами и холловскими контактами. Изменение сопротивления какого-либо из этих резисторов приводит к разбалансу моста и к дрейфу U_0 .

В ДХ с изоляцией обратно смещенным р-п-переходом также наблюдается незначительный начальный дрейф U_0 , обусловленный механическими напряжениями, возникающими в процессе технологических операций скрайбирования, посадки кристаллов в корпус и термокомпрессии. Однако, электротермотренировка при 120°C в течение 48 часов полностью устраняет временной дрейф, сохраняя лишь естественный температурный дрейф не более $10\text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ при питании ДХ постоянным напряжением. Магнитная чувствительность кремниевых датчиков с изоляцией обратносмещенным р-п - переходом лежит в пределах $50\text{ мкВ}/\text{Гс}$.

Конструктивно-технологические параметры используемых структур соответствуют требованиям тех ИС, которые изготавливаются совместно с ДХ на едином кристалле: удельное сопротивление до 1 Ом см и толщина эпитаксиальной пленки 5 мкм для цифровых схем и $\rho=5\text{ Ом см}$, $h_{\text{эп}}=12\text{ мкм}$ для линейных ИС. Рассчитаем параметры датчика Холла, изготавливаемого совместно с линейной схемой операционного усилителя. Для этого зададимся следующими параметрами эпитаксиальной пленки: удельное сопротивление 2 Ом см , толщина эпитаксиальной пленки 12 мкм . Отношение L/W выберем равным 2, напряжение питания $U_{\text{пит}}=5\text{ В}$, а входной ток датчика $I_{\text{пит}}=1,5\text{ мА}$, следовательно, сопротивление токового плеча датчика должно составлять $3,3\text{ кОм}$. Из формулы (20) чувствительность датчика к магнитному полю можно записать в виде $U_{\text{н}}/B=R_{\text{н}}I/d_{\text{эп}}=I/qn d_{\text{эп}}$. Вычисления по этой формуле при подстановке заданных выше параметров дают величину чувствительности порядка $50\text{ мкВ}/\text{Гс}$.

Выберем реальные размеры датчика. Ширина датчика определяется допустимой плотностью тока в ИС (порядка $75\text{ А}/\text{см}^2$), тогда, исходя из заданной величины тока питания, W датчика определится по формуле $j_{\text{доп}}=I/s=I/Wd_{\text{эп}}$; $W=I/d_{\text{эп}} j_{\text{доп}}$. Вычисления показывают, что ширина датчика

должна быть не меньше 170 мкм. Тогда, исходя из выбранного соотношения $L/W=2$, длина датчика должна составлять 340 мкм. Причем полученные значения L и W - это расстояния между токовыми и холловскими контактами соответственно.

Рассмотрим топологические особенности интегрального датчика Холла с изоляцией обратносмещенным р-п - переходом. Известно, что при изготовлении ИС на эпитаксиальных структурах, ориентированных в плоскости (111), боковой уход всех диффузионных процессов составляет 0.8 от глубины процесса, т.е. боковой уход разделительной диффузии составит $0.8d_{np}=9\text{мкм}$. Учитывая этот уход и все фотолитографические и технологические допуски, расстояние от фотолитографического края контактных окон до фотолитографического края изолирующего р-п - перехода должно быть выбрано не меньше 20 мкм. Исходя из этого и учитывая размеры самих контактных окон, фотолитографические размеры датчика должны составлять 400×220 мкм. Таким образом, мы рассматриваем прямоугольный карман n-типа проводимости, окруженный со всех сторон областями р-типа проводимости, причем токовые и холловские контакты расположены на определенных расстояниях от края областей р-типа проводимости. При такой конструкции силовые линии тока, исходящие из токовых контактов будут изгибаться по ширине элемента и тем самым приводить к искажению эквипотенциальных поверхностей, что, в свою очередь, приведет к появлению напряжения на холловских контактах при отсутствии магнитного поля. Чтобы избежать этого, карман для рабочей области датчика изготавливается сложной конфигурации (рис. 7). Такая конструкция позволяет исключить краевые эффекты, связанные с искажением линий тока и защитить от них холловские контакты за счет обрыва линий тока на выступах изолирующего р-п - перехода.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики некоторых типов дискретных ДХ, освоенных в промышленности в настоящее время.

Параметры промышленных датчиков Холла

Таблица 1

Тип	Материал	$n, \text{см}^{-3}$	Размеры, мм	Толщина d , мкм	γ , мВ/к	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
ДХК	Si	$2 \cdot 10^{15}$	6x3	100	50	-60...+130
ХАГ-ПЗ	GaAs	$4 \cdot 10^{16}$	4x2	20	500	-60...+130
ХАГЭ-1	GaAs	$2 \cdot 10^{15}$	3x10	10	1000	-60...+150
ХИМ	InAs	$5 \cdot 10^{16}$	4x2	350	4000	-60...+100
ХИС	InSb	$3 \cdot 10^{17}$	4x3	370	4500	-270...+70
ПХИЗ12	InSb	$6 \cdot 10^{17}$	3x3	1000	200	-50...+150

Более подробные сведения о технологии изготовления и параметрах ДХ можно получить из [3] и [4].

2.2. Магниторезистивные преобразователи

2.2.1. Магниторезистивный эффект

Изменение под действием магнитного поля сопротивления полупроводника, по которому протекает электрический ток, называется магниторезистивным эффектом [2]. Увеличение электрического сопротивления под действием магнитного поля происходит как в случае перпендикулярности вектора магнитной индукции поверхности полупроводниковой пластины (поперечный эффект магнитосопротивления), так и в случае их параллельности (продольный эффект магнитосопротивления). Однако изменение сопротивления во втором случае незначительно.

Изменение сопротивления полупроводника в магнитном поле пропорционально квадрату подвижности носителей тока

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \cdot \mu^2 \cdot B^2, \quad (21)$$

где c – коэффициент пропорциональности, связанный с рассеянием носителей заряда.

Как отмечалось в предыдущем параграфе, в полупроводниковой пластине, помещенной в магнитное поле, на движущиеся носители зарядов действует сила Лоренца, уравнивающаяся холловским электрическим полем. Однако холловское поле уравнивает только те носители, которые движутся со средними скоростями. На более медленные носители сильнее действует поле Холла, на более быстрые – сила Лоренца, траектории тех и других искривляются и эффективная длина свободного пробега уменьшается, что приводит к увеличению сопротивления. Очевидно, что чем меньше эффект Холла в полупроводнике, тем больше его магнитосопротивление. В полупроводнике с двумя типами носителей поле Холла меньше, поэтому линии тока в нем не параллельны граням, и эффект магнитосопротивления соответственно больше.

Исключить влияние эффекта Холла можно и в полупроводнике с преобладанием одного типа носителей, используя специальную геометрию образца. Наиболее наглядным примером влияния конструкции на эффект магнитосопротивления является диск Корбино, представляющий собой полупроводниковую пластину с концентрическим расположением контактов: один в центре, а второй по окружности на равных расстояниях от первого. Если к электродам такого диска приложить напряжение, то траектории электронов будут иметь вид радиальных лучей, расходящихся от центра. При помещении в магнитное поле, перпендикулярное плоскости пластины, носители отклоняются вдоль поверхности, линии тока удлиняются, но накопления зарядов не происходит, и поле Холла не возникает. В такой структуре наблюдается максимальный эффект магнитосопротивления, однако ввиду технических трудностей практическое применение диска Корбино сильно затруднено.

2.2.2. Конструкции магниторезисторов

Увеличение эффекта магнитосопротивления за счет геометрии резистора может быть достигнуто также и в полупроводниковой пластине, длина которой L значительно меньше ее ширины W . При воздействии на такую пластину магнитного поля, направление которого перпендикулярно плоскости пластины, поле Холла оказывается ослабленным за счет шунтирующего действия токовых электродов. Геометрически эффект магнитосопротивления в этом случае проявляется тем сильнее, чем меньше отношение L/W . Еще более увеличить эффект можно путем последовательного соединения резисторов с малым отношением L/W . Один из возможных способов реализации указанного принципа описан в [11].

Основой материала магниторезистора служит антимонид индия, обладающий высокой подвижностью носителей, к которому добавляется 1.8% NiSb. После сплавления и последующего остывания антимонид никеля кристаллизуется в антимониде индия в виде игл толщиной в 1 мкм и длиной примерно 50 мкм, расположенных параллельно друг другу и перпендикулярно направлению тока. Удельная проводимость игл из NiSb около $10^{40} \text{ м}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, а InSb на два порядка меньше.

Таким образом, иглы играют роль хорошо проводящих электродов, разделяющих основную массу полупроводника на отдельные зоны с малым отношением L/W . Это приводит к резкому подавлению поля Холла, а, следовательно, к искривлению траектории электронов под действием магнитного поля, т.е. к возрастанию эффекта магнитосопротивления.

Другой способ реализации указанного принципа на основе микроэлектронной технологии описан в [17]. Его суть заключается в формировании магниторезисторов на основе кремниевых эпитаксиальных пленок, содержащих низкоомные шунтирующие участки поликристаллического кремния (ПК), расположенные перпендикулярно направлению тока.

Технология изготовления таких магниторезисторов основана на одновременном выращивании моно- и поликристаллических пленок кремния [18]. С помощью процессов окисления и фотолитографии формируются локальные области SiO_2 , на которых в процессе выращивания эпитаксиальной пленки растут пленки ПК.

Для закорачивания ЭДС Холла проводится легирование полученных областей ПК атомами фосфора до концентрации 10^{21} см^{-3} , причем, учитывая более высокую скорость диффузии атомов легирующей примеси в ПК по сравнению с монокристаллическим кремнием, легирование проводится одновременно с процессом создания в монокристаллической пленке p^+ -областей под омические контакты [19].

2.2.3. Параметры магниторезисторов

Основными параметрами магниторезисторов являются: начальное сопротивление R_0 при $B=0$, магниторезистивное отношение R_B/R_0 , представляющее собой отношение сопротивления магниторезистора при определен-

ном значении магнитной индукции (обычно 0,3 и 1,0 Тл) к начальному сопротивлению, магнитная чувствительность γ_{mp} , определяемая как относительное приращение сопротивления, деленное на соответствующее приращение магнитной индукции $\Delta R/R\Delta B$, и нагрузочная способность, определяемая предельным значением температуры перегрева, который допускается для магниторезистора. Нагрузочная способность указывается в паспорте либо в виде значений рассеиваемой мощности P , либо в виде предельно допустимого тока I_{max} , либо как тепловое сопротивление

$$G_{th} = \frac{P}{t_{max} - t_{окр}}, \quad (22)$$

где P - мощность, выделяемая в магниторезисторе; t_{max} - максимально допустимая температура резистора; $t_{окр}$ - температура окружающей среды.

При определении нагрузочной способности магниторезистора при постоянном токе исходят из максимального значения сопротивления R_b (т.е. при B_{max}), а при постоянном питающем напряжении - из минимального значения сопротивления R_0 при $B=0$. При работе на переменном токе магниторезистивный эффект не зависит от частоты вплоть до значений 10 ГГц.

В случае наклейки магниторезисторов на металлическую подложку возможны возникновения токов Фуко, поэтому при высоких частотах применяется подложка из феррита. В табл.2 приведены параметры магниторезисторов из эвтектического сплава InSb-NiSb при $T=25^\circ\text{C}$, причем все подложки выполнены из ферритов.

Последние два типа указанных в табл.2 магниторезисторов являются дифференциальными.

Параметры магниторезисторов из сплава InSb-NiSb.

Таблица 2

Тип	Начальное сопротивление R_0 , Ом, при $B=0$, $T=25^\circ\text{C}$	Относительное изменение R_b/R_0 , $T=25^\circ\text{C}$, $B=1$ Тл	Размеры магниторезистора, мм	Максимальная рассеиваемая мощность, Вт
FP3050E	50	15	3.2x1.2x0.4	0.25
FP17200E	200	8.5	3.2x2.7x0.4	0.7
FP3060E	60	6	3.2x1.2x0.4	0.5
FP110155	2x155	15	3.2x2.0x0.4	0.7
FP111100	2x100	8.5	3.2x2.7x0.4	0.7

2.3. Гальваномагнитные преобразователи на активных элементах

2.3.1. Магнитодиоды

Магнитодиодом называется полупроводниковый преобразователь магнитного поля, принцип действия которого основан на магнитодиодном эффекте.

Магнитодиодный эффект проявляется в диодах с длинной базой и за-

ключается в резком изменении электрического сопротивления диода, включенного в прямом направлении, при воздействии поперечного магнитного поля [3]. В длинных диодах прямой ток определяется неравновесной проводимостью базовой области. Распределение инжектированных носителей в базе диода определяется подвижностью и временем жизни. В магнитном поле вследствие магниторезистивного эффекта уменьшается подвижность носителей и, следовательно, проводимость базы, что приводит к перераспределению напряжений, падающих на р-п-переходе, и в толще базы: падение напряжения на базе растет, а на р-п-переходе уменьшается. Уменьшение напряжения на р-п-переходе приводит к уменьшению уровня инжекции и к дальнейшему увеличению сопротивления толщ базы. Последнее вызывает новое перераспределение напряжения и т.д.

Таким образом, эффект магнитосопротивления за счет изменения уровня инжекции усиливается в сотни раз. Магниточувствительность длинных диодов во много раз превышает чувствительность магниторезисторов.

Существенным недостатком магнитодиодов является сильная зависимость электрических параметров от температуры, которая определяется температурной зависимостью подвижности носителей и увеличением концентрации основных носителей за счёт их генерации с ростом температуры. В табл.3 приведены параметры выпускаемых промышленностью магнитодиодов типа КД301 и КД303.

Электрические параметры магнитодиодов

Таблица 3

Тип	Прямое напряжение при $I=3$ мА	Магнитная чувствительность В/Тл, при $T=25^0\text{C}$, $I=1$ мА	Магнитная чувствительность В/Тл, при $T=25^0\text{C}$, $I=3$ мА
КД301А	6.0-7.5	5	15
КД301В	9.2-10.5	10	30
КД301Д	12.2-13.5	15	45
КД301Ж	15.2-20.0	20	60
КД303А	4.0-5.0	-	10
КД303В	6.1-7.0	-	25
КД303Д	9.1-11.0	-	35
КД303	13.1-15.0	-	45

Магнитодиоды типа КД303 в отличие от КД301 имеют вольт-амперную характеристику, зависящую не только от значений прямого тока и магнитной индукции, но и от ее направления (рис.8).

2.3.2. Магнитотранзисторы

В наибольшей степени магнитодиодный и магниторезистивный эффекты проявляются в магнитотранзисторах [1]. Инжектированные из эмиттера носители преодолевают базу за счет процесса диффузии и попадают в кол-

латор. Магнитное поле, направленное перпендикулярно движению неосновных носителей заряда, отклоняет их от первоначального направления на угол θ . При этом средний путь, пройденный носителями в базе, возрастает, что приводит к усилению процесса их рекомбинации и к уменьшению коэффициента передачи тока.

Для оценки магниточувствительности можно считать, что возросла эффективная толщина базы. Из рис. 9 видно, что $W=W_0/\cos\theta$, где θ - угол Холла. Тогда

$$W = \frac{W_0}{1 - 0.5 \mu^2 B^2}, \quad (23)$$

где W_0 - толщина базы в отсутствие магнитного поля.

Как известно, коэффициент передачи по току α в схеме с общей базой равен

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_p} \right)^2, \quad (24)$$

где L_p - диффузионная длина неосновных носителей.

Подставляя в (24) выражение W из (23), получим

$$\alpha = 1 - \left(\frac{W_0}{L_p} \right)^2 \left(\frac{1}{2 - \mu_p^2 B^2} \right). \quad (25)$$

В схеме с общим эмиттером коэффициент усиления тока β связан с коэффициентом передачи α следующим образом:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (26)$$

Поскольку значение коэффициента передачи α близко к единице, то можно записать приближенно $1 - \alpha = 1/\beta$ и подставить сюда его выражение из (25). Тогда

$$\beta = 2 \left(\frac{L_p}{W_0} \right)^2 (1 - 0.5 \mu^2 B^2)^2. \quad (27)$$

Поскольку в транзисторах $W_0 \ll L$, то магниточувствительность в схеме с общим эмиттером больше, чем в схеме с общей базой.

Одновременно с уменьшением коэффициента передачи по току в поперечном магнитном поле происходит увеличение сопротивления базы транзистора, как и в магнитодиоде. В схеме с общим эмиттером оба эти эффекта изменяют коллекторный ток в одну сторону, поэтому магниточувствительность транзисторов выше, чем у магнитодиодов.

Для увеличения магниточувствительности транзисторов необходимо, чтобы искривление траектории движения носителей приводило не только к увеличению эффективной толщины базы, но и к отклонению части носителей от коллектора.

Для этого используют конструкцию транзистора с удлинённой базой. Магнитное поле искривляет траектории носителей, так что часть носителей, ранее попадавшая в коллектор, отклоняется от него (рис.9). Таким образом, в такой структуре магнитное поле приводит к дополнительному, по сравнению с обычным транзистором, уменьшению коэффициента передачи тока.

Чтобы отклоняемые носители не накапливались в базовой области, необходимо, чтобы вблизи коллектора была высокая скорость поверхностной рекомбинации. Для создания магнитотранзисторов используют обычно конструкцию биполярного транзистора, в котором увеличена ширина базы, а в область перехода база-коллектор введены центры рекомбинации, обеспечивающие увеличение её скорости.

2.4. Гальваномагниторекомбинационные преобразователи

2.4.1. Гальваномагниторекомбинационный (ГМР) эффект

ГМР-эффект относится к магниторекомбинационным явлениям и заключается в следующем. В полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, под действием силы Лоренца пары носителей отклоняются и скапливаются у одной из поверхностей, тогда как у противоположной поверхности концентрация электронно-дырочных пар уменьшается. Если скорость рекомбинации на одной грани больше, чем на другой, то при отклонении носителей к этой грани наблюдается резкое убывание тока с ростом магнитного поля [15]. Относительное изменение проводимости вдоль оси X (рис.10), обусловленное изменением средней по сечению образца концентрации носителей заряда, равно

$$\frac{\Delta \sigma_B}{\sigma_0} = \frac{a_m q \mu_n (1+b)^2 n_0 p_0 L_D^2 E_x B_z \theta}{(n_0 + p_0)(n_0 + b p_0) k T d}, \quad (28)$$

где

$$\theta = \frac{1 - L_{s0}/L_{sd}}{\left(\operatorname{cth} \frac{d}{2L_d} + \frac{L_D}{L_{sd}} \right) \left(\operatorname{cth} \frac{d}{2L_d} + \frac{L_{s0}}{L_{sd}} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{L_{s0}}{L_{sd}} \right) \operatorname{csch}^2 \frac{d}{2L_d}}, \quad (29)$$

q -заряд электрона; $b = \mu_p/\mu_n$; μ_p, μ_n – подвижности электронов и дырок; n_0, p_0 – концентрация электронов и дырок в образце при $B=0$; k – постоянная Больцмана; T – температура окружающей среды; d – ширина образца; B_z – магнитная индукция вдоль оси z ; E_x – напряженность электрического поля вдоль оси x ; $L_d = \sqrt{D\tau}$ – длина биполярной диффузии; τ – время жизни носителей, L_{s0} и L_{sd} – длины диффузионных пробега носителей в направлении соответствующих граней

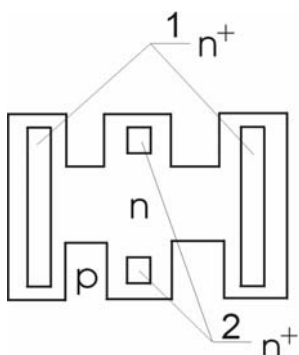


Рис.7. Конфигурация кармана для изготовления интегрального ДХ и его токовые (1) и холловские (2) контакты

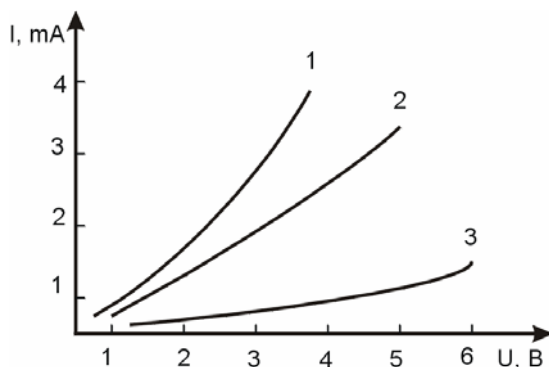


Рис.8. ВАХ магнитодиода КД 303 при разных значениях и направлениях магнитной индукции B : 1) $B=0$ Тл; 2) $B=-0.2$ Тл; 3) $B=0.2$ Тл

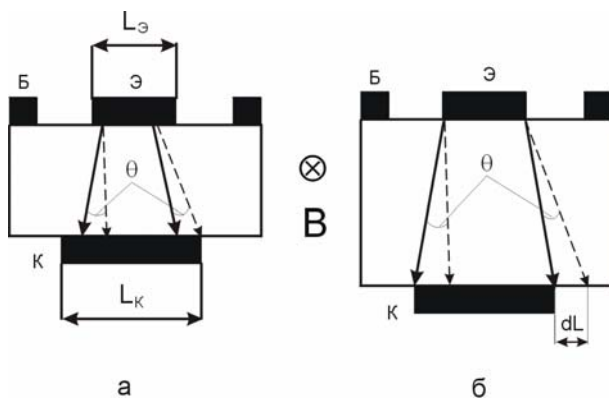


Рис.9. Изменение траектории движения инжектированных носителей в магнитном поле в p - n - p биполярном транзисторе с узкой (а) и широкой (б) базой

$$L_{s0} = \frac{D}{S_0}, \quad L_{sd} = \frac{D}{S_d}, \quad D = \frac{\mu_n \mu_p (n_0 + p_0)}{\mu_n n_0 + \mu_p p_0} \cdot \frac{kT}{q}; \quad (30)$$

$$a_m = \frac{3}{2} r \left(1 - \frac{\pi}{4} \right), \quad (31)$$

где γ - зависит от механизма рассеяния, например, при рассеянии на ионизированных примесях $\gamma = 3/2$; S_0 и S_d - скорость поверхностной рекомбинации на противоположных гранях образца.

Как видно из формул (28, 29), относительное изменение проводимости образца под действием магнитного поля обращается в нуль при равенстве скоростей поверхностной рекомбинации на обеих гранях и достигает максимума при $S_d/S_0 \rightarrow \infty$. Чтобы объяснить полученный результат, необходимо вспомнить о самом понятии скорости поверхностной рекомбинации.

Энергетическая структура поверхности любого полупроводника всегда отличается от объемной, что обусловлено наличием в запрещенной зоне определенных разрешенных уровней энергии, связанных с обрывом кристаллических связей на поверхности (уровни Тамма), наличием на ней дефектов и дислокаций, адсорбированных атомов и молекул. Вся совокупность этих энергетических уровней называется поверхностными состояниями. Концентрация поверхностных состояний, связанная с уровнями Тамма, обусловлена кристаллической структурой полупроводника и для данного материала является постоянной. Концентрация же остальных поверхностных состояний определяется качеством обработки поверхности, ее защитой и составом окружающей среды (величина переменная). В зависимости от своего расположения в запрещенной зоне полупроводника относительно уровня Ферми энергетические уровни поверхностных состояний могут служить ловушками захвата или центрами рекомбинации.

Центрами рекомбинации служат поверхностные состояния, энергетические уровни которых расположены вблизи середины запрещенной зоны под уровнем Ферми, а следовательно, заполнены электронами. Тогда при захвате на них дырки из валентной зоны происходит акт рекомбинации. Скорость поверхностной рекомбинации определяется как

$$S = \frac{c_s}{\Delta n_s},$$

где c_s - число электронно-дырочных пар, исчезающих каждую секунду на единице площади поверхности [$\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$], или величина, характеризующая поверхность (число поверхностных состояний); Δn_s - концентрация избыточных носителей вблизи поверхности [см^{-3}]. Таким образом, скорость поверхностной рекомбинации имеет размерность скорости [$\text{см}/\text{с}$] и определяется концентрациями центров рекомбинации на поверхности и носителей заряда, подходящих к ней.

Рассмотрим теперь плоский образец полупроводника, вдоль которого

протекает ток, причем образец однородный и, следовательно, линии тока параллельны его граням и концентрация носителей одинакова во всем объеме, если не учитывать влияние поверхностей. Однако на поверхности происходит рекомбинация электронно-дырочных пар, а, следовательно, вблизи нее этих пар будет не хватать, т.е. создается градиент концентрации от поверхности к центру образца. Если скорости поверхностной рекомбинации на обеих гранях образца одинаковые, то градиенты концентрации от одной и от другой грани образца будут одинаково искривлять траектории движения носителей. Если теперь приложить к образцу магнитное поле, то за счет силы Лоренца концентрация носителей у одной из граней увеличивается, а у другой уменьшается, за счет чего на первой скорость поверхностной рекомбинации возрастает, а на второй уменьшается. Однако общее число рекомбинирующих пар не изменится, и проводимость образца может измениться только за счет искривления траектории движения носителей, что является обычным магниторезистивным эффектом. Однако, если скорость поверхностной рекомбинации на одной грани образца существенно больше, чем на другой, то помещение образца в магнитное поле приведет к существенному росту на этой грани поверхностной рекомбинации, а это значит, что под действием магнитного поля концентрация носителей в образце будет уменьшаться, что приведет к уменьшению проводимости. Это явление и носит название гальваномагниторекомбинационного эффекта.

При выполнении условия $S_d \gg S_0$ в режиме постоянного тока и в слабых магнитных полях, исходя из уравнения (28), падение напряжения на гальваномагниторекомбинационном элементе (ГМРЭ) можно представить в виде

$$\Delta U = J_0 R_0 \frac{\Delta \sigma_B}{\sigma_0} = \alpha_B E^2 B \ell, \quad (32)$$

где E - напряженность электрического поля, B - магнитная индукция, ℓ - длина ГМРЭ, α_B - константа, определяемая физическими параметрами полупроводника; J_0 , R_0 - ток через образец и его сопротивление при $B=0$;

$$\alpha_B = \frac{a_m q \mu_n (1+b)^2 n_0 p_0 L_D^2 \left(ch \frac{d}{L_D} - 1 \right)}{k T d (n_0 + p_0) (n_0 + b p_0) ch \frac{d}{L_D}}. \quad (33)$$

Величина α_B при заданных L_D , μ , b и T достигает максимума при $d = 1.4 L_D$ и $n_0 = p_0$ и принимает вид

$$\alpha_{B \max} = 0.2 \frac{q \mu_n (1+b) L_D}{k T}. \quad (34)$$

Следует отметить, что введение понятия скорости поверхностной рекомбинации возможно при условии отсутствия слоя объемного заряда у боковой поверхности полупроводника, т.е. только в том случае, когда основным препятствием для рекомбинации являются переходы электронов и дырок на рекомбинационные уровни поверхностных состояний. Но при боль-

шой ширине приповерхностного объемного слоя и особенно большой высоте барьеров основным препятствием для рекомбинации может стать именно слой поверхностного заряда, который не позволяет носителям достичь центров рекомбинации. Наличие обедненного слоя у поверхности зависит от параметров полупроводника (ширина запрещенной зоны) и состояния поверхности. Известно, что поверхность кремния окисляется на воздухе при комнатной температуре, а наличие слоя окисла у поверхности приводит к изгибу энергетических зон и появлению слоя объемного заряда. Германий же не окисляется на воздухе, обладает меньшей шириной запрещенной зоны, и следовательно, слой объемного заряда у поверхности германия оказывается меньшей ширины и обладает меньшей высотой барьера, чем у поверхности кремния.

Максимальное значение отношения $\Delta\sigma_B/\sigma_0$ в настоящее время достигнуто на германиевых ГМР-элементах (0.1 при $B \approx 0.25$ Тл). Достичь такой высокой чувствительности на кремниевых образцах можно только в области высоких температур ($T > 450$ К), при которых наступает собственная проводимость, т.е. выполняется условие $n_0 = p_0$.

2.4.2. Гальваномагниторекомбинационный преобразователь (ГМРП)

ГМРП представляет собой резистор, управляемый магнитным полем, принцип действия которого основан на магниторекомбинационном эффекте. Схема включения ГМРП приведена на рис. 11.

Номинал нагрузочного резистора R_n определяет режим работы преобразователя. Если сопротивление R_n на порядок превышает сопротивление R_r , то последний работает в режиме питания от источника тока ($I = \text{const}$).

При этом схема обеспечивает режим максимальной магнитной чувствительности ГМРП. Можно так подобрать значение сопротивления R_n , что будет обеспечиваться режим работы с минимальным значением температурного коэффициента магнитной чувствительности ($R_r/R_n = 2.5$).

Основными параметрами ГМРП являются:

- приращение выходного сигнала, представляющее собой разность выходных напряжений при номинальном значении индукции магнитного поля U_B и её отсутствии U_0

$$\Delta U = U_B - U_0 ; \quad (35)$$

- рабочий ток, определяемый из выражения

$$I = \frac{U_n}{R_H + R_z} ; \quad (36)$$

- магнитная чувствительность γ , представляющая собой отношение приращения выходного сигнала ΔU_B к вызвавшей его изменение магнитной индукции, при протекании рабочего тока

$$\gamma = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta B} \right|_{I = \text{const}} ; \quad (37)$$

- температурный коэффициент чувствительности

(38)

$$K_{\gamma} = \frac{100\Delta\gamma}{\gamma\Delta t}.$$

В табл.4, 5 приведены характеристики германиевых ГМРП с рабочим диапазоном температур от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$ в различных режимах работы ($t=20^{\circ}\text{C}$).

Электрические параметры ГМРП в режиме максимальной магнитной чувствительности

Таблица 4

Тип	$R_{г}$, кОм	$R_{н}$, кОм	I , мА	γ , В/Тл	K_{γ} , %/град	размеры, мм
ГМР-1	20	200	1.0	80	2	10x0.5x0.2
ГМР-2	15	150	0.8	50	2	5.0x0.5x0.15
ГМР-3	5	100	0.8	20	2	2.0x0.5x0.15
ГМР-4	50	200	1.0	10	2	10.0x1.5x0.15
ГМР-5	25	200	1.0	6	2	6.0x1.5x0.15

Электрические параметры ГМРП в режиме минимального температурного коэффициента магнитной чувствительности

Таблица 5

тип	$R_{г}$, кОм	$R_{н}$, кОм	I , мА	γ , В/Тл	K_{γ} , %/град	размеры, мм
ГМР-1	20	8	1.0	60	0.2	10x0.5x0.2
ГМР-2	15	6	0.8	38	0.2	5.0x0.5x0.15
ГМР-3	5	2	0.8	16	0.2	2.0x0.5x0.15
ГМР-4	50	20	1.0	75	0.2	10.0x1.5x0.15
ГМР-5	25	10	1.0	45	0.2	6.0x1.5x0.15

2.4.3. Кремниевые интегральные ГМРП

Технология одновременного выращивания моно- и поликристаллических пленок кремния позволяет создать кремниевые ГМРП в интегральном исполнении [18].

Наличие в монокристаллическом кремнии на границе с пленкой поликремния (ПК) дефектов упаковки на расстоянии, равном примерно толщине пленки, создает условие, при котором величина ГМР-эффекта может оказаться достаточной для его наблюдения в области рабочих температур ИС. Так, при толщине пленки 6 мкм ширина объемного приповерхностного слоя, при удельном сопротивлении пленки 0,5 Ом·см, меньше 1 мкм, и в слое монокремния на границе с пленкой ПК создается боковая поверхность с повышенной скоростью рекомбинации вне слоя объемного заряда. При этом более низкое значение чувствительности для кремниевых образцов, по сравнению с германиевыми, может быть скомпенсировано с помощью схемы усиления сигнала, которую, благодаря эпитаксиально-планарной технологии изготовления, можно расположить на едином кристалле с ГМРП.

В [20] описан ГМР-элемент на основе кремниевой эпитаксиальной пленки n-типа проводимости с удельным сопротивлением 5 Ом·см и толщи-

ной 5 мкм, выращенной на подложке КДБ-10. Роль боковой поверхности с повышенной скоростью рекомбинации играет пленка ПК, выращенная в едином технологическом процессе с монокристаллической, а противоположная боковая поверхность элемента формируется с помощью диффузии атомов бора на всю толщину эпитаксиальной пленки (рис.12).

Для пленки с концентрацией электронов 10^{15} см^{-3} , подвижностью носителей $10^3 \text{ см}^2/\text{с}$ и временем жизни носителей, равным 0.1 мкс, длина диффузионного пробега, вычисленная из соотношений

$$L_D = \sqrt{D\tau}, \quad D = \frac{kT}{q} \mu,$$

оказывается равной 15 мкм.

Для получения максимальной чувствительности ширина образцов, согласно (28), выбиралась равной $1.4L_D$, т.е. 22 мкм.

Значение $\alpha_{\text{Вmax}}$ для германия при $L_D = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, рассчитанное по формуле (34), оказывается равным $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ В}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а максимальная магнитная чувствительность при $E = 10 \text{ В/см}$ и $\ell = 1 \text{ см}$ составляет 50 мВ/мТ.

Чувствительность ГМР-элемента для Si собственной проводимости, из-за более низкой подвижности носителей, на порядок меньше, чем в германии. Для легированных кремниевых пленок n-типа проводимости чувствительность ниже на много порядков, в частности, для пленок с концентрацией 10^{15} см^{-3} , применяемых для изготовления линейных ИС, чувствительность составляет 45 нВ/Т. Применение же описанной конструкции интегрального ГМР-элемента, изготовленного на одновременно выращенных пленках моно- и поликристаллического кремния, позволяет получить чувствительность в пределах 0,15-0,3 мВ/мТ, что почти на 7 порядков выше расчетных значений для данной концентрации и соответствует значению, получаемому из формулы (34) для концентрации носителей $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, т.е. почти для собственной концентрации.

Истошение рабочей области ГМРП свободными носителями заряда происходит вследствие расширения ОПЗ обратносмещенного p-n-перехода, созданного с помощью разделительной диффузии атомов бора. Действительно, при напряжении 30 В в пленке с концентрацией легирующей примеси 10^{15} см^{-3} обедненный слой p-n-перехода расширяется в область монокремния примерно на 14 мкм.

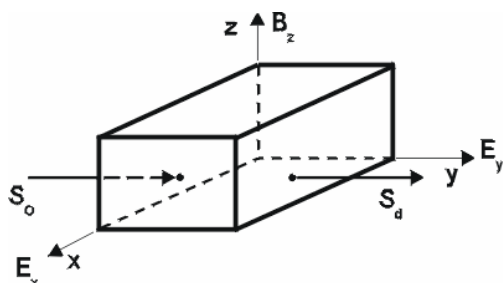


Рис.10. Полупроводниковая пластина с разными скоростями поверхностной рекомбинации на боковых гранях в скрещенных электрическом и магнитном полях

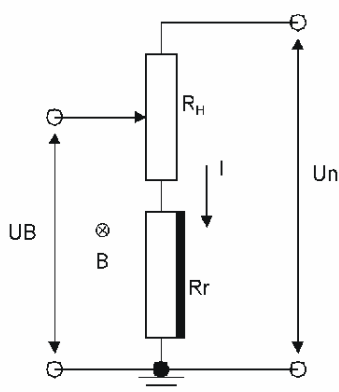


Рис. 11. Схема включения ГМРП

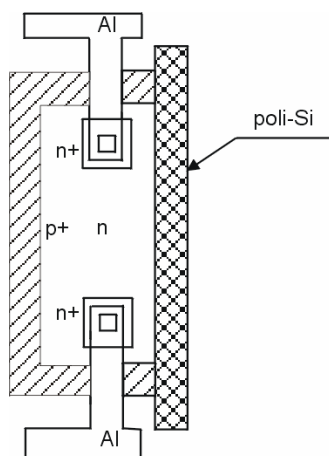


Рис.12. Топология ГМРП на основе одновременно выращенных локальных пленок моно- и поликристаллического кремния

Если учесть боковой уход границы р-п-перехода при проведении разделительной диффузии на расстояние $0.8 h_{\text{эп}}$ (4.8 мкм) и наличие с противоположной стороны у границы ПК-областей с высокой концентрацией дефектов с шириной, равной толщине пленки (6 мкм), то рабочая область ГМРП практически оказывается полностью перекрытой ОПЗ и обладает собственной проводимостью.

Еще большее повышение чувствительности, а также температурной стабильности достигается применением дифференциального ГМРП, представляющего собой два одинаковых элемента, отделенных друг от друга пленкой ПК [22].

Топология дифференциального ГМРП представлена на рис.13. При воздействии магнитного поля носители тока в одном из элементов отклоняются к границе раздела с пленкой ПК, а в другом - от этой границы к противоположной грани, представляющей собой обратносмещенный р-п-переход. Сопротивление первого элемента при этом повышается, а второго понижается, вследствие чего дифференциальное выходное напряжение возрастает в 2 раза.

Поскольку оба элемента обладают одинаковыми температурными коэффициентами сопротивления, при изменении температуры их сопротивления будут изменяться на одинаковую величину и, следовательно, выходное напряжение будет температурно-независимым. ТКС дифференциального ГМРП в диапазоне температур от комнатной до 120°C не превышает $0.12\%/^{\circ}\text{град}$.

2.5. Магниточувствительные интегральные схемы

2.5.1. Магнитокоммутируемые ИС на основе эффекта Холла

Как отмечалось ранее, использование кремниевой микроэлектронной технологии значительно расширяет функциональные возможности ДХ и область их применения, а также снижает их стоимость. Кремний раньше не использовался для изготовления ДХ из-за малой подвижности носителей заряда, которая не позволяет получать высокие выходные сигналы. Типичный кремниевый ДХ имеет чувствительность всего лишь 30 мВ/кГс , что на 2 порядка меньше, чем сигнал арсенид-галлиевого ДХ. Зато он обладает гораздо большей температурной стабильностью, чем все другие ДХ, а объединение с ним схем усиления и обработки сигналов в едином интегральном исполнении позволяет получать на выходе напряжения, вполне приемлемые для практического использования. Кроме того, в значительной мере упрощаются проблемы шумов и длинных выводов, характерные для дискретных ДХ.

В настоящее время разработаны магниточувствительные ИС как с цифровым, так и с линейным выходами, изготавливаемые по гибридно-пленочной, биполярной и МОП-технологии [23-26].

Типичная магниточувствительная коммутирующая микросхема (МКМ) состоит из ДХ, дифференциального усилителя (ДУ), порогового устройства и выходного логического каскада. В [24] приведено описание МКМ серии

1116КП, изготавливаемой по эпитаксиально-планарной технологии с изоляцией элементов обратносмещенным р-п-переходом. Рассмотрим принцип действия электрической схемы МКМ (рис.14).

В качестве усилителя использован дифференциальный каскад на п-р-п транзисторах Т1, Т2 с резистивной нагрузкой R1, R3 и токозадающим резистором R2. К коллекторам транзисторов ДУ подключена бистабильная схема, выполненная на п-р-п транзисторах Т3, Т4 с эмиттерной связью. Резистор R3 является одновременно коллекторной нагрузкой транзистора Т3 и правого плеча ДУ. Нагрузкой транзистора Т4 служит прямосмещенный переход база-эмиттер транзистора Т5, с коллектора которого снимается инвертированный выходной токовый сигнал. Выходной сигнал далее усиливается эмиттерным повторителем на п-р-п транзисторе Т6 и через два резистивных делителя, ограничивающих эмиттерный ток, поступает на базы выходных транзисторов Т7, Т8 с открытыми коллекторами.

Для повышения стабильности параметров МКМ и расширения диапазона питающего напряжения в нее включен внутренний стабилизатор напряжения на транзисторе Т9, стабилитроне ДЗ и токозадающем резисторе R11. Стабилизатор обеспечивает внутреннее питание схемы напряжением 5 В, независимо от приложенного с внешнего источника напряжения в диапазоне $9 \div 30$ В.

Основные технические характеристики МКМ К1116КПЗ следующие:

- магнитная индукция срабатывания - 200 Гс;
- магнитная индукция включения - 350 Гс;
- гистерезис переключения - 50 Гс;
- потребляемый ток - 6 мА;
- температурный диапазон работы - $-40^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$;
- гистерезис переключения - 50 Гц;
- потребляемый ток - 6 мА.

Использование гибридно-пленочной технологии изготовления позволяет вместо обычно применяемого ДУ ввести операционный усилитель с высоким коэффициентом усиления, что повышает магнитную чувствительность и температурную стабильность, а также дает возможность с помощью внешних подстроечных резисторов регулировать величину гистерезиса и магнитной индукции переключения [25].

На рис.15 приведена принципиальная схема МКМ в гибридно-пленочном исполнении.

Питание ДХ осуществляется через 2 равных по величине токоограничивающих резистора R1 и R2, между которыми включен ДХ. Такое включение обеспечивает подачу синфазного напряжения на вход операционного усилителя (ОУ) 740УД4, равного половине напряжения питания, что обеспечивает нормальную работу выходного каскада усилителя при одностороннем питании. Кроме того, применение токоограничивающих резисторов позволяет

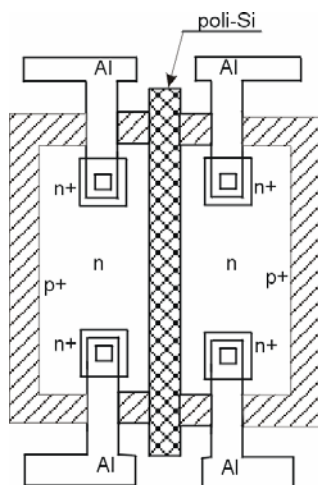


Рис.13. Топология дифференциального ГМРП

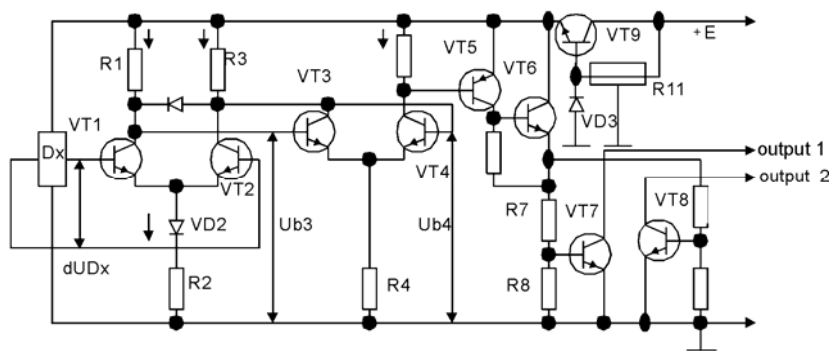


Рис.14. Принципиальная схема твердотельной магнитокоммутуемой ИС на эффекте Холла

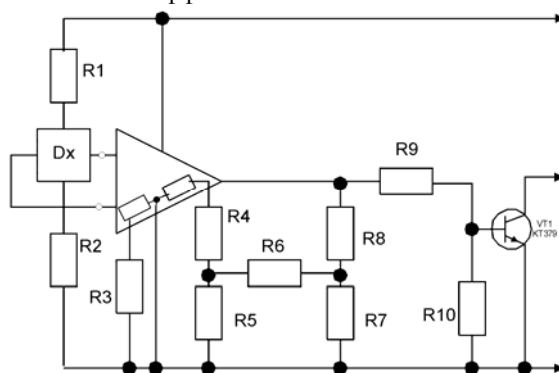


Рис.15. Принципиальная схема гибридно-пленочной МКМ

снизить дрейф параметров схемы при изменении входного сопротивления ДХ с температурой.

Положительная обратная связь на резисторах R5-R7 введена для получения гистерезиса переключения, повышающего помехоустойчивость схемы. Глубина положительной обратной связи регулируется лазерной подгонкой резистора R6, а начальное смещение выбирается подгонкой резистора R3.

В качестве материала пленочных резисторов применяется сплав РС-3710 с $\text{ТКС} = 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ и поверхностным сопротивлением 1 кОм/кВ. Поскольку ТКС используемых резисторов меньше, чем ТКС кремниевой пленки, на которой сформирован ДХ, включенный последовательно с ними, то степень влияния последнего на общее температурное изменение сопротивления цепи значительно снижается.

Выходом схемы является открытый коллектор бескорпусного транзистора КТ-379, который работает в ключевом режиме и обеспечивает согласование схемы со стандартными логическими схемами. Напряжение питания гибридной МКМ 27 В, потребляемый ток - 6 мА, а магнитная индукция переключения лежит в диапазоне 100 – 500 Гс.

Основной проблемой магниточувствительных ИС с ДХ является температурный и временной дрейфы остаточного напряжения ДХ, связанные с перераспределением упругих механических напряжений в объеме кристалла ДХ, возникающих при изменениях температуры и протекании тока. Для уменьшения дрейфов ДХ применяется ортогональное соединение холловских элементов, которое обеспечивает снижение влияния механических напряжений на остаточное напряжение ДХ (рис.16). Помимо этого, для уменьшения влияния дрейфа положительных ионов на границе Si-SiO₂ на дрейф нулевого смещения проводится ионное легирование рабочей поверхности ДХ атомами бора. Тем самым на поверхности создается тонкий слой р-типа проводимости, отделяющий объем п-типа проводимости от границы Si-SiO₂ (рис.17). Указанные меры применены в МКМ серии КП1159, что позволило снизить дрейф остаточного напряжения U_0 до 0.02 мВ/°С.

В табл.6 приведены параметры некоторых типов отечественных и зарубежных МКМ.

Существенным недостатком биполярных магниточувствительных ИС является большой ток потребления (6 мА), что особенно критично при их использовании в устройствах с автономными источниками питания.

Для уменьшения потребляемого тока используется КМОП-технология, которая позволяет также получить более высокую чувствительность и низкий уровень собственных шумов. Пороговая магниточувствительная ИС, изготовленная по КМОП-технологии, также, как и биполярная, содержит магниточувствительный элемент, схемы усиления и обработки сигналов, расположенные на едином кристалле. При напряжении питания 3 В ток потребления ИМС менее 0.5 мА, а индукция переключения находится в диапазоне 100÷300 Гс [27].

Параметры магниточувствительных микросхем

Таблица 6

тип МИС	B_{cp} , мТл, min/max	Гистерезис, мТл	$I_{пит}$, мА	диапазон тем- ператур, °С
K1116КПЗ, СССР	20/35	5	6	-40 ... +125
1AV2A HONEYWELL, США	40/45	10	13	-40 ... +150
SAS 221S4, "SIEMENS", ФРГ	25/40	5	7	-40 ... +125
TL172 TEXAS INSTRU- MENT, США	60/10	40	-	-40 ... +125
DGN 3203 "SPRAQUE", США	35/10	20	-	-40 ... +125
S6SS2 MICROSWITCH, США	62/12	40	-	-40 ... +150
МКМ 1159КП1	5/15	2	6	-60 ... +125

Чувствительным элементом является элемент Холла, выполненный на основе тонкого инверсионного слоя n-канала МОП-транзистора. Помимо обычных областей стока, истока и затвора холловский транзистор содержит две дополнительные области холловских контактов, формируемых одновременно со стоком и истоком (рис.18, а). Геометрические размеры транзистора близки к оптимальным. Напряжение Холла, возникающее при воздействии магнитного поля, передается непосредственно с холловских контактов на затворы двух усилительных транзисторов, управляя протекающими в них токами (рис.18, б).

2.5.2. Линейные магниточувствительные схемы

Для измерения относительно небольших изменений магнитного поля применяются магниточувствительные схемы с линейным выходом, в которых напряжение холла изменяется пропорционально индукции магнитного поля. В отсутствие внешнего магнитного поля выходное напряжение линейной магниточувствительной схемы (МИС), принимаемое за уровень отсчета, обычно равно половине питающего напряжения. При регистрации положительного направления магнитного поля выходное напряжение выше уровня отсчета, при регистрации отрицательного направления - ниже, хотя оно и остается положительной величиной.

Основными параметрами линейных МИС являются магнитная чувствительность, диапазон выходных рабочих напряжений, линейность характеристики, напряжение питания.

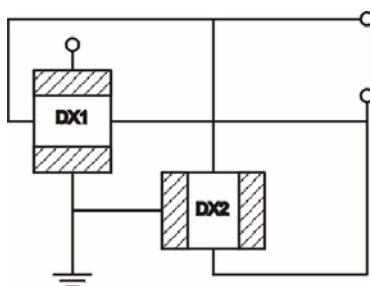


Рис.16. Ортогональное расположение двух ДХ

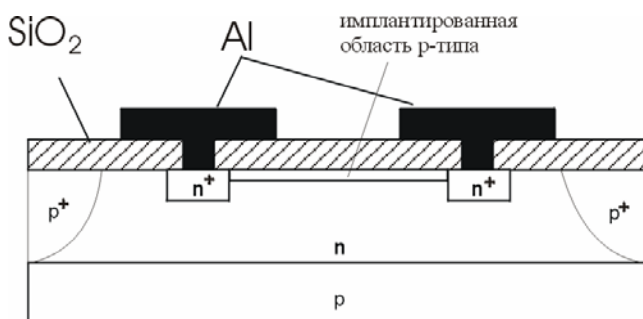


Рис.17. ДХ с изолированной от окисла рабочей областью

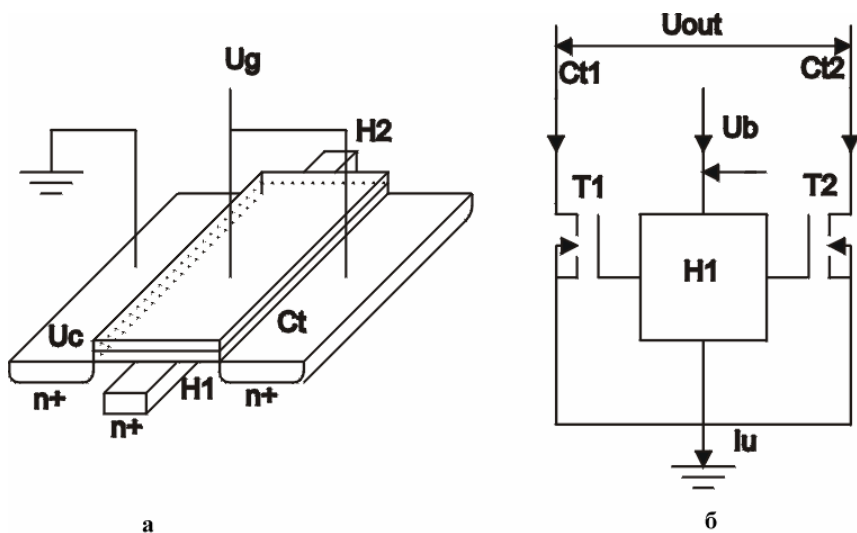


Рис.18. МОП-элемент Холла (а) и электрическая схема его подключения (б)

Чувствительность линейных МИС, как правило, лежит в пределах $1.3 \div 7$ мВ/Гс, а напряжение питания – в диапазоне от 4.5 до 16 В. Например, линейная МИС типа SAS 231L, выпускаемая фирмой SIEMENS по биполярной технологии, расположена на кристалле с размерами $0,7 \times 0,9$ мм и при напряжении питания 15 В имеет предельное выходное напряжение 13 В и среднюю крутизну характеристики преобразования 1 мВ/Гс [3]. В рабочем диапазоне температур $0 \div 70$ °С ток, потребляемый МИС при холостом ходе (т.е. $R_n = \infty$, $U_n = 15$ В), составляет 6 мА, номинальный выходной ток – 5 мА, нелинейность характеристики – не более 2%. Наличие у МИС высокого выходного сигнала, имеющего стандартизированное значение (10 В, 5 мА), упрощает построение различных измерительных устройств и уменьшает их габариты.

В табл.7 приведены основные параметры линейных МИС, разработанных известными фирмами.

Линейные магниточувствительные ИС

Таблица 7

Тип	Изготовитель	Магнитная чувствительность, мВ/Гс	$I_{\text{пот}}$, мА	$U_{\text{вых}}$, В
TL173	Texas Instruments	1.5	20	5.4...6.6
UGN	Sprague	0.7	15	3.6...4.2
633SS2	Microswitch	1	5	1.75...2.2
SAS231L	Siemens	1	5	7...13
ИПДМП	МИЭТ, Москва	2.5	0.2	6.3...7.7

Последняя схема, разработанная в Московском институте электронной техники, в отличие от всех остальных изготовлена по КМОП-технологии и, как видно из таблицы, имеет максимальную чувствительность и минимальный потребляемый ток [27].

Магниточувствительный КМОП транзистор изготовлен по стандартной 5-микронной КМОП-технологии с поликремниевым затвором. В качестве подложек использовались кремниевые пластины n-типа проводимости с удельным сопротивлением $4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и ориентацией (100).

В основе конструкции магнитотранзистора лежат двухстоковые симметричные МОП-транзисторы с каналами n- и р-типа проводимости. В стоках магнитотранзистора при отсутствии магнитного поля текут практически равные токи, различие которых определяется лишь рассовмещением топологических слоев в технологическом процессе изготовления МИС.

Воздействие магнитного поля перпендикулярно поверхности кристалла приводит к отклонению линий тока в области n- и р-типа МОП-магнитотранзисторов, что создает асимметрию в распределении токов стоковых областей и обуславливает изменение разности потенциалов между стоками, величина которой и является мерой напряженности магнитного поля.

Линейные ИМС могут применяться для бесконтактного измерения токов в проводах, а при высокой чувствительности и использовании концен-

траторов с их помощью можно измерять даже магнитное поле Земли, индукция которой порядка 0.5 Гс.

3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

3.1. Тензорезистивный эффект в полупроводниках

Работа полупроводниковых датчиков давления основана, в основном, на использовании тензоэффекта, который у полупроводников значительно выше, чем у металлов [1].

Полупроводниковые кристаллы обладают в основном кубической симметрией, расстояния между атомами в кристаллах обусловлены минимумом энергии взаимодействия между соседними атомами. Любое приложенное извне механическое воздействие, достаточное для изменения расстояния между ближайшими соседними атомами в кристаллической решетке, приводит к изменению энергии взаимодействия между ними, а следовательно, к изменению вида потенциальной энергии в уравнении Шредингера и к изменению энергетической зонной структуры полупроводника (плотности состояний в разрешенных зонах или ширины запрещенной зоны).

Изменение энергетической структуры неизбежно приводит к изменению концентрации свободных носителей заряда или их подвижности, в связи с чем тензочувствительность полупроводников в десятки раз превосходит тензочувствительность металлов.

Тензорезистивным эффектом, или тензосопротивлением, называется изменение электрического сопротивления полупроводника в результате действия нагрузки, создающей деформацию. Деформация тела может быть описана симметричным тензором деформации U_{ik} :

$$U_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \frac{\partial U_k}{\partial X_i} \right) = U_{ki}. \quad (39)$$

Тензор деформации U_{ik} определяет изменение расстояний между точками тела при деформации. Если в недеформированном теле расстояние между двумя точками dl , а в деформированном теле расстояние между теми же точками равно dl' , то связь между dl' и dl можно выразить через тензор деформации U_{ik} :

$$dl' = \sqrt{dl^2 + 2 \sum_{i,k} U_{ik} dx_i dx_k} = dl \cdot \sqrt{1 + 2 \sum_{i,k} U_{ik} n_i n_k}, \quad (40)$$

$$\text{где } n_{i,k} = \frac{dx_{i,k}}{(dl)^2}.$$

Относительное удлинение вдоль направления $n=(n_1, n_2, n_3)$, где n – индексы Миллера, можно выразить через тензор деформации следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{dl' - dl}{dl} = \sqrt{1 + 2 \sum_{i,k} U_{ik} n_i n_k} - 1 \cong \sum U_{ik} n_i n_k. \quad (41)$$

Найдем изменение объема dv' при деформации:

$$\begin{aligned} dv' &= dx'dy'dz' = dx(1+U_1)dy(1+U_2)dz(1+U_3) = \\ &= dv(1+U_1+U_2+U_3) \end{aligned} \quad (42)$$

или

$$\frac{dv' - dv}{dv} = \Delta = \sum_i U^{(i)} = \sum_i U_{ii} = \sum_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \text{div} U. \quad (43)$$

Таким образом, главные значения тензора деформации определяют относительные удлинения вдоль главных осей тензора, а их сумма – относительное изменение объема.

При деформации тела в нем возникают внутренние напряжения, стремящиеся вернуть тело в равновесное, недеформированное состояние. Они могут быть описаны некоторым симметричным тензором второго ранга – тензором напряжений P_{ik} . Сила F , действующая на единичный объем тела, может быть выражена через тензор напряжений P следующим образом:

$$F = \text{div} P; \quad (44)$$

$$F_i = \sum_k \frac{\partial P_{ik}}{\partial x_k} \quad (i=1,2,3). \quad (45)$$

Между тензором деформации и тензором напряжений должна быть определенная связь, так как с ростом деформации напряжения должны возрастать. В пределах упругих деформаций между деформацией и напряжением на основании закона Гука должна существовать линейная зависимость. Величина, связывающая деформацию с напряжением, называется обычно модулем упругости. Поскольку в общем случае деформация и напряжение являются тензорами второго ранга, то и модуль упругости должен быть тензором, причем более высокого ранга, именно, четвертого. Обозначим его элементы через λ_{ijkl} , тензор λ называется тензором упругости. В соответствии с законом Гука запишем

$$p_{ik} = \sum_m \lambda_{iklm} U_{lm}. \quad (46)$$

Тензор модулей упругости λ симметричен по парам своих индексов:

$$\lambda_{ijkl} = \lambda_{jikl} = \lambda_{ijkl} = \lambda_{klij}, \quad (47)$$

так как он связывает между собой два симметричных тензора P_{ik} и U_{lm} . Изотропные тела характеризуются всего двумя модулями упругости – модулями сдвига G и модулем Юнга E . Для анизотропных материалов, к которым принадлежат все полупроводники, упругие свойства определяются набором гораздо большего числа упругих коэффициентов. С учетом (47) в общем случае из 81 элемента тензора λ отличными друг от друга элементами могут быть не более 21. С учетом свойств симметрии решетки число независимых модулей упругости может быть уменьшенное. Например, в триклинной системе число независимых модулей равно 18, в ромбоэдрической – 12, в гексагональной –

5 и в кубической, характерной для кремния, только три, которые можно обозначить как

$$\lambda_{xxxx}; \lambda_{xxuu}; \lambda_{xuyu}. \quad (48)$$

Поскольку тензор модулей упругости имеет значительно меньше 81 компонента, то для него используют обозначения, указывая не на четыре индекса, а только на два. Например, в случае кристаллов с кубической решеткой вводят следующие обозначения:

$$\lambda_{1111} \equiv \lambda_{xxxx} = c_{11}; \lambda_{1122} = c_{12}; \lambda_{1212} = c_{44}. \quad (49)$$

Компоненты $c_{i,k}$ являются симметричными относительно своих индексов.

Перейдем к описанию тензорезистивного эффекта. Пусть вещество характеризуется тензором удельного сопротивления ρ с компонентами ρ_{ik} .

Если полупроводник деформирован, то его удельное сопротивление изменилось, оно равно ρ' или ρ'_{ik} . Величина $\rho' - \rho$ или $\rho'_{ik} - \rho_{ik}$ представляет собой изменение удельного сопротивления в результате действия нагрузки, вызывающей деформацию и напряжение в полупроводнике. Изменение удельного сопротивления можно выразить двояким образом: либо через напряжение, либо через деформацию. Поскольку между напряжением и деформацией существует вполне определенная связь, то оба способа описания являются эквивалентными. Выразим изменение сопротивления $\rho' - \rho$ через тензор напряжения P_{ik} в виде

$$\rho'_{ik} - \rho_{ik} = \rho_{ik} \sum_{lm} \pi_{iklm} P_{lm} \quad (50)$$

или

$$\frac{\rho'_{ik} - \rho_{ik}}{\rho_{ik}} = \sum_{lm} \pi_{iklm} P_{lm}. \quad (51)$$

Тензор четвертого ранга π_{iklm} называется обычно тензором коэффициентов пьезосопротивления или тензором пьезосопротивления.

Для кубического кристалла тензор пьезосопротивления имеет всего три различные величины, которые для простоты изображаются величинами с двумя индексами аналогично (49):

$$\pi_{1111} = \pi_{11}; \pi_{1122} = \pi_{12}; \pi_{1212} = \pi_{44}. \quad (52)$$

При экспериментальном исследовании тензорезистивного эффекта выбирают образец в виде стержня прямоугольного сечения, который подвергают одностороннему сжатию или растяжению. Если ток направлен вдоль оси, по которой направлено растяжение, то мы имеем продольный эффект, если ток направлен под углом 90° к оси, вдоль которой приложена внешняя нагрузка, то мы имеем поперечный эффект. Наиболее интересен продольный эффект.

Изменение удельного сопротивления образца при действии давления p вдоль оси можно выразить с помощью продольного коэффициента пьезосопротивления π_l :

$$\rho' = \rho (1 - \pi_l p). \quad (53)$$

Если образец (стержень) вырезан так, что его ось совпадает с направлением типа $[100]$, то продольный коэффициент пьезосопротивления π_l по направлению $[100]$ равен

$$\pi_l = \pi_{[100]} = \pi_x = \pi_y = \pi_z = \pi_{11}. \quad (54)$$

Если образец вырезан вдоль направления типа $[110]$, то $n = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right)$, и коэффициент пьезосопротивления по направлению $[100]$ равен

$$\pi_l = \pi_{[110]} = \frac{\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}}{2}. \quad (55)$$

Аналогично можно получить для направления $[111]$

$$\pi_l = \pi_{[111]} = \frac{2}{3}(\pi_{12} + \pi_{44}) + \frac{\pi_{11}}{3}. \quad (56)$$

Таким образом, численное значение продольного коэффициента пьезосопротивления π_l зависит от направления оси образца относительно осей кристалла.

Известно, что для реальных кристаллов, например для кремния р-типа проводимости с не очень высокой степенью легирования (примерно до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для диффузионных слоев), справедливы следующие допущения:

$$\pi_{11} \approx \pi_{12} = 0 \quad (57)$$

и для кремния n-типа проводимости -

$$\pi_{44} = 0; \quad \pi_{11} \approx -2\pi_{12}. \quad (58)$$

Эти допущения справедливы с погрешностью не хуже 10% значения максимального коэффициента для границы указанной концентрации примеси. С уменьшением степени легирования погрешность уменьшается. Таким образом, допущения (57) и (58) можно использовать для большинства практических случаев. Тогда коэффициент π_l будет выражен через тензор коэф-

фициентов пьезосопротивления π_{44} для р-типа тензорезисторов и через π_{11} для n-типа. Можно ввести коэффициент тензочувствительности S_l по деформации ε вдоль оси стержня. Модулем Юнга E , как известно, называется величина, определяемая соотношением

$$-p = E\varepsilon. \quad (59)$$

В этом случае связь между S_l и E , аналогично (59), будет представлена в виде

$$S_1 = E \cdot \pi_e. \quad (60)$$

Необходимо только помнить, что модуль Юнга E , модуль сдвига G , связывающий их коэффициент Пуассона ν в анизотропных телах, также зависят от кристаллографического направления.

В табл. 8 приведены некоторые экспериментальные данные по кремнию для коэффициентов пьезосопротивления.

Адиабатические коэффициенты пьезосопротивления ($T=20^\circ\text{C}$) Таблица 8

Материал	Концентрация примеси см^{-3}	ρ^0 , $\text{ом}\cdot\text{см}$	π_{11}	π_{12}	π_{44}	$E_{(111)}$, н/м^2	$S_{(111)}$ $=E_{(111)} \times \pi_{(111)}$
		(в $10^{-11} \text{ м}^2/\text{н}$)					
Кремний: р-тип	$1.7 \cdot 10^{15}$	7.8	6.6	-1.1	138.1		175
п-тип	$4 \cdot 10^{14}$	11.7	-102.2	53.4	-13.6	$1.87 \cdot 10^{11}$	-142

Табл. 8 показывает, что как коэффициенты пьезосопротивления, так и тензочувствительность S_1 и π_1 зависят от величины и типа проводимости. Они зависят от температуры и даже от деформации. На рис. 19 представлены зависимости главных пьезорезистивных коэффициентов π_{11} для п-типа и π_{44} для р-типа кремниевых диффузионных слоев от поверхностной концентрации и температуры.

Чтобы понять эти зависимости необходимо рассмотреть физическую природу тензорезистивного эффекта. В общем случае удельное сопротивление можно выразить через концентрацию носителей заряда и подвижность μ :

$$\rho^{-1} = en\mu = \sigma. \quad (61)$$

Изменение ε может быть связано с изменением концентрации носителей заряда и подвижности.

Простейшим случаем тензосопротивления является случай объемного, или всестороннего сжатия при деформации. Постоянная решетки кристалла a уменьшается:

$$a' = a(1 - \varepsilon). \quad (62)$$

Так как расстояние между атомами уменьшается, то увеличивается перекрытие волновых функций электронов, а потенциальная энергия $W(a)$, описывающая взаимодействие атомов решетки, изменяется. Она возрастает как при сжатии, так и при растяжении кристалла (рис. 20). Это приводит в свою очередь к изменению ширины запрещенных зон и зон энергии.

Изменение ширины запрещенной зоны обусловлено тем, что смещается дно зоны проводимости E_c и потолок валентной зоны E_v . Но изменение ширины запрещенной зоны должно привести к изменению концентрации электронов и дырок.

В общем случае положения E_c и E_v являются функцией относительного изменения объема или тензора деформации:

$$\begin{aligned} E_c(\varepsilon) &= E_c(0) + \Delta_c \varepsilon, \\ E_v(u) &= E_v(0) + \Delta_v \varepsilon. \end{aligned} \quad (63)$$

Дополнительная потенциальная энергия электрона в деформированной решетке носит название потенциала деформации, а Δ_c и Δ_v называются постоянными потенциала деформации для зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно.

Для продольного коэффициента пьезосопротивления π_l и коэффициента чувствительности S_l

$$\begin{aligned} \pi_l &= \frac{\Delta_c - \Delta_v}{2kT\varepsilon}; \\ S_l &= \frac{\Delta_c - \Delta_v}{2kT}. \end{aligned} \quad (64)$$

Оценка S_l на основании (64) дает сравнительно небольшое изменение сопротивления при всестороннем сжатии. Так как, согласно (64), всестороннее сжатие в общем случае входит как составная часть в любую деформацию, кроме чистого сдвига, то изменение концентрации свободных носителей заряда, обусловленное всесторонним сжатием, должно наблюдаться во всех случаях. Однако в области истощения примеси всестороннее сжатие может изменить общую концентрацию частиц только на удвоенное изменение концентрации неосновных носителей заряда, поэтому тензосопротивление проявится слабо. В действительности же в целом ряде случаев тензосопротивление проявляется значительно сильнее, что может быть объяснено только сложной структурой зон энергии.

Значительно большее тензосопротивление наблюдается при одностороннем сжатии или растяжении. Деформация тела определяется тензором деформации u_{ik} . Необходимо отметить следующее обстоятельство: если в направлении сжатия расстояние между атомами уменьшается, то в поперечном направлении расстояние между атомами увеличивается. Это по-разному меняет характер перекрытия волновых функций атомов вдоль разных направлений.

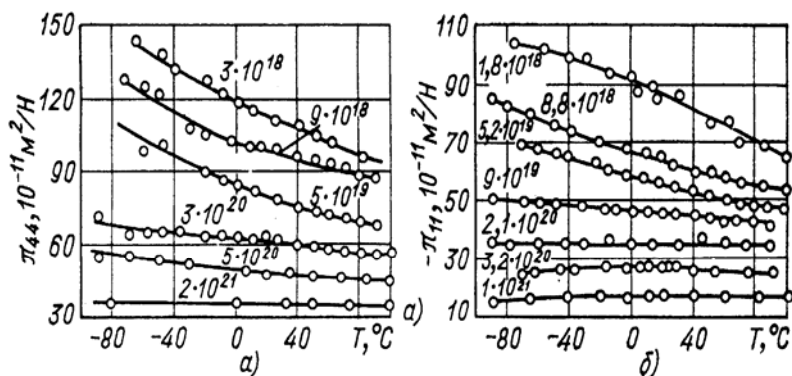


Рис.19. Зависимость от температуры и поверхностной концентрации примеси главных пьезорезистивных коэффициентов π_{44} диффузионных слоев кремния р-типа проводимости (а) и π_{11} n-типа проводимости (б)

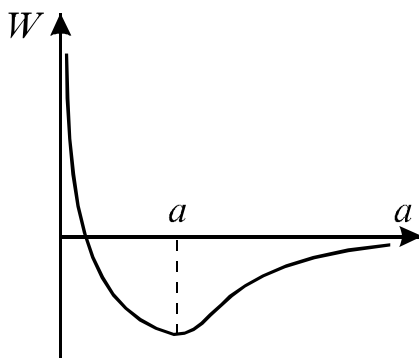


Рис.20. Зависимость потенциальной энергии от расстояния между атомами

Выразим положение дна зоны проводимости в виде

$$E_c(\varepsilon) = E_c(0) + \sum_{ik} \Delta_{ik}^{(c)} u_{ik}. \quad (65)$$

Выражение (65) справедливо для малых деформаций. Обобщим поставленную задачу на случай полупроводника, имеющего M долин. Мы должны предположить, что положение дна зоны проводимости в каждой долине (v - долине) описывается своим тензором $(\Delta_{ik})^{(c)(v)} = (\Delta_{ik})^v$:

$$E_c^{(v)}(\varepsilon) = E_c(0) + \sum_{ik} \Delta_{ik}^{(v)} u_{ik}. \quad (66)$$

Поскольку тензор деформации одинаков для всех долин, а $\Delta^{(v)}$, вообще говоря, различны, то *дно зоны проводимости сместится по-разному в каждой долине*. Положение уровня Ферми от номера долины не зависит, поэтому расстояния между уровнем Ферми E_F и дном зоны становятся различными, что приводит к различной величине концентраций электронов в каждой долине: если дно долины поднимается, то число электронов в ней уменьшается; если дно долины опускается, то число электронов в ней увеличивается:

$$n^{(v)} = N_c e^{\frac{E_F - E_c^{(v)}(u)}{kT}} = n^{(v)}(\varepsilon). \quad (67)$$

Запишем теперь выражение для полной проводимости:

$$\sigma(\varepsilon) = \sum_{v=1}^M \sigma^v(\varepsilon) = e \sum_{v=1}^M n^{(v)}(\varepsilon) \mu^{(v)}. \quad (68)$$

Если $\mu^{(v)}$ анизотропная, то проводимость становится при наложении деформации анизотропной.

При фиксированной деформации *анизотропия проводимости связана с анизотропией подвижности, т.е. с анизотропией обратной эффективной массы*.

Рассмотрим в качестве примера n -кремний. Если сжать кристалл кремния вдоль оси $[100]$, то расстояния между атомами в этом направлении уменьшатся, энергия взаимодействия между электронами соседних атомов для этого направления возрастет, а для направлений $[010]$ и $[001]$ уменьшится. Дно зоны проводимости в направлении $[100]$ опустится (две долины), а в перпендикулярных направлениях (четыре долины) поднимется. Так как сумма состояний в общем постоянна, тогда

$$\sum_{v=1}^M \delta n^{(v)} = 0. \quad (69)$$

Это значит, что область занятых состояний в одних минимумах увеличится, а в остальных уменьшится. Таким образом, изменение проводимости для разных осей различно. Если наложить давление вдоль оси $[110]$, то энергетические минимумы вдоль направлений $[100]$ и $[010]$ опустятся (четыре

долины), а в направлении [001] поднимутся (две долины). Если же сжать кристалл в направлении [111], то все экстремумы останутся эквивалентными, перераспределения электронов не произойдет, и в этом приближении тензосопротивление наблюдаться не должно. В действительности оно будет иметь место вследствие изменения концентрации носителей заряда, о котором мы говорили в первом пункте.

Перейдем к рассмотрению тензосопротивления в р-кремнии. В нем наблюдается большое изменение сопротивления, которое не может быть объяснимо указанным выше изменением концентрации носителей заряда. Известно, что валентная зона кремния обладает почти сферическими поверхностями энергии, поэтому объяснить аномально большое тензосопротивление анизотропией проводимостей подобно тому, как это имеет место в зоне проводимости, нельзя. Объяснение было найдено при учете легких и тяжелых дырок. Смещение зон энергии легких и тяжелых дырок меняет их концентрации на различные величины при сохранении полного числа дырок проводимости (в случае примесной проводимости в области истощения). Но перераспределение концентраций легких и тяжелых дырок вследствие различия в их подвижности меняет проводимость и сопротивление:

$$\delta\sigma = e_p (\delta p_l \mu_{pl} + \delta p_T \mu_{zT}). \quad (70)$$

Таким образом, аномально большое тензосопротивление р-кремния связано с различием масс, и подвижностей легких и тяжелых дырок.

Подводя итог, можно выделить следующие основные моменты:

1. Тензорезистивный эффект состоит в изменении сопротивления (проводимости) полупроводника или металла в результате его деформации. Физической причиной тензосопротивления является изменение энергетической структуры полупроводника. Изменение ширины запрещенной зоны приводит к изменению концентрации носителей заряда и тем самым к изменению сопротивления.

2. В веществах, имеющих сложную структуру зон подобно п-кремнию, деформация кристалла, вызванная односторонним сжатием или растяжением, приводит к большому изменению сопротивления, которое не может быть объяснено изменением общей концентрации носителей заряда. Объяснение состоит в том, что в результате анизотропной деформации экстремумы энергии становятся неэквивалентными, происходит перераспределение электронов по экстремумам. Минимумы, дно которых опустится, дадут большой вклад в проводимость, чем минимумы, дно которых поднимется. Изменение проводимости при этом наблюдается только в том случае, если поверхности энергии отличны от сферических.

3. В полупроводниках типа р-кремния большая величина изменения сопротивления обусловлена снятием вырождения зон энергии при наложении анизотропной деформации. В результате снятия вырождения меняется число легких и тяжелых дырок, обладающих различной подвижностью и дающих благодаря этому различный вклад в проводимость, что приводит к изменению сопротивления даже при сохранении общего числа дырок.

3.2. Первичные тензопреобразователи

Полупроводниковые приборы, работа которых основана на тензоэффекте, можно назвать первичными тензопреобразователями [2]. Самым простым первичным тензопреобразователем является полупроводниковый тензорезистор. Он может быть выполнен в виде стержня из полупроводника с омическими контактами на концах. Номинал сопротивления тензорезистора задается технологически, путем соответствующего уровня легирования полупроводника. Как правило, размеры тензорезистора не превышают по длине и ширине нескольких миллиметров, а по толщине - десятых долей миллиметра. Тензорезистор закрепляют на пластине так, как это представлено на рис.21. Закрепление зачастую осуществляется приклеиванием специально подобранными компаундами и клеями. Сама операция приклеивания достаточно трудоемкая, а качество ее выполнения зависит от квалификации специалиста, который ее производит [3]. Деформация создается силой F , действующей на свободный конец пластины.

Для оценки изменения сопротивления тензорезистора при деформации пользуются коэффициентом тензочувствительности по сопротивлению m :

$$m = \frac{\Delta R}{R} \bigg/ \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \bigg/ \frac{\Delta \ell}{\ell}. \quad (71)$$

Он представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации в данном направлении (ℓ - размер полупроводника в направлении деформации).

Для уменьшения влияния температуры на величину сопротивления тензорезисторы обычно изготавливаются из примесных полупроводников, в которых концентрация основных носителей равна концентрации примесей и не зависит от деформации. Поэтому изменение сопротивления при деформации определяется только изменением подвижности.

Коэффициент тензочувствительности для германия и кремния имеет наибольшее значение порядка 140...175. Большой тензочувствительностью обладают также полупроводниковые соединения GaSb, InSb, PbTe и др.

Для компенсации зависимости сопротивления от температуры часто в плече измерительного моста используются два тензорезистора с одинаковым температурным коэффициентом. Тензопреобразователем является только один резистор, а второй служит для компенсации температурного изменения величины сопротивления первого.

Как правило, тензорезистор используется в качестве одного из резисторов в мосте Уитстона. При этом на выходе моста получают зависимость из выходного напряжения от величины прикладываемой силы или давления.

Тензорезистор является пассивным полупроводниковым прибором или пассивным тензоэлементом. Гораздо привлекательнее использование в качестве первичных тензопреобразователей активных полупроводниковых приборов - диодов на основе различных переходов и барьеров Шотки, полевых и биполярных транзисторов.

Тензодиоды. Так как от деформации зависит только подвижность носителей заряда и ширина запрещенной зоны, то для получения максимальной тензочувствительности необходимо, чтобы при увеличении ширины запрещенной зоны величина подвижности уменьшалась, и наоборот [4]. Такое согласование нельзя получить в р-п-переходах. Например, в кремнии величина ширины запрещенной зоны при сжатии уменьшается, подвижность электронов увеличивается, а дырок уменьшается. Следовательно, в качестве базы диода необходимо выбирать полупроводник, в котором неосновные носители - электроны, т.е. полупроводник р-типа, а значит, переход п-р-типа (рис. 22).

Вследствие большей зависимости тока от подвижности тензочувствительность диода с короткой базой выше, чем с длинной.

Для структуры тензодиодов существенное значение имеет ориентация плоскости р-п-перехода. Например, в структуре при использовании германия максимальная тензочувствительность может быть получена, если плоскость р-п-перехода совпадает с плоскостью [111], так как изменения ширины запрещенной зоны и при небольших деформациях максимальны в направлении [111]. Однако недостатком такого датчика является то, что при сжатии ток через р-п-переход при малых давлениях уменьшается, а при больших - увеличивается. При ориентации же р-п-перехода в плоскости [100] чувствительность меньше, но ток непрерывно уменьшается с ростом давления. Тензодиод можно включать и при прямом, и при обратном смещении, так как в обоих случаях ток пропорционален току насыщения.

Преимуществом тензодиодов перед тензорезисторами является их более высокая чувствительность, а также возможность измерения деформаций при всестороннем сжатии.

Биполярные транзисторы. Влияние деформации на характеристики биполярного транзистора можно получить при воздействии деформации на эмиттерный или коллекторный р-п-переходы, что влияет на коэффициент передачи по току. Чувствительный к давлению транзистор получил название "питран" [5]. В "питране" слой эмиттер-база механически связан с воспринимающей давление мембраной.

Деформация тензотранзисторов осуществляется такими же методами, что и р-п-переходов. Так как максимальная тензочувствительность достигается при точечной деформации, то деформируемый р-п-переход можно сделать состоящим из множества выступов. Аналогичного результата можно добиться, если деформируемую поверхность р-п-перехода сделать неровной за счет её глубокой шлифовки.

В специально сконструированном тензотранзисторе оптимальным выбором параметров всегда можно получить большее значение тензочувствительности, чем у р-п-переходов.

Полевые транзисторы с р-п-переходом. При деформации канала полевого транзистора с р-п-переходом происходит изменение подвижности носителей заряда и соответствующее изменение величины сопротивления канала R_k .

В режиме постоянного напряжения на затворе U_z и стоке $U_{ст}$ изменение сопротивления канала ничем не отличается от аналогичного изменения сопротивления обычного тензорезистора, поэтому значение будет таким же.

В режиме постоянных $I_{ст}$ и U_z , например $U_z=0$ (затвор замкнут с источником), обратное напряжение на р-п-переходе равно $U_{рп}=U_{ст}=I_{ст}R_k$. Если при деформации R_k увеличивается, это приводит к росту $U_{рп}$. Из-за увеличения $U_{рп}$ происходит сужение канала и дополнительное увеличение R_k . В данном случае величина $U_{ст}$ увеличивается на большую величину, чем при изменении R_k только за счет изменения, т.е. тензочувствительность увеличивается.

Тензочувствительность полевого транзистора с р-п-переходом не выше, чем у биполярного.

МДП-транзисторы. Влияние деформации на характеристики МДП-транзистора, работающего в режиме постоянных напряжений стока и затвора или постоянных напряжений затвора и тока стока, аналогично отмеченному выше, если не учитывать изменения свойств диэлектрика и заряда на поверхностных состояниях. Использование последних двух эффектов позволяет значительно увеличить тензочувствительность МДП-транзисторов.

Выходной характеристикой полевого МДП-транзистора может быть зависимость тока стока от приложенной нагрузки.

Несмотря на очевидные преимущества активных тензоэлементов наибольшее применение нашли тензопреобразователи на основе тензорезисторов прежде всего за счет простой технологии изготовления и, соответственно, дешевизны приборов.

3.3. Классификация интегральных тензопреобразователей давления

3.3.1. Пути интеграции тензопреобразователей

В интегральных тензопреобразователях давления в качестве чувствительного элемента чаще всего используется диффузионный резистор. На рис.23 схематично показано устройство классического тензорезистивного преобразователя давления.

Роль элемента, воспринимающего давление, выполняет мембрана, которая, деформируясь, передаёт воздействие через шток (передающий элемент) на балку (упругий элемент). Деформация упругого элемента вызывает появление механических напряжений в тензорезисторах, включённых в схему вторичного преобразователя, где могут использоваться усилители и преобразователи сигнала, а также подстроечные элементы.

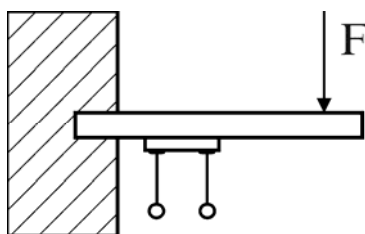


Рис.21. Схема размещения тензорезистора

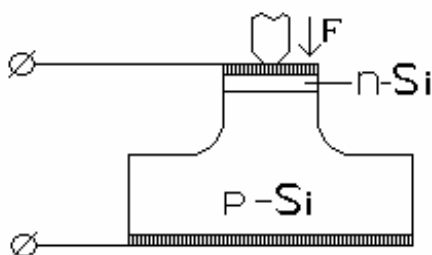


Рис.22. Структурная схема тензодиода

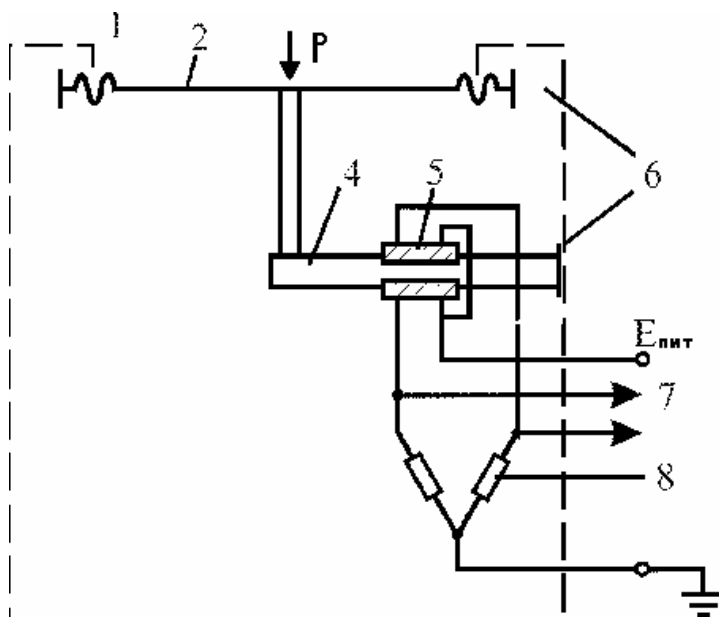


Рис.23. Структурная схема тензорезистивного преобразователя давления: 1 - корпус, 2 - мембрана, 3 - шток, 4 - балка, 5 - тензорезистор, 6 - крепление мембраны и балки, 7 - выход, 8 - постоянный или подстраиваемый резистор

В связи с развитием технологии микроэлектроники конструкция тензопреобразователей улучшалась, уменьшались габариты, росла точность измерения давления. Это было связано с появившейся возможностью интеграции элементов тензопреобразователя. Историческое развитие тензопреобразователей происходило в несколько этапов так, что на каждом очередном этапе интегрировались отдельные физико-конструктивные элементы преобразователя, представленные структурной схемой на рис. 24 [6].

На первом этапе интеграция сводилась к объединению воспринимающего, передающего и упругого элементов. Преобразователь давления, соответствующий этапу I, показан на рис.25, а.

Тензорезисторы прикреплены непосредственно к мембране, одновременно выполняющей функции воспринимающего и упругого элементов. Устройство такого типа отличается простотой конструкции.

Отсутствие таких деталей, как передающие рычаги, крепления увеличивает надёжность преобразователя и снижает его стоимость. Данный тип преобразователя имеет пониженную точность и заметную температурную зависимость выходного сигнала, обусловленные неустойчивостью клеевого соединения, разбросом параметров тензорезисторов и дополнительной нагрузкой, которую даёт мембране чувствительный элемент. Суммарная жёсткость мембраны с закреплённым на ней тензоэлементом становится очень большой, и конструкция пригодна только для измерения сравнительно высоких давлений начиная с долей мегапаскаля.

Этап II соответствует интеграции преобразующего элемента (тензорезистора) с мембраной. С появлением технологии плёночных микросхем стало возможным создание преобразователей, в которых на мембране напылены плёночные тензоэлементы (рис.25, б). При этом был решён вопрос получения однородной мембраны. Малая масса такого тензоэлемента позволяет снять проблему дополнительной нагрузки мембраны. Такими приборами можно измерять сравнительно низкие давления. Этот метод даёт возможность повысить точность и устойчивость к механическим воздействиям.

Следующим шагом, который соответствует II этапу физико-конструктивной интеграции, было создание полностью однородной тонкой кремниевой мембраны с расположенными на ней диффузионными тензорезисторами (рис.25, в). Этот шаг представляет собой новый уровень технологической интеграции. Он привёл к увеличению надёжности, чувствительности, точности, к уменьшению габаритов, массы и повышению стабильности при изменении температуры окружающей среды.

Дальнейшее улучшение характеристик преобразователей сдерживается точностью позиционирования зоны заделки мембраны.

Этап III физико-конструктивной интеграции соответствует применению методов локального контролируемого травления полупроводниковых материалов.



Рис. 24. Структурная схема интеграции элементов тензорезистивного преобразователя давления

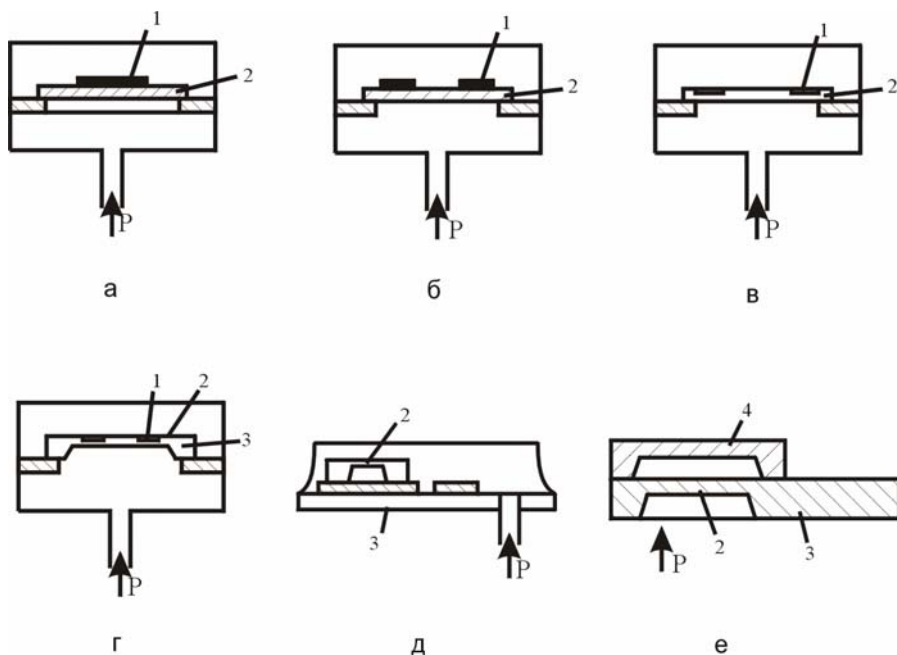


Рис.25. Конструкции датчиков давления на различных этапах интеграции: 1- тензорезистор; 2- мембрана; 3-основание; 4-крышка

В нём создан полностью интегральный чувствительный элемент, представляющий собой тонкую кремниевую мембрану с изготовленными на ней диффузионными тензорезисторами, причём мембрана обрамлена массивным основанием, представляющим с ней единый монокристалл (рис.25, г). Таким образом на этом этапе интегрируются элементы внутренней конструкции преобразователя, а именно - узел заделки и основание тонкой мембраны. Это позволило решить проблемы с точностью и надёжностью на этапе производства кристалла чувствительного элемента. Групповой способ производства, на котором основана микроэлектронная технология, кардинально решает проблему уменьшения стоимости преобразователей.

Этап IV заключается в объединении в одной ИС наряду с интегральным мембранным чувствительным элементом ИС усилителей и подстроечных элементов (рис.25, д). В результате такого подхода появилось целое семейство преобразователей с относительно низкой стоимостью.

Этап V заключается в интеграции всей внешней конструкции преобразователя (рис.25, е).

Таким образом, современному уровню развития интегральных первичных преобразователей соответствуют конструкции, выполненные в виде единого твёрдотельного прибора.

Необходимо отметить, что с появлением каждого нового этапа интеграции предыдущие этапы и конструкции не отмирают, а продолжают использоваться. Дальнейшая физико-конструктивная интеграция элементов преобразователя пойдёт по пути усложнения конструкции за счёт интеграции с АЦП и микропроцессорами.

3.3.2. Классификация структур интегральных тензопреобразователей

На рис.26 показана классификация известных интегральных преобразователей давления по материалу упругого элемента и материалу основания.

Структура I (а также V) имеет вид, представленный на рис.27, и отличается простотой и минимальной стоимостью исходного материала. Недостатком является сравнительная сложность обеспечения воспроизводимости и контроля толщины упругого элемента. Такой структурой обладают максимальное количество преобразователей, описанных в литературе.

Структуры II и VI отличаются более высокой стоимостью исходного материала, представляют собой пластину с подложкой с n эпитаксиальным слоем (рис.27, б), обеспечивают хорошую восприимчивость и простоту контроля толщины упругого элемента преобразователя за счёт использования специальных видов травления. Остальные свойства такие же, как у предыдущей структуры.

Структуры III и VII аналогичны предыдущей по воспроизводимости и контролю толщины упругого элемента преобразователя (рис.27, в). Тип проводимости подложки основания противоположен типу проводимости эпитаксиального слоя (упругого элемента). Это позволяет осуществить электри-

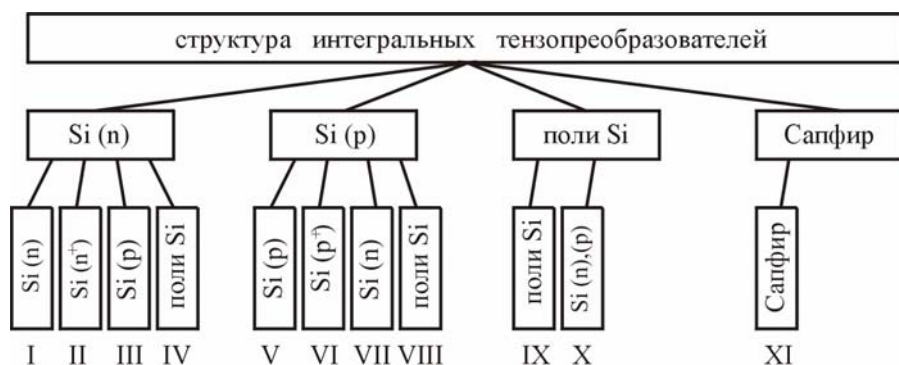


Рис.26. Классификация структур интегральных преобразователей

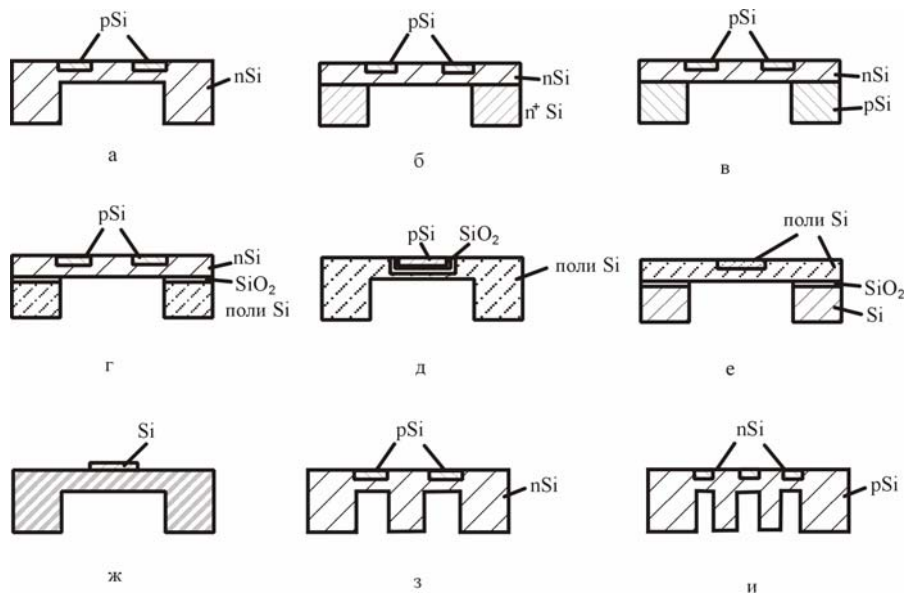


Рис.27. Структуры чувствительных элементов интегральных тензопреобразователей

ческую изоляцию компонентов. Эту структуру целесообразно использовать, когда на основании необходимо интегрировать электронные схемы.

Структуры IV и VIII являются альтернативными предыдущему варианту с преимуществом окисной изоляции компонентов, интегрируемых на основании (рис.27, г). Обе стороны упругого элемента могут быть покрыты одинаковым окислом. Это имеет важное значение для поверхности мембраны и уменьшения температурных погрешностей преобразователей. Недостатком является сложность обеспечения воспроизводимости.

Структура IX (рис.27, д) целесообразна для создания преобразователей, работающих в широком температурном диапазоне благодаря окисной изоляции термоэлементов.

Структура X (рис.27, е) сочетает возможность получения хорошо контролируемой формы и толщины окружающего элемента преобразователя.

Структура XI (рис.3.9, ж) изготовлена по технологии “кремний на сапфире” (КНС). Производство КНС преобразователей целесообразно и оправдано только, когда необходимо обеспечить большой температурный диапазон, работу в агрессивных средах, хорошую электрическую изоляцию от среды и повышенную радиационную стойкость.

Для ряда задач используют структуры, представленные на рис.27, з, и. Для их получения специальным образом профилируют мембрану.

Целью микропрофилирования является снижение нелинейности и повышение чувствительности выходного сигнала. При этом несколько усложняется технология изготовления датчиков.

3.3.3. Технологические этапы изготовления интегральных тензопреобразователей

Технология изготовления интегральных тензопреобразователей хотя и базируется на общей технологии интегральных схем, однако предполагает разработку и использование специфических технологических операций (рис.28).

Первый этап - окисление пластины (рис.28, а) n -Si (100). Хорошо отработанный этап имеет особенности - качественный окисел должен быть получен с обеих сторон пластины, толщина окисла должна обеспечивать защиту поверхности Si для глубокого микропрофилирования при анизотропном травлении.

Второй этап - двустороннее совмещение и фотолитография (рис.28, б), не типичен для стандартного планарного процесса. Тензочувствительные элементы изготавливают на одной стороне пластины, а микропрофилирование происходит на другой.

Способы проведения двустороннего совмещения и фотолитографии:

1. Совмещение в ИК-свете. На одной стороне обычным способом формируют рисунок компонентов ИС, затем фоторезист наносят на другую сторону пластины и совмещение с очередным фотошаблоном проводят в ИК-свете.

2. При двусторонней фотолитографии используется специальное приспособление для одновременной экспозиции пластины с двух сторон.

3. Совмещение по сквозным отверстиям. С помощью локального травления создаются сквозные отверстия по периферии пластины, которые служат реперным знаком для совмещения изображений на одной и другой сторонах пластины.

Третий этап — изготовление интегральной тензосхемы (рис.28, в). Стандартный планарный процесс, в котором используется диффузия бора для создания тензорезисторов, вскрытие окон под контакты, металлизация; фотолитография для создания межсоединений и контактных площадок.

Четвертый этап — микропрофилирование пластин (рис.28, г). Методы микропрофилирования пластин могут быть различные - анизотропное травление, изотропное травление, травление в стоп-травителях (при применении эпитаксиальных слоев), травление, контролируемое лазером.

Представленный технологический процесс изготовления интегральных тензопреобразователей является примерным. На каждом предприятии существуют свои технологические тонкости, связанные с особенностями технологического оборудования и имеющегося у персонала опыта.

3.4. Принципы размещения тензорезисторов на мембранах полупроводниковых и интегральных тензопреобразователей давления (ИТПД)

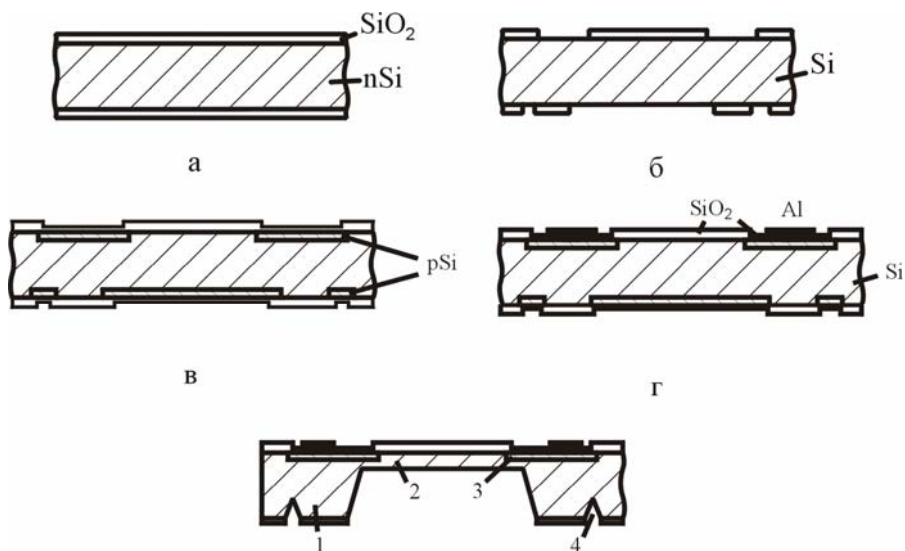
Среди ИТПД наиболее распространенными чувствительными элементами являются кристаллы кремния n-типа с круглой или прямоугольной мембраной (рис.29, 30), поверхность которых ориентирована в кристаллографической плоскости (100), а стороны (для прямоугольной мембраны) - вдоль взаимно перпендикулярных направлений семейства $\langle 110 \rangle$, на которых расположены тензорезисторы p-типа проводимости.

Рассмотрим тензопреобразователь с круглой мембраной [6]. Для определения местоположения тензорезистора с круглой мембраной пользуются полярной системой координат (рис.29) с координатами r и θ . Угол θ отсчитывается от полярной оси X системы координат, совмещенной с кристаллографическим направлением $\langle 100 \rangle$. Тензорезистор расположен на расстоянии \bar{r} от центра мембраны. Известно, что радиальное σ_r и тангенциальное σ_t напряжения в этой точке можно рассчитать по формулам

$$\sigma_r = \frac{3q}{8h^2} [a^2(1+\nu) - \bar{r}^2(3+\nu)], \quad (72)$$

$$\sigma_t = \frac{3q}{8h^2} [a^2(1+\nu) - \bar{r}^2(1+3\nu)], \quad (73)$$

где p - давление, прилагаемое к ИТПД; h - толщина мембраны; a - радиус мембраны; ν - коэффициент Пуассона.



Д

Рис.28. Технологические этапы изготовления интегральных тензопреобразователей: 1 - кремниевая пластина; 2 - мембрана; 3 - тензорезисторы; 4 - канавки для разделения на отдельные чипы

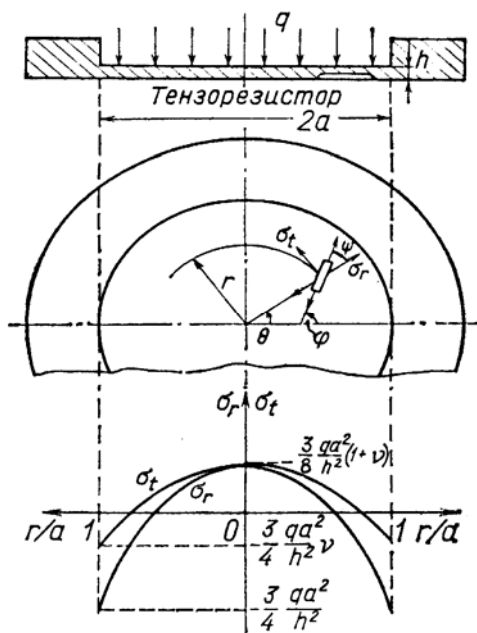


Рис. 29. Определение местоположения точечного тензорезистора на круглой мембране

Если материал мембраны изотропный, то радиальное и тангенциальное напряжения на поверхности мембраны не зависят от угла θ (рис.29). В этом случае напряжения определяются только расстоянием \bar{r} от центра мембраны.

С учетом анизотропии механических свойств кремниевых упругих элементов относительное изменение сопротивления тензорезистора выражается формулами:

$$\delta = \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \pi_{\psi\psi} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi, \quad (74)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_r \cos^2 \psi + \sigma_t \sin^2 \psi \\ \sigma_y &= \sigma_r \sin^2 \psi + \sigma_t \cos^2 \psi \end{aligned} \right\}, \quad (75)$$

где φ - угол между направлением тока в тензорезисторе и направлением $[110]$ на поверхности мембраны; $\varphi = \theta + \psi$; $\pi_{\psi\psi}$ - главный пьезорезистивный коэффициент.

Распределение радиальной σ_r и тангенциальной σ_t составляющих напряжений, возникающих в круглой мембране, было рассчитано в [6] и приведено на рис.29, откуда видно, что максимальной тензочувствительностью будут обладать тензорезисторы, расположенные вдоль периметра круглой мембраны.

Если принять, что значения тензочувствительности тензорезистора выражается формулой

$$S = \frac{\Delta R}{Rq}, \quad (76)$$

то тогда тензочувствительность р-тензорезисторов на круглой мембране будет выражаться формулой

$$S = 0.384 \pi_{\psi\psi} \frac{a^2}{h^2}, \quad (77)$$

Рассмотрим расположение р-тензорезисторов на прямоугольной мембране с размерами сторон $2a$ и $2b$ (рис.30). Относительное изменение сопротивления тензорезистора δ также выражается формулой (74), однако выражения для σ_x и σ_y имеют более сложную зависимость, чем для круглой мембраны. Зависимость тензочувствительности тензорезистора будет иметь следующий вид [7]:

$$S = -\frac{1}{2} |S_k| \cdot K \cdot C^2 \left[\left(\frac{y^2}{b^2} - 1 \right) \left(3 \frac{x^2}{a^2} - 1 \right) - \left(\frac{x^2}{a^2} - 1 \right) \left(3 \frac{y^2}{b^2} - 1 \right) \right] \cos 2\varphi, \quad (78)$$

где $C = \frac{b}{a}$ - отношение длин сторон мембраны; S_k - максимальное значение чувствительности тензорезистора в середине боковой стороны квадратной ($a = b$) мембраны. При этом

$$K = \frac{14E + 4[E\nu + 2G(1 - \nu^2)]}{7E(1 + C^4) + 4C^2[E\nu + 2G(1 - \nu^2)]}, \quad (79)$$

$$S_k = \pm 4.59\pi_{\text{кк}} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \frac{E(1 - \nu)}{7E + 2[E\nu + 2G(1 - \nu^2)]}, \quad (80)$$

В кристаллографическом направлении $[110]$, с которым совпадают направления осей координат (для плоскости (100)), упругие постоянные кремния принимают следующие значения:

$$E = 1.692 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2; G = 0.509 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2; \nu = 0.063.$$

Для этих значений

$$S_k = \pm 0.517\pi_{\text{кк}} \left(\frac{a}{h}\right)^2. \quad (81)$$

Если разделить обе части уравнения (78) на \mathcal{Z}^k , то получим выражения для нормированной чувствительности. На рис.31 представлена топограмма нормированной чувствительности тензорезисторов р-типа проводимости, расположенных на квадратной ($c = 1$) мембране.

Из рисунка видно, что максимальная тензочувствительность наблюдается у тензорезисторов, расположенных у центра боковых сторон. В центре мембраны тензочувствительность равна 0.

Для прямоугольной мембраны ($a \neq b$), ($c = 1$) точками экстремальной чувствительности являются середины боковых сторон мембран и ее центр [7]. Значение максимальной нормированной чувствительности в этих точках S_a , S_b , S_0 (рис.32) могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} S_a = S_n(a; 0) &= \mp \frac{28.17 \cdot c^4}{11.84(1 - c^4) + 4.48c^2}; \\ S_b = S_n(0; b) &= \pm \frac{28.17 \cdot c^2}{11.84(1 - c^4) + 4.48c^2}; \\ S_0 = S_n(0; 0) &= \pm \frac{28.17 \cdot c^2(c^2 - 1)}{11.84(1 + c^4) + 4.48c^2}. \end{aligned} \quad (82)$$

Знак зависит от расположения резистора на мембране, т.е. от угла φ . Верхний знак в (82) соответствует $\varphi = 0$, а нижний $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Полученные зави-

симости графически представлены на рис.32. Видно, что по мере увеличения c (по мере увеличения одной из сторон мембраны) значения S_0 , S_a , S_b довольно быстро приближаются к своим максимальным значениям.

Представленные выше формулы сведены в таблицу 9, в которой даны зависимости чувствительности тензорезисторов, размещенных в экстремальных точках мембраны при использовании различной формы.

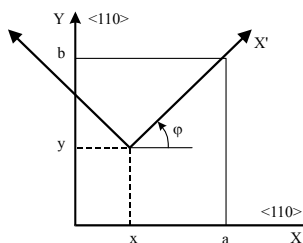


Рис.30. Определение местоположения точечного тензорезистора на квадратной мембране

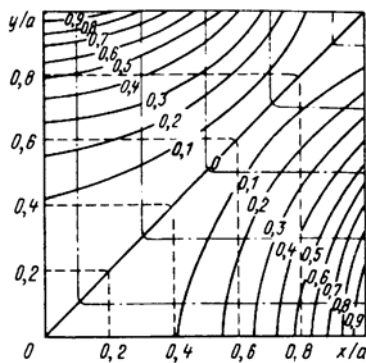


Рис.31. Топограммы нормированной чувствительности тензорезисторов р-типа на квадратной мембране

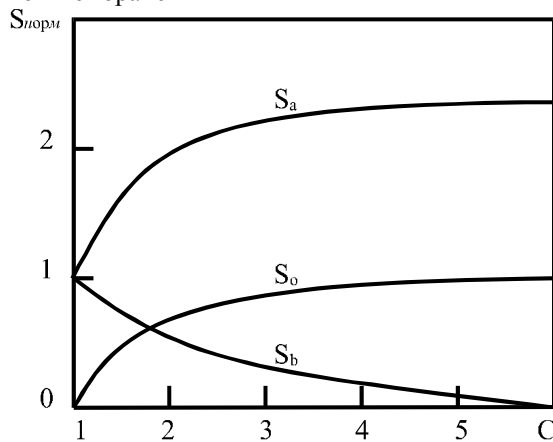


Рис.32. Зависимость модуля нормированной чувствительности прямоугольной пластинки в серединах боковых сторон (S_a , S_b) и в центре (S_o) от соотношения длин сторон C

Чувствительность тензорезисторов

Таблица 9

Вид упругого элемента	Круглая мембрана, радиус = a	Квадратная мембрана $a = b, c = 1$	Прямоугольная мембрана $c = 3$	Произвольная мембрана $c = \infty$
Максимальная чувствительность $S = \frac{\Delta R}{R \cdot q}, \frac{M^2}{H}$	$0.384 \pi_{\text{из}} \left(\frac{a}{h} \right)^2$	$0.517 \pi_{\text{из}} \left(\frac{a}{h} \right)^2$	$1.163 \pi_{\text{из}} \left(\frac{a}{h} \right)^2$	$1.229 \pi_{\text{из}} \left(\frac{a}{h} \right)^2$

Анализ значений тензочувствительности, представленных в таблице 9 показывает, что максимальной чувствительностью обладают тензорезисторы, расположенные на прямоугольной мембране. Однако видно, что бесконечно увеличивать соотношения сторон не имеет смысла, так как выигрыш в чувствительности при $c > 3$ минимален и технологически изготовление таких тензопреобразователей довольно затруднено.

Кроме этого, в работе [8] предложены новые варианты размещения тензорезисторов на прямоугольной мембране, предполагающие увеличение тензочувствительности датчиков за счет использования центра мембраны.

Следует также отметить работу [9], в которой показано, что тензочувствительность можно повысить не только традиционными способами размещения тензорезисторов в различных областях мембраны, но и, например, применяя специальное микропрофилирование периметра мембраны. При этом автор показывает, что тензочувствительность датчиков может увеличиться на порядок по сравнению с датчиками, имеющими традиционные круглые или квадратные мембраны.

3.5. Функция преобразования тензопреобразователей давления

В датчиках давления в большинстве случаев наибольшее распространение получило соединение четырех тензорезисторов в электрическую цепь – мост Уитстона (рис.33). Под действием давления в мосту Уитстона изменяется сопротивление всех четырех тензорезисторов, поэтому он является электрической цепью с четырьмя рабочими плечами.

Входной величиной является относительное изменение сопротивления плеч измерительной цепи $\varepsilon_{R1}, \varepsilon_{R2}, \varepsilon_{R3}, \varepsilon_{R4}$ за счет действия давления.

Выходной величиной является изменение напряжения $U_{\text{вых}}$.

Выходной сигнал, величина которого зависит от прикладываемого давления, зависит от функции преобразования электрической цепи $S_{\text{ц}}$:

$$U_{\text{вых}} = S_y S_{R_i} \cdot \quad (83)$$

В мостовой цепи с четырьмя рабочими плечами под действием давления, как правило, R_1 и R_2 увеличивают свое значение на $R_1 \cdot \varepsilon_1$ и $R_4 \cdot \varepsilon_4$, соответ-

ственно, а сопротивления R_2 и R_3 уменьшаются на $R_2 \cdot \varepsilon_2$ и $R_3 \cdot \varepsilon_3$, тогда величина выходного сигнала

$$U_{\text{вых}} = U \frac{R_1(1 + \varepsilon_1)R_4(1 + \varepsilon_4) - R_2(1 - \varepsilon_2)R_3(1 - \varepsilon_3)}{[R_1(1 + \varepsilon_1) + R_2(1 - \varepsilon_2)][R_3(1 - \varepsilon_3) + R_4(1 + \varepsilon_4)]}. \quad (84)$$

Выполняя деление числителя и знаменателя на $R_2 \cdot R_4$, после некоторых преобразований получаем

$$U_{\text{вых}} = U \frac{k(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_1\varepsilon_4 - \varepsilon_2\varepsilon_3)}{(k+1)(k+1+k\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - k\varepsilon_3 + \varepsilon_4) + (k\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_4 - k\varepsilon_3)}, \quad (85)$$

где $k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$.

Обычно $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 \ll 1$, тогда, пренебрегая слагаемыми уравнения второго порядка малости, выражение (85) можно представить следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{num}} k}{k+1} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4). \quad (86)$$

Обычно в датчиках давления все четыре тензорезистора равны по величине, то есть $k = 1$, тогда

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{num}} k}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4). \quad (87)$$

Оценим порядок входного напряжения датчиков давления. Как правило $U_{\text{num}} = 3 \div 10$ В, а ε_R не превышает 0.01, тогда из (87) получим следующее (при $U_{\text{num}} = 5$ В):

$$U_{\text{вых}} = (5/4)4 \cdot 0.001 = 0.005 \text{ В} = 5 \text{ мВ}.$$

Действительно, выходное напряжение датчиков давления без схем усиления сигнала лежит в пределах $10 \div 100$ мВ в зависимости от геометрических размеров мембран датчиков и величины воздействующего давления.

3.6. Примеры интегральных преобразователей давления

3.6.1. Интегральные тензопреобразователи, изготавливаемые в НИИ МВС ТРТУ

В НИИ МВС ТРТУ, по заказам промышленных предприятий авиационной, химической и газовой отраслей, выпускаются небольшие партии датчиков давления в диапазоне 0-0.1, 0-1, 0-1.5 МПа [10,11].

Конструкция датчика включает интегральный чувствительный элемент, представляющий собой тонкую квадратную кремниевую мембрану с размером стороны от 1 до 4 мм и толщиной $h = 20 - 150$ мкм с изготовленными на ней диффузионными тензорезисторами, включенными в мостовую схему Уитстона. Мембрана обрамлена массивным основанием, представляющим с ней единый монокристалл. Последние разработки, предназначенные для измерения давления газовых сред в диапазоне 0-1000, 0-10000 Па, включают в

себя, кроме конструкции интегрального тензочувствительного элемента, конструкцию полупроводникового терморезистора или диода для контроля температуры.

В качестве исходного материала при изготовлении чувствительного элемента используется кремниевая пластина КЭФ- 4,5 диаметром 76 мм, имеющая кристаллографическую ориентацию (100). Технологический процесс изготовления интегрального чувствительного элемента включает следующие основные операции: длительное окисление с достижением толщин окисла 1,8- 2,2 мкм, двухстороннее совмещение изображений элементов на обеих сторонах исходной пластины и анизотропное травление, необходимое для формирования мембраны чувствительного элемента и нужного расположения тензорезисторов на кристалле, а также операцию нанесения металлизации (алюминий-ванадий-медь) на нерабочую сторону кристалла для последующей сборки кристалла в корпус.

Закрепление кристалла на коваровом кристаллодержателе осуществляется пайкой либо приклеиванием вакуумированным клеем (К-400, ВК-9). Разводка внутренних выводов датчика осуществляется с помощью ультразвуковой сварки либо пайкой микропаяльником к контактным площадкам переходной платы. Для защиты от загрязнений рабочая поверхность кристалла покрывается эластичным кремнийорганическим компаундом.

Конструкция корпуса датчика зависит от требований заказчика, характеризуется простотой сборки и достаточной прочностью в заданном диапазоне давлений и температур.

Принцип действия датчика заключается в изменении электрического сопротивления тензорезисторов при деформации мембраны под воздействием давления жидкой или газовой среды. Изменение сопротивления тензорезисторов приводит к появлению выходного напряжения разбаланса, пропорционального измеряемому давлению.

Для уменьшения температурной погрешности измерения давления предусмотрена пассивная схема термокомпенсации, состоящая из нескольких внешних стабильных резисторов, снижающих температурный дрейф нуля выходного напряжения в 6 - 10 раз.

На рис.34 представлены экспериментальные результаты по тензочувствительности S_0 датчиков давления, изготовленных в НИИ МВС для трех типоразмеров квадратных мембран с расположенными на них точечными тензорезисторами р-типа, ориентированными вдоль направления [110]. Экспериментальные точки неплохо укладываются на кривую 1, описываемую следующим уравнением:

$$S_0 = 0.0055 \pi_{44} (a/h)^{5/2}. \quad (88)$$

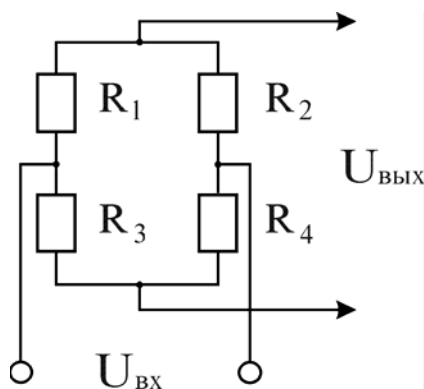


Рис.33. Схема моста Уитстона

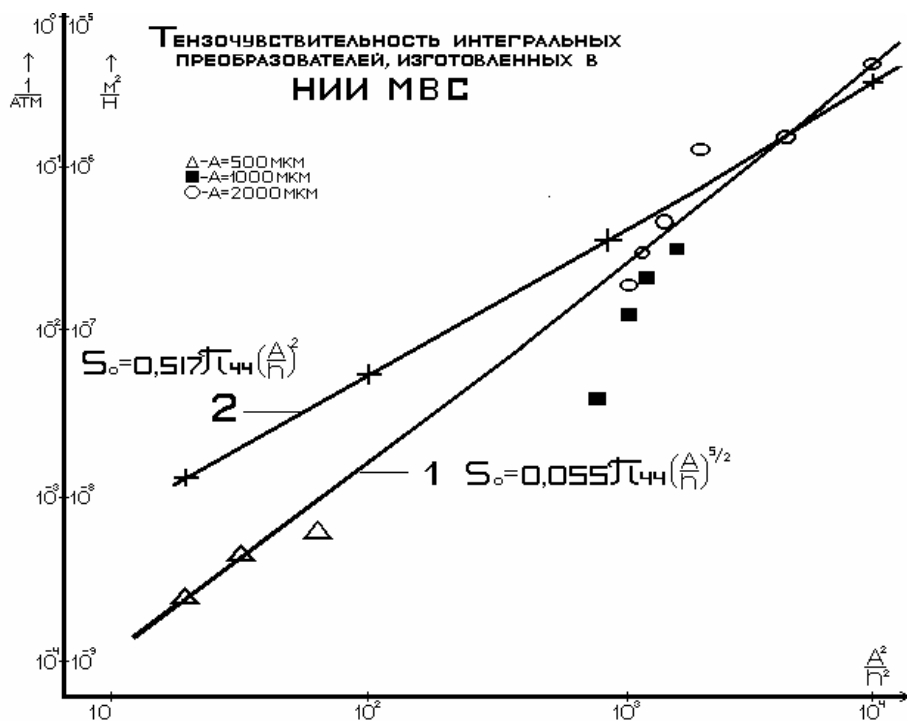


Рис.34. Тензочувствительность интегральных преобразователей, изготовленных в НИИ МВС ТРТУ.

Видно, что обнаруженная зависимость отличается от теоретической зависимости тензочувствительности, полученной в [6] - кривая 2. Отличие в характеристиках объясняется, видимо, технологическими и конструктивными особенностями производства тензопреобразователей.

Датчики давления, изготавливаемые в ТРТУ, как правило, имеют следующие характеристики:

- чувствительность (в зависимости от отношения h^2/a^2) от 5 мкВ/В·Па до 5 мВ/В·МПа;
- напряжение питания 3-9 В;
- температурный дрейф нуля выходного напряжения,
без схемы термокомпенсации 0.2%/°С;
со схемой термокомпенсации 0.03 %/°С;
- температурный коэффициент чувствительности 0.02 %/°С.

3.6.2. Интегральные преобразователи давления с профилированной мембраной фирмы ENDEVCO

Фирма ENDEVCO (США) серийно выпускает диффузионные тензорезисторные преобразователи давления в нескольких конструктивных вариантах [6]. Принципиальным отличием чувствительных элементов преобразователей ENDEVCO является то, что вместо однородной по толщине мембраны в них использованы специальным образом профилированные мембраны с концентраторами механических напряжений в месте расположения тензорезисторов. Это позволяет получить более высокую чувствительность при сохранении собственной резонансной частоты либо увеличить резонансную частоту при сохранении чувствительности. Кроме того, это значительно увеличивает прочность мембраны.

Принцип устройства такого чувствительного элемента на примере мембранного преобразователя давления иллюстрируется на рис. 35. Жесткий центр мембраны, состоящей из двух островков пластины исходной толщины, сформирован анизотропным травлением. Узкая полоска между двумя островками и полоска между островком и «берегом» - толстым кольцевым основанием мембраны - являются концентраторами механических напряжений, возникающих при воздействии избыточного давления. Следует отметить, что напряжения, возникающие в центральной и боковых полосках, имеют разные знаки. Если расположить два тензорезистора в центре, а два других – с краю полоски так, как показано на рис. 35, то с их помощью можно образовать полную мостовую тензорезисторную схему. В преобразователях ENDEVCO плоскость мембраны ориентирована в плоскости (100), а направление полосок – концентраторов и продольной оси тензорезисторов соответствует направлению $\langle 110 \rangle$. В мостовую схему тензорезисторы объединяются с помощью металлизированных токоведущих дорожек (не показано на рисунке), которые выходят на периферию кристалла к контактным площадкам.

Кроме указанных выше преимуществ, преобразователи с концентраторами напряжений обладают лучшей линейностью и существенно большим диапазоном линейного преобразования по сравнению с преобразователями на основе плоских мембран.

3.6.3. X-ducer фирмы Motorola

Фирма Motorola выпускает датчики абсолютного, относительного, дифференциального давлений серии MPX [12].

В основе чувствительных элементов фирма "Motorola" использует так называемый X-ducer (рис. 36). В отличие от стандартных датчиков давления, которые используют четыре близко расположенных резистора в конфигурации моста Уитстона, в датчиках серии MPX используется только одиночный пьезорезистивный элемент, полученный ионным легированием, расположенный на кремниевой мембране и имеющий X-образную форму.

Напряжение питания (ток питания) подается на X-ducer на ответвления 1 и 3. При воздействии давления мембрана прогибается и в ответвлениях 2 и 4 возникает поперечное напряжение. X-ducer фирмы "Motorola" можно рассматривать как механический аналог датчика, основанного на эффекте Холла.

Преимущества X-ducer заключаются в следующем. Использование одиночного элемента позволяет исключить потребность в получении идентичных по своим параметрам четырех тензорезисторов для моста Уитстона. Это же самое значительно упрощает схему температурной компенсации чувствительности и температурной компенсации дрейфа нуля. Фирма Motorola для температурной компенсации использует напыленные вакуумным способом пленочные резисторы, которые подстраивают лазером для получения необходимых характеристик датчика давления. При этом в температурном диапазоне 0 - 80 °С погрешность измерения давления обеспечивается в пределах $\pm 1\%$ и $\pm 2\%$ в температурном диапазоне $-50 \div +125^\circ \text{C}$. Недостатком датчиков давления серии MPX является невозможность их использования для измерения жидких сред.

Кристалл датчика давления серии MPX расположен на кремниевом кристаллодержателе, который приклеен к корпусу датчика. Внутренняя полость заполнена кремнийорганической жидкостью - компаундом. Пластмассовый корпус закрыт крышкой из нержавеющей стали. В корпус впресованы внешние выводы, которые с помощью золотых проволочек соединяются с выводами 1-4 кристалла датчика давления.

Датчики давления фирмы Motorola выходят готовыми к эксплуатации и не требуют дополнительных схем термокомпенсации.

3.6.4. Датчик давления типа MBS фирмы Danfoss

В чувствительном элементе датчика давления типа MBS фирмы DANFOSS используется прямоугольная мембрана (рис.37) [13].

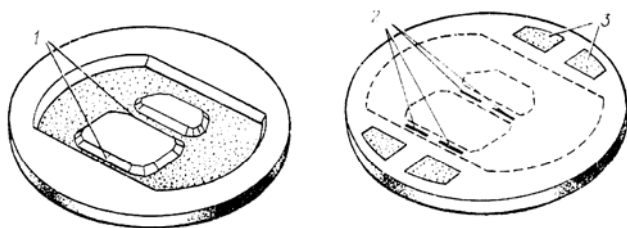


Рис.35. Принцип устройства чувствительного элемента преобразователей ENDEVCO: 1- области расположения тензорезисторов с обратной (планарной) стороны пластины; 2- тензорезисторы; 3- контактные площадки

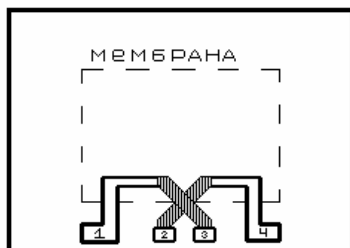


Рис.36. Схема X-ducer

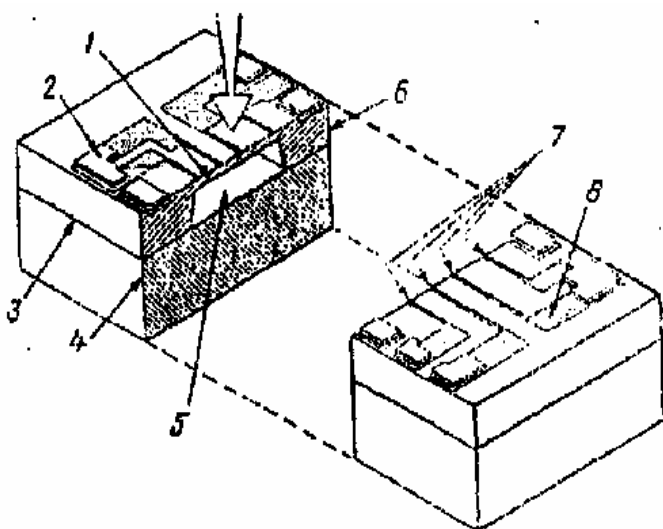


Рис.37. Датчик давления типа MBS фирмы DANFOSS

На рабочей стороне кремниевого кристалла (6) сформирована прямоугольная диафрагма (1) с четырьмя одинаковыми резисторами (7), расположенными на её поверхности и включенными в мост Уитстона. Тензорезисторы имеют абсолютно одинаковую форму в виде длинного прямоугольника, что позволяет максимально снизить температурный дрейф нулевого сигнала при изменении напряжения питания и воздействия давления, заставляющего мембрану изменять свою форму, возникающий пьезоэлектрический эффект вызовет изменение сопротивления четырех резисторов моста, и сигнал на его выходе, пропорциональный давлению, будет возрастать.

Кремниевый чип закреплен (3) на стеклянном основании (4). Золотые провода приварены к контактным площадкам (2, 8) чипа и к внутренним проводам, которые проведены через стеклянные уплотнения от схемы компенсации и усиления.

Для защиты кремниевого чипа от окружающей среды он заключен в диафрагму из нержавеющей стали, которая приварена к сенсорному элементу методом лазерной сварки. Для передачи давления среды от диафрагмы на мембрану используется силиконовое масло (5). Для предотвращения возникновения пузырьков воздуха масло заливается при температуре 100°C в условиях вакуума. После заливки проводится герметизация. Датчик давления располагается в пластмассовом корпусе и закрыт крышкой из нержавеющей стали.

4. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГАЗОВ

4.1. Адсорбция на поверхности твердых тел

При помещении полупроводника в газовую среду на его поверхности происходит адсорбция, т.е. газовые молекулы ударяются о поверхность твердого тела и прилипают к ней. В таком состоянии они проводят некоторое время, затем отрываются от поверхности и возвращаются обратно в газовую среду. Это явление называется десорбцией. Таким образом, газовая молекула проводит какое-то время в адсорбированном состоянии на поверхности твердого тела, а значит, твердое тело всегда удерживает на своей поверхности некоторое количество молекул газа. Тело, на котором происходит адсорбция, называется адсорбентом. Адсорбируемое вещество называется адсорбатом, а адсорбированное - адсорбтивом.

В зависимости от природы сил, удерживающих адсорбированную молекулу на поверхности адсорбента, различают физическую адсорбцию и химическую адсорбцию (так называемую хемосорбцию) [1].

В случае физической адсорбции - это силы той же природы, что и силы, действующие между молекулами в газе (так называемые силы Ван дер Ваальса). При хемосорбции - это силы химической природы, действующие между атомами в молекуле (так называемые обменные силы).

Хемосорбция отличается от физической адсорбции рядом признаков. Прежде всего при физической адсорбции расстояние между адсорбирован-

ной частицей и поверхностью больше, чем при хемосорбции, когда адсорбированную частицу можно представлять себе вдавленной в поверхность. Во-вторых, при хемосорбции частица привязана к поверхности прочнее, чем при физической адсорбции. Наконец, при физической адсорбции скорость адсорбции тем меньше, чем выше температура, в то время как при хемосорбции скорость адсорбции чрезвычайно быстро возрастает с увеличением температуры. Если через dN/dt , где dN - число молекул, адсорбированных единицей поверхности, а dt - временной интервал, обозначить скорость адсорбции, то в случае хемосорбции

$$dN/dt = \alpha \cdot \exp(-E/kT),$$

где α - коэффициент, медленно убывающий с температурой, а E - энергия активации адсорбции, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. Адсорбцию, подчиняющуюся этому закону, называют активированной адсорбцией.

Процесс адсорбции заканчивается тогда, когда количество молекул, адсорбированных на данной поверхности за данный промежуток времени, становится равным количеству молекул, десорбированных за тот же промежуток времени с той же поверхности. При этом наступает равновесие между поверхностью и газом (адсорбционное равновесие), характеризующееся определенной степенью заполнения поверхности газовыми молекулами. Эта степень заполнения поверхности, т. е. число молекул, удерживаемых поверхностью при установившемся адсорбционном равновесии, зависит прежде всего от температуры и от давления. При заданном давлении оно уменьшается при увеличении температуры, а при заданной температуре увеличивается с увеличением давления. Зависимость заполнения от давления (при заданной температуре) называется изотермой адсорбции [1]. Такие изотермы адсорбции схематически изображены на рис. 38. Здесь N - число молекул, адсорбированных на единице поверхности в условиях адсорбционного равновесия, а P - давление в газовой фазе. Кривые 1 и 2 на рис. 38 относятся к двум различным температурам, кривая 2 соответствует более высокой температуре, чем кривая 1. Видно, что заполнение на поверхности сначала возрастает с увеличением давления, а затем, когда давление становится достаточно большим, достигает насыщения.

Максимальное число молекул, способных удерживаться на поверхности при заданной температуре, т. е. число молекул, соответствующих горизонтальному участку изотермы, характеризует адсорбционную способность поверхности. Одна и та же поверхность обладает различной адсорбционной способностью по отношению к молекулам различного газа. Адсорбционная способность поверхности - это ее емкость по отношению к газовым молекулам. Адсорбционная способность поверхности зависит от природы и от обработки поверхности и может быть изменена путем тех или иных внешних воздействий на адсорбент. При этом поверхность чувствительна к изменению состава адсорбента, например, введение примесей внутрь адсорбента влияет на адсорбционную способность его поверхности, некоторые примеси заметно

увеличивают адсорбционную способность, другие ее уменьшают. Адсорбционная способность иногда резко изменяется при освещении адсорбента. Это - так называемый фотоадсорбционный эффект.

Иногда хемосорбция бывает необратимой, это значит, что количество молекул, адсорбированных на поверхности под влиянием освещения, не уменьшается при выключении освещения. Для того, что бы их снять, необходимо повысить температуру тела.

При ударе о поверхность, т. е. в самом акте адсорбции, молекула часто раскалывается на части, так что на поверхности оказываются не сами молекулы газа, а их части. Молекулы или их части, адсорбированные на поверхности, могут соединяться друг с другом в новых комбинациях, образуя новые молекулы. Таким образом, из газа на поверхность попадают одни молекулы, а с поверхности в газ уходят другие, постепенно изменяется состав газа, происходит его химическое превращение.

Адсорбированные молекулы обладают иными свойствами, чем те же молекулы в свободном состоянии. Молекулы, не взаимодействующие друг с другом в свободном состоянии, часто вступают во взаимодействие, когда они находятся в адсорбированном состоянии. Таким образом, поверхность твердого тела является катализатором химических реакций [1].

4.1.1. Роль электронов и дырок при адсорбции

При движении в полупроводнике электроны и дырки выходят на его поверхность, где встречаются с адсорбированными молекулами газа. При этом адсорбированные молекулы и атомы играют ту же роль, что и примесные атомы, т.е. они захватывают свободные электроны и дырки.

Подобно объемной примеси, адсорбированные атомы и молекулы могут выполнять функции акцепторов или доноров. Так, например, адсорбированные атомы или молекулы кислорода или хлора являются типичными акцепторами. Угледородные молекулы (например, C_2H_4) могут служить примером доноров. В роли доноров выступают, как правило, и атомы водорода.

Адсорбированная молекула (или атом), которая захватила электрон или дырку, оказывается электрически заряженной. Чем больше в полупроводнике электронов или дырок, тем большая доля всех адсорбированных частиц будет находиться в заряженном состоянии, в результате поверхность полупроводника заряжается. При адсорбции акцепторов поверхность заряжается отрицательно, при адсорбции доноров – положительно, т. е. знак поверхностного заряда, образующегося при адсорбции, зависит от природы адсорбирующихся частиц.

Таким образом, в каждый момент времени некоторая доля адсорбированных частиц находится в заряженном состоянии (каждая адсорбированная частица за время жизни в адсорбированном состоянии определенную долю времени проводит в заряженном состоянии). Иначе говоря, всегда существует некоторая вероятность того, что нейтральная адсорбированная частица делается заряженной, а заряженная, наоборот, нейтрализуется. Переход ад-

сорбированной частицы из нейтрального состояния в заряженное и обратно свидетельствует о локализации и делокализации свободного электрона или дырки на адсорбированной частице [1].

Электрон или дырка, захваченные адсорбированной частицей, нарушают характер ее связи с поверхностью - эта связь упрочняется, адсорбированная молекула в заряженном состоянии прочнее привязана к поверхности, чем в электрически нейтральном. Такой молекуле, прежде чем уйти в газовую фазу, надо передать полупроводнику ее электрон или дырку, что требует затраты некоторой энергии.

Различают два типа связи адсорбированной частицы с поверхностью, которые условно называются *слабой* и *прочной связью* [1]. В случае слабой связи свободные электроны и дырки полупроводника не принимают участия в связи. Связь осуществляется в этом случае собственными электронами, принадлежащими адсорбированной молекуле (атому), или собственными электронами, принадлежащими атому кристаллической решетки полупроводника. Эти электроны затягиваются в большей или меньшей степени с адсорбированной частицы в решетку или с решетки на адсорбированную частицу, чем и осуществляется связь. В случае прочной связи в нее вовлекается свободный электрон или дырка полупроводника, пойманные адсорбированной частицей.

Слабая связь является электрически нейтральной, прочная — электрически заряженной. Средняя прочность связи адсорбированной частицы с поверхностью определяется относительным содержанием на поверхности слабой и прочной форм или, иначе говоря, относительной вероятностью пребывания частицы в состоянии слабой или прочной связи. От этого зависит адсорбционная способность поверхности. В свою очередь относительное содержание слабой и прочной форм определяется концентрацией свободных электронов и дырок на поверхности полупроводника. Таким образом, свободные электроны и дырки полупроводника управляют его адсорбционными свойствами.

Адсорбционная способность поверхности по отношению к акцепторным молекулам тем больше, а по отношению к донорным тем меньше, чем больше концентрация свободных электронов (или, чем меньше концентрация свободных дырок) в плоскости поверхности. Говоря о поверхности полупроводника, мы имели дело до сих пор с идеализированной картиной. Мы представляли себе эту поверхность как плоскость со строго периодической структурой. Реальная поверхность отличается от идеальной наличием нарушений ее периодической структуры. Такая поверхность содержит ступеньки, пики, атомы, выброшенные из узлов кристаллической решетки на поверхность, вакансии, и другие макро- и микродефекты структуры. Они служат местами для адсорбции газовых молекул: адсорбция происходит преимущественно на этих дефектах, которые называются *центрами адсорбции*, или *адсорбционными центрами*. На таких центрах, как и на идеальной поверхности, адсорбция может идти с участием или без участия свободных электронов и дырок

(прочная и слабая связь). Очевидно, природа и концентрация адсорбционных центров на поверхности зависит от «биографии» поверхности, т. е. от той обработки, которой она подвергалась [1].

Таким образом, дефекты поверхности, в частности поверхностные примеси, играют при адсорбции двойную роль. С одной стороны, ими регулируется концентрация свободных электронов и дырок, которой, в свою очередь, регулируются адсорбционные свойства поверхности. С другой стороны, поверхностные дефекты сами по себе могут выступать в роли центров адсорбции.

4.1.2. Взаимодействие поверхности с объемом

Как известно, на выведение электрона из полупроводника надо затратить некоторую энергию, называемую *работой выхода* электрона. Полупроводник могут покинуть только те электроны, которые обладают достаточным для этого запасом энергии. Испускание электронов полупроводником называется эмиссией.

Такая эмиссия может быть вызвана, прежде всего, нагреванием полупроводника до достаточно высокой температуры. Это — *термоэлектронная эмиссия*, или так называемый *эффект Ричардсона*.

Эмиссия электронов может быть вызвана также освещением полупроводника (*фотоэлектронная эмиссия*, или *внешний фотоэлектрический эффект*). В этом случае энергия электронов увеличивается за счет энергии поглощенного света.

Бомбардируя полупроводник быстрыми частицами (ионами или электронами), можно также вызвать эмиссию электронов (*вторичная электронная эмиссия*), при этом бомбардирующие частицы передают свою энергию электронам полупроводника.

Наконец, эмиссия электронов может быть вызвана достаточно сильным внешним электрическим полем, способным извлечь электрон из полупроводника. В этом случае говорят о *холодной эмиссии*.

Работа выхода электрона в полупроводнике может измениться под влиянием адсорбции. Заряд поверхности, возникающий при адсорбции в зависимости от знака (т. е. от природы адсорбирующегося газа), может облегчить или затруднить выход электрона из полупроводника. Если поверхность заряжена отрицательно, то работа выхода возрастает, если положительно — снижается [1].

Так, например, адсорбция кислорода (акцептор, отрицательное зарядение поверхности) всегда вызывает возрастание работы выхода. Адсорбция водорода (донор, положительное зарядение поверхности) приводит, наоборот, к снижению работы выхода.

По тому, как изменяется работа выхода под влиянием адсорбции можно судить о составе газовой фазы. Чем больше давление газа, тем больше адсорбируется молекул на поверхности полупроводника и тем сильнее влияние газовой среды на работу выхода.

Влияние газовых молекул, адсорбированных на поверхности, проникает достаточно глубоко внутрь полупроводника. Пример этого — влияние адсорбции на проводимость полупроводника. Если при адсорбции поверхность полупроводника заряжается положительно, то вблизи поверхности увеличивается концентрация свободных электронов. При этом увеличивается электронная проводимость приповерхностной области, что может отразиться на проводимости всего образца в целом. Если же поверхность при адсорбции заряжается отрицательно, то это приводит к обогащению приповерхностного слоя дырками, т. е. к увеличению дырочной проводимости.

Таким образом, адсорбция вызывает увеличение или уменьшение проводимости полупроводника в зависимости от того, *какой газ* (акцепторный или донорный) адсорбируется и на *каком полупроводнике* (электронном или дырочном). Так, адсорбция кислорода на окиси цинка (электронный полупроводник) всегда снижает проводимость, в то время как проводимость окиси никеля (дырочный полупроводник) в результате адсорбции кислорода всегда возрастает. Водород обычно оказывает противоположное влияние, т.к. газовые молекулы, адсорбированные на поверхности, действуют подобно атомам примеси, введенным внутрь кристалла: или обедняют, или обогащают полупроводник носителями заряда.

Необходимо отметить, что адсорбционная способность поверхности оказывается чувствительной не только к примесям, размещенным на поверхности, но и к тому, какие примеси и в каких концентрациях внедрены в глубину полупроводника. Вводя небольшое количество примеси в полупроводник, можно изменить во много раз адсорбционную способность его поверхности, поскольку она зависит, при прочих равных условиях, от концентрации свободных электронов и свободных дырок в полупроводнике. В то же время концентрация свободных электронов и дырок регулируется примесью, содержащейся в полупроводнике. Таким образом, примесь, размещенная в полупроводнике, управляет адсорбционными свойствами его поверхности через коллектив свободных электронов и дырок.

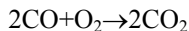
4.1.3. Химические реакции на поверхности полупроводников

Рассмотрим полупроводник, помещенный в газовую среду, представляющую собой смесь разных газов, т. е. смесь молекул различных сортов [1]. Предположим, что в этой газовой среде протекает некая химическая реакция, в результате которой некоторые молекулы исчезают, а вместо них возникают новые молекулы. Вещества, вступающие в реакцию, называются *реагентами*, а вещество, возникающее в результате реакции, — *продуктом реакции*. Количество продукта, возникающего за единицу времени, характеризует *скорость реакции*.

Когда в среду реагирующих газов помещено твердое тело (полупроводник), газовые молекулы адсорбируются на его поверхности и вступают в реакции с другими адсорбированными молекулами или с молекулами, налетающими из газовой фазы. Таким образом, реакция переносится из газовой

фазы на поверхность твердого тела. При этом скорость реакции изменяется. В некоторых случаях она увеличивается. Таким образом, полупроводник выступает в роли катализатора (ускорителя) реакции. В некоторых случаях реакция ускоряется в тысячи раз.

Так, например, реакция окисления угарного газа



в газовой фазе идет очень медленно. При внесении в эту смесь двуокиси марганца MnO_2 или окиси серебра Ag_2O , скорость реакции резко возрастает. Двуокись марганца или окись серебра оказываются для этой реакции катализаторами.

Относительное увеличение скорости реакции, вызываемое катализатором, характеризует так называемую *активность катализатора*. Катализатор, активный в отношении данной реакции, может оказаться неактивным по отношению к другой. Активность катализатора зависит от ряда условий. В частности, от примесей, введенных внутрь катализатора или адсорбированных на его поверхности. Некоторые примеси увеличивают активность, такие примеси называются *промоторами*. В некоторых случаях примесь может затормозить каталитическую реакцию, такая примесь называется *ядом*. Активность катализатора всегда возрастает при увеличении температуры.

Вопросы о механизмах каталитического действия полупроводников и роли свободных электронов и дырок в каталитических реакциях, протекающих на их поверхности, рассматриваются в электронной теории хемосорбции и катализа.

Во всякой молекуле отдельные атомы или отдельные группы атомов соединены друг с другом так называемыми *валентными связями*. Структурные формулы для некоторых простых молекул представлены на рис. 39. В молекуле воды H_2O (рис. 39, а) каждый из двух атомов водорода связан с атомом кислорода, т. е. каждый атом водорода одновалентен, а атом кислорода двухвалентен. То же самое имеет место в молекуле перекиси водорода H_2O_2 , изображенной на рис. 39, б. В молекуле этилена C_2H_2 (рис. 39, в) каждый атом углерода С связан одновалентными связями с двумя атомами водорода Н и двухвалентной связью с другим атомом С, т. е. атомы С в молекуле этилена четырехвалентны. Так же обстоит дело и в молекуле CO_2 , в которой атом С связан с двумя атомами кислорода О, каждый из которых двухвалентен. Некоторые атомы могут обладать *переменной валентностью*, т. е., входя в состав различных молекул, могут иметь различную валентность. Так, атом С четырехвалентен в молекуле C_2H_4 или CO_2 , а в молекуле СО атом С двухвалентен (рис. 39, д).

Валентность любого атома стремится к насыщению, т.е. ненасыщенная связь всегда стремится насытиться за счет другой такой же ненасыщенной связи. В любой устойчивой молекуле все валентные связи всегда насыщены, т. е. нигде не обрываются. Если валентно-насыщенную молекулу разорвать на две части, то получим две молекулы с ненасыщенными (свободными) ва-

лентностями. Такие молекулы называются *радикалами*. Пример радикала (так называемый гидроксил OH), получающегося в результате отрыва атома H от молекулы H_2O , изображен на рис. 39, *е*. Молекула с одной ненасыщенной валентностью (пример — гидроксил) называется *монорадикалом*, с двумя ненасыщенными валентностями — *бирадикалом*, со многими — *полирадикалом*. Очевидно, молекула, находящаяся в радикальном состоянии, всегда более реакционноспособна, т. е. с большей легкостью вступает в химическое соединение, чем валентно-насыщенная молекула. С точки зрения электронной теории катализа действие полупроводника как катализатора заключается в том, что газовые молекулы, оставаясь в газовой фазе валентно-насыщенными, садясь на поверхность полупроводника, превращаются (частично) в радикалы.

Это действие полупроводника обусловлено тем, что каждый кристалл полупроводника может рассматриваться как большая молекула (макромолекула), обладающая при этом свободными (ненасыщенными) валентностями [1]. Таким образом, сам полупроводник представляет собой своего рода *полирадикал*. Этим и обусловлено с точки зрения электронной теории его каталитическое действие. В роли свободных (ненасыщенных) валентностей катализатора выступают свободные электроны и дырки полупроводника.

Например, в кристалле каменной соли NaCl , состоящем из ионов Na^+ и Cl^- , свободный электрон представляет собой лишний электрон, захваченный на ион Na^+ и превращающий этот ион в нейтральный атом Na , свободная дырка — это дырка на ионе Cl^- , превращающая этот ион в нейтральный атом Cl . Ионы Na^+ и Cl^- обладают нулевой валентностью, в то время как атомы Na и Cl — одновалентны. Таким образом, свободный электрон и свободная дырка в кристалле играют роль свободной валентности, это имеет место и в случае более сложных кристаллов.

Рассматривая свободные электроны и дырки полупроводника как свободные валентности, мы можем приписать этим свободным валентностям следующие свойства. Они не локализованы, а могут свободно блуждать по полупроводнику, встречаться с адсорбированными на поверхности газовыми молекулами, разрывая валентные связи внутри этих молекул и насыщаясь за счет этих связей, превращая, таким образом, валентно-насыщенные молекулы в радикалы, а радикалы, наоборот, — в валентно-насыщенные образования.

Рассмотрим в качестве примера каталитическую реакцию окисления CO . Представим, что на поверхности полупроводника адсорбирован атом O , находящийся в состоянии прочной связи с поверхностью, т. е. привязанный к локализованному около него электрону. Такое состояние изображено на рис. 40, *а*. Мы имеем в данном случае поверхностный радикал (или, выражаясь точнее, *ионорадикал*), на ненасыщенную валентность которого может сесть молекула CO , пришедшая из газовой фазы. При этом у атома C раскрываются две дополнительные валентности (атом C становится четырехвалентным), и мы получаем поверхностное образование, изображенное на рис. 40, *б*, также представляющее собой ионорадикал. Достаточно теперь электрону, удерживающему атом O на поверхности, перейти на атом C , чтобы превратить это образование в молекулу CO_2 , которая улетит в газ. Таким образом, поверхностный радикал действует как катализатор, превращаясь в молекулу CO_2 и освобождаясь для повторения цикла.

живающему это образование, делокализоваться или аннигилировать с подошедшей дыркой - в газовую фазу уходит молекула CO_2 , являющаяся продуктом реакции (рис. 40, в). Согласно рис. 40, эту реакцию можно рассматривать состоящей из двух стадий, из которых первая (переход 1 на рис. 40) идет тем быстрее, чем больше на поверхности адсорбированных атомов кислорода (чем выше концентрация на поверхности свободных электронов). Скорость второй стадии (переход 2, рис. 40) тем больше, чем вероятнее аннигиляция локализованного электрона со свободной дыркой, т. е. чем больше концентрация свободных дырок. Мы видим на этом примере, что скорость реакции регулируется концентрацией свободных электронов и дырок на поверхности полупроводника.

Таким образом, процессы адсорбции молекул и атомов из газовой фазы на поверхности полупроводника приводят не только к изменению свойств газов, но и к изменению электрических свойств полупроводника, которые могут быть зарегистрированы измерительными приборами (изменение разности потенциалов, протекающего тока, сопротивления, емкости).

Очевидно, что анализируя изменение электрических свойств полупроводника можно делать заключение о параметрах газовой среды (состав, концентрация), т.е. конструировать полупроводниковые первичные преобразователи (или сенсоры) химического состава газов.

Сенсоры химического состава газов нашли применение в химической и электронной промышленности, машиностроении, авиационной и автомобильной технике, космонавтике, медико-биологических исследованиях и медицинской практике. Они используются в составе автономных измерительных приборов для определения концентрации газов в системах автоматического регулирования производственных процессов и оптимальной работы двигателей, автоматизированных систем управления технологическими процессами, промышленных работах, лечебно-диагностических комплексах и приборах бытового назначения [2].

Из большого разнообразия газовых датчиков по технологическим признакам можно выделить класс микроэлектронных, изготовление которых связано с применением технологии интегральных микросхем. Классификация таких датчиков представлена на рис. 41 [3, 4].

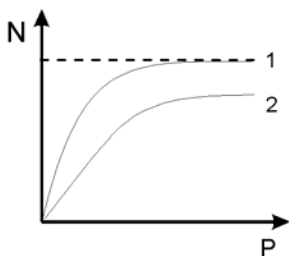


Рис. 38. Изотермы адсорбции для двух различных температур: 1 — T_1 ; 2 — T_2 ; $T_2 > T_1$

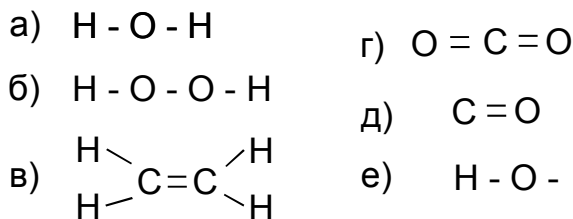


Рис. 39. Структурные формулы некоторых простых молекул: а — вода H_2O ; б — перекись водорода H_2O_2 ; в — этилен C_2H_4 ; г — двуокись углерода CO_2 ; д — окись углерода CO ; е — гидроксил OH

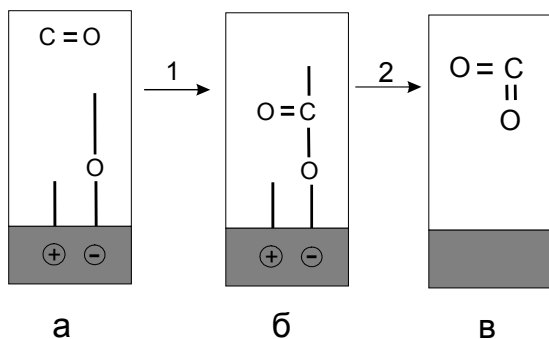


Рис. 40. Механизм окисления CO

4.2. Датчики на основе окислов металлов

В качестве чувствительных материалов применяют SnO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , WO_3 , Co_3O_4 . На поверхности этих полупроводников при хемосорбции кислорода локализуется отрицательный заряд, образованный захваченными электронами, что приводит к обеднению приповерхностной области полупроводника электронами и снижению его проводимости. Когда сорбируется другой анализируемый газ, каталитически взаимодействующий с хемосорбированным кислородом, проводимость приповерхностной области полупроводника увеличивается. Скорости этих процессов и их обратимость зависят от температуры, которая должна быть порядка нескольких сотен градусов [3,4].

Датчики изготавливаются методами тонко- и толстоплёночной технологии. На изолирующую подложку (ситалл, сапфир) напыляют платиновые контакты. Сверху наносят плёнку чувствительного материала в виде пасты, которую затем отжигают. На обратной стороне изолирующей подложки формируется тонкоплёночный резистивный нагреватель из платины. В зависимости от состава пленки чувствительного материала датчики реагируют на газы: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CO , CH_4 , H_2 , O_2 . Рабочая температура колеблется в диапазоне 273-773K [3, 4].

С помощью микроэлектронной технологии изготавливаются резистивные датчики этанола, конструкция которых представлена на рис 42.

После термического окисления кремния подложки осаждением из газовой фазы наносят поликремний, имплантированный фосфором. Далее химическим осаждением из газовой фазы наносят слой SiO_2 (1 мкм), а поверх него термическим распылением - тонкий слой SnO_x (100 нм). Пористый слой PdAu толщиной 2.5 нм служит для увеличения чувствительности датчика к $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. При введении в анализируемую среду 200 ppm $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ сопротивление датчика уменьшается в 140 раз [3, 4].

Кремниевый датчик другой конструкции, предназначенный для определения содержания CO , изготовлен по групповой технологии на пластине Si . Его структура представлена на рис. 43.

Используется анизотропное травление на всю толщину кремниевой подложки. Слои SiO_2 и SnO_2 нанесены магнетронным распылением. Время отклика датчика при введении 35000 ppm CO_2 составляет около 4 мин при 600K [3, 4].

4.3. Датчики на органических полупроводниках

В качестве чувствительных элементов используют плёнки фталоцианинов, обладающие высокой термической и химической стойкостью. Эти плёнки являются полупроводниками p-типа, большое влияние на их проводимость оказывает кислород воздуха. Проводимость плёнки меняется в присутствии газов, сродство к электрону у которых больше, чем у кислорода. К ним относятся галогены и галогеносодержащие газы, а также NO_2 , чувствительность

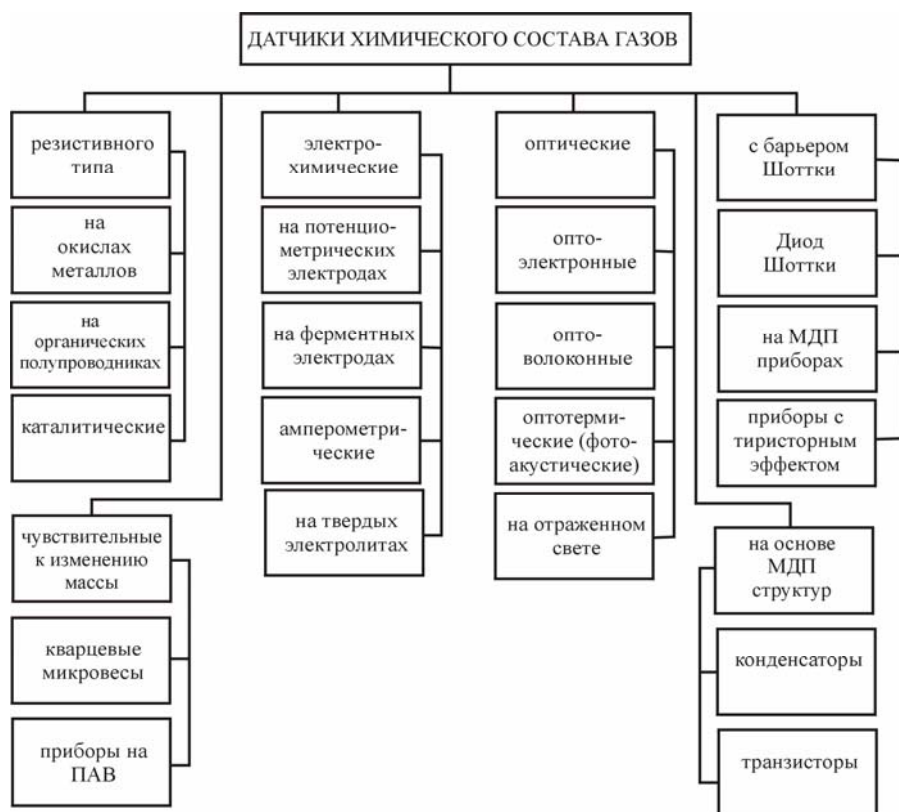


Рис.41. Классификация датчиков химического состава газа в соответствии с физико-химической природой процессов, происходящих в структуре датчика

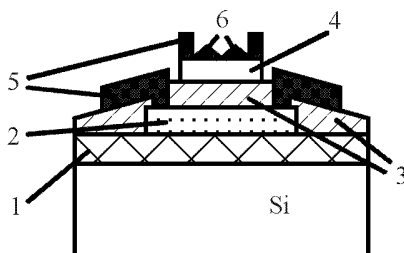


Рис.42. Резистивный датчик этанола: 1 — слой SiO_2 (1 мкм); 2 — поликремний; 3 — пиролитический SiO_2 (1 мкм); 4 — плёнка SnO_x ; 5 — контакты Al/Cr; 6 — островки PdAu

датчика увеличивается при легировании плёнок атомами тяжёлых металлов [4].

Для определения концентрации NH_3 применяют полипиррол, для смеси $\text{NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$ и Cl_2 используют плёнки тетразанулина. Для определения концентрации газообразного йода используют плёнки полипарафенилиназومتана.

4.4. Каталитические датчики

Каталитические датчики работают по принципу регистрации количества тепла, выделяющегося при протекании каталитических реакций на поверхности катализатора. В качестве термочувствительного параметра обычно используют изменение сопротивления плёнки самого катализатора либо тонкой платиновой проволоки, расположенной в непосредственной близости к его поверхности.

Основная трудность заключается в точности измерения малых изменений температуры в рабочей области. В одной из конструкций в качестве датчика температуры применяют биполярный транзистор (рис. 44) [4].

Исходным материалом служит пластина $\text{n}^+\text{-Si}$ с эпитаксиальным слоем n -типа толщиной 10 мкм, в которой изготавливают вертикальный биполярный транзистор. После этого формируют мезаструктуру диаметром 500 мкм. Слой SiO_2 (0.5 мкм) наносят методом химического осаждения из газовой фазы при $T=723\text{K}$, после чего выполняют металлическую разводку. Затем проводят анизотропное травление кремниевой подложки на всю толщину, через маску из золота (0.2 мкм) с подслоем хрома (0.2 мкм). В заключении напыляют тонкий (0.1 мкм) слой Al_2O_3 и катализатор (плёнка Pd толщиной 10-20 нм). Датчик характеризуется высокой чувствительностью к водороду [4].

Другой вариант каталитического датчика представлен на рис. 45.

На пластине кремния p -типа анизотропным травлением получена мембрана толщиной 25 мкм. Датчиком температуры служит конденсатор, на верхней обкладке которого (тонкий слой платины) происходит каталитическая реакция. Нижняя обкладка конденсатора изготовлена из легированного фосфором поликремния. Между обкладками размещён слой ZnO (1 мкм). На его поверхности за счёт пьезоэлектрического эффекта возникает заряд, величина которого зависит от температуры. Величина заряда регистрируется при помощи усилителя, выполненного по КМОП технологии и расположенного на одном кристалле с датчиком [4].

Резистивным нагревателем служит область $\text{p}^+\text{-типа}$, полученная диффузией бора в кремниевую подложку. Выходной сигнал датчика достигнет максимума за 15 сек при заполнении камеры чистым CO (99.99%).

4.5. Электрохимические газовые датчики

В основе работы этой группы датчиков лежат закономерности протекания электрического тока через электрическую цепь, основными элементами которой являются [4]:

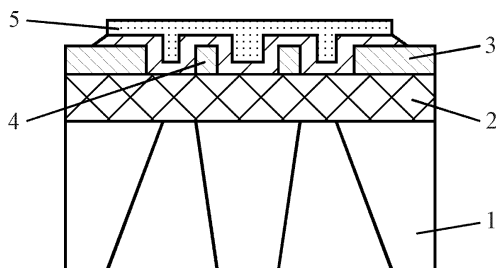


Рис.43. Датчик CO: 1 — Si жёсткая опора; 2 — пиролитический SiO_2 ; 3 — пленки Au/Mo; 4 — изолирующий слой; 5 — плёнка SnO_2

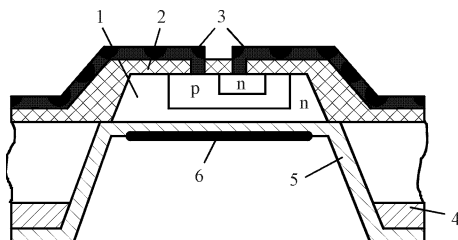


Рис.44. Структура резистивного каталитического датчика водорода: 1 — мезоструктура (биполярный транзистор); 2 — пиролитический SiO_2 ; 3 — алюминиевые контакты; 4 — металлическая маска (Au/Cr); 5 — Al_2O_3 ; 6 — катализатор

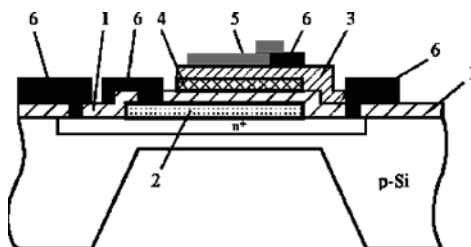


Рис.45. Структура каталитического датчика окиси углерода: 1 — слой SiO_2 ; 2 — поликремний; 3 — пиролитический SiO_2 ; 4 — слой ZnO ; 5 — катализатор; 6 — алюминиевые контакты

- 1) металлические или полупроводниковые наноселективные электроды;
- 2) проводники второго рода (растворы электролитов, их расплавы или твёрдые электролиты);
- 3) границы раздела фаз между металлами (полупроводниками) и электролитами, двумя различными проводниками первого рода, двумя различными электролитами.

Разновидностью электрохимической цепи является цепь, в которой два проводника второго рода разделены мембраной.

Датчики с ферментными электродами. Их работа основана на ферментативных реакциях, происходящих в слое фермента, отделяющего исследуемую среду от наноселективного электрода, с помощью которого регистрируются продукты ферментативной реакции.

Датчики с амперометрическими электродами. Величина тока электрохимической цепи такого датчика зависит от концентрации газа в исследуемой среде, проникающего через мембрану.

Амперометрический метод лежит в основе работы газовых датчиков на твёрдых электролитах, которые применяются для определения содержания кислорода и окислов серы. Электролитом служит двуокись циркония с добавками.

На рис.46 представлена типичная структура такого датчика, выполненного по совмещённой технологии. Подложкой служит пластина из сапфира с высоким сопротивлением (порядка 10^8 Ом·см). Электрод сравнения, который обеспечивает постоянное значение активности кислорода, изготовлен из смеси Ni/NiO или Pd/PdO и покрыт сверху защитным слоем, предотвращающим проникновение к нему исследуемой газовой смеси. Контакт последней с рабочими электродами из пористой толстой плёнки платины осуществляется через специальное отверстие в защитном покрытии. Поступающий газ диффундирует через пористый рабочий электрод к границе раздела рабочий электрод - твёрдый электролит, где происходит реакция диссоциации кислорода. Твёрдый электролит представляет собой стабилизированный иттрием или кальцием тонкий слой ZnO_2 . Рабочий электрод, изготовленный из кермета на основе платины (Pt/ Al_2O_3 , Pt/ $MgAl_2O_3$ и т.п.), имеет высокую стабильность и воспроизводимость характеристик. На обратной стороне сапфировой подложки формируют резистивный нагреватель из тонкой платиновой плёнки. На одной сапфировой пластине размером 76x76 мм может быть получено одновременно до 300 датчиков.

4.6. Датчики на основе МДП-структур

Исследования показали, что МДП-структуры, металлический электрод которых выполнен из переходных металлов (палладий, платина, никель) меняют свои характеристики под действием газов [4]. При этом в МДП-конденсаторах наблюдается сдвиг ВФХ вдоль оси напряжения без изменения её формы, а в МДП-транзисторах — изменение порогового напряжения и как следствие сдвиг ВАХ. Например, при введении в среду газообразного водо-

рода у МДП-структур с затворами из палладия на поверхности протекает каталитическая реакция диссоциации адсорбированных молекул водорода на атомы, которые затем растворяются в палладии и под действием градиента концентрации диффундируют к границе раздела Pd-SiO₂, где вследствие реакции $\text{H} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{e}^-$ образуется дипольный слой, ионы располагаются на активных центрах границы раздела Pd - SiO₂, а электроны остаются в палладии. Таким образом в диэлектрике появляется дополнительный заряд, который приводит к сдвигу ВФХ, изменению напряжения плоских зон и порогового напряжения.

Существует несколько конструкций датчиков химического состава на основе МДП-структур, некоторые из них приведены ниже.

Дифференциальный датчик водорода на МДП-транзисторе имеет вид, представленный на рис.47. На одном кристалле формируются два МДП-транзистора, отличающиеся лишь материалом металлического затвора, нагреватель и датчик температуры (полупроводниковый диод).

Слой SiO₂ получен термическим окислением, Si₃N₄ (50 нм) – осаждением из газовой фазы, слои платины (50 нм) и палладия (50 нм) напыляются через металлическую маску. Чтобы обеспечить нечувствительность одного из МДП-транзисторов к изменению концентрации водорода в среде, сверху палладия нанесён слой (1 мкм) металла, не поглощающего водород (Al, Ni, Cu, Au, Ag). На выходе дифференциальной схемы измеряется величина изменения порогового напряжения $\Delta U_{\text{пор}}$.

Другой конструкцией датчика химического состава является МДП-транзистор с сеточным (перфорированным) затвором, представленный на рис.48.

Диаметр пор в палладиевой плёнке 1.5-3.0 мкм. Слой окиси палладия формируется либо распылением палладия в атмосфере Ag+O₂, либо термическим окислением при температуре 473—673К. Для уменьшения водородной чувствительности приборов на слой палладия наносят тонкий слой Al. По сравнению с датчиками CO на основе SnO₂ резистора разработанные приборы имеют в 6 раз большую чувствительность в атмосфере CO/этанол, в 7 раз – CO/бутан и в 12 раз – CO/метан, однако они имеют низкую скорость отклика (1-2 мин).

Датчики, чувствительные к NH₃ и NO₂, могут быть изготовлены на основе МДП-транзистора с двухэлементным диэлектриком, верхний слой которого изготовлен из органически модифицированных силикатов. Для того, чтобы обеспечить доступ исследуемого газа к слою силиката, металлический затвор должен быть либо пористым (слой золота 10 нм), либо расщепленным (рис.49), либо зигзагообразным. Принцип действия датчика основан на изменении диэлектрической проницаемости силиката при адсорбции газов, следствием чего является сдвиг порогового напряжения МДП-транзистора.

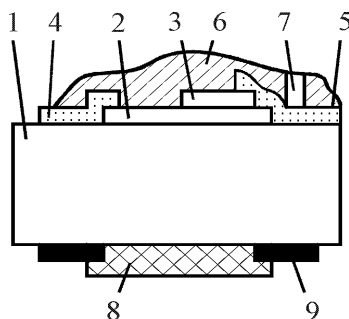


Рис.46. Датчик на твердом электролите: 1- сапфировая подложка; 2- твердый электролит; 3- электрод сравнения; 4 и 5- рабочие электроды; 6- защитное покрытие; 7- отверстие для подвода исследуемого газа; 8- нагреватель; 9- выводы нагревателя

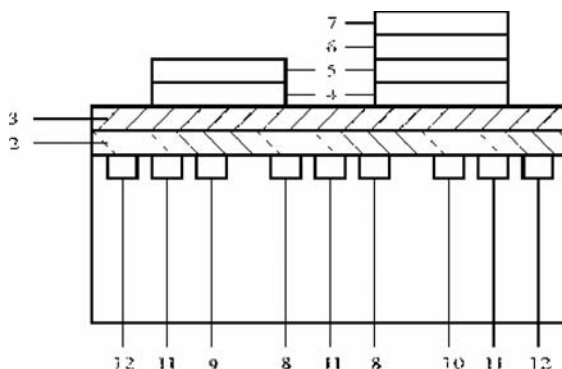


Рис.47. Дифференциальный датчик водорода на МДП-транзисторе: 1 — Si подложка; 2 — слой SiO_2 ; 3 — слой Si_3N_4 ; 4 — платина; 5 — палладий; 6 — медь; 7 — серебро; 8 — общий исток; 9 — сток первого МДП- транзистора; 10 — сток второго МДП-транзистора; 11 — охранные кольца; 12 — нагреватель

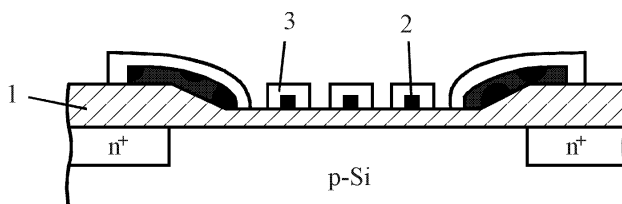


Рис.48. Датчик CO на основе МДП-транзистора с сеточным затвором: 1 — слой SiO_2 ; 2 — слой палладия; 3 — слой PdO

Если между двумя половинами расщеплённого затвора МДП-транзистора поместить резистивный слой (например, полимер), то получится прибор, называемый транзистором с растеканием заряда (charge-blow transistor). Такой датчик работает в динамическом режиме. При подаче напряжения затвор-исток сначала заряжается ёмкость под затвором, затем ёмкость под резистивным слоем. Постоянная времени заряда ёмкости под резистивным слоем зависит от сопротивления резистивной плёнки, толщины и длины резистивной части затвора, а также от диэлектрической проницаемости и толщины затворного диэлектрика. Обычно измеряют время задержки импульса тока, при приложении прямоугольных импульсов между затвором и истоком.

Существует конструкция газового датчика, у которого в качестве диэлектрика используется воздушный зазор (рис.50). Попадая в зазор между поверхностью полупроводника и поликремниевым затвором, газ может менять либо диэлектрическую проницаемость в зазоре, либо, адсорбируясь на поверхность подложки или поликремниевого затвора, формировать дипольный слой, что приводит к изменению порогового напряжения транзистора.

Данный прибор получил название "транзистор с доступом к поверхности" (surface-accessible transistor). Толщина поликремния должна быть не менее 1 мкм. Оптимальная глубина зазора 4 мкм получается травлением затворного окисла в буферном травителе.

Главным недостатком такого прибора является низкая селективность, т.е. реагирование на суммарное количество полярных газов в зазоре.

В другом варианте газового датчика с воздушным зазором применяют перфорированный (сетчатый) платиновый затвор, который для повышения чувствительности электролитически покрывают тонким слоем металла (палладий, свинец, цинк) либо полипиролла (рис.51).

Этот прибор называется "транзистор с подвешенным затвором" (suspended-gate transistor). Исследуемый газ проникает в полость под затвором и взаимодействует с его внутренней поверхностью, покрытой чувствительным слоем. В результате происходит изменение работы выхода материала затвора и сдвиг порогового напряжения. Такой прибор используется для регистрации паров спиртов и компаундов.

4.7. Газовые датчики с барьером Шотки

Газовые датчики на основе диодов Шотки (ДШ) с контактом из палладия появились одновременно с датчиками на основе МДП-структур [4]. Как известно, ВАХ ДШ описывается выражениями:

$$I = I_0 \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right),$$

$$I_0 = A^* T^2 \exp \left(- \frac{q\phi_s}{kT} \right),$$

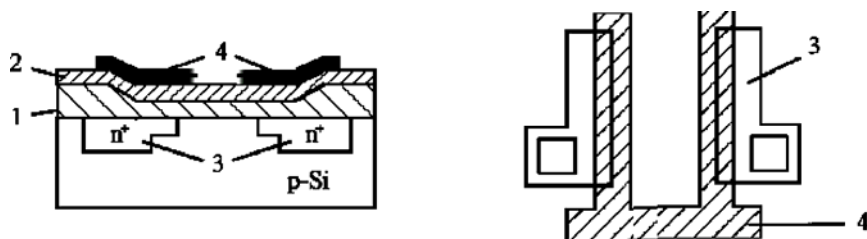


Рис.49. Структура и топология МДП-транзистора с расщеплённым затвором: 1 – SiO_2 ; 2 – силикат; 3 – сток (исток); 4 – затвор

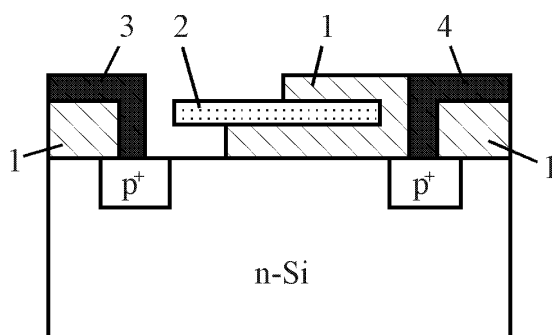


Рис.50. Газовый датчик с воздушным затвором: 1 – слой SiO_2 ; 2 – поликремний; 3, 4 – Al контакты

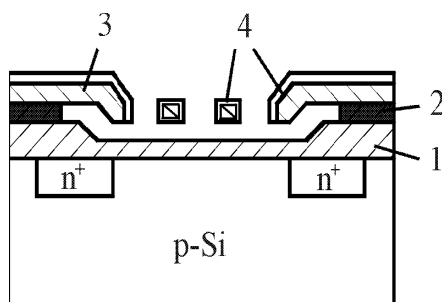


Рис.51. МДП-транзистор с сетчатым затвором: 1 – слой SiO_2 ; 2 – под-слой; 3 – платиновый затвор; 4 – чувствительное покрытие

где I - прямой ток, I_0 – ток насыщения, U - напряжение, q - заряд электрона, k - постоянная Больцмана, T - температура, A^* - постоянная Ричардсона, ϕ_b - высота барьера Шотки, т. е. ток ДШ экспоненциально зависит от высоты барьера Шотки. Этим объясняется высокая чувствительность датчиков на основе ДШ.

Водородная чувствительность газовых датчиков на основе ДШ определяется двумя механизмами:

- диффузией атомов водорода через металлический контакт из палладия (платины, золота) с образованием на границе раздела металл-полупроводник дипольного слоя, который влияет на высоту барьера Шотки;

- изменением заряда поверхностных состояний на границе раздела металл-полупроводник в присутствии водорода.

Так, изменением высоты барьера Шотки можно объяснить ВАХ ДШ при выдержке в водородосодержащей атмосфере (рис. 52).

К настоящему времени получены газочувствительные ДШ с палладиевыми контактами на таких полупроводниках, как CdS , ZnO , TiO_2 , InP , $GaAs$. При напылении на кремний палладий вступает в химическое взаимодействие с образованием силицида палладия, при этом пропадает водородная чувствительность структуры. Для предотвращения этого явления на поверхности Si необходимо вырастить туннельно тонкий слой SiO_2 (2-3 нм). Полученные таким образом МДП-диоды работают как ДШ. Вместо монокристаллического кремния можно использовать гидрогенизированный аморфный (α -Si:H). На стеклянную поверхность напыляют слой хрома (300нм), который служит обратным контактом. Далее пиролизическим разложением силана наносят α -Si:H n-типа (30нм) и нелегированный α -Si:H (0,6мкм), затем напыляют палладий (8-10 нм). По ВАХ этот прибор близок к лучшему, созданному на монокристаллическом кремнии, он может детектировать водород на уровне 10 ppm в N_2 . Время отклика датчика составляет 15 мин при 295 К, что связано с медленной адсорбцией водорода на поверхности палладия.

Если МДП-туннельный диод дополнить ещё одним p-n-переходом, как показано на рис.53, то получится прибор, обладающий тиристорным эффектом, т.е. переключающийся из закрытого состояния в открытое при определённом пороговом напряжении, величина которого зависит от концентрации водорода в среде.

4.8. Газовые датчики на основе приборов, чувствительных к изменению массы

Известно, что генераторы на основе пьезокристаллов чрезвычайно чувствительны к изменению массы электродов и посторонних частиц, адсорбированных на поверхности. Чтобы создать химические датчики на их основе, необходимо обеспечить преимущественную адсорбцию молекул исследуемого газа на поверхность кристалла с помощью нанесения тонкого слоя адсорбирующего материала [4]. Таким образом, при росте концентрации исследуемого газа в среде увеличивается его масса, адсорбированная на поверхности пьезокристалла, и пропорционально снижается частота

пьезокристалла, и пропорционально снижается частота выходного сигнала генератора.

Существуют два типа приборов, чувствительных к изменению массы. Первый из них называется кварцевыми микровесами, его структурная схема показана на рис. 54.

Чувствительным элементом служит 15 МГц кристалл кварца с золотыми контактами. Имеются два однотипных пьезокристалла, один из которых является чувствительным элементом, а другой - эталоном. Изменение концентрации газа влияет на частоту сигнала на выходе генератора (3). Смеситель (5) выделяет разностную частоту, пропорциональную массе газа адсорбированного на поверхности чувствительного элемента. Такой прибор обладает высокой селективностью и применяется для регистрации паров ртути. Недостатком датчика является необходимость регенерации (удаление паров ртути) после каждого измерения.

Второй тип прибора - датчик на ПАВ дифференциальной конфигурации (рис. 55). На пьезокристаллической подложке (кварц, LiNbO_3 , $\text{ZnO/SiO}_2/\text{Si}$) размещены две одинаковые линии задержки на ПАВ, каждая из которых состоит из нескольких возбуждающих и детектирующих электродов. В области распространения ПАВ одной из линий задержки нанесён чувствительный слой, селективно адсорбирующий молекулы исследуемого газа, что сопровождается уменьшением скорости распространения ПАВ, а значит и частоты колебаний генератора. Смеситель выделяет разностную частоту, пропорциональную количеству адсорбированного газа, а значит его концентрации в среде.

Напыляя на поверхность подложки пленку палладия, получают газовые датчики водорода. Для регистрации NO_2 в качестве чувствительного слоя применяют пленки фталацианидов.

4.9. Оптические газовые датчики

Оптические газовые датчики можно разделить на четыре группы [4].

1. Оптоэлектронные приборы представляют собой комбинацию из источника света (светодиод, полупроводниковый лазер) и фотоприёмника (фотодиод, фототранзистор), между которыми находится оптически прозрачная среда. Изменение оптических свойств среды под действием исследуемого газа влияет на выходной сигнал фотоприёмника. Этот эффект может быть использован для измерения концентрации газа.

2. Оптоволоконные датчики – это приборы, в которых свет между источником и приёмником распространяется по оптоволокну, оптические свойства которого зависят от концентрации исследуемого газа, что вызывает изменение выходного сигнала фотоприёмника.

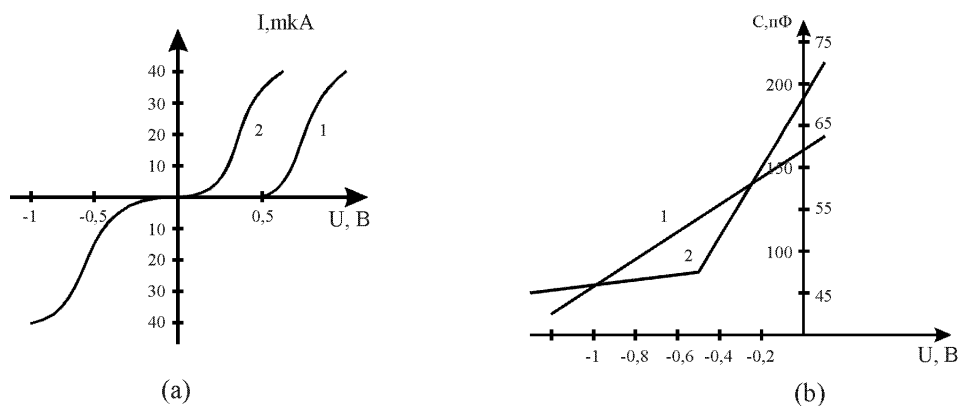


Рис.52. ВАХ (а) и ВФХ ДШ (б) со структурой Pd-InP на воздухе (1) и в атмосфере водорода (100 ppm) (2). На (б) масштаб справа соответствует кривой 1, слева - кривой 2

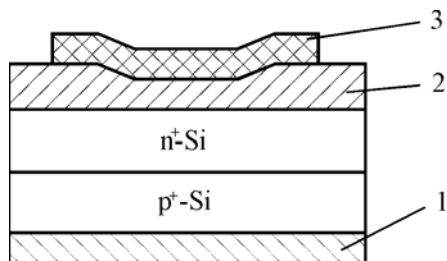


Рис. 53. Датчик водорода на тиристорном эффекте: 1 - омический контакт; 2 - слой SiO_2 ; 3 - слой палладия

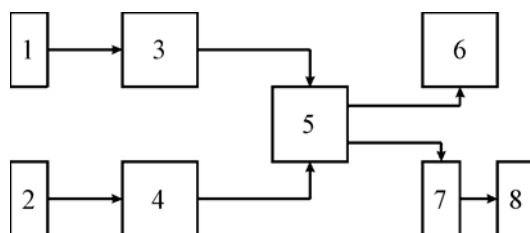


Рис. 54. Структурная схема кварцевых микровесов: 1, 2 - чувствительный и вспомогательный пьезокристаллы; 3, 4 - генераторы; 5 - смеситель; 6 - частотомер; 7 - преобразователь частота-напряжение; 8 - регистрационное устройство

3. Оптотермический прибор (рис. 56) включает в себя пьезоэлектрический кристалл со сквозными отверстиями, через которые на сапфировую пластину попадают импульсы света. Под действием поглощённого света меняются механические свойства сапфира, регистрируемые пьезокристаллом. Если на внешнюю поверхность сапфира нанести чувствительный слой, то из-за поглощения им света меняется температура сапфира, что приводит к изменению сигнала светового датчика.

4. Количество адсорбированного на поверхности газа можно определить оптическим методом, основанным на зависимости коэффициента отражения от плотности покрытия. Например, методом поверхностного плазменного резонанса.

5. ВЛАГОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СЕНСОРЫ

Использование прецизионных групповых методов технологии микроэлектроники позволяет разрабатывать и выпускать дешёвые датчики и приборы на их основе для контроля параметров окружающей среды, которые обладают характеристиками, находящимися на качественно новом уровне по сравнению с аналогичными характеристиками дискретных датчиков, выполненных по традиционной технологии[1].

За рубежом, на основании технологии микроэлектроники, более ста фирм выпускают датчики влажности. Разработкой датчиков занимаются такие фирмы, как: IBM, General Electric, Texas Instruments(США), Sony и Matsushita Electric (Япония), Philips (Нидерланды) и др [1].

Такой интерес обусловлен развитием не только микроэлектроники, но и других отраслей промышленности, например металлургии, прецизионной химии, которые предъявляют высокие требования к методам и приборам для измерения влажности, как к средству получения информации о качестве проведения технологических процессов.

Наибольший интерес представляет определение содержания влаги в газообразных и жидких средах. Так, в технологии микроэлектроники широко используются процессы физико-химической обработки материалов, находящихся в контакте с газовой (эпитаксия, диффузия, окисление) и жидкой (химическое травление, анодное окисление, фотолитография, очистка поверхности) фазам и в зависимости от типа технологического процесса требования к уровню содержания влаги в среде различны. Например, при автоэпитаксии кремния наличие в технологической парогазовой смеси (ПГС) одной молекулы H_2O на миллион молекул ПГС вызывает рост дефектного поликристаллического слоя кремния.

Концентрация паров воды в фосфине при производстве ИС средней степени интеграции не должна превышать уровня 30 молекул H_2O на миллион молекул ПГС, а при производстве СБИС - одной молекулы H_2O на миллион молекул ПГС. Содержание влаги внутри корпусов ИС не должно превышать 500, а на операциях сборки ИС 50 молекул H_2O на миллион молекул воздуха.

В последнее время датчики влажности находят широкое применение в бытовой технике, например, как средства контроля комфортности условий в жилых помещениях или в салоне автомобиля.

Область применения датчика определяет его рабочий диапазон по температуре и влажности (табл.10) [1].

Области применения датчиков влажности

Таблица 10.

Область применения	Режим эксплуатации	
	Температура, К	Влажность, %
Бытовая техника		
система кондиционирования	278 - 313	40 – 70
сушилки для одежды	353	0 – 40
СВЧ-печи	278 - 373	2 – 100
Контроль микроклимата в медицине	283 - 303	50 – 100
Контроль запотевания стекол в автомобилях	253 - 353	50 – 100
Промышленность		
текстильная	283 - 303	50 – 100
производство и сушка порошков в химии	323 - 373	0 – 50
электронная	278 - 313	0 – 50
Контроль атмосферы в сельском хозяйстве	293 - 313	40 – 70
Гидрометеорологические радиозонды	223 - 313	0 – 100

Кроме того, в каждом конкретном случае предъявляются свои специфические требования к быстродействию, временной и температурной стабильности, универсальности, взаимозаменяемости, размерам, характеру выходного сигнала датчика и т.д.

5.1. Единицы измерения влажности

Содержание влаги обычно измеряют в единицах абсолютной влажности, парциального давления паров воды, объёмного влагосодержания, относительной влажности и температуры точки росы [1].

Абсолютная влажность S_a измеряется обычно в граммах на кубический метр, *парциальное давление* паров воды – в гектопаскалях (1 ГПа - 100Па). *Объёмное влагосодержание* (или объёмная концентрация паров воды) S_v определяется как отношение объёма паров воды к объёму ПГС и выражается в единицах ppm (т.е. количество примесных атомов на 10^6 атомов основного вещества). *Относительная влажность* Φ измеряется в процентах и определяется как отношение парциального давления паров воды к давлению насыщенных паров воды при данной температуре. *Температурой точки росы* T_p называется такая температура (в кельвинах), с которой начинается

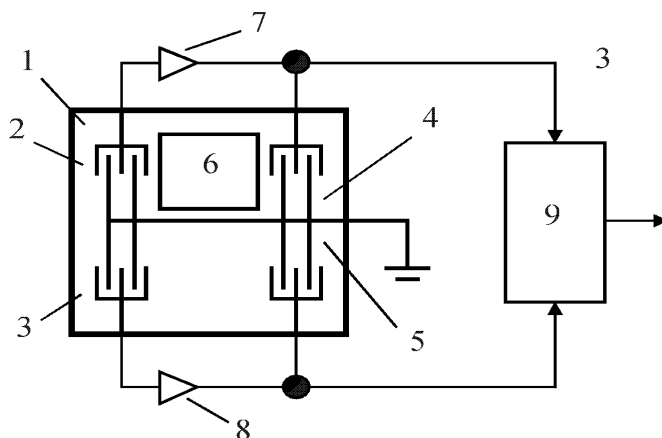


Рис. 55. Датчик на ПАВ: 1 - пьезокристаллическая подложка; 2, 3 - возбуждающие электроды; 4, 5 - детектирующие электроды; 6 - чувствительное покрытие; 7, 8 - усилители; 9 – смеситель

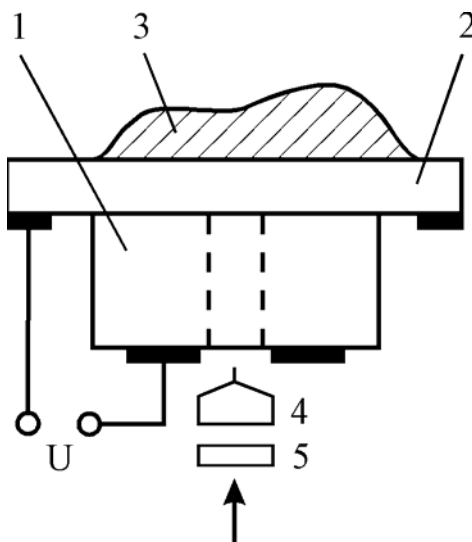


Рис. 56. Оптотермический датчик: 1 - пьезоэлектрический кристалл; 2 - сапфировая пластина; 3 - газочувствительное покрытие; 4 - фокусирующая система; 5 - световой затвор

конденсация паров воды, содержащихся в газе, при изобарическом охлаждении.

При измерениях микроконцентраций влаги в жидкостях и газах в качестве единицы измерения объёмного влагосодержания чаще всего применяют объёмные проценты или единицы ppm.

5.2. Методы измерения влажности

С точки зрения физико-химической сущности процессов, происходящих при измерении влажности газов и жидкостей, все методы можно разбить на две группы: основанные на непосредственном выделении влаги из анализируемой среды с последующим определением её количества (т.н. прямые методы) и основанные на измерении какой-либо физической величины, функционально связанной с влагосодержанием среды (косвенные методы) [1].

Широко распространена классификация по характеру физической величины, в которую преобразуется влажность. При этом микроэлектронные датчики влажности можно разбить на две большие группы: температурно-градиентные (включающие психрометрические и конденсационные) и сорбционные (включающие кулонометрические, сорбционно-импедансные и пьезосорбционные).

5.3. Температурно-градиентные датчики влажности

5.3.1. Психрометрические датчики

Психрометрический метод предназначен для измерения относительной влажности газа (чаще всего воздуха) при значениях температур выше 273 К и основан на зависимости влажности воздуха от разности показаний сухого и влажного термометров [1]. При этом температура влажного термометра зависит от интенсивности испарения воды с увлажнённой поверхности. Между давлением и температурой существует соотношение

$$p = p' - A P (t_c - t_b),$$

где p - парциальное давление паров воды в исследуемой газовой среде при температуре сухого термометра t_c ; p' - давление насыщенных паров воды при температуре влажного термометра t_b , P - общее давление, A - психрометрический коэффициент, зависящий от свойств анализируемого газа и конструктивных особенностей преобразователя.

На точность и надежность метода влияет ряд факторов: точность термометра; скорость воздушного потока, обтекающего увлажненный термометр; освещённость; размеры; форма; материал и увлажнённость фитиля, взаимное расположение термометров; температура и чистота воды, используемой для увлажнения фитиля.

В качестве термочувствительных элементов используют термопары, термометры сопротивления, полупроводниковые терморезисторы и термодиоды.

Относительная простота и дешевизна приборов обеспечивают им достаточно широкое распространение в бытовой технике, а также при кондиционировании воздуха.

Метод обладает серьёзными недостатками: необходимость мокрого термометра, зависимость показаний от суммарного давления газа и его состава, невозможность применения при низких температурах, которые приводят к неуклонному уменьшению доли психрометров в общем объёме выпуска приборов для измерения влажности.

5.3.2. Конденсационные датчики

Конденсационный метод (или метод точки росы) основан на фиксации температуры конденсации паров воды в газовой фазе [1]. В последнее время интерес к этому методу повысился в связи с разработкой эффективных средств охлаждения, надёжных и точных способов регистрации момента выпадения конденсата и измерения температуры, а также в связи с необходимостью измерения влажности внутри малых объёмов корпусов ИС.

К достоинствам метода, прежде всего, относятся возможность измерения влажности в широком диапазоне концентраций паров воды, температуры и давления анализируемой среды, а также градуировки датчиков по температуре, а не по влажности.

При реализации метода необходимо выполнение операций регулируемого охлаждения конденсирующей поверхности детектора с точной фиксацией момента появления слоя конденсата и одновременной регистрацией температуры конденсирующей поверхности.

Для охлаждения используются термоэлектрические холодильники (до температур ~ 203 К), а также криогенные жидкости (жидкие азот, воздух, гелий).

Для измерения температуры конденсирующей поверхности детектора применяются термопары и терморезисторы.

Для определения момента образования слоя конденсата и выявления его параметров применяют способы, основанные на измерении оптических (в видимой и ИК областях спектров) и электрических характеристик конденсата (чаще всего поверхностного сопротивления).

Для индикации слоя конденсата применяют также пьезокварцевый резонатор, включённый в схему генератора, добротность которого резко уменьшается в момент выпадения на поверхности резонатора слоя конденсата, что приводит к резкому изменению частоты генерации. Высокая чувствительность такого метода объясняется чрезвычайно высокой массовой чувствительностью кварцевого резонатора, который регистрирует изменения массы 10^{-8} - 10^{-10} г.

В методе регистрации слоя конденсата с помощью фотоэлементов (фотодиодов, фоторезисторов, фототранзисторов) определение основано на сравнении интенсивности световых потоков, отражённых от чистой зеркальной конденсирующей поверхности и от поверхности со слоем конденсата.

В связи с необходимостью измерения влажности в корпусах ИС возрос интерес к методам регистрации конденсата по изменению поверхностной проводимости или межэлектродной ёмкости. Простейшие датчики поверхностно-конденсационного типа представляют собой подложку из окисленного кремния или другого диэлектрика, на которую нанесены два металлических электрода, чаще всего гребенчатой формы.

Структура двухэлектродного датчика точки росы резистивно-емкостного типа представлена на рис.57.

Поверхностная проводимость такой структуры при приближении к точке росы увеличивается по закону, близкому к экспоненциальному. Образование на поверхности твердой фазы (льда) приводит к резкому уменьшению электропроводности конденсата.

Типичная зависимость тока датчика I_d конденсационного типа при измерении влажности в объеме корпуса ИС представлена на рис.58.

Охлаждение корпуса ИС проводят со скоростью не более 15 К/мин.

Структура полупроводникового датчика точки росы емкостного типа (без датчика температуры) фирмы Philips Telecommunication (США) представлена на рис.59.

Датчик используется для контроля содержания влаги в корпусах ИС по изменению паразитной межэлектродной ёмкости структуры. При этом изменение ёмкости порядка 1 пФ фиксируется с помощью чувствительного ёмкостного моста.

В гребенчатых (Al или поли Si) электродах расстояние d_3 в несколько раз больше, чем d_1 для сведения к минимуму последовательного сопротивления электродной полоски, d_1 и d_2 делаются как можно меньше для увеличения межэлектродной ёмкости.

Датчик выполнен по стандартной биполярной технологии, в качестве датчика температуры используется биполярный транзистор n-p-n типа, формируемый диффузией в эпитаксиальном слое.

Межэлектродная ёмкость 17.2 ± 0.3 пФ (85% которой обусловлено емкостной связью через подложку, а 15% связью через надповерхностный слой) зависит от содержания влаги.

Для увеличения ёмкости между электродами разработана структура датчика МДП-типа с увеличенной плотностью компоновки, представленная на рис.60. Гребенчатая структура электродов из поли Si сформирована травлением.

При одной и той же площади данный датчик имеет более высокую чувствительность по сравнению с предыдущей конструкцией за счет конденсации в углублениях между электродами.

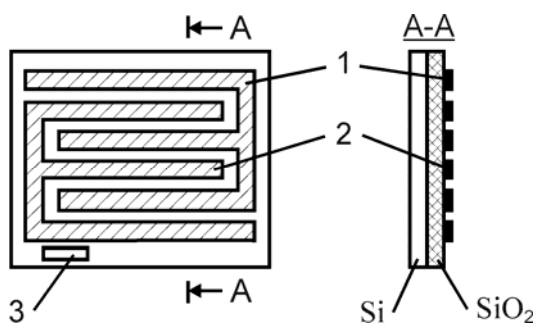


Рис.57. Двухэлектродный датчик росы резистивно-емкостного типа:
1,2 – электроды; 3 – датчик температуры

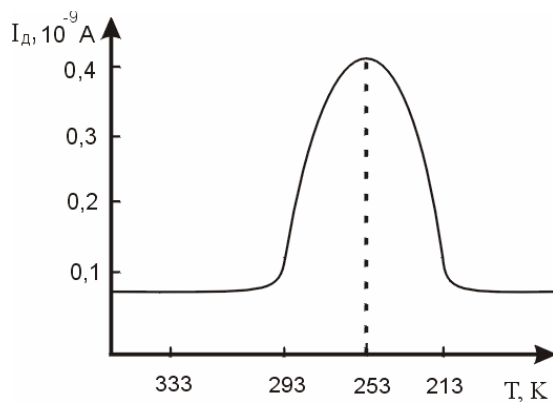


Рис.58. Характеристика датчика конденсационного типа

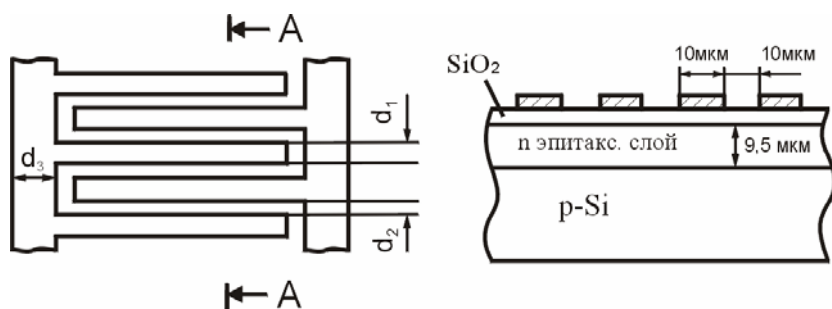
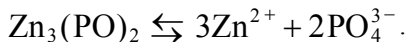


Рис.59. Структура датчика точки росы емкостного типа

Основным недостатком кондуктометрического способа регистрации слоя конденсата, как и конденсационного метода в целом, является зависимость показаний от степени загрязнённости поверхности.

Для устранения этого недостатка поверхность конденсационной площадки между электродами покрывают тонким слоем гигроскопичной соли NaCl или малорастворимыми в воде ортофосфатами цинка, лития, кальция, свинца, железа и магния.

Конденсация влаги на поверхности таких датчиков сопровождается резким изменением сопротивления между электродами вследствие протекания реакции типа



Низкая растворимость ортофосфатов (меньше $1 \cdot 10^{-6}$ г на 100 г воды для $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$) обеспечивает высокую стабильность датчиков. Так, преобразователи со слоем ортофосфата цинка толщиной 10-500 мкм выдерживают длительное воздействие высокой влажности и предназначены для определения сконденсированной влаги на стеклах автомобиля.

5.4. Микроэлектронные сорбционные датчики влажности

Принцип действия датчиков этой обширной группы основан на явлении сорбции влаги из анализируемой среды. Происходящие при этом изменения физико-химических или электрофизических параметров чувствительного элемента датчика служат мерой для определения содержания влаги в среде [1].

В зависимости от вида и механизма сорбции можно выделить адсорбционные, абсорбционные и хемосорбционные датчики влажности.

В адсорбционных датчиках сорбция паров воды происходит на поверхности непористого сорбента или на поверхности пор пористого. В датчиках абсорбционного типа поглощение влаги осуществляется всем объёмом сорбента. В хемосорбционных датчиках сорбируемая вода вступает в химическую реакцию взаимодействия с материалом сорбента. В наиболее распространённых датчиках такого типа – кулонометрических – хемосорбция воды сопровождается ее разложением с помощью электролиза, сила тока которого однозначно связана с содержанием влаги в измеряемой среде.

В датчиках адсорбционного и абсорбционного типов поглощение и выделение влаги сорбентом сопровождается изменением его массы и электрофизических характеристик — электропроводности, диэлектрической проницаемости и т.д. В соответствии с этим различают датчики гравитационного типа (это прежде всего пьезосорбционные, основанные на измерении массы сорбента) и импедансные датчики, основанные на измерении полного сопротивления (или одного из его составляющих) плёнки сорбента.

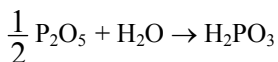
Среди материалов, используемых в качестве сорбентов, можно выделить неорганические – ионообразующие (гигроскопичные соли, кислоты и щёлочи) и ионнеобразующие (окислы металлов), органические и смешанные.

5.4.1. Кулонометрические датчики

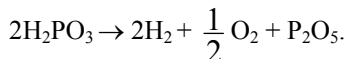
Действие кулонометрических датчиков влажности основано на непрерывном поглощении влаги плёнкой гигроскопичного вещества и одновременном её электролитическом разложении [1].

В качестве сорбционного покрытия обычно используют фосфорный ангидрид (P_2O_5), обладающий очень высокой гигроскопичностью, большим удельным сопротивлением в сухом виде и хорошей электропроводностью после сорбции влаги.

В таком датчике непрерывно происходят два процесса: поглощение влаги фосфорным ангидридом с образованием фосфорной кислоты



и электролиз, сопровождающийся регенерацией фосфорного ангидрида



Конструкцию, размеры датчика и напряжение на его электродах выбирают таким образом, чтобы влага полностью извлекалась из потока газа и проходил её полный электролиз.

Существуют несколько конструкций кулонометрических датчиков.

В первых конструкциях платиновые спиралеобразные электроды расположены на внутренней или внешней поверхности пластмассовой или стеклянной трубки. Между электродами наносится слой сорбента P_2O_5 .

Основной недостаток - низкая технологичность, кроме того, ограничением конструкции является необходимость измерения и поддержания расхода газа через чувствительный элемент на определённом уровне (в диапазоне 20-200 см³/мин). К тому же датчики не позволяют проводить измерения при влажности более 1000 - 1500 ppm, т.к. при этом сильно возрастает ток электролиза и повышается температура датчика.

Для измерения высокого влагосодержания используют диффузионную мембрану, пропускающую лишь часть влаги из анализируемого потока.

В качестве сорбционного покрытия датчика, кроме пятиоксида фосфора, используется КОН, NaOH, метафосфат калия и кремниевая кислота.

Датчик может применяться и для измерения влажности агрессивных газов (HCl и фосгена).

Полное извлечение влаги из потока обеспечивает датчик с планарной конструкцией чувствительного элемента. Для повышения стабильности электродов применяют родиевое покрытие.

Для измерения влажности газов при нормальном и пониженном давлении рекомендуется применять датчик, изготовленный на корундовой подложке (96.6%- Al_2O_3 , 0.4%- SiO_2) размерами 9×11×0,25 мм.

Гребенчатые родиевые электроды наносят методом вакуумного напыления: толщина электродов 0.1 мкм, ширина и расстояние между соседними

зубцами электродов 50 мкм, напряжение на электродах – 30 В. Характеристики датчика линейны (рис.61).

Основными недостатками кулонометрических датчиков влажности с сорбционным слоем пятиоксида фосфора является низкая стойкость к воздействию среды с влажностью более 1000 ppm, невозможность измерения влажности веществ, реагирующих с P_2O_5 (органических жидкостей, аммиака).

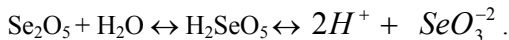
Эти недостатки устраняются при использовании датчика с сорбционным покрытием из цеолита.

5.4.2. Сорбционно-импедансные датчики

Действие таких датчиков влажности основано на зависимости полного сопротивления (импеданса) влагочувствительного слоя сорбента от количества сорбированной им влаги [1].

В качестве сорбентов первоначально использовали гигроскопичные ионообразующие соли (хлористый литий, хлористый кальций, фтористый бериллий, фтористый магний и т.д.). Общий недостаток датчиков с такими сорбентами - низкая чувствительность.

Частично этот недостаток устраняют, применяя датчики с сорбционным слоем из двуоксида селена, который взаимодействует с водой:



Наибольшее распространение получили импедансные датчики с органическими полимерными и неорганическими сорбентами на основе окислов металлов.

Датчики с полимерной чувствительной плёнкой. Практически все органические полимерные материалы в той или иной степени изменяют свои физико-химические свойства при сорбции влаги, что позволяет использовать многие из них в датчиках влажности, в том числе кондуктометрического и емкостного типов.

Органическая полимерная плёнка в таких датчиках может служить либо самостоятельным влагочувствительным агентом, либо с добавлением неорганических влагочувствительных соединений (обычно солей хлористого лития или хлористого кальция) или негигроскопичных проводящих частиц (мелкодисперсного углерода, золота, серебра и т.п.).

В качестве влагочувствительных покрытий таких датчиков могут использоваться акрилаты, полимеры метакрилата, полиакрила меди, полиэтиленимиды, гидроксилцеллюлоза, продукты полимеризации хлорсодержащих полимеров, кремнийорганические полимеры, содержащие аминогруппы. Стабильный датчик влажности можно реализовать на основе полиимидной плёнки, обладающей очень высокой химической и температурной стабильностью.

Фирмой Honeywell (США) разработан интегральный датчик влажности, в котором используется пористый, проницаемый для влаги электрод, слой полиимида толщиной 0.5 мм и нижний гребенчатый электрод, напыленный на поверхность SiO_2 (рис.62).

Часто в качестве влагочувствительного покрытия используют поливиниловый спирт (частично гидролизированный поливинилацетат). Он практически не растворим в воде, но молекулы воды легко диффундируют в его объём. Для увеличения чувствительности в плёнку вводится органический электролит (ацетат натрия, калия или лития) в количестве $0.05 \div 10$ вес.% от поливинилового спирта. Поливиниловый спирт заполняет поры, образованные частицами Fe_2O_3 и углерода размером 1-100 нм. Датчик с таким покрытием обладает высокой стабильностью.

В качестве влагочувствительного покрытия используется также плёнка полистирола, полученная полимеризацией в ВЧ-плазме.

При изменении относительной влажности от 12 до 100% ёмкость такого датчика изменяется почти в два раза, характеристика близка к линейной.

В ёмкостном датчике влажности фирмы Vaisala (Финляндия) плёнку полимера толщиной ≤ 10 мкм получали методом окунания. Серийно выпускаемый фирмой датчик HUMICAP 606/НМ предназначен для измерения относительной влажности от 0 до 100% с погрешностью не более $\pm 2\%$ и служит основой индикаторов влажности типа НМ14.

Гигроскопический полимер с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 80$) использован в ёмкостном датчике С.С.Н. фирмы Corcori. Верхним электродом служит толстый слой пористого хрома, что повышает стойкость датчика к воздействию загрязнений. Номинальная ёмкость датчика с размерами 6×6 мм составляет 500 пФ, чувствительность — 1.7 пФ на 1% относительной влажности. Характеристика датчика линейна во всём рабочем диапазоне от 5 до 98% относительной влажности. Температурный диапазон работы датчика 263 - 313 К.

Датчик влажности, выпускаемый фирмой General Corporation (США), снабжён мембраной, пропускающей пары воды и задерживающей пыль и различные масла. Датчик размером $16 \times 20 \times 46$ мм предназначен для измерения относительной влажности в диапазоне 10 - 90% с точностью $\pm 5\%$.

Обширную группу составляют датчики с полимерной влагочувствительной плёнкой, в которую введены мелкодисперсные проводящие частицы (чаще всего углерода, поэтому датчики такого типа иногда называют “угольными”), связующим влагочувствительным веществом служит целлюлоза или её производные, а нанесение плёнки на диэлектрическую подложку (например, из поликора или керамики) осуществляют методом окунания. Абсорбция воды влагочувствительным полимером приводит к изменению его

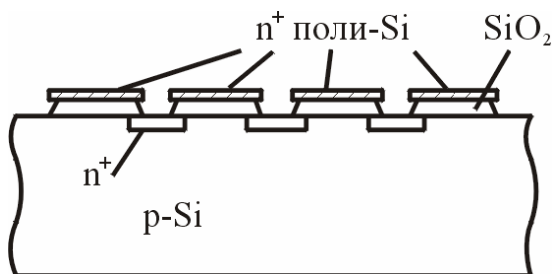


Рис.60. Датчики влажности МДП-типа

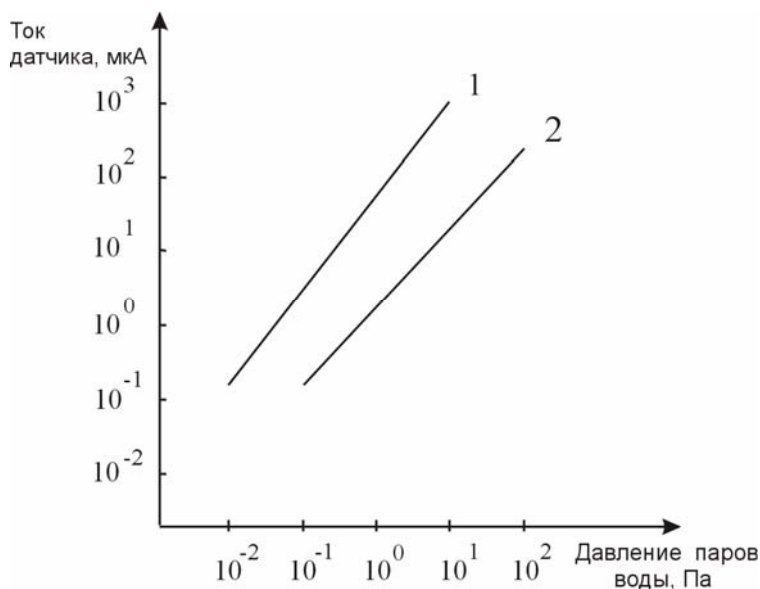
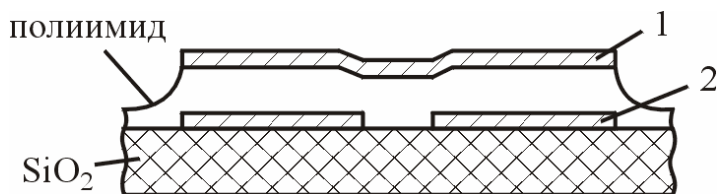
Рис.61. Характеристики планарного кулонометрического датчика влажности при температуре 293К: 1- на воздухе, при $P = 10^5$ Па; 2- в вакууме

Рис.62. Датчик с полимерной чувствительной пленкой:

1- пористый электрод; 2- нижний гребенчатый электрод

линейных размеров, что сопровождается перемещением проводящих частиц и изменением контактного сопротивления между ними.

Для увеличения стабильности и воспроизводимости характеристик “угольных” датчиков в них необходимо использовать частицы гидрофобного углерода, имеющего аморфную или графитизированную структуру. Если средняя величина частиц превышает 0,5 мкм, то плёнка имеет нестабильное сопротивление.

Недостатком большинства полимерных датчиков является наличие гистерезиса, низкая стабильность и высокая чувствительность к воздействию агрессивных сред.

Датчик фирмы Nippon Electric (Япония) предназначен для определения конденсированной влаги на автомобильном стекле. Он содержит подложку с золотыми гребенчатыми электродами, на которую последовательно нанесены адгезионный и влагочувствительный слои с равномерно распределёнными проводящими частицами (Au, Pd, Ag). Влагочувствительным веществом является акриловая или метакриловая смола. Вес проводящих частиц составляет 20 - 60% от веса смолы.

Порог срабатывания датчика, в зависимости от состава влагочувствительного покрытия и содержания в нём проводящих частиц, находится в пределах от 60 до 95% относительной влажности. При этом сопротивление датчика изменяется от 6 кОм при относительной влажности 20 - 60% до 10 Мом при влажности 98%. Датчик выдерживает до 2000 циклов осушки.

Фирмой Sharp (Япония) разработан полимерный датчик влажности на основе полевого транзистора (рис.63) с индуцированным n-каналом

Площадь структуры 1.5 мм², длина канала 12 мкм, ширина 7.3 мкм. Затворный диэлектрик представляет собой композицию из SiO₂ толщиной 50 нм и Si₃N₄ толщиной 800 нм. Si₃N₄ предохраняет прибор от влияния атмосферы. Чувствительная к влаге полиимидная пленка помещена между затвором, верхний слой которого изготовлен из пленки Au толщиной 20 нм, проницаемой для воды, нижний – из тантала толщиной 300 нм. Изменение проводимости пленки полиимида под действием молекул воды меняет проводимость канала и ток стока.

Интересным решением являлось объединение влагочувствительной полимерной пленки с генератором на поверхностно-акустических волнах ПАВ (рис. 64).

На подложке из ниобата лития или кварца формируется структура генератора на ПАВ. На обратной стороне мембраны, толщина которой сравнима с длиной поверхностной волны, наносится влагочувствительная пленка. Поглощение паров воды из атмосферы приводит к изменению плотности, жесткости и толщины пленки. В результате изменяется фазовая скорость поверхностных акустических волн в тонком слое ZnO₂, нанесенном на верхнюю сторону мембраны и, следовательно, меняется частота колебаний генератора.

В этой конструкции активная поверхность прибора защищена от паров воды, и водяной конденсат не оказывает паразитного влияния на элементы конструкции и электронной схемы обработки сигнала.

Керамические датчики. К этой группе относятся датчики, в которых влагочувствительным веществом является пористая керамика, состоящая из одного окисла или смеси нескольких окислов. Характеристика датчика чаще всего определяется зависимостью его сопротивления от влажности, несколько реже используется ёмкостной тип датчиков.

По виду проводимости керамические датчики влажности делятся на два типа: с ионной проводимостью и электронной проводимостью. В датчиках ионного типа уменьшение полного сопротивления сенсорного элемента при увеличении относительной влажности обусловлено физической адсорбцией на поверхности и конденсацией в микрокапиллярах молекул воды. В датчиках с электронной проводимостью адсорбированные молекулы воды действуют как донорные центры, отдающие керамике электроны.

Все датчики такого типа относятся к толстоплёночным (толщина сорбционного покрытия обычно более 10 мкм). В качестве влагочувствительного вещества применяется керамика из окиси кобальта CoO , получаемая при взаимодействии порошков металлического кобальта и четырёхокси кобальта Co_3O_4 при температуре $\sim 1173 \text{ K}$. Порошок окиси кобальта смешивают с органическим связующим, затем наносят на подложку и подвергают термообработке при $1623 - 1823 \text{ K}$. Сопротивление датчика изменяется на шесть порядков (от 10^{10} Ом до 10^4 Ом) при изменении относительной влажности от 30 до 100%. Основным недостатком такого датчика является очень высокое собственное сопротивление окиси кобальта, превышающее $10^6 \div 10^8 \text{ Ом}$, при относительной влажности 30-40%, что предопределяет значительные размеры датчика.

Аналогичные результаты получаются при использовании в качестве влагочувствительного вещества керамики из Fe_2O_3 .

Для устранения указанного недостатка датчик обрабатывается раствором хлорного железа (FeCl_3). Технология изготовления такого датчика включает осаждение на диэлектрическую термостойкую подложку (например, из кварца) размерами $11.25 \times 5.0 \times 0.75 \text{ мм}$ двух металлических (золото, платина, палладий) электродов. После этого на сформированную структуру методом центрифугирования или пульверизации наносят водную суспензию, содержащую 2-5 вес.% металла и 0.01-0.05 вес.% связующего вещества (поливинилового спирта). После этого структуру подвергают термообработке при $873-1073 \text{ K}$ в течение 1-2 ч. При этом происходит спекание отдельных частиц окисла и удаление из плёнки связующего вещества, что обеспечивает максимальную пористость покрытия и его активизацию. Толщина сорбционного покрытия составляет 50 мкм. Образованную таким образом плёнку обрабатывают раствором гигроскопической хлорсодержащей соли (5% р-р FeCl_3) с последующей термообработкой при $473 - 573 \text{ K}$ в течение $0.5 \div 1.0 \text{ ч}$. В результате ионы хлора прочно удерживаются на поверхности пор сорбента за счёт

счёт ковалентных связей с окислом, при этом на поверхности окисла образуется оксихлорид железа. Наличие на поверхности пор ионов хлора соответствует увеличению гигроскопичности сорбента и его электропроводности. Для стабилизации свойств датчика его подвергают искусственному старению путём циклического воздействия среды с влажностью 10-90%.

Слой Fe_2O_3 можно пропитывать органическим влагочувствительным веществом, например полиэтиленгликолем. При этом улучшаются адсорбционная способность и механическая прочность влагочувствительного покрытия.

Градуировочные характеристики датчика с сорбционным слоем Fe_2O_3 приведены на рис.65.

Для увеличения стабильности датчика их поверхность покрывают тонкой влагопроницаемой защитной мембраной из поливинилового спирта.

Термообработка в восстановительной атмосфере (H_2) при температуре ~ 1773 К способствует уменьшению собственного сопротивления керамики из окиси кобальта более чем на порядок. Это позволяет уменьшить размеры датчика до 5.0×5.0 мм при толщине подложки 1 мм.

Фирмой General Electric (США) разработан датчик относительной влажности на основе керамики из $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, в состав которой введены ионы щелочных металлов (Na^+ , K^+ , Li^+). Импеданс датчика изменяется от 10^6 Ом при относительной влажности 10% до $8 \cdot 10^2$ Ом при 95%.

Эффективным способом модифицирования поверхности алюминиево-оксидной керамики (96% Al_2O_3) является обработка подложки на воздухе при температуре $T=373 - 1023$ К в течение 0.5-30 ч после формирования на поверхности конфигурации электродов из золота. Затем поверхность подложки покрывают слоем P_2O_5 и выдерживают 0,5-30 ч при температуре 323 – 773 К. В результате образуется проводящий влагочувствительный слой за счёт реакции взаимодействия Al_2O_3 с P_2O_5 . Толщина модифицированного слоя составляет ~ 60 нм, толщина золотых электродов - 0.1 мкм. Датчик размером $2 \times 1.5 \times 0.5$ мм может быть встроен в корпус ИС, он позволяет измерять влажность в диапазоне $3 \div 15000$ ppm как на переменном, так и на постоянном токах.

Другим способом уменьшения собственного сопротивления и повышения чувствительности датчика является использование многокомпонентной керамики. Ведущая роль в разработке и патентовании датчиков влажности на основе многокомпонентной керамики принадлежит японским фирмам. Ими предложено около 70 составов керамических композиций, состоящих на 98-99.55 вес.% из основного компонента, включающего от 0.01 до 80 мольных % перекиси хрома и от 0.01 до 20 мольных % одного из окислов: TiO_2 , ZrO_2 , HfO , SnO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , WO_3 , MnO_3 , MoO_2 , SiO_2 , VO_2 . В качестве добавки (0.05-2 вес.%) используется окисел из группы: BeO , MgO , CaO , SrO , BaO , FeO , NiO , CuO , ZnO , CdO и PbO .

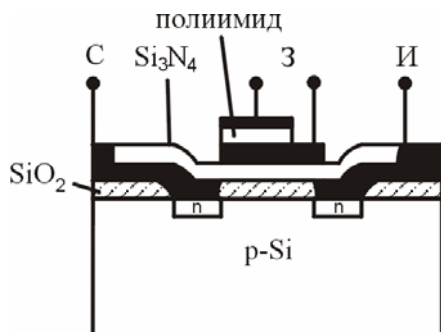


Рис. 63. Датчик на основе МДП-транзистора

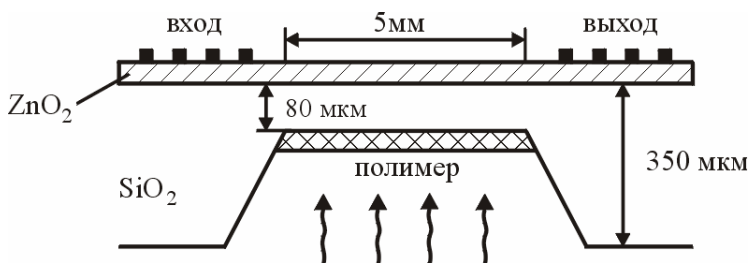


Рис.64. Датчик влажности на ПАВ

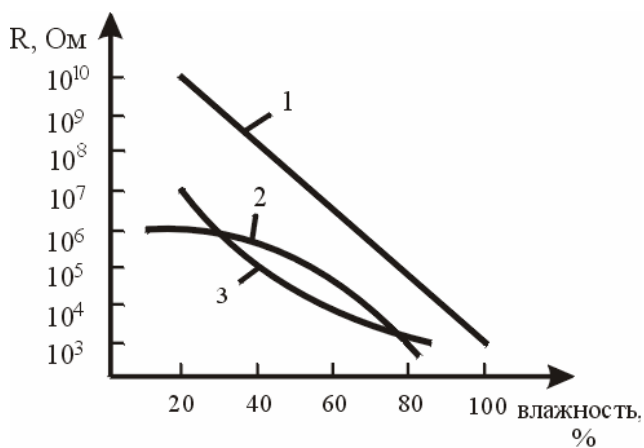


Рис.65. Зависимость сопротивления керамического датчика со слоем Fe_2O_3 от влажности: 1 — немодифицированный; 2 — модифицированный FeCl_3 ; 3 — пропитанный полиэтиленгликолем

Такие датчики обладают высокой стабильностью и чувствительностью при низком собственном сопротивлении (10^5 - 10^6 Ом) и при нулевой влажности. При изготовлении датчиков используется обычная технология, включающая подготовку порошков окислов, смешивание их в необходимой пропорции с раствором связующего вещества (4-10%), водный раствор поливинилового спирта, нанесение эмульсии на подложку или прессование в пластины под давлением порядка 750 кг/см^3 .

Затем проводят спекание материала при температуре 1623 К в течение 1-3ч. Электроды из двуокиси рутения наносят поверх влагочувствительного керамического слоя и вжигают при температуре 1023 К.

В керамических датчиках влажности емкостного типа, конструкция которых представлена на рис.66, электроды (2), содержащие 9 токоведущих дорожек длиной 18 мм, сформированы методом толсто пленочной технологии из палладиево-серебряной пасты на корундовой подложке (1) (~96% Al_2O_3), ширина токоведущих дорожек и расстояние между ними составляет 0.625 мм. Поверх электродов нанесен слой влагонепроницаемого диэлектрика (3) толщиной около 10 мкм, а на его поверхность - последовательно два слоя влагочувствительного покрытия общей толщиной около 40 мкм. Влагочувствительный слой состоит из инертных частиц корунда (4), покрытых влагочувствительной стеклокерамикой (5).

Таким образом, одновременно увеличивается площадь сорбционной поверхности и уменьшается толщина датчика, что приводит к увеличению его чувствительности и быстродействия. Типичный размер пор влагочувствительного покрытия составляет 2 мкм. Емкость измеряется линейно от 8 пФ при нулевой влажности до 60 пФ при влажности 100%. Время установления показаний датчика при изменении влажности от 30 до 90% не превышает 3с.

К недостаткам датчика относятся низкая чувствительность при влажности меньше 25% и достаточно большие габариты (25.4×12.7 мм).

Основным недостатком керамических датчиков влажности в целом является сложность измерения низких уровней влажности (менее 1%). Повысить чувствительность датчиков в этой области можно с помощью пропитки гигроскопичными солями, например хлористым литием, причем керамические датчики с пропиткой более стабильны, чем аналогичные тонкопленочные.

Другим недостатком, общим для всех кондуктометрических датчиков влажности, является экспоненциальный характер зависимости сопротивления от влажности, что требует применения достаточно сложных измерительных схем и увеличивает габариты приборов для контроля влажности. Этот недостаток можно устранить, формируя датчик на одной подложке с обрабатывающей ИС.

Тонкопленочные полупроводниковые датчики. Действие датчиков такого типа основано на изменении проводимости тонкого слоя полупроводника под действием зарядов, адсорбированных на его поверхности, или поверхно-

сти расположенного на нем диэлектрического слоя полярных молекул, в т.ч. молекул воды.

Первые датчики этого типа выполнены в виде диода Шотки, образованного переходом Si (или Ge) - двуокись олова.

Контакты наносят на противоположные поверхности структуры. Недостатками датчика являются достаточно большая постоянная времени и низкая чувствительность при малых уровнях влажности.

Для увеличения чувствительности на поверхность тонкого слоя (50 – 80 нм) окиси олова, расположенного на диэлектрической подложке с двумя электродами, наносят слой диэлектрика, толщиной 10-40 нм. Диэлектриком служит тефлон (при определении влажности более 80%) или полимер, полученный конденсацией в плазме тетраэтоксисилана (при определении влажности в диапазоне 0-100%). Измерения проводят на постоянном токе, сопротивление датчика изменяется от 100 Мом до нескольких сотен кОм в диапазоне влажности 0-100%. Для повышения точности измерений на поверхность диэлектрического слоя наносят дополнительный электрод из алюминия, при этом его площадь не должна превышать 45-50% площади диэлектрического слоя. Подавая на электрод положительный или отрицательный потенциал можно смещать характеристику датчика в заданный диапазон и обеспечивать оптимальную чувствительность и точность измерений. В качестве полупроводника можно также использовать окиси цинка, марганца, меди, никеля, титана, кадмия, железа, серебра, висмута, ванадия. В качестве датчика влажности используется также кремниевый МОП-транзистор с открытым затвором. Для увеличения чувствительности на открытую часть подзатворного окисла толщиной 0.1 мкм наносят полимерную плёнку толщиной 0.3 мкм. Канальная проводимость такого транзистора зависит от количества адсорбированных молекул воды и приложенного к затвору управляющего напряжения. Влажность определяют по времени задержки отпирания канала сток-исток, зависящей от сопротивления полимерной плёнки.

Полупроводниковые датчики влажности обладают высокой чувствительностью, однако они имеют и серьёзные недостатки, главным из которых является значительная временная нестабильность характеристик, обусловленных изменением поверхностных свойств сорбционных покрытий и электродов.

Эта проблема может быть решена путем использования в качестве влагочувствительного элемента плёнки окиси алюминия, полученного анодированием поверхности чистого алюминия. В настоящее время ряд фирм (в их числе Panametrics (США) и Shaw (Великобритания)) активно занимаются разработкой датчиков на основе анодированной окиси алюминия.

В настоящее время датчики влажности такого типа нашли наибольшее распространение, что объясняется их высокими метрологическими характеристиками, технологичностью и достаточно низкой стоимостью.

Датчик состоит из алюминиевой подложки, на которой методом электрохимического окисления сформирован анодный окисел. Вторым электродом служит тонкий влагопроницаемый слой металла (чаще всего золота, реже алюминия, серебра, палладия или платины). Первоначально в качестве подложки использовали алюминиевые стержни или пластины, затем - алюминиевую фольгу, сейчас применяют тонкие ($\sim 1\text{мкм}$) слои напыленного алюминия.

Характеристики алюминиево-оксидных датчиков в основном определяются свойствами анодных плёнок окиси алюминия, которые, в свою очередь, сильно зависят от состава электролита и режимов анодирования.

Упрощённая модель строения анодного окисла алюминия предполагает, что он состоит из совокупности плотно упакованных элементарных ячеек мицел, каждая из которых обладает адсорбционной активностью за счёт наличия гидроксильных групп на её поверхности (рис.67.).

Толщина плёнки окиси алюминия влияет на чувствительность датчика и определяет его динамические характеристики. Датчики с толщиной окисной плёнки $\sim 1.5\text{-}2.5\text{ мкм}$ позволяют измерять влажность в пределах от 20 до 100%. В датчиках влажности фирмы Shaw пористую плёнку Al_2O_3 перед нанесением верхнего электрода пропитывают насыщенными растворами солей (например, LiCl , CaCl). Недостатком датчиков такого типа является высокая чувствительность к перегрузкам по влажности. В датчиках фирмы Panametrics (США) уменьшили толщину слоя Al_2O_3 до 0.2 мкм и менее, что позволило значительно увеличить быстродействие датчика, чувствительность в области низких концентраций влаги ($<1\%$) и уменьшить размеры.

Дальнейший шаг в этом направлении — полный переход на групповую технологию микроэлектроники. При этом датчик (рис.68) формируется на термически окисленной Si подложке, после напыления Al электрохимическим окислением получают плёнку пористого Al_2O_3 толщиной менее 0.25 мкм . Затем наносят верхний влагопроницаемый золотой электрод толщиной $10\text{-}50\text{ нм}$ и дополнительный слой золота на поверхность контактной площадки для обеспечения более надёжного контакта.

Датчики такого типа под названием Aquamax серийно выпускаются фирмой Panametrics. На их базе реализованы приборы для измерения влажности газов и органических жидкостей. Одна из последних моделей анализаторов влаги фирмы SystemI снабжена микропроцессором и позволяет проводить измерения в диапазоне от 0.001 до $200\,000\text{ ppm}$ одновременно по шести каналам. Зонды с датчиками могут быть удалены от прибора на расстояние до 600 м . Постоянная времени датчика не превышает 1 мин .

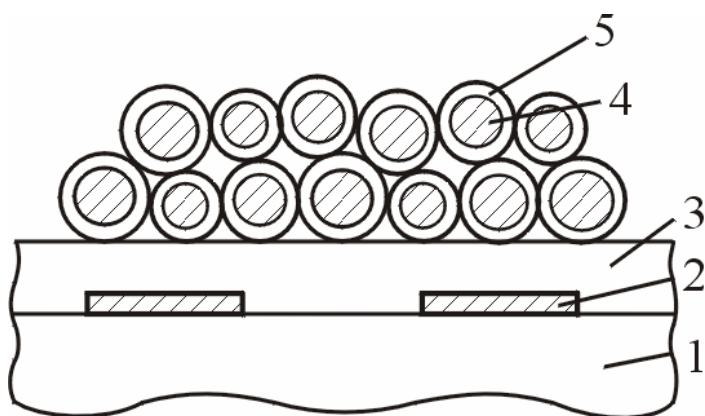


Рис.66. Конструкция керамического датчика емкостного типа: 1 – корундовая подложка, 2 – электроды, 3 – покрытие, 4 – частицы корунда, 5 – влагочувствительная стеклокерамика.

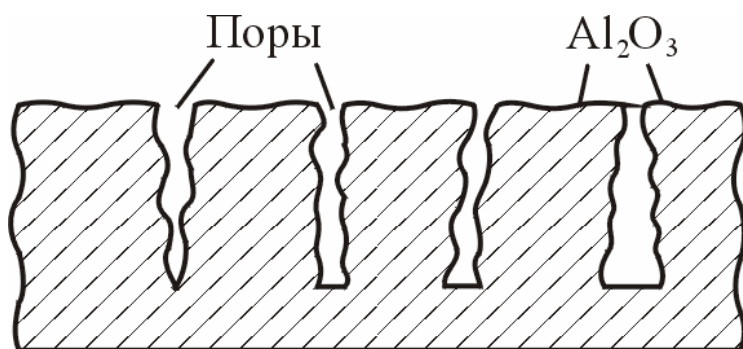


Рис.67. Схема строения мицел

В более позднем варианте датчика Aquatax II (рис.69), кроме влажочувствительной структуры на основе пористой окиси алюминия толщиной менее 0.25 мкм, имеются термостабилизирующий нагреватель из нихрома и датчик температуры.

Датчиком температуры могут служить сформированный на периферии кристалла дополнительный резистор из никеля или платины или (как показано на рис.69) р-п-переход. За счёт нагревания до температуры 323 К исключается деградация характеристик датчика при воздействии повышенной влажности 95-100%. Потребляемая на нагрев мощность не превышает 500 мВт. Малые размеры (2.54x2.54 мм или 1.52x1.52 мм) и высокая чувствительность позволяют использовать датчики такого типа для измерения содержания влаги внутри малых объёмов корпусов ИС.

Алюминиевооксидные датчики считаются наиболее пригодными для измерения влажности природного газа при нормальных условиях и повышенных давлениях.

Датчики с сорбционным слоем двуокиси кремния. Применение в качестве влажочувствительного вещества пористой двуокиси кремния позволило максимально использовать при изготовлении датчиков технологию микроэлектроники.

Получение двуокиси кремния при производстве датчиков влажности осуществляется электрохимическим окислением в растворах электролитов, т.к. при этом получается слой SiO_2 с высокой пористостью. Реже используется метод гидролиза растворов кремнийорганических соединений (чаще всего тетраэтоксисилана). В датчике фирмы IBM формирование пористого слоя SiO_2 проводят по следующей технологии: в 10-33% водном растворе HF при плотности тока 0.1-20 А/см² обрабатывают поверхность кремния, которая в результате имеет пористость 30-80%. После этого проводят термическое окисление пористой поверхности пленки кремния при 773-1473 К или анодированием в растворе азотной кислоты при плотности тока 6 мА/см². Полученный слой двуокиси кремния имеет пористость 15-40%. После этого формируют необходимую конфигурацию электродов. Такой датчик может быть изготовлен в едином технологическом цикле с БИС и размещён с ней на одном кристалле. Полное сопротивление датчика изменяется от $170 \cdot 10^{10}$ Ом в сухом азоте до $1 \cdot 10^{10}$ Ом при влажности 100%.

5.4.3. Пьезосорбционные датчики

Использование для измерения присоединённой массы пьезокварцевых резонаторов, позволяющих регистрировать величины сорбции на уровне $10^{-9} \div 10^{-12}$ г/см² позволило реализовать пьезосорбционные датчики влажности, обладающие высокими чувствительностью и точностью измерений [1]. В датчиках такого типа при сорбции влаги происходит изменение массы сорбента, нанесённого на поверхность пьезокварцевого резонатора, что приводит к изменению частоты его колебаний на величину

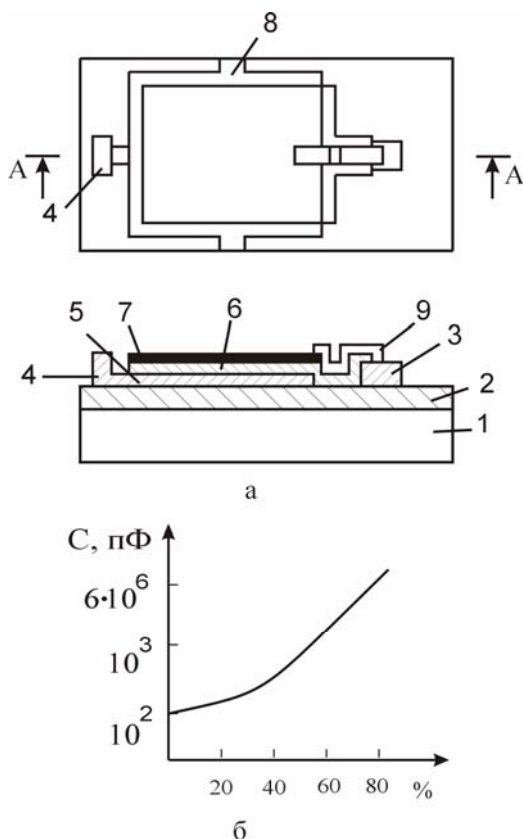


Рис.68. Конструкция алюминиево-оксидного датчика влажности (а) и зависимость его емкости от влажности (б): 1- кремниевая подложка; 2- SiO_2 ; 3,4- контактные площадки; 5- нижний Al электрод; 6- Al_2O_3 ; 7- влагопроницаемый Au электрод; 8- дорожка для соединения с другими датчиками на подложке; 9- дополнительная металлизация для контактной площадки

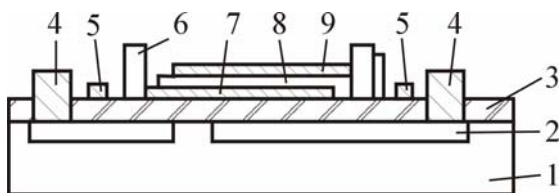


Рис.69. Конструкция алюминиево-оксидного датчика влажности Aquamax II: 1- кремниевая подложка n-типа; 2- диффузионные области p-типа; 3- слой SiO_2 ; 4- контакты к области p-типа; 5- нагреватель (нихром); 6- контактные площадки датчика влажности; 7- нижний Al электрод; 8- анодная пленка Al_2O_3 ; 9- верхний золотой электрод

$$\Delta f = - \frac{f_0^2}{N \cdot \rho_N \cdot S} \Delta m,$$

где - f_0 - резонансная частота кварцевого резонатора, $N=1770$ кГц·мм - постоянная, ρ_N - плотность пьезокварца (~ 2.65 г/см³), S - площадь пьезоэлемента, Δm - изменение массы сорбента.

Таким образом, при прочих равных условиях величина выходного сигнала пьезосорбционного чувствительного элемента влажности определяется сорбционной активностью применяемого сорбента.

В качестве влапочувствительного покрытия, толщина которого обычно не превышает 1-2 мкм, применяются гигроскопичные соли лития и кальция (LiCl, LiBr, CaCl₂), фториды кальция, магния, натрия, бария, Р₂О₅, плёнки пористого стекла, окиси кремния, органические полимерные материалы. Органические полимеры широко применяются в приборах фирмы Du Pont (США), занимающей ведущие позиции в разработке, изготовлении и реализации датчиков влажности пьезосорбционного типа. Порог чувствительности пьезосорбционного анализатора влажности одной из последних моделей составляет 0.02 ppm, полный диапазон измерения влажности от 0 до 20 000 ppm. При переходе от среды с более высокой влажностью к более сухой быстрое действие пьезосорбционных датчиков влажности невелико. Для устранения этого недостатка используют принудительную десорбцию влаги путём обдува пьезосорбционного чувствительного элемента влажности потоком осушенного газа или за счёт повышения температуры.

В целом для развития датчиков влажности характерны следующие основные направления:

- переход на групповую планарную микроэлектронную технологию;
- создание многофункциональных датчиков температуры и влажности;
- схемотехническая интеграция, т.е. размещение датчиков на одной подложке с обрабатывающей схемой.

6. АВТОГЕНЕРАТОРНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ АНАЛОГОВ НЕГАТРОНОВ

6.1. Транзисторные аналоги негатронов

Транзисторные аналоги негатронов (АН) по сравнению с негатронами (динистор, тиристор, однопереходной транзистор, тунельный диод) обладают лучшей воспроизводимостью, управляемостью характеристик, повышенной температурной стабильностью, более высокими рабочими частотами. Генераторы, реализованные на АН, требуют применения минимального количества реактивных элементов (катушек, конденсаторов), поэтому АН удобно использовать в микроэлектронике. Автогенераторы в датчиках используются в следующих ролях:

- а) сигнал от автогенератора подается на одну из диагоналей мостовой схемы, в одно или несколько плеч которой включаются сенсоры (чувстви-

тельные элементы); с другой диагонали моста снимается выходной сигнал: сенсор может быть резистивным, емкостным, индуктивным;

б) сигнал автогенератора подается на цепочку, состоящую из последовательно соединенных сенсора и эталонного резистора, с которого снимается сигнал;

в) сенсор включается в схемы автогенератора и определяет его частоту; в этом случае сенсором может служить и пьезорезонатор;

Сенсор и автогенератор, реализованные как единая конструкция, представляют собой преобразователь, если к преобразователю добавить схему индикации с индикатором, получим датчик.

Обычно автогенератор представляет собой один или несколько усилительных каскадов, в которые введены гальванические положительные обратные связи или обратные связи через реактивные элементы (конденсаторы, трансформаторы, пьезорезонаторы). Если в усилителе каскады замкнуты в кольцо, получается так называемый кольцевой автогенератор. Усилительные каскады с гальваническими обратными связями часто являются аналогами негатронов, имеющими S- или N-образные вольт-амперные характеристики (ВАХ). Если АН при подключении к источнику питания имеет S-образную ВАХ, то для реализации автогенератора к клеммам, между которыми наблюдается эта ВАХ, достаточно подключить частотозадающие элементы (конденсатор, пьезорезонатор, последовательный LC-контур). Если АН имеет N-образную ВАХ, то между АН и источником питания включается параллельный LC-контур.

Известны также устройства с динамическим отрицательным сопротивлением. У них отрицательное сопротивление на определенных клеммах появляется только на высоких частотах за счет набега базы, а на статических ВАХ отсутствует участок дифференциального отрицательного сопротивления. Автогенераторы на таких устройствах организуются также подключением к ним частотозадающих элементов.

Виды ВАХ АН приведены на рис. 70. Кривые 1 и 2 – S-образные ВАХ, кривые 3 и 4 – N-образные. Частным видом N-образной ВАХ является λ -образная ВАХ.

Аналоги негатронов с S-образной ВАХ типа кривой 1 для установления рабочей точки на участке отрицательного сопротивления должны питаться от источника тока с большим внутренним сопротивлением. Такой источник тока можно заменить последовательным соединением резистора нагрузки R_n и источника напряжения (с малым внутренним сопротивлением). При этом должно выполняться неравенство

$$R_n > |R_x|,$$

где $|R_x|$ – модуль отрицательного дифференциального сопротивления.

Если ВАХ соответствует кривой 2, то рабочая точка автоматически устанавливается на участке отрицательного сопротивления при подаче напряжения питания, достаточного для вывода транзисторов в активный режим. У

таких АН напряжение питания подается на одни клеммы, а отрицательное сопротивление наблюдается между другими клеммами.

Аналог негатронов с N-образной ВАХ типа кривой 3 должен питаться от источника напряжения. Поскольку его малое внутреннее сопротивление шунтирует отрицательное сопротивление, то возникают проблемы с использованием отрицательного сопротивления в радиотехнических устройствах. Они обычно решаются включением между АН и источником напряжения катушки индуктивности. Это позволяет по постоянному току установить рабочую точку на участке отрицательного сопротивления, а по переменному току устранить шунтирование источником питания отрицательного сопротивления, так как сопротивление катушки по переменному току велико (при достаточной индуктивности на соответствующих рабочих частотах). АН с ВАХ типа кривой 4 имеет отдельные клеммы, между которыми наблюдается отрицательное сопротивление, и клеммы, на которые подается напряжение питания.

Рассмотрим схемы АН с S-образной ВАХ, нашедшие практическое применение.

На рис. 71 приведена схема аналога однопереходного транзистора, имеющего ВАХ между клеммами а-б типа 1(рис. 70). Величина отрицательного сопротивления связана с параметрами элементов схемы следующим соотношением [1]:

$$R_{\Sigma} = - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}{1 - \alpha_2},$$

где α_1 и α_2 – динамические коэффициенты передачи по току соответствующих транзисторов в схеме с общей базой ($\alpha = \Delta I_k / \Delta I_3$, ΔI_3 , ΔI_k – приращения токов коллектора и эмиттера соответственно).

Как видно, отрицательное сопротивление наблюдается, если $(\alpha_2 + \alpha_1) > 1$. Это соотношение обычно выполняется, т.к. при нормальном питании $\alpha \rightarrow 1$, наличие в знаменателе члена $(1 - \alpha_2)$ говорит о низкой температурной и режимной стабильности R_{Σ} , т.к. величина α_2 близка к 1 и заметно меняется в зависимости от тока эмиттера и температуры.

На рис. 72 приведена схема аналога динистора, имеющего ВАХ между клеммами а-б типа 1 (рис. 70).

При этом [2]

$$R_{\Sigma} = -R_2 (\alpha_1 + \alpha_2 - 1).$$

Видно, что R_{Σ} отрицательно также при $(\alpha_1 + \alpha_2) > 1$. Но R_{Σ} более стабильно, чем у аналога однопереходного транзистора.

Аналог динистора на КМОП-транзисторах приведен на рис. 73 [3]. Здесь транзистор VT 1- с индуцированным каналом n-типа, а транзистор VT 2- со встроенным каналом p-типа. Величина отрицательного сопротивления

$$R_{\Sigma} = - \frac{(1 + \mu_4 S_2 R_2)(1 + \mu_2 S_1 R_1)}{S_1 + S_2 + S_1 S_2 (\mu_2 R_1 + \mu_4 R_2)},$$

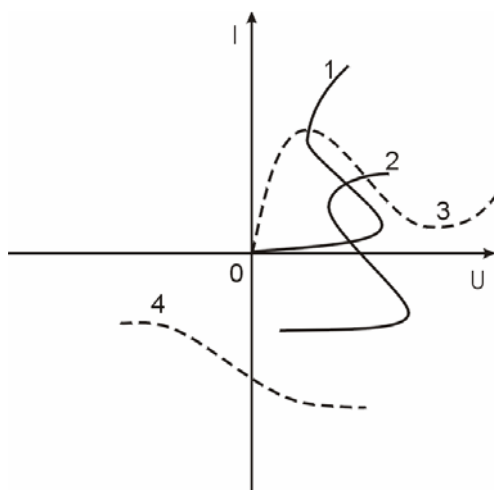


Рис. 70. Виды ВАХ АН

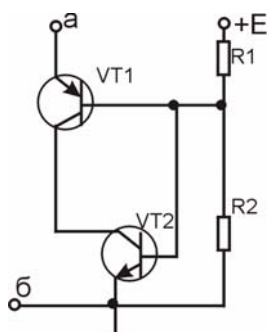


Рис. 71. Схема аналога однопереходного транзистора

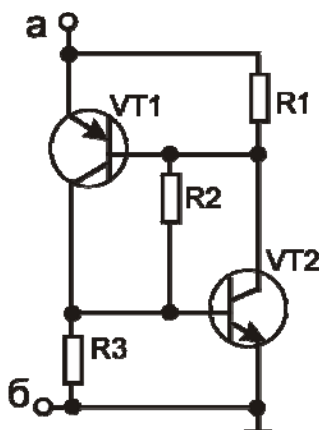


Рис. 72. Схема аналога динистора на биполярных транзисторах

где μ_1 и μ_2 , S_1 и S_2 – динамические коэффициенты усиления по напряжению и крутизны соответствующих транзисторов.

На рис. 74 приведены схемы каскодных АН на биполярных транзисторах одинакового типа проводимости [4]. Они имеют ВАХ типа кривой 2 (рис. 70). Для первой схемы

$$R_{\Sigma} = -0.5R_3 \left[\frac{\alpha_2 \alpha_3 \left(\frac{R_1}{R_3} - \alpha_4 \right)}{1 + \alpha_2 \frac{R_1}{R_3}} + \alpha_1 \alpha_4 \right],$$

а для второй

$$R_{\Sigma} = -0.5R_1 (\alpha_1 + \alpha_2 \alpha_3).$$

Если в первой схеме все транзисторы одинаковы, $R_1=R_3$, $R_2=R_4$, то

$$R_{\Sigma} = -\frac{\alpha^2}{1 + \alpha} R_1.$$

При изменении α в пределах 0,95-1 коэффициент при R_1 меняется незначительно, поэтому схема обладает повышенной температурной и режимной стабильностью отрицательного сопротивления.

Схема каскодного АН на полевых транзисторах приведена на рис. 75 (можно использовать и МДП-транзисторы со встроенным каналом). Она имеет ВАХ типа 2 (см рис.70). При одинаковых транзисторах $R_1=R_2$ [4]

$$R_{\Sigma} = -\frac{R_1(\mu - 1)}{2}.$$

Видно, что отрицательные сопротивления наблюдается только при $\mu > 1$.

Схемы каскодных АН с токовыми отражателями приведены на рис. 76 [5]. Они имеют ВАХ типа 2 (рис. 70) и питаются от двух источников напряжения, обладают повышенными рабочими частотами, $R_{\Sigma} \approx -R_1$

Схема каскодного АН на основе модернизированного триггера Шмидта представлена на рис.77 [4]. При одинаковых транзисторах, $R_1 > R_2$, $R_2 > R_3$, $R_4 \gg R_1$ (можно R_4 заменить источником тока) величиной

$$R_{\Sigma} = -R_1 \left[\alpha \left(1 + 1.5 \frac{R_2}{R_3} \right) - \left(1 + 0.5 \frac{R_2}{R_3} \right) \right].$$

Особенностью схемы является заземленность клеммы б. ВАХ имеет вид кривой 2 (рис. 70).

Схема АН на биполярных транзисторах с гальваническими перекрестными коллекторно-базовыми связями показана на рис. 78 [6]. При одинаковых транзисторах, $R_1=R_3$, $R_2=R_4$

$$R_{\Sigma} = -R_1 \frac{2R_2(2\alpha - 1)}{R_2 - R_1(2\alpha - 1)}.$$

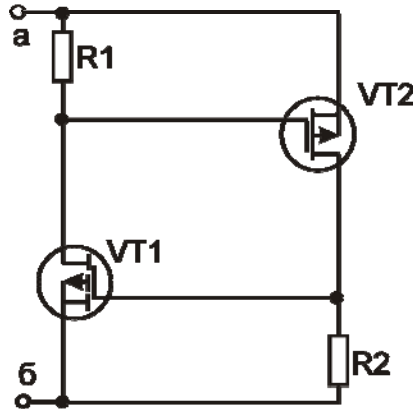


Рис. 73. Аналог динистора на КМОП-транзисторах

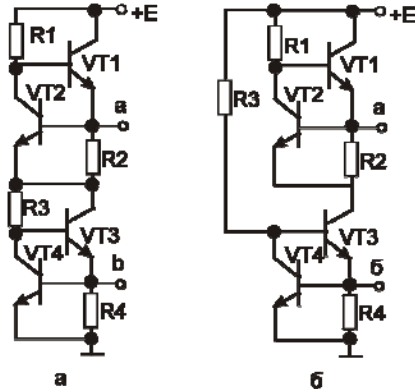


Рис. 74. Схемы каскодных АН на биполярных транзисторах одинакового типа проводимости

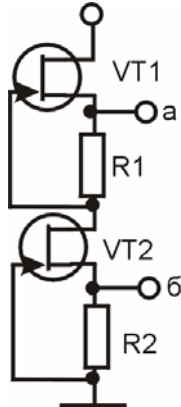


Рис. 75. Схема каскодного АН на полевых транзисторах

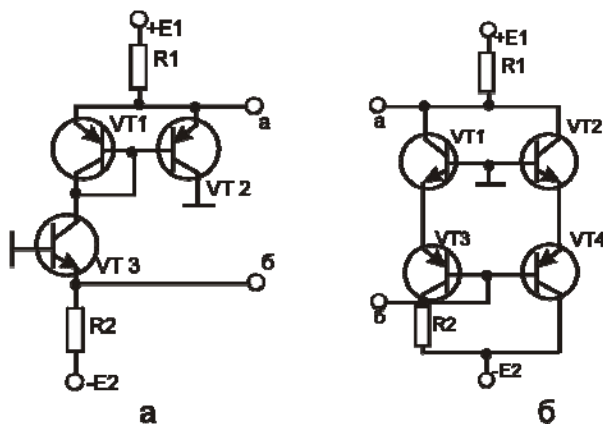


Рис. 76. Схемы каскодных АН с токовыми отражателями

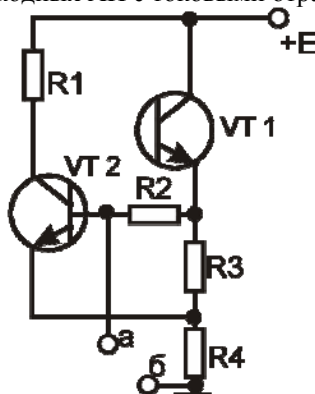


Рис. 77. Схема АН на основе модернизированного триггера Шмидта

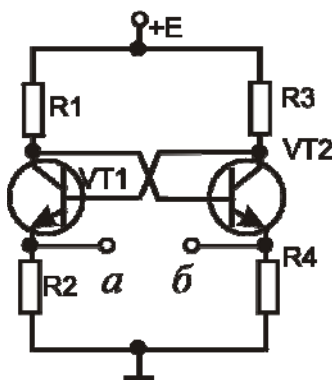


Рис. 78. Аналог негатрона на биполярных транзисторах с перекрестными коллекторно-базовыми связями

Отрицательное сопротивление наблюдается при $R_2 > R_1$, поэтому резисторы R_2 и R_4 лучше заменять на источники тока. ВАХ имеет вид кривой 2 (рис. 70), но при $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$ участок отрицательного сопротивления проходит через нули тока и напряжения, чем эта схема отличается от других.

Стремление повысить рабочие частоты АН ведет к включению биполярных транзисторов по схеме с общей базой. АН на таких транзисторах, включенных с перекрестными коллекторно-базовыми связями, показан на рис. 79 [7]. У этой схемы участок отрицательного сопротивления появляется только на динамической ВАХ на высоких частотах, когда сопротивления конденсаторов C_1 и C_2 малы. При $R_2 \gg R_1$ ($R_1 = R_6$, $R_2 = R_5$, $R_3 = R_4$), $\alpha \rightarrow 1$ величина $R_{\Sigma} \approx -2R_1$. По сравнению с предыдущей схемой рабочие частоты возрастают в 3-5 раз.

Аналог негatrona с S-образной ВАХ типа 1 (рис. 70), приведенный на рис. 80 [8, 9], имеет

$$R_{\Sigma} = R_2 \frac{\frac{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}{\alpha_2} - \frac{R_4\alpha_1}{R_3+R_4}}{1 + \frac{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}{\alpha_2} - \frac{R_4\alpha_1}{R_3+R_4}}.$$

При $\alpha_1 = \alpha_2 \rightarrow 1$

$$R_{\Sigma} = -R_2 \frac{R_4}{R_3}.$$

Видно что выбором номиналов резисторов можно в широких пределах изменять величину R_{Σ} .

Схема аналога негatrona с ВАХ S-типа вида 2 (рис. 70) на полевом и биполярном транзисторах показана на рис. 81, а [10]. Величина

$$R_{\Sigma} = -\frac{R_1(\mu-1)}{2} + R_2\mu\beta,$$

где β - коэффициент передачи биполярного транзистора по току в схеме с общим эмиттером.

Видно, что сопротивление R_1 следует выбирать высоким, а R_2 – малым.

Все АН с S-образной ВАХ имеют годограф полного сопротивления, показанный на рис. 82.

Получить аналитические выражения для мнимой составляющей $\text{Im } R_{\Sigma}$ и действительной составляющей $\text{Re } R_{\Sigma}$ можно, если использовать аппроксимации частных зависимостей коэффициентов α , μ и крутизны S :

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_{\alpha}}}; \mu = \frac{\mu_0}{1 + \frac{f}{f_{\mu}}}; S = \frac{S_0}{1 + \frac{f}{f_s}},$$

где α_0 , μ_0 и S_0 – значения этих параметров на низких частотах, f_{α} , f_{μ} и f_s – граничные частоты, на которых соответствующие коэффициенты уменьшаются в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с их низкочастотными значениями.

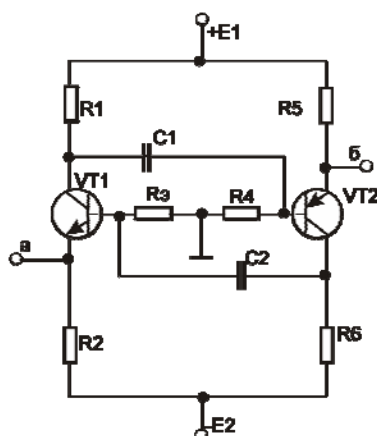


Рис. 79. АН на биполярных транзисторах, включенных по схеме с общей базой

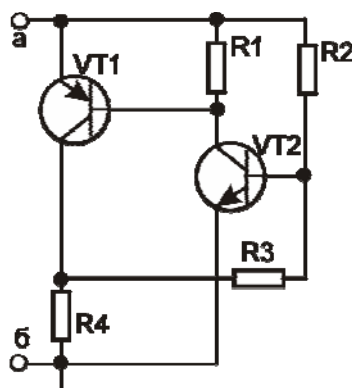


Рис. 80. АН на двух усилителях

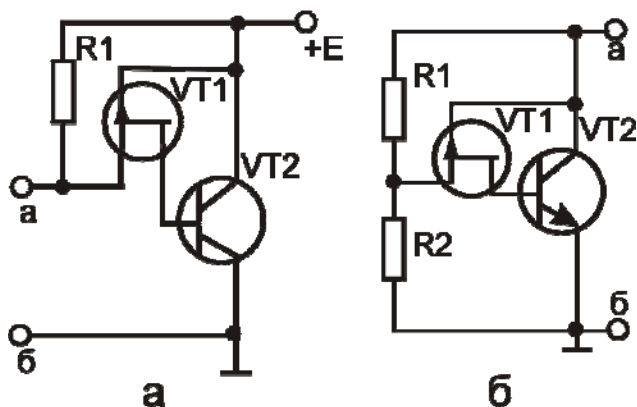


Рис. 81. АН на полевом и биполярном транзисторах

Аппроксимационные зависимости α , μ и S подставляются в формулы для R_{Σ} и после простых преобразований получают формулы для полного сопротивления в виде $\text{Re}R_{\Sigma} + j\text{Im}R_{\Sigma}$, а также выражения для $\text{Re}R_{\Sigma}$ и $\text{Im}R_{\Sigma}$. Так как $\text{Im}R_{\Sigma} = j\omega L_{\Sigma}$, то эквивалентная индуктивность в последовательной схеме замещения с $\text{Re}R_{\Sigma}$ определяется выражением

$$L_{\Sigma} = \frac{\text{Im}R_{\Sigma}}{\omega},$$

Теперь рассмотрим схемы нашедших практическое применение АН с N-образной ВАХ. Схема АН с N-образной ВАХ типа 3 (рис.70) на полевом и биполярном транзисторах приведена на рис. 81, б [10]. Эквивалентная проводимость между клеммами а-б

$$Y_{\Sigma} = -\frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \alpha \mu}{(1 - \alpha)(\mu - 1)}.$$

Эта схема не отличается высокочастотностью.

Другая схема с такого же вида ВАХ приведена на рис. 83 [5]. Величина

$$Y_{\Sigma} = -\beta_1/R_2.$$

Здесь используются биполярные транзисторы одинакового типа проводимости. Рабочие частоты не превышают f_{β} (граничная частота коэффициента β).

Схема АН, получившего название λ -диода, показана на рис. 84 [11], величина

$$Y_{\Sigma} = -\frac{S_1 S_2}{(S_1 + S_2)}.$$

Схема отличается отсутствием резисторов и простотой.

Схема высокочастотного АН с N-образной ВАХ типа 4 (рис. 70) приведена на рис. 85 [5], при одинаковых транзисторах величина Y_{Σ} будет равна

$$Y_{\Sigma} = -\frac{2\alpha - 1}{2r_{\Sigma}},$$

где r_{Σ} – сопротивление эмиттерного перехода, зависящее от тока эмиттера, определяемого резистором R_1 .

Схема АН с N – образной ВАХ вида 3 (рис.70) приведена на рис. 86 [8,9,12]. Она отличается от АН, приведенного на рис. 80, другим типом проводимости транзистора VT1, эквивалентная проводимость между клеммами а-б имеет вид

$$Y_{\Sigma} = -\frac{1}{R_2} \frac{(0.5R_1 A - R_4) - (R_2 + 0.5R_1) \left[(1 - \alpha_2) + \frac{R_4}{R_3} \right]}{R_4(1 - \alpha_2) - 0.5R_1 A(1 - \alpha_2) + 0.5R_1(1 + \alpha_2) \left[(1 - \alpha_2) + \frac{R_4}{R_3} \right]},$$

где $A = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)(2\alpha_1 - 1) + \alpha_2$. При $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \rightarrow 1$, $R_4 \ll R_3$

$$Y_3 = -\frac{R_3}{R_2 R_4}.$$

Рабочие частоты этого АН не высоки.

Таким образом, приведен обзор основных нашедших применение АН. Более подробно с АН можно познакомиться, используя литературу, приведенную в ссылках. В этой же литературе можно найти выражения для $\text{Re } R_3$, $\text{Re } Y_3$, $\text{Im } R_3$, $\text{Im } Y_3$, L_3 , C_3 .

Годограф эквивалентной проводимости АН с N-образной ВАХ имеет вид, показанный на рис. 87.

Выражения для $\text{Im } Y_m$ и $\text{Re } Y_3$ получаются таким же способом, как и выражения для $\text{Re } R_3$ и $\text{Im } R_3$. При этом выражение для полной проводимости приводится к виду

$$R_3 Y_3 + j \text{Im } Y_3.$$

Так как $\text{Im } Y_3 = \omega C_3$, то эквивалентная емкость в параллельной схеме замещает с $\text{Re } Y_3$ (R_3):

$$C_3 = \frac{\text{Im } Y_3}{\omega}.$$

Выражения для $\text{Re } R_3$, $\text{Re } Y_3$, $\text{Im } R_3$, $\text{Im } Y_3$, L_3 , C_3 можно найти в [1-15].

6.2. Пьезоэлектрические датчики

Чувствительным элементом в пьезорезонансных датчиках являются пьезоэлектрические резонаторы, в которых используются объемные или поверхностные акустические волны [16]. Такие пьезорезонаторы включаются в схему автогенератора и определяют его частоту. Воздействующим фактором на резонатор является температура, сила, давление, ускорение, влажность. Пьезорезистор на объемных волнах (ОВ) представляет собой конденсатор, диэлектриком которого является пьезоматериал (рис. 88). Пьезорезонатор в виде пластинки резонирует на трех основных частотах:

$$f_1 = \frac{N_e}{e}, f_2 = \frac{N_b}{b}, f_3 = \frac{N_h}{h},$$

а также на гармониках (N_e , N_b , N_h - частные постоянные).

Пьезорезистором на поверхностных акустических волнах (ПАВ) может служить встречно-штыревой преобразователь (рис. 89). Обычно выбирается $a=h$. В этом случае резонансная частота

$$f_0 = \frac{V_a}{4a},$$

где V_a - скорость распространения ПАВ.

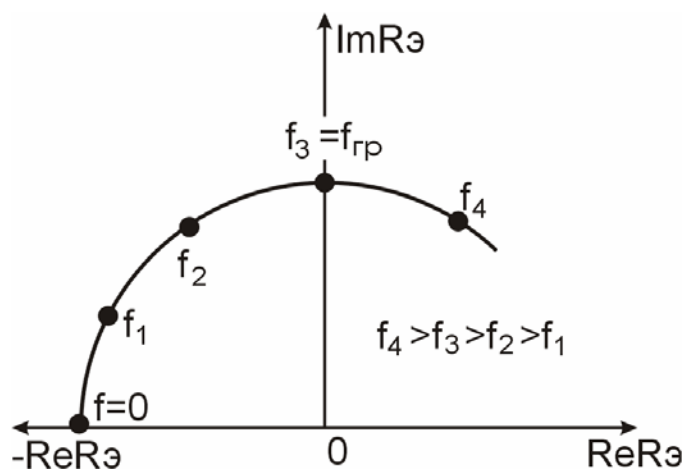


Рис. 82 Годограф полного сопротивления АН с S-образной ВАХ

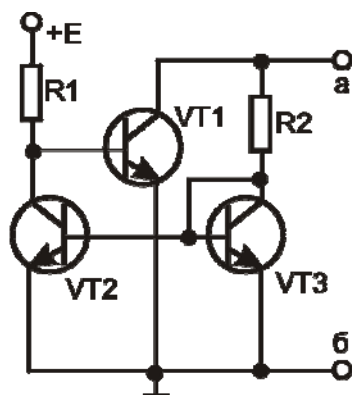


Рис. 83. Схема АН с токовым отражателем

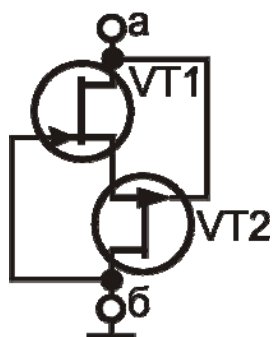


Рис. 84. Схема λ - диода

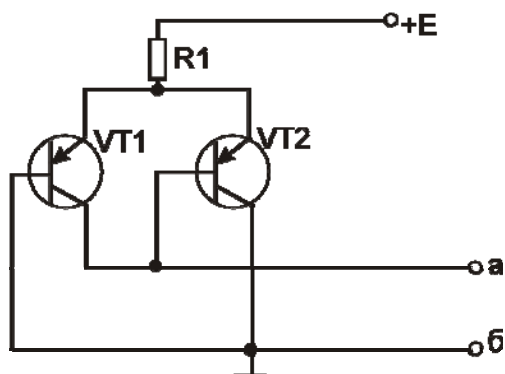


Рис. 85. Схема высокочастотного АН с N-образной ВАХ

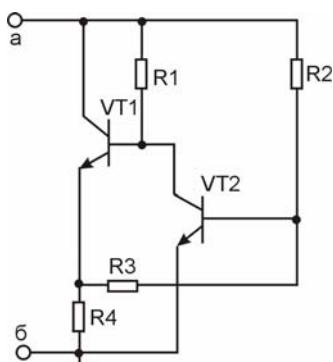


Рис. 86. Схема АН на эмиттерном повторителе и усилителе

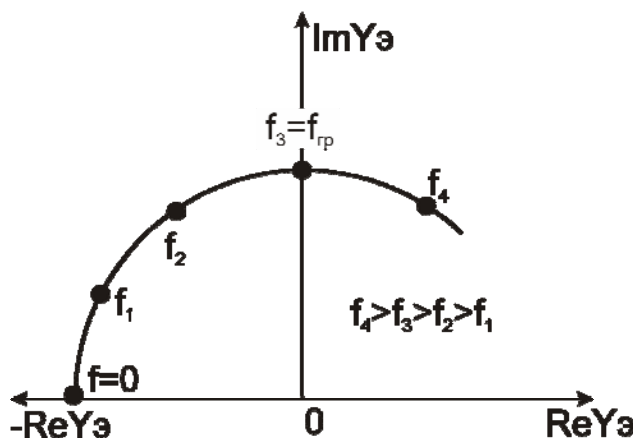


Рис. 87 Годограф эквивалентной проводимости для АН с N-образной ВАХ.

Под влиянием внешних факторов могут меняться размеры l , b , h , a или частотные постоянные и скорость V_a .

На основе пьезорезисторов выполняются пьезотрансформаторы, которые также могут служить сенсорами. Простейшие пьезотрансформаторы на ОВ и ПАВ и показаны на рис. 90. Площади выходных элементов меньше площадей входных, если требуется получить коэффициент трансформации более 1. Коэффициент трансформации примерно равен отношению этих площадей в степени $(0,33 - 1)$. Для получения автогенераторных датчиков пьезорезонаторы или пьезотрансформаторы клеммами 1-1 подключаются к клеммам а-б АН с S-образной ВАХ (рис. 91). Генерация возникает, если модуль отрицательного сопротивления превышает сопротивление, отражающее потери энергии в пьезорезонаторе и пьезотрансформаторе. Вследствие наличия реактивного сопротивления у АН и статической емкости у пьезорезонаторов и пьезотрансформаторов генерируемая частота несколько отличается от частоты последовательного резонанса пьезорезонатора или пьезотрансформатора [17-19]. Генерируемая частота не превышает $(0,1-0,5)f_0$. Иногда последовательно с пьезорезонатором (кварцевым) включают конденсатор, который служит сенсором. На рис. 92 приведены графики зависимости генерируемой частоты от напряжения питания при использовании пьезорезонатора на ПАВ. Пьезорезонатор был выполнен на ниобате лития, длина перекрытия электродов $C=5\text{мм}$; ширина электродов a и зазора между ними h равны 50 мкм , число пар электродов – 20. Резонатор подключается к клеммам а – б через разделительный конденсатор с емкостью $0,1\text{мкФ}$. Использовались транзисторы КНТ591В, $R_1=R_3=510\text{ Ом}$; $R_2=R_4=240\text{ Ом}$, $R_5=200\text{ Ом}$. Как видно, под действием аммиака частота уменьшится на $40-60\text{ кГц}$. Воздействие влажности воздуха изменяло частоту в существенно меньшей степени, а воздействие паров хлористого олова – на несколько сотен кГц . Углеводороды, спирты, угарный и природный газы не влияли на частоту генератора.

Следует заметить, что при отсутствии разделительного конденсатора после пребывания резонатора в среде аммиака или паров хлористого олова, проводящие электроды, находящиеся под большим положительным потенциалом, деградировали. Электроды, находящиеся под низким потенциалом, оставались неповрежденными.

6.3. Датчики электромагнитных полей

В радиотехнике датчиками электромагнитных полей (ЭМП) являются антенны. Антенной переносных радиоприемников ДВ- и СВ-диапазонов является ферритовый сердечник с катушкой LC - контура. Добротность этого контура определяется, в основном, добротностью катушки индуктивности и лежит в пределах 50-70. Резкое изменение размеров ферритовой антенны до такой степени, чтобы ее можно было рассматривать как компонент гибридной интегральной микросхемы, ведет к пропорциональному уменьшению добротности LC - контура. Увеличить добротность контура можно включением

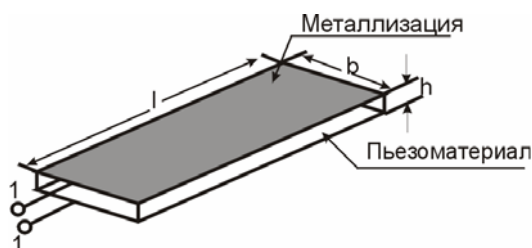


Рис. 88. Пьезорезонатор на ОВ

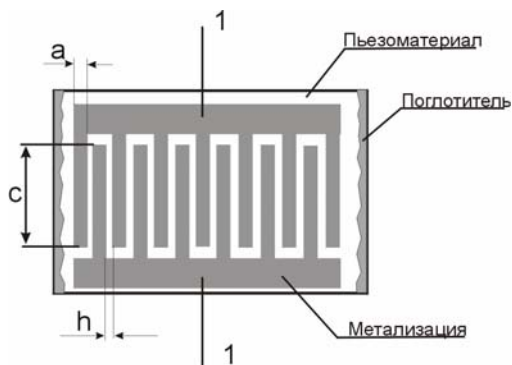


Рис. 89. Пьезорезонатор на ПАВ

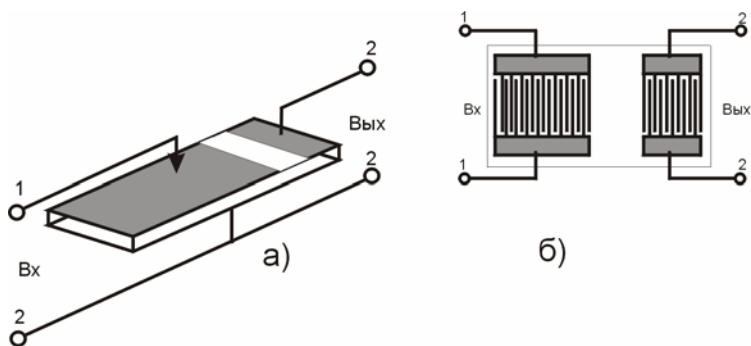


Рис. 90. Пьезорезонаторы на ОВ (а) и ПАВ (б)

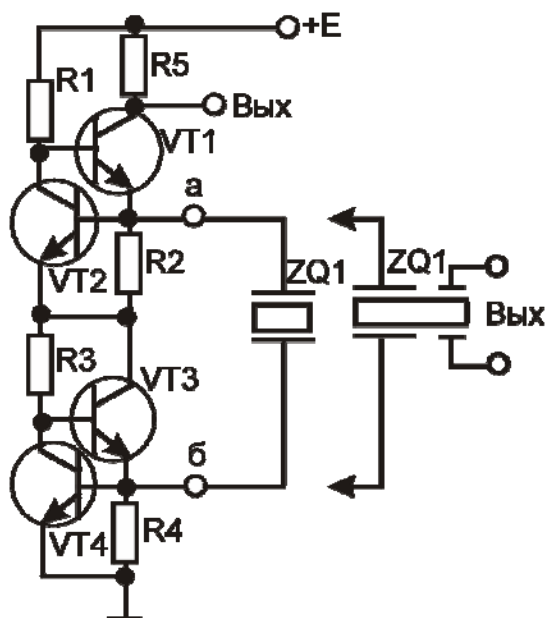
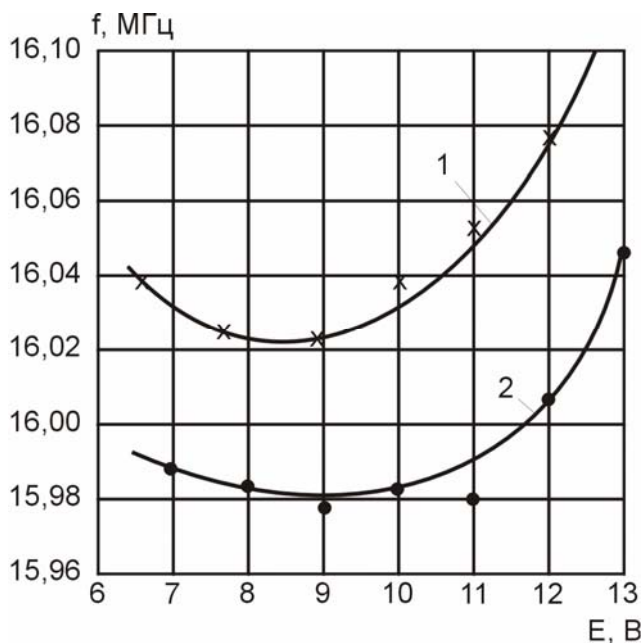


Рис. 91. Схема пьезорезонаторного датчика

Рис. 92. Графики зависимости генерируемой частоты от напряжения питания
1 – воздух; 2 – аммиак, $10^{-2} \%$

последовательно или параллельно с катушкой индуктивности отрицательно дифференцированного сопротивления [13]. Предполагаемая потеря чувствительности антенны, связанная с уменьшением занимаемого ею объема, легко может быть компенсирована микроэлектронным усилителем.

На рис. 93 и 94 показаны схемы датчиков ЭМП, настроенных на радиостанцию "Маяк" (549 мГц). В макетах датчиков использовались два типа катушек. Первая катушка была намотана на стержневой сердечник из феррита марки 600 НН (диаметр сердечника - 2 мм, его длина - 12 мм) проводом ПЭВ - 0,06 до получения индуктивности $L=170$ мГн. Вторая катушка не содержала магнитного сердечника. Она наматывалась таким же проводом на плоское основание из оргстекла толщиной 0,5 мм с радиальными прорезями, диаметр катушки - 20 мм, индуктивность та же. Такая катушка является прототипом печатной катушки, получаемой напылением на ситалл меди с подслоем хрома с последующей фотолитографией и травлением.

Добротность катушки регулировалась резистором R_k , служащим для частичной компенсации отрицательного сопротивления. Изменением емкости конденсатора C_k удавалось перестроить по частоте весь диапазон СВ. К выходу датчика ЭМП подключался усилитель (коэфф. усиления 100), детектор и высокоомные наушники. При перестройке датчика ЭМП приходилось изменять сопротивление R_k , чтобы сорвать возникающую генерацию. Это является недостатком перестраиваемых датчиков ЭМП описанного типа.

При использовании высокочастотных транзисторов и катушек с меньшей индуктивностью удавалось перестроить диапазоны КВ и УКВ. Антенны сохраняли четко выраженную направленность на радиостанцию.

Схема рис. 93 из-за включения усилителя на транзисторах VT5 и VT6 обладает коэффициентом усиления равным 60, поэтому имеет повышенную чувствительность.

Схема рис. 94 строится на однотипных транзисторах, но менее стабильна.

В твердотельных датчиках ЭМП можно использовать свойство АН с S-образной ВАХ служить конвертором отрицательного сопротивления [20].

В этом случае емкость конденсатора, подключенного параллельно резистору, сопротивление которого конвертируется в отрицательное, на клеммах а-б конвертируется в индуктивность. Эта индуктивность может входить в эквивалент колебательного контура, который и служит датчиком ЭМП.

Пример схемы такого датчика приведен на рис. 95. Здесь емкость C_1 на клеммах а-б создает эквивалентную индуктивность, причем

$$L_{\text{э}} = kR_1^2 C_1,$$

где k - коэффициент конверсии, для данной схемы при $\alpha \rightarrow 1$, $k=0,25$.

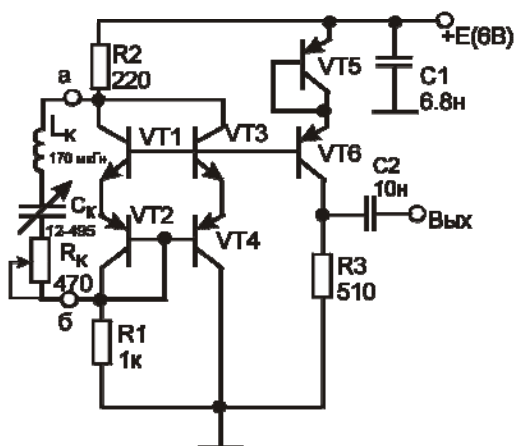


Рис. 93. Схема датчика ЭМП на АН с S-образной ВАХ.
 VT1, VT3 – КТ315; VT2, VT4 – VT6 – КТ361

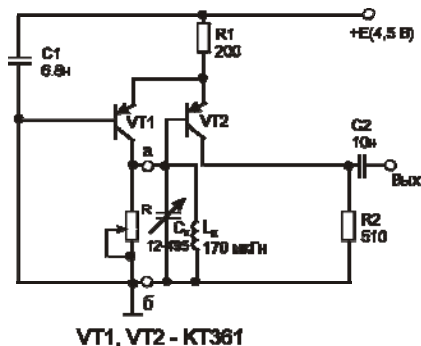


Рис. 94. Схема датчика ЭМП на АН с N-образной ВАХ

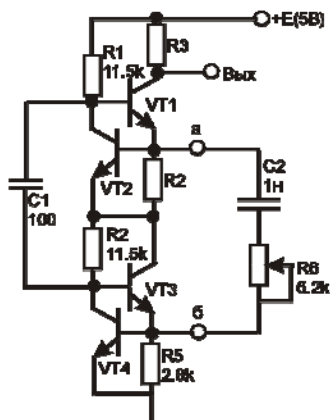


Рис. 95. Схема твердотельного датчика ЭМП

Конденсатор C2- контурный, резистором R6 регулируется добротность контура.

Действующий макет датчика был построен на двух микросхемах K119CC2 при использовании внешних конденсаторов C1 и C2, резисторов R3 и R6. Внешние элементы помещались в заземленный экран. При $E=5B$ резонансная частота контура $f_0=90$ кГц. При уменьшении расстояния между датчиком и источником излучения от 30 до 2 см выходное напряжение возрастало с 1 до 50 мВ. Можно сделать вывод, что чувствительность твердотельных датчиков ЭМП невысока.

Идею построения датчиков ЭМП можно использовать для реализации малогабаритных приемных телевизионных антенн.

Комнатная телевизионная антенна (рис. 96) состоит из двухпроводного кабеля длиной 1160 мм, платы с проводниковой дорожкой длиной 2 – 6 м, аналога негatrona, который используется как компенсатор активного сопротивления кабеля с проводниковой дорожкой [21, 22]. Плата с проводниковой дорожкой и АН изготавливается по технологии гибридных интегральных микросхем. Плата представляет собой ситалловую подложку с размерами 48 x 60 мм, на которой выполнена змеевидная проводящая дорожка шириной 0,5 мм с зазором между проводниками 0,5мм. Дорожка выполнена из металлов V–Cu–Ni, ее длина составляет 2,4 м, сопротивление – 144 Ом. Аналог негatrona между клеммами а – б имеет эквивалентное отрицательное сопротивление $R_{ab} = -R_1$. Величина сопротивления R_1 выбрана равной 270 Ом, т.к. она должна превышать сопротивление проводящих дорожек и кабеля. Точная компенсация сопротивлений регулируется добавочным резистором R_d . Аналог негatrona выполнен на транзисторах КТ3132 (n-p-n) и КТ3123 (p-n-p) с граничными частотами 3-5 ГГц. Применение СВЧ-транзисторов обусловлено необходимостью иметь на частотах первого канала телевидения (48,5-56-25 МГц) активное отрицательное сопротивление (с малой индуктивной добавкой). Не должны иметь реактивную составляющую и резисторы R_1, R_2, R_n . Именно этим и обусловлена необходимость их изготовления по толсто пленочной или тонкопленочной технологии. Все устройство может быть встроено в корпус телевизора. Антенна принимает сигнал от первого до двенадцатого канала.

6.4. Датчики температуры с частотным выходом

В качестве чувствительного элемента обычно используются терморезисторы или диоды. При резистивном сенсоре его можно включить вместо резистора, отвечающего за питание транзисторов АН по постоянному току, если на АН построен емкостной автогенератор (к клеммам а-б подключим конденсатор). Например, при использовании АН, приведенных на рис. 76, терморезистор включается вместо резистора R2. При использовании диодов в качестве сенсоров один диод или последовательная их цепочка включается последовательно с тем же резистором. На рис. 97 приведен пример датчика

температуры с диодными сенсорами (VT1, VT2, VT6, VT7). Здесь ток, протекающий через транзисторы, при $R_2=R_3$ будет

$$I = \frac{0.5E - 4U_{\text{Эб}}}{R_2}.$$

Так как напряжение $U_{\text{Эб}}$ с ростом температуры уменьшается на $2,2 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$, то этот ток возрастает, меняется ВАХ между клеммами а-б и, следовательно, частота автогенератора [23]. Из приведенного на рис. 97, б графика можно определить, что чувствительность датчика составляет $-0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Если в АН использовать МДП-транзисторы, параметры которых сильно зависят от температуры, то эти транзисторы, входящие в АН, одновременно могут служить и сенсорами. Пример такого датчика температуры приведен на рис. 98. Чувствительность составляет $+0,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При использовании других схем АН график зависимости частот от температуры не всегда получается линейным.

Понятно, что сенсором может служить и сегнетоконденсатор. Однако в твердотельном исполнении датчик температуры проще всего изготавливается при использовании диодов.

6.5. Датчики магнитного поля с частотным выходом

Сенсорами магнитного поля могут служить элементы Холла, гальвано-магнитнорекомбинационные (ГМР) элементы, магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы. Подход к построению датчиков магнитного поля с магниторезисторами и магнитодиодами тот же, что и при построении датчиков температуры с терморезисторами и диодами. Рассмотрим случай, когда сенсорами служат элементы Холла.

Каждый датчик содержит элемент Холла, включенный в автогенератор на транзисторном аналоге негатрона. Так как продольный и поперечный контакты элемента Холла гальванически связаны между собой, это накладывает ограничения на выбор схемы аналога негатрона. Исследованы три схемы датчиков, использовался элемент Холла производства завода “АЗОН” (Баку). На рис. 99–101 приведены принципиальные электрические схемы датчиков и графики зависимости изменения частоты от индукции магнитного поля. [24]. Направление индукции выбрано таким, чтобы с ее увеличением частота возрастала. При изменении направления индукции на обратное с увеличением индукции частота уменьшается, характер зависимости сохраняется.

В первом датчике (рис. 99) используются два дополнительных конденсатора С2 и С3, обеспечивающие асимметрию схемы по переменному току, датчик отличается малым количеством транзисторов.

Во втором датчике (рис. 100) используется один дополнительный конденсатор С2, но уже требуются 4 комплементарных транзистора. В третьем датчике (рис. 101) нет дополнительных конденсаторов, но требуются 6 транзисторов одного типа проводимости. Последний датчик обладает наивысшей чувствительностью частоты к магнитному полю. Если исходная частота у первых двух датчиков меняется в пределах 3%, то у третьего датчика частота

меняется на 25% при увеличении индукции до 4 мТл. Как видно, ни одна из схем не дает строго линейной зависимости изменения частоты от индукции магнитного поля.

Рассмотрим случай, когда сенсором служит ГМР-элемент [25]. Он представляет собой два полупроводниковых резистора, изолированных р-п-переходом и разделенных прослойкой из поликремния среднего уровня легирования. Конструкция ГМР-элемента приведена на рис. 102. Сенсор включается в схему, приведенную на рис. 103. ГМР-элемент из двух резисторов вместе с резисторами R1 и R2 составляет электрический мост. Одна его диагональ подключена к источнику E, с другой напряжение разбаланса подается на базы транзисторов VT3, VT4. На транзисторах VT1 и VT4 собран аналог негatrona. Между эмиттерами транзисторов VT1 и VT2, где наблюдается отрицательное дифференциальное сопротивление, включен частотоподающий конденсатор C1. При отсутствии магнитного поля мост балансируется резисторами R1, R2. Под действием магнитного поля поток носителей заряда в полупроводниковых резисторах отклоняется. В одном из резисторов он подходит ближе к поликремнию, где высокая скорость рекомбинации, в другом он отходит от поликремния. Это ведет к изменению сопротивления, т.е. ГМР-эффекту. В результате мост разбалансируется, базы транзисторов VT3, VT4 изменяют свой потенциал, меняется ВАХ аналога негatrona и, как следствие, генерируемая частота.

График зависимости относительного изменения частоты от индукции магнитного поля B показан на рис. 104. Как видно, чувствительность линейно возрастает с увеличением напряжения питания.

6.6. Датчики на основе индуктивных балансных сенсоров и аналогов негatronов

Индуктивные балансные сенсоры (ИБС) состоят из двух плоских катушек индуктивности, сдвинутых одна относительно другой на некоторое расстояние, при котором подача сигнала на одну из катушек не дает сигнала на выходе другой. Экспериментально выявлено, что по сравнению с дифференциальными трансформаторами, индуктивными сенсорами, включенными в мостовую схему, ИБС обладают повышенной чувствительностью и более широкими функциональными возможностями.

Условие баланса можно получить, используя методику, описанную в [27]. Если для одновитковых катушек круглой формы (рис. 105,а) баланс наступает при $h=0,7a$, то для катушек квадратной формы (рис. 105,б) - при $h/a=0,37$, для катушек треугольной формы (рис. 105, в, г) - при $h/a=0,125$ и $h/a=0,7$, соответственно [28, 29]. Для многовитковых катушек выведенные условия баланса являются грубо приближенными, точное положение катушек устанавливается экспериментально.

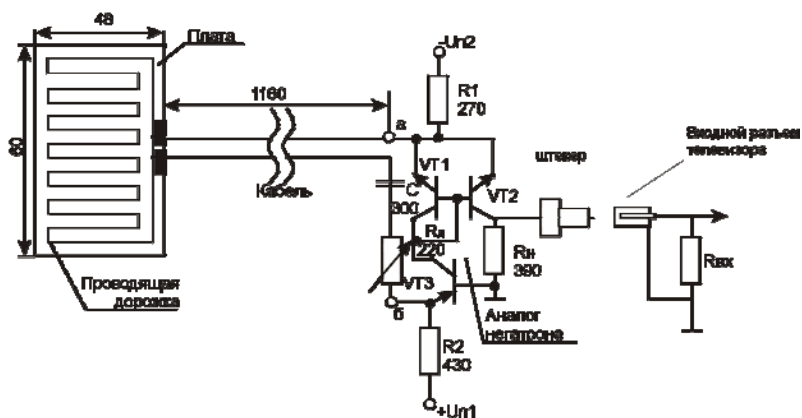


Рис. 96. Комнатная телевизионная антенна

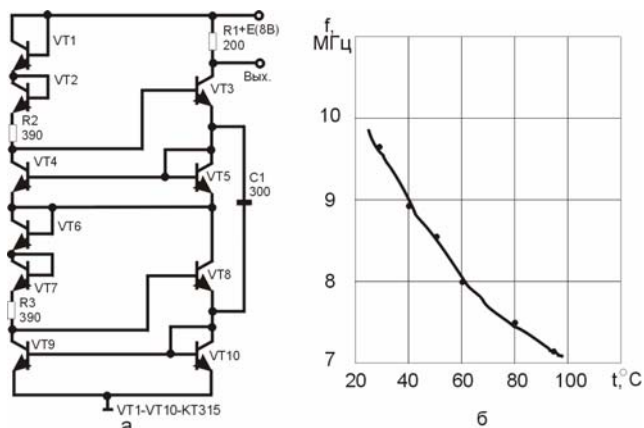


Рис. 97. Схема датчика температуры (а) и график зависимости частоты от температуры (б)

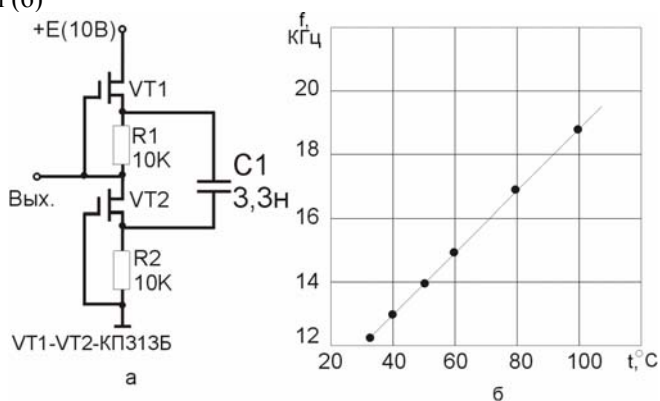


Рис. 98. Схема датчика температуры (а) и график зависимости частоты от температуры (б)

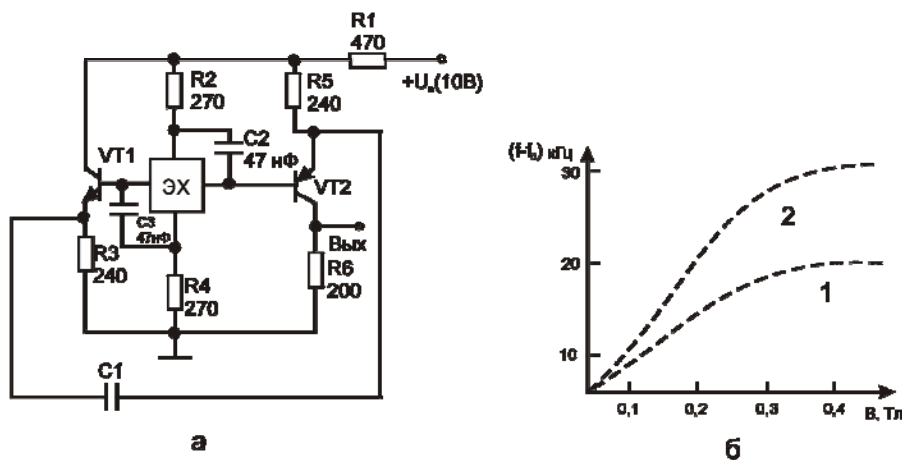


Рис. 99. Схема датчика магнитного поля на двух комплементарных биполярных транзисторах (а) и график зависимости изменения частоты от индукции магнитного поля (б). VT1 – КНТ591В, VT2 – КТС3103. 1- $C1=6800$ пФ, $f_0=862$ кГц; 2 – $C1=910$ пФ, $f_0=4619$ кГц

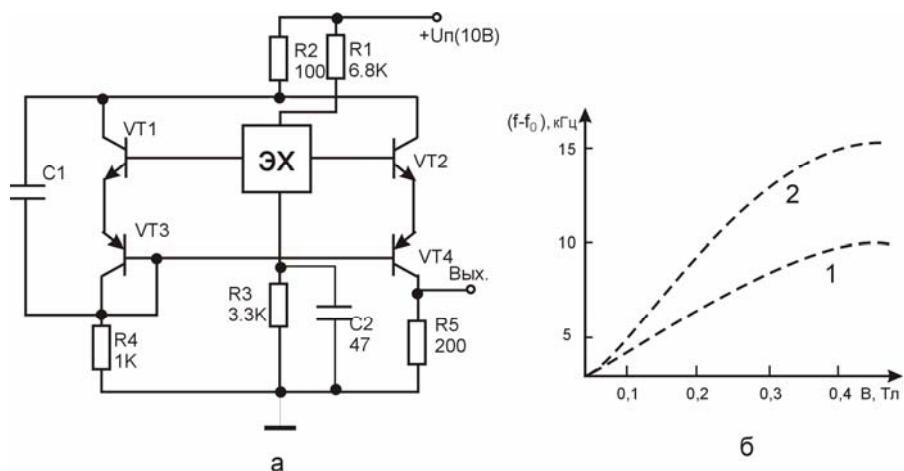


Рис. 100. Схема датчика магнитного поля на четырех комплементарных транзисторах (а) и график зависимости изменения частоты от изменения индукции магнитного поля (б). VT1, VT2 – КНТ591В, VT3, VT4 – КТС3103. 1- $C1=6800$ пФ, $f_0=572$ кГц; 2 – $C1=910$ пФ, $f_0=1283$ кГц

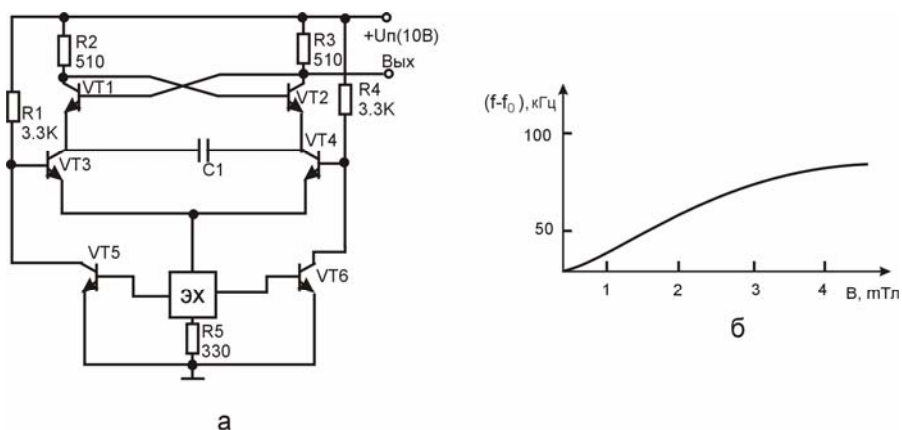


Рис. 101. Схема датчика магнитного поля на одностипных биполярных транзисторах (а) и график зависимости изменения частоты от изменения индукции магнитного поля (б). VT1 – VT6 КНТ591В, C1= 1 нФ, $f_0=290$ кГц

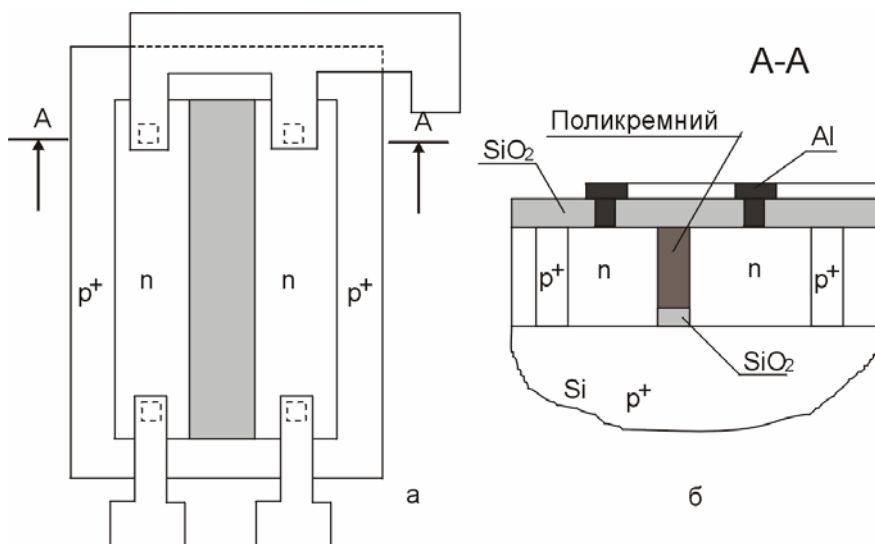


Рис. 102. Конструкция ГМР-элемента

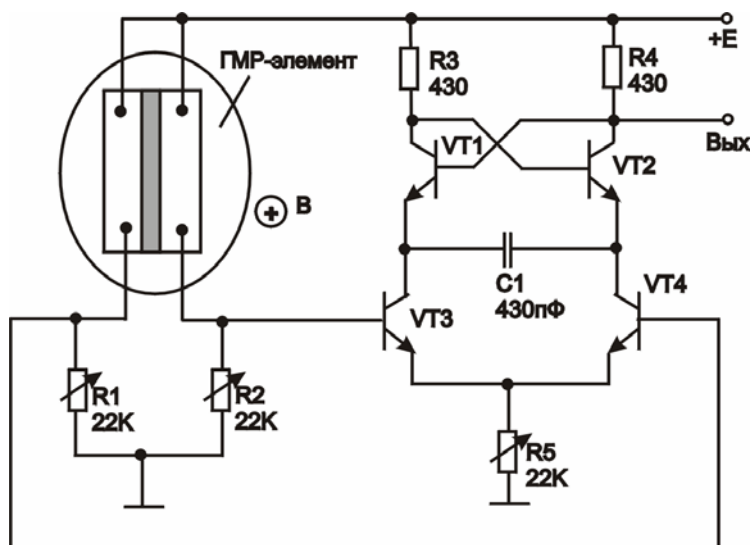


Рис. 103. Схема датчика магнитного поля с ГМР-элементом

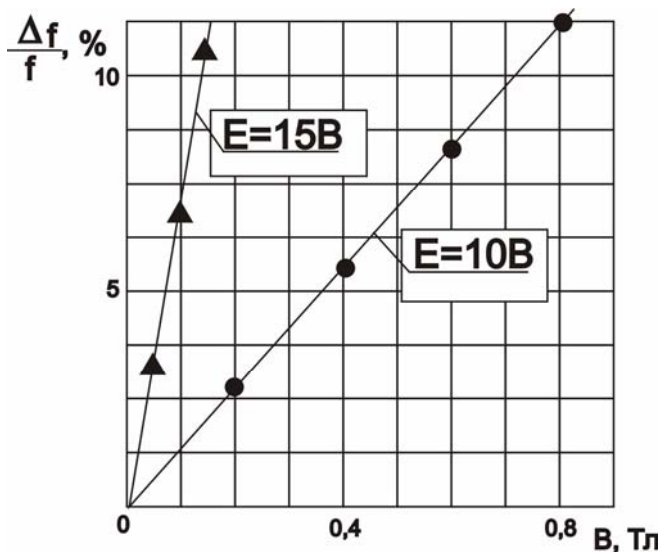


Рис. 104. График зависимости изменения частоты от магнитного поля

Для определения чувствительности ИБС к приближению вплотную медной пластины были изготовлены ИБС с гибкими катушками круглой формы при $a = 30$ мм, числе витков $N = 40$, диаметре провода $d = 0.08$ мм. Затем катушкам придавались формы, показанные на рис. 105. Одна из катушек включалась в контур автогенератора на аналоге негatrona, к выходу второй подключался вольтметр ВЗ - 41. Экспериментально в момент баланса напряжений на выходе удается установить лишь минимальное (V_0), а не нулевое. При поднесении вплотную к ИБС медной пластины замерялось напряжение разбаланса V_p . Для ИБС рис. 105, а $V_p/V_0 \leq 18$; рис. 105, б $V_p/V_0 = 10.7$; рис. 105, в $V_p/V_0 = 30.9$; рис. 105, г $V_p/V_0 = 8.8$ ($V_0 = 1\text{ мВ}$).

Как видно, наивысшей чувствительностью обладает вариант ИБС, показанный на рис. 105, в. Такой вариант ИБС использовался в приставке к вольтметру ВЗ - 41 для определения проводимости воды. Катушки были выполнены плоскими на пластине из оргстекла толщиной 0.5 мм с прорезями (размер $a = 20$ мм, число витков $N = 20$, диаметр провода $d = 0.08$ мм). При помещении ИБС в водопроводную воду (сильно минерализованную) $V_p/V_0 = 41.7$. Это отношение при квадратной и круглой формах катушек оказалось в 2 - 3 раза меньшим [30].

В описанных выше экспериментах использовался маломощный аналог негatrona с N-образной вольт-амперной характеристикой при токах через транзисторы порядка 0,15 мА, в котором при поднесении металла вплотную к ИБС не происходил срыв колебаний. При использовании же мощного аналога негatrona с S-образной ВАХ на четырех транзисторах с токами через транзисторы порядка 40 мА при поднесении металлов к ИБС на малое расстояние за счет вносимых потерь происходил срыв колебаний. Использовался ИБС с круглыми катушками диаметром $a = 71$ мм, числом витков $N = 140$, диаметр провода $d = 0.08$ мм. Графики зависимости напряжения разбаланса от расстояния H между металлической пластиной и ИБС приведены на рис. 106. Как видно, при $H < 3$ см происходит срыв колебаний. Это явление можно устранить, создав больший запас по возбуждению, увеличив отрицательное сопротивление. ИБС начинает чувствовать приближение металлов на расстоянии 35 - 42 см. Изменение толщины металлических листов (более 0,2 мм) практически не влияет на показания вольтметра из-за того, что вихревые токи на частотах в единицы МГц проникают в металл на малые расстояния (0,025 - 0,125 мм). В то же время ИБС хорошо реагирует на изменение толщины и удельного сопротивления металлических пленок толщиной менее 1 мкм.

Такой ИБС реагирует и на приближение диэлектриков (рис. 107). Увлажнение поверхности диэлектриков увеличивает напряжение разбаланса в 5-10 раз. Несмотря на явную чувствительность ИБС к влажности диэлектриков, использование их для определения влажности рыхлых, сыпучих и твердых диэлектриков затруднено из-за неконтролируемости загрязнений диэлектриков веществами, диссоциирующими в воде.

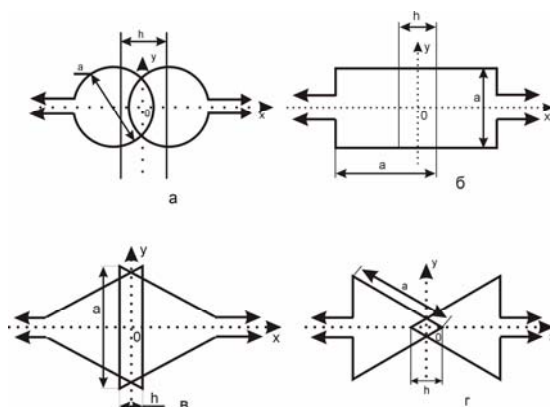


Рис. 105. Формы ИБС

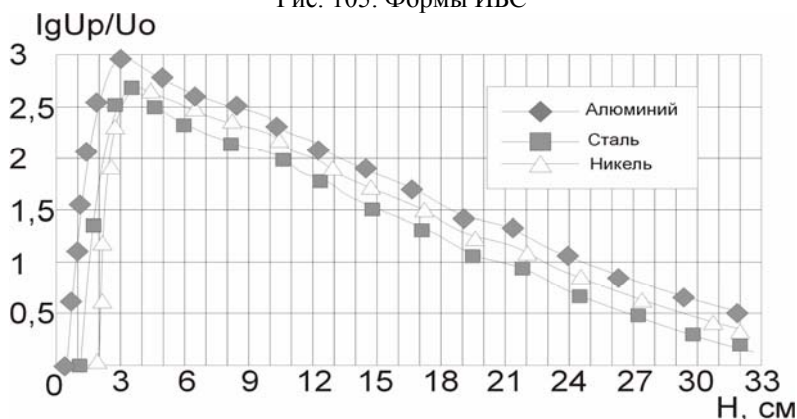


Рис. 106. График зависимости напряжения разбаланса от расстояния между металлической пластиной и ИБС

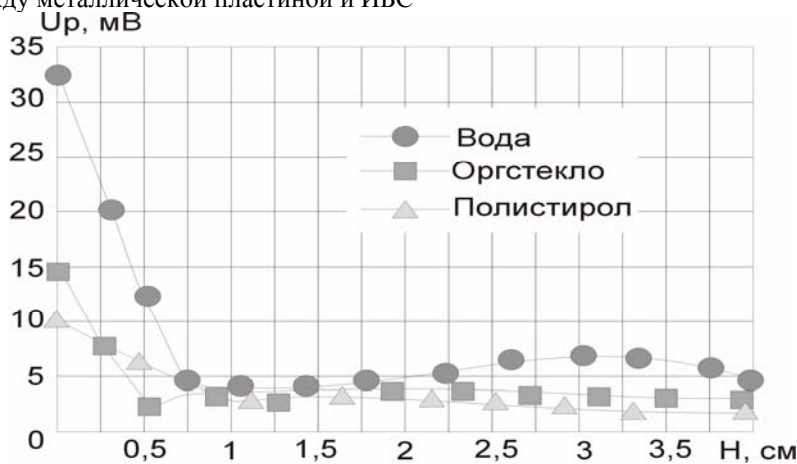


Рис. 107. Реакция ИБС на приближение диэлектриков

Если устранить срыв колебаний при приближении ИБС к металлу, последние можно использовать для определения толщины диэлектрических покрытий на металлах, для построения плоских весов. При использовании же катушек, реализованных методами полупроводниковых интегральных микросхем, можно построить микросхемы датчиков приближения металлов и пальцев человека. В весах использовались плоские прямоугольные катушки с $a = 20$ мм, числом витков $N = 20$, диаметром провода $d = 0.08$ мм.

Тонкий фольгированный текстолит площадью 3×5 см² и толщиной 0,3 мм приклеивался к бумажному гофру на расстоянии 3 мм от катушек, и в этом состоянии устанавливался баланс перемещением одной из катушек. Первая катушка подключалась к аналогу негatrona, вторая - к вольтметру ВЗ-41. Измеряемая масса, помещаемая на фольгированный текстолит, приближала металл к ИБС, при этом увеличивалось напряжение разбаланса. Такие весы позволяли измерять массу до 45 г с разрешающей способностью 0,5 г/мВ (точность 1,1%). Зависимость V_p от измеряемой массы линейна. Так как измеряемая масса определяется не только чувствительностью ИБС, но и свойствами гофра, то она может варьироваться в широких пределах. Эти же весы можно использовать для измерения воздушного давления, как основу для радиомикрофона.

Исследовалось также поведение напряжения разбаланса при движении над ИБС по осям X, Y проводящих пластин различной формы (прямоугольник, треугольник, крест, эллипс) или такой же формы проволочного контура. График зависимости V_p от положения центра алюминиевого прямоугольника с размерами 5,8 x 1,0 см показан на рис. 108 (большой размер - по оси Y). Как видно, форма зависимости или колоколообразная, или трехлепестковая. В ряде случаев при $|x|, |y| > 7$ см наблюдается второй небольшой пик.

Колоколообразная форма зависимости является более предпочтительной при использовании ИБС в тахометре, т.к. она лучше считывается частотомером, чем трехлепестковая. Важно отметить, что максимум выходного сигнала соответствует положению проводника над областью, являющейся общей для двух катушек. ИБС можно использовать в датчиках перемещения положения проводящих предметов в плоскости.

С помощью ИБС можно обнаружить трещины в металлическом листе, даже если он покрыт краской, поскольку трещина препятствует протеканию вихревых токов, можно измерять расстояние между прорезями или отверстиями в металле. Принципиальная схема вихретокового дефектоскопа с ИБС приведена на рис.110. На транзисторах VT1, VT2 собран аналог негatrona с N-образной вольт-амперной характеристикой между клеммами подключения контура L1C1. Первая катушка ИБС L1 связана со второй катушкой L2, они размещены на разных текстолитовых пластинах, так что перемещением одной пластины относительно другой можно устанавливать баланс (минимальные показания микроамперметра ВА1). Если баланс устанавливается при наличии металла под катушками, то в момент перемещения катушек над

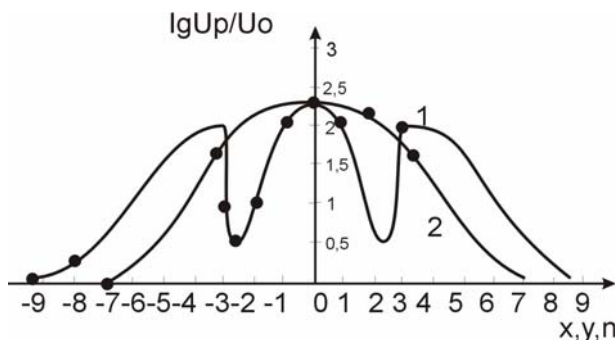


Рис. 108. Реакция ИБС при перемещении над ИБС проводящих пластин: 1- перемещение по оси X; 2- перемещение по оси Y

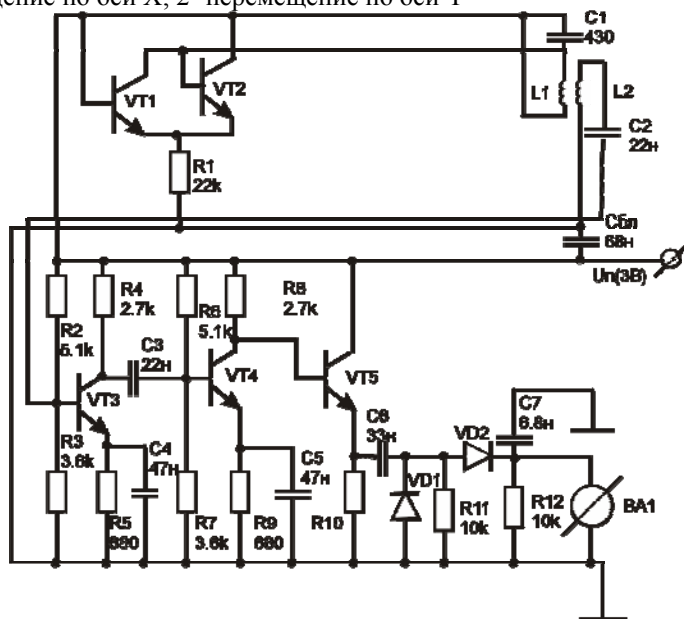


Рис. 109. Схема вихретокового дефектоскопа VT1-VT5 – КТ315; VD1, VD2 – Д2Ж; BA1 – М4761 (200 мкА).

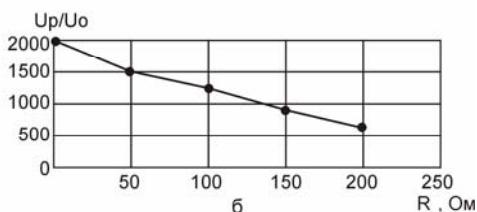
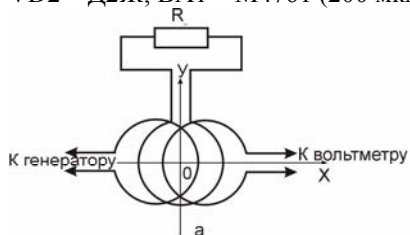


Рис. 110. ИБС с тремя катушками (а) и график зависимости выходного напряжения ИБС от сопротивления нагрузки (б)

трещиной микроамперметр даст максимальные показания (разбаланс), если баланс устанавливается при отсутствии металла, то – наоборот. На транзисторах VT3 - VT5 собран усилитель напряжения разбаланса, снимаемого с катушки L2. Далее сигнал детектируется диодами VD1 и VD2, сглаживается конденсатором C7 и подается на индикатор -микроамперметр ВА1. В эксперименте катушки имели диаметр 15 мм, намотаны проводом с диаметром 0,08 мм, число витков $N = 25$. Конденсатором C1 подобрана частота генератора, соответствующая максимальной чувствительности дефектоскопа (1 МГц). При перемещении ИБС над алюминиевой пластиной с прорезями длиной 55 мм и шириной 4 мм в момент нахождения области, являющейся общей для обеих катушек, над прорезью напряжение на выходе дефектоскопа возрастало в 8 раз. Видимо, можно измерять расстояние между центрами прорезей, их длину, диаметры отверстий, расстояния между выступами на поверхности металлов, размеры выступов.

Этот же прибор можно использовать для определения толщины диэлектрического покрытия на металле, в качестве тахометра. В последнем случае вместо микроамперметра ВА1 следует включить частотомер, а на вращающемся валу сделать углубление или выступ. Максимальная измеряемая частота вращения вала должна быть хотя бы на порядок меньше частоты автогенератора. Такой тахометр легко приспособливается для измерения скорости потока газов или жидкостей в диэлектрической трубе, если внутри нее поместить крыльчатку, а над ней - ИБС (металл можно нанести на одну из лопастей крыльчатки). Достоинством такого устройства является то, что ось крыльчатки не надо выводить из трубы, а если вместо детектора и микроамперметра к выходу усилителя подключить антенну, то информацию о скорости потока можно передавать на расстояние.

Широкие функциональные возможности имеет ИБС с дополнительной третьей катушкой, нагруженной на сопротивление R_n (рис. 110,а). При разомкнутой третьей катушке условие баланса не нарушается. С уменьшением сопротивления нагрузки R_n до нуля возрастает напряжение разбаланса (рис.110, б). ИБС с тремя катушками удобен для измерения температуры вращающихся диэлектрических валов. При этом третья катушка располагается на торце вала, а терморезистор (R_n) может быть расположен в любом месте вращающегося вала. Первые две катушки ИБС устанавливаются на стационарном основании в непосредственной близости к третьей вращающейся катушке. В этом случае трехкатушечный ИБС используется в качестве преобразователя сопротивления в амплитуду переменного напряжения, отличающегося отсутствием механического контакта между измерительными приборами и вращающимся валом. Диэлектрический вал может сочленяться с металлическим, на котором располагается терморезистор. Таким образом можно следить за разогревом подшипников. Для измерения других физических величин на вращающемся теле терморезистор может быть заменен тензорезистором, фоторезистором или другими элементами, сопротивление которых по переменному току меняется от воздействующего фактора. Экспериментальная кривая, приведенная на

тальная кривая, приведенная на рис. 110,б, снята при ИБС с первыми двумя катушками диаметром 71 мм, числом витков $N = 140$, диаметром провода $d = 0,08$ мм. Третья катушка имела такой же диаметр, намотана тем же проводом, но число витков $N = 10$. Даже при варьировании числа витков третьей катушки заметное изменение напряжения разбаланса наблюдается при $R_H < 1$ кОм. При $R_H = 0$ и $N = 1$ напряжение разбаланса зависит от диаметра третьего контура. Поэтому ИБС можно использовать для измерения диаметра колец подшипников.

Использование трехкатушечного ИБС для контроля скорости газов или жидкостей показано на рис. 111. Здесь отсутствуют трущиеся части. На рис.112 приведен вариант использования такого ИБС для бесконтактного измерения сопротивления потребителей электроэнергии или тока в цепи, потребляемой мощности. Здесь конденсатор C выбирается малой емкости. Его сопротивление на частотах в единицы МГц должно быть мало, а на частотах 50 Гц - велико. Фильтр верхних частот (ФВЧ) не должен пропускать частоту 50 Гц.

6.7. Радиопарные датчики

По аналогии с оптопарными датчиками возможна реализация радиопарных датчиков, содержащих радиопередатчик, радиоприемник и расположенную между ними радиосреду. Внешние факторы чаще всего воздействуют на радиосреду. Радиопередатчик может быть выполнен как интегральные микросхемы (полупроводниковые или гибридные). Радиопередатчик и радиоприемник могут располагаться на одном кристалле (подложке) или на разных кристаллах (подложках), выполняться из одних и тех же материалов в едином техпроцессе.

Радиопарные датчики удачно реализуются с применением АН. На рис. 113 приведены два варианта радиопередатчиков-радиоприемников. В обоих случаях на транзисторах VT1, VT4 построен АН с S-образной ВАХ между клеммами а – б. Обычно транзисторы одинаковы $R_1=R_2$, $R_4=R_5$, $R_3 \ll R_1$. При построении радиопередатчика отрицательное дифференциальное сопротивление между клеммами а – б R_3 недокомпенсируется сопротивлением резистора R_6 ($R_6 < R_3$). Для схемы, представленной на рис. 113, частота излучаемых колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_{3a})C_1}},$$

где L_{3a} – эквивалентная индуктивность АН. Антенной является катушка индуктивности L_1 . Для схемы рис. 113,б

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3C_2}},$$

где $L_3 = 0,25R_1^2 C_1$ ($\alpha \rightarrow 1$, $L_3 \gg L_{3a}$). Антенной является эквивалент колебательного контура L_3C_2 . При построении радиоприемников используются те же схемы, но отрицательное сопротивление компенсируется сопротивлением

R_6 ($R_6 > R_3$). Резистор R_3 в радиопередатчиках не всегда используется, а в радиоприемниках с него снимают выходной сигнал.

На рис. 114,а показана конструкция датчика давления P (силы, массы, ускорения), а на рис. 114,б – датчика для измерения толщины h или удельного электросопротивления ρ металлических пленок (элементы электропитания опущены). В первом случае под действием давления P радиоприемник 5 приближается к радиопередатчику 6, выходной сигнал возрастает. Во втором случае в зависимости от удельного сопротивления пленок ρ при постоянной их толщине h или в зависимости от толщины h при постоянном удельном сопротивлении ρ по-разному ослабляется радиосигнал от радиопередатчика. Интересным представляется использование в качестве катушки индуктивности L_1 радиопередатчика и радиоприемника индуктивного балансного сенсора. В этом случае обе катушки располагают так, что при наличии сигнала на катушке L_1 передатчика на такой же катушке приемника сигнал отсутствует (сенсор сбалансирован). Полупроводниковый вариант ИБС показан на рис. 115. Первая катушка выполнена эмиттерной диффузией с поверхностным сопротивлением слоя $\rho_s = 1-5$ Ом/кв. Поэтому ее активное сопротивление при длине витка 1-5 мм и ширине проводника 20 мкм будет составлять сотни Ом – единицы кОм. Если такую катушку использовать в передатчике, показанном на рис. 114,а, то эквивалентное сопротивление АН должно быть больше активного сопротивления такой катушки резистора. Соответствующим образом следует выбирать номиналы резисторов в АН. В другом варианте (рис. 113,б) такую катушку в передатчике следует включить вместо резистора R_3 , а вторую катушку из металла в радиоприемник следует включить последовательно с конденсатором C_2 .

В гибридной микросхеме обе катушки выполняются из проводящих пленок и разделяются диэлектрической пленкой, поэтому не возникает проблем с их включением. В полупроводниковом варианте сторона a катушки равна 0,5-4 мм, в гибридном – 4-10 мм. При использовании других АН возможны иные варианты включения катушки.

Если передатчик, приемник и ИБС выполнены на одном кристалле (подложке), то конструкция датчика силы будет отличаться от приведенной тем, что на мембране будет отсутствовать кристалл приемника (мембрана металлическая). В этом случае используется следующее свойство ИБС: при приближении к сенсору металла за счет образования в нем контура вихревых токов нарушается баланс, т.е. на второй катушке растет уровень сигнала по мере приближения металла.

Микросхему датчика с ИБС можно использовать для измерения проводимости жидкости, для реализации радиомикрофонов, плоских весов, тахометров, для измерения размеров отверстий в металлических деталях, толщины диэлектриков на металлах. Потребляемая микросхемой мощность легко снижается до единицы мВт.

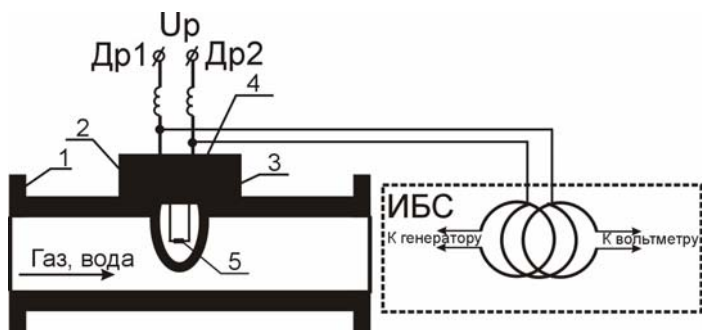


Рис. 111. Измеритель скорости газов: 1-труба, 2- ввинчивающаяся вставка, 3- уплотняющая прокладка, 4- диэлектрик, 5- позистор, U_p – напряжение источника подогрева; Др1, Др2 – высокочастотные дроссели

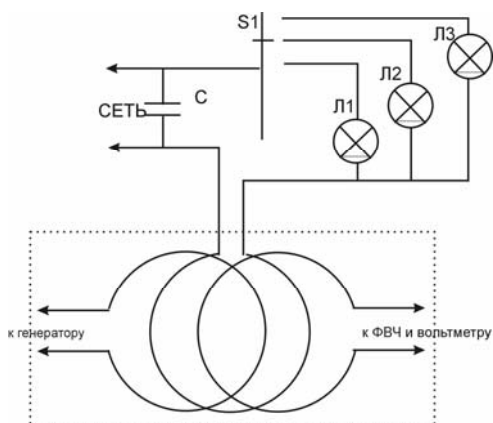


Рис. 112. Измеритель тока в нагрузке

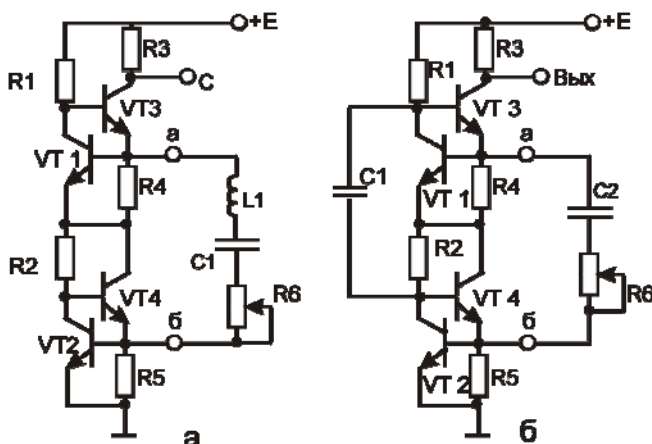


Рис. 113. Схемы радиопередатчиков-радиоприемников на АН

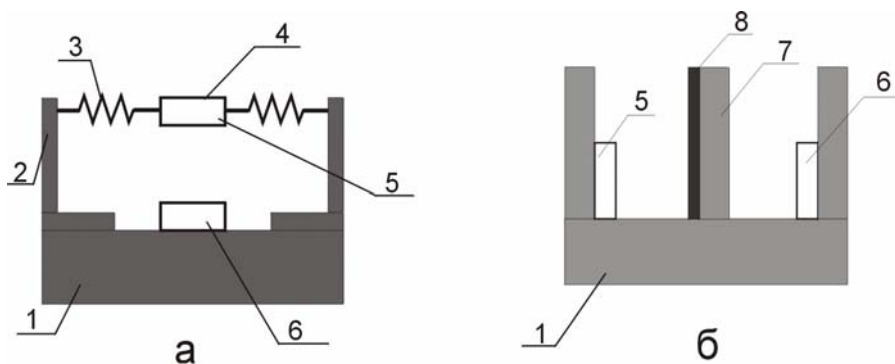


Рис. 114. Радиопарные датчики давления (а) и толщины металлической пленки (б). 1- диэлектрическое основание, 2- втулка, 3- гофр, 4- мембрана, 5- радиоприемник, 6 - радиопередатчик, 7- ситалловая подложка, 8- металлическая пленка

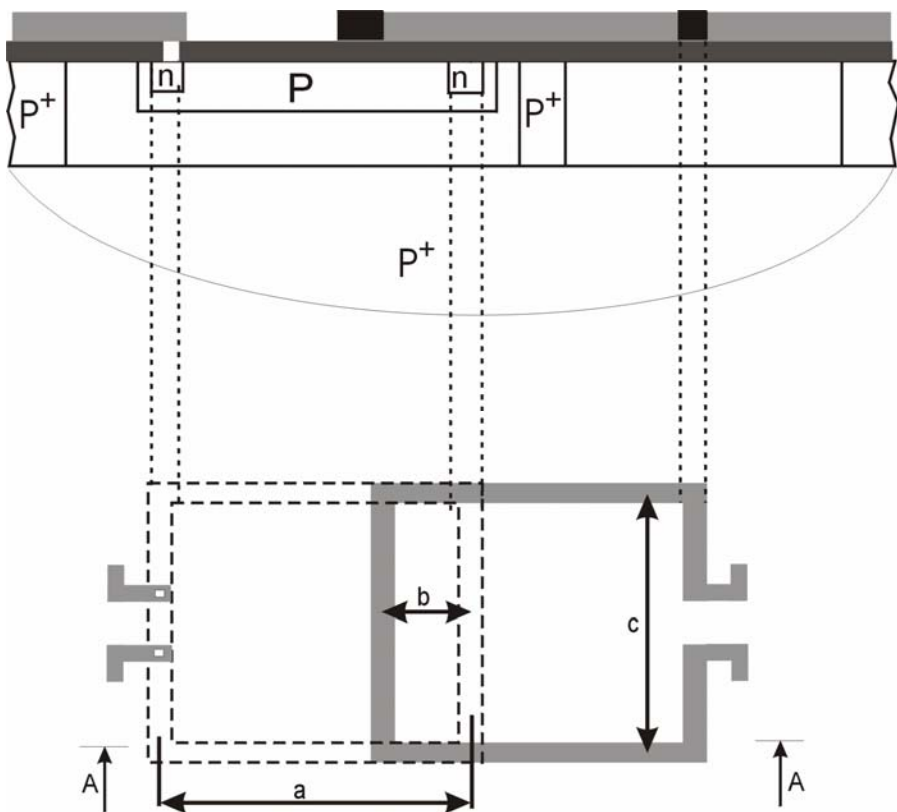


Рис. 115. Полупроводниковый индуктивный балансный сенсор

ЛИТЕРАТУРА

К Введению

1. Волков В.А. Датчики автоматизированных систем контроля измерения и управления // Приборы и системы управления. 1990, №10. С. 2-3.

2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. М.: Сов. радио. 1975. 104 с.

К разделу 1

1. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. М.: Сов. радио. 1975. 104 с.

К разделу 2

1. Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Гальваномагнитные приборы. М.: Радио и связь, 1983. 104 с.

2. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы. М.: Энергия, 1971. 352 с.

3. Хомерики О.К. Гальваномагнитные элементы и устройства автоматики и вычислительной техники. М.: Энергия, 1975. 176 с.

4. Мирзабаев М.М., Потаенко К.Д., Тихонов В.И. и др. Эпитаксиальные датчики Холла и их применение. Ташкент: Фан, 1986. 215 с.

5. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. М.: Сов. радио, 1974. 328 с.

6. Касимов Ф.Д., Кучис Е.В., Мамиконова В.М. и др. Исследование механизма переключения поликремниевых пленок с помощью эффекта Холла // Литовский физический сборник. 1990. Т.30, N1. С. 67-71.

7. Омельяновский Э.М., Фистуль В.И. Определение холл-фактора в атомных полупроводниках // Заводская лаборатория. 1964, N5. С. 559-562.

8. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1973. 616 с.

9. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1969. 592 с.

10. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1978. 382 с.

11. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение. М.: Энергия, 1974. 384 с.

12. Тихонов З.Х., Постных О.А., Тихонова Э.А. Исследование характеристик тонкослойных монокристаллических датчиков Холла // Приборы и системы управления. 1972, N 7. С. 18-19.

13. Портной Г.Я., Постных О.А., Тихонов З.И. Исследование пригодности гомо- и гетерозепитаксиальных слоев GaAs, InAs и InSb для создания датчиков Холла // Синтез и рост совершенных кристаллов и пленок полупроводников. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1981. С.127-132.

14. Палатник Л. С., Папилов И. И. Эпитаксиальные пленки. М.: Наука, 1971. 480 с.

15. Yano M., Nogami M., Matsuchima Y., Kimata M. Molecular beam epitaxial growth of InAs. - Japan. J. Appl. Phys. 1977, v.16, N12, p.2131-2137.

16. Касимов Ф.Д., Адигезалов Г.Д., Мамиконова В.М. Сравнительный

анализ кремниевых интегральных датчиков Холла с различными типами изоляции // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1986. Вып. 5 (241). С. 71-72.

17. Касимов Ф.Д., Гезалов Б.А., Ветхов В.А., Мехтиев Т.Э. Способ изготовления магниторезисторов. А.с. N 1463053, 1988

18. Abdullaew A.G., Kasimov F.D., Mamikonova V.M. The simultaneous growth of mono- and polycrystalline silicon films. - Thin Solid Films, 1984, v. 115, N3, p.237-243.

19. Касимов Ф.Д., Абдуллаев А.Г., Гезалов Б.А., Мамиконова В.М. Способ изготовления биполярных ИС. А.с. N 1391375. 1987.

20. Полупроводниковые преобразователи (В.Денис, И.Левитас, А.Матуленис, Ю.Пожела, К.Сталерайтис, В.Юцена) Вильнюс: Мокслас, 1980. 174 с.

21. Касимов Ф.Д., Абдуллаев А.Г., Мамиконова В.М. Интегральный гальваномангниторекомбинационный преобразователь на основе локальных пленок моно- и поликристаллического кремния // Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника, 1988. Вып.3. С.71-72.

22. Касимов Ф.Д., Гезалов Б.А., Мамиконова В.М., Стоялов М.Н. Магниторезистивный преобразователь. А.с. N1263153. 1986.

23. Алиев И.М., Касимов Ф.Д., Исмаилов Т.К. Кремниевый планарный датчик Холла и микропереключатель на его основе // Приборы и системы управления, 1984. N2. С.25-26.

24. Марченко А.Н. K1116КП - серия магнитоуправляемых ИС на эффекте Холла // Электронная промышленность. 1985, N 6. С.11-13.

25. Касимов Ф.Д., Адигезалов Г.Д., Карпов А.Г. Магниточувствительная гибридно-пленочная ИС // Приборы и системы управления. 1986, N 7. С.34-35.

26. Касимов Ф.Д., Рагимов С.Н. Кремниевый твердотельный преобразователь магнитного поля // Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника, 1991. Вып.4(143). С.15-17.

27. Галушков А.И., Романов И.М., Чаплыгин Ю.А. Исследование магниточувствительного элемента на основе двухстокового МОП-транзистора. // Разработка и исследование микроэлектронных кремниевых датчиков и элементов памяти с БИС ДОЗУ. М.: МИЭТ, 1994. С.31-36.

К разделу 3

1. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1969. 592 с.

2. Стучебников В.М. Сенсор или микроэлектронный датчик. ПСУ, 1991, N2. С 20-21.

3. Проектирование датчиков для измерения механических величин; Под ред. Е.П.Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.

4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. М.: Сов. радио, 1975. 104 с.

5. Измерение в промышленности. Справочник; Под ред. П.Профоса. / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1980. 648 с.

6. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983, 137с.

7. Ваганов В.И., Бекленишев В.В., Белов Н.С., Гончарова Н.И. Анализ чувствительности тензорезисторов на прямоугольной кремниевой пластине // Электронная измерительная техника в научных исследованиях; Под ред. А.Г. Филипова. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 3-8.

8. Зеленцов Ю.А. Анализ чувствительности интегральных тензопреобразователей с прямоугольной мембраной // ПСУ, N 7, 1997. С. 19-22.

9. Егiazарян Э.Л. Способы повышения чувствительности микродатчиков, работающих на тензоэффекте // ПСУ, 1997, N 6. С. 31-34.

10. Петров В.В., Котов В.Н. Высокочувствительный сенсор давления // Известия ТРТУ, №2, 1998, с. 175.

11. Петров В.В. Особенности конструкции чувствительного элемента датчика малых давлений // Тр. 6-й Международной НТК "ПЭМ-99". Дивноморское. 6-11 сент. 1999 г.

12. Motorola Sensor Device Date, 1998.

13. Симонсен Э. Датчик давления типа MBS для промышленных установок // ПСУ, 1993, №5. С. 45-46.

К разделу 4

1. Волькенштейн Ф.Ф. Электроны и кристаллы. М.: Наука, 1983. 128 с.

2. Арутюнян В.М. Микроэлектронные технологии – магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров // Микроэлектроника. 1991. Т. 20, N 4. С. 337.

3. Евдокимов А.В. и др. Микроэлектронные датчики химического состава газов // Зарубежная электронная техника. 1988. Вып. 2. С.3.

4. Бутурлин А.И. и др. Газочувствительные датчики на основе металлооксидных полупроводников // Зарубежная электронная техника. 1989, N 10. С.3.

К разделу 5

1. Бутурлин А.И. и др. Микроэлектронные датчики влажности. // Зарубежная электронная техника. 1984, N 9. С.3.

К разделу 6

1. Негоденко О. Н., Ковалев А. В., Холявко А. Н. Исследование планарного аналога однопереходного транзистора в области малых токов // Функциональные микроэлектронные устройства и их элементы. Таганрог, 1974. Вып. 2. С. 56.

2. Негоденко О. Н., Христофоров В. Н., Ерохин А. В. Транзисторные аналоги динисторов в высокочастотных кварцевых генераторах // Функциональные микроэлектронные устройства и их элементы. Таганрог, 1976. Вып. 3. С. 90.

3. Капустин С. Б., Негоденко О. Н. Аналог динистора на КМОП-транзисторах.// Функциональные микроэлектронные устройства и их элементы. Таганрог, 1978. Вып. 4. С. 62.

4. Негоденко О. Н., Липко С. И., Мирошниченко С. П. Каскодные аналоги негатронов.// Полупроводниковая электроника в технике связи; Под ред. Николаевского И. Ф. М.: Радио и связь, 1986. Вып. 26. С. 29.
5. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А., Гагин С. В., Негоденко О. Н., Филинюк Н. А., Касимов Ф. Д. Негатроника; Под ред. Л. Н. Степановой Новосибирск: Наука, 1995. С. 315.
6. Негоденко О. Н., Липко С. И., Голошапов В. И. Аналогии негатронов на биполярных транзисторах с перекрестными коллекторно-базовыми связями и их применение.// Актуальные проблемы микроэлектроники. Таганрог, 1990. Вып. 1. С. 112.
7. Негоденко О. Н., Татаринцев С. А., Зинченко Л. А. Схема с отрицательным сопротивлением на комплементарных биполярных транзисторах с перекрестными коллекторно-базовыми связями. Деп. ВИНТИ, № 2595-B97.
8. Гарицин А. Г., Негоденко О. Н. Двухполюсники с отрицательным сопротивлением на двух биполярных транзисторах.// Функциональные микроэлектронные устройства и их элементы. Таганрог, 1982. Вып. 6. С. 18.
9. Sharma C. K., Dutta Roy S. C. A versatile design giving both N-type and S-type of negative-resistance// Microelectronics and Reliability, 1972, v.11, № 6. P. 499.
10. Негоденко О. Н., Татаринцев С. А., Обломий А. В. Частотные свойства устройств на основе транзисторного аналога инжектрно-полевой структуры. Деп. ВИНТИ, № 2596-B97.
11. Негоденко О. Н., Татаринцев С. А., Сулимов В. В., Холостов А. А., Зинченко Л. А. Частотные свойства аналогов негатронов на полевых транзисторах. Деп ВИНТИ. № 2597-B97.
12. Негоденко О. Н., Татаринцев С. А., Стрижаков П. И., Гуков А. С. Использование транзисторных аналогов негатронов в качестве конверторов импеданса. Деп. ВИНТИ, № 1655-B98.
13. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах. М.: Сов. радио, 1975. С. 287.
14. Арефьев А. А., Баскаков Е. Н., Степанова Л. Н. Радиотехнические устройства на транзисторных эквивалентах р-п-р-п-структуры. М.: Радио и связь, 1982. 104 с.
15. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н. Электронные устройства на элементах с отрицательным сопротивлением. М.: Радио и связь, 1992. 200 с.
16. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
17. Липко С. И., Негоденко О. Н., Дзюба Л. П. Кварцевые автогенераторы на ограничителях тока// Изв. вузов СССР. Приборостроение., 1980. Т. 23, № 6. С. 66.
18. Негоденко О. Н., Липко С. И., Мирошниченко С. П. Принципы построения гармониковых кварцевых генераторов на каскодных аналогах негатронов.// Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1988. Т. 31, № 5. С. 73.

19. Негоденко О. Н., Липко С.И., Мирошниченко С.П., Будяков И.В. Кварцевые генераторы на микросхеме К119СС2. Деп.ВИНИТИ, №7828–В85.
20. Негоденко О. Н., Липко С. И., Мирошниченко С. П., Ткачев К. И. Конверторный полосовой фильтр на двух транспарантных парах// Радиотехника, 1994, № 9. С.92.
21. Негоденко О. Н., Татаринцев С. А. Микроэлектронная комнатная телевизионная антенна// Труды МНТК Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники. Дивноморское, 1998. С. 134.
22. Негоденко О. Н., Татаринцев С. А. Улучшение качества телевизионного изображения с помощью аналога негатрона при приеме на печатную комнатную антенну. Деп.ВИНИТИ, № 1657-В98.
23. Коноплев Б. Г., Негоденко О. Н., Кошелев С. Г., Рындин Е. А. Полупроводниковые трансдюсеры температуры с частотным выходом на аналогах негатрона// Труды НТК Датчик-95. Крым, 1995 С. 342.
24. Бедуев В. Л., Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные трансдюсеры магнитного поля с частотным выходом.// Труды НТК Теория цепей и сигналов. Таганрог, 1996. С. 56.
25. Касимов Ф.Д., Негоденко О. Н., Касимова Ф.Ф., Исмаилов Н.Л. Негатронный преобразователь магнитного поля для дистанционных измерений// Труды НТК Приборостроение - 97. Винница: Симеиз, 1997. С.275.
26. Семенцов В.И., Негоденко О. Н. Индуктивные балансные сенсоры// Труды НТК. Датчики 94. Крым. 1994. С. 167
27. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. С. 306
28. Семенцов В.И., Кошелев С.Г., Негоденко О. Н. Технические возможности планарных индуктивных балансных сенсоров// Труды НТК. Теория цепей и сигналов. Таганрог, 1996. С. 57
29. Негоденко О. Н., Семенцов В.И., Кошелев С.Г. Технические возможности индуктивных балансных сенсоров. Деп. ВИНИТИ, № 1700 – В98.
30. Румянцев К.Е. Негоденко О. Н., Семенцов В.И. Датчики на основе индуктивных балансных сенсоров // Электромеханика. 1995, № 4. С.99.