



## Лекция 7

### *Содержание лекции 19.*

Прохождение горячих электронов через тонкие металлические пленки

Диэлектрические слои с малой подвижностью носителей заряда

Активные пленочные элементы

Технологические основы микроэлектроники

Эпитаксия

Термическое окисление

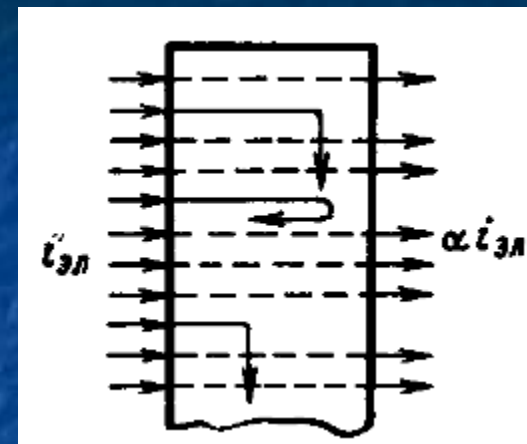
Легирование

Теоретические основы диффузии

## Прохождение горячих электронов через тонкие металлические пленки

Исследование вопросов, связанных с прохождением горячих электронов через тонкие металлические пленки, привлекает все большее внимание в связи с возможностью разработки на этой основе активных пленочных элементов.

Рассмотрим кратко физику этого явления. Пусть на тонкую металлическую пленку, показанную на рис. 2.1, слева падает поток электронов  $i_{эл}$ . При перемещении внутри пленки часть электронов будет испытывать рассеяние и из пленки не выйдет. Обозначим эту составляющую потока- через  $i_1$ .



(2.1)

# Прохождение горячих электронов через тонкие металлические пленки

В соответствии с законами рассеяния частиц веществом, на толщине  $d$  интенсивность потока уменьшится в  $e^{-d/L_m}$  раз и станет равной  $i_{эл} e^{-d/L_m}$ , где  $L_m$  — средняя длина пробега электронов в металле относительно их поглощения. Ее называют длиной поглощения. Тогда

$$i_1 = i_{эл} - i_{эл} e^{-d/L_m} = i_{эл} (1 - e^{-d/L_m}) \quad (3.1)$$

Поток электронов  $i_{эл} e^{-d/L_m}$  подошедший к правой свободной поверхности пленки, будет частично отражаться от этой поверхности и из пленки также не выйдет. Обозначим отраженный поток через  $i_2$ . Он равен:

$$i_2 = R i_{эл} e^{-d/L_m} \quad (3.2)$$

где  $R$  — квантово-механический коэффициент отражения электронов.



## Прохождение горячих электронов через тонкие металлические пленки

Таким образом, из пленки будет выходить поток электронов

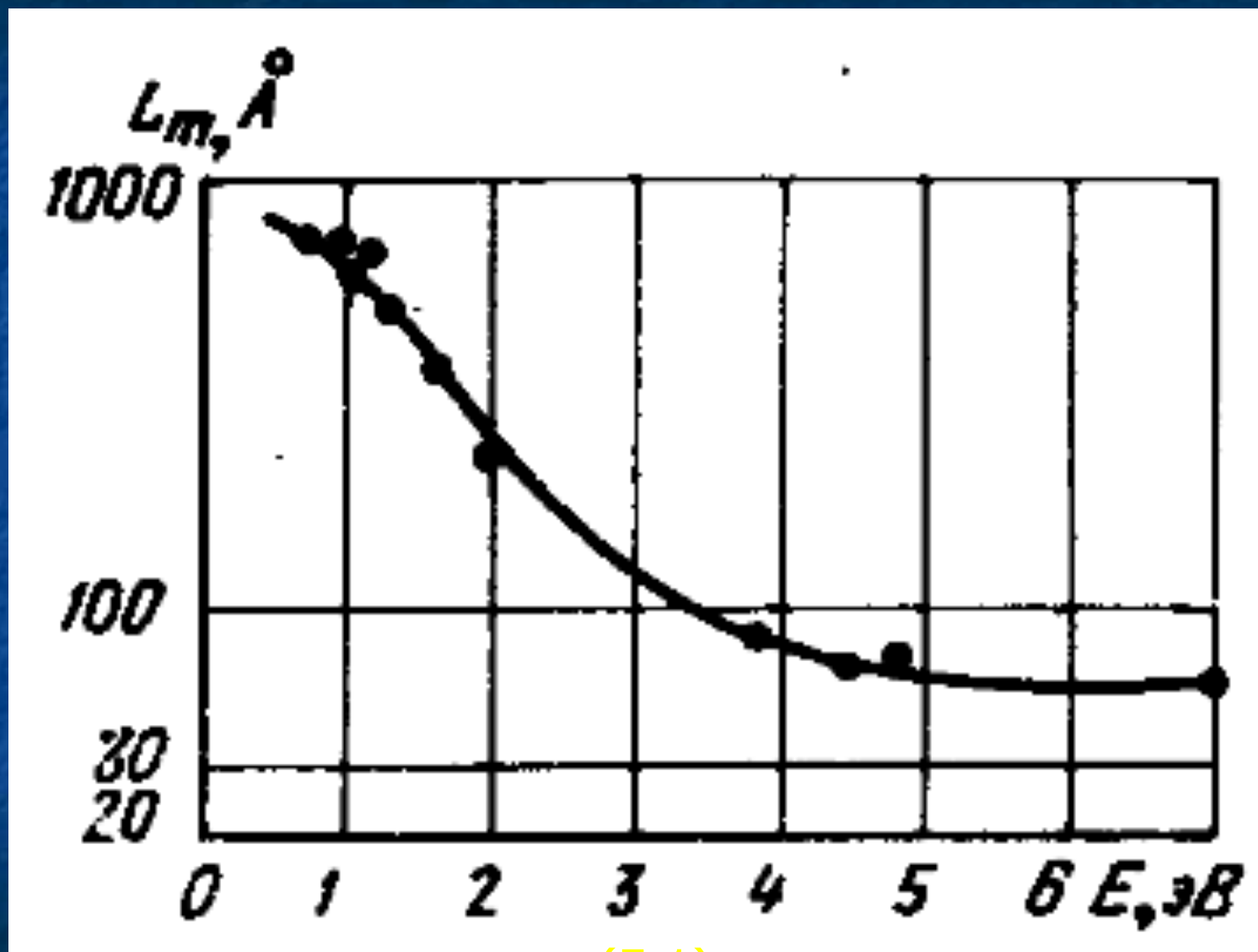
$$i = i_{эл} - i_1 - i_2 = i_{эл}(1 - R) e^{-d/L_m} \quad (4.1)$$

Отношение этого потока к потоку  $i_{эл}$ , инжектированному в пленку, называется коэффициентом передачи  $a$ :

$$a = i/i_{эл} = (1 - R) e^{-d/L_m} \quad (4.2)$$

Из выражения 4.2 видно, что коэффициент передачи  $a$  определяется главным образом длиной поглощения электронов в металле, которая весьма чувствительна к структурным несовершенствам пленки. В качестве примера на рис. 5.1 показана экспериментальная кривая зависимости  $a$  от энергии электронов для пленок золота. Из рис. 4.2 видно, что с увеличением энергии средняя длина пробега электрона  $L_m$  довольно резко падает особенно в области низких энергий.

# Прохождение горячих электронов через тонкие металлические пленки



(5.1)

## Прохождение горячих электронов через тонкие металлические пленки

В табл. 6.1 приведена величина средней длины поглощения электронов с энергией порядка 0,9 эВ для ряда металлов.

Средняя длина поглощения электронов	Au	Ag	Cu	Pd
$L_m, \text{ \AA} \dots\dots\dots$	740	410	50—200	170

## Диэлектрические слои с малой подвижностью носителей заряда

В диэлектрических слоях, содержащих очень большое количество структурных дефектов и примесей, подвижность носителей заряда оказывается крайне низкой. Как показывают исследования, изменение тока под действием внешнего напряжения в таких пленках, наиболее вероятно, обусловлено эффектом Френкеля, рассмотренном в предыдущих лекциях.

Электрическое поле достаточно высокой напряженности  $E$  способно изменять энергетическое состояние электронов в атомах примеси и уменьшать энергию возбуждения их в зону проводимости на некоторую величину  $\Delta U$ . Расчет показывает, что

$$\Delta U = -2 \sqrt{\frac{e^3 \mathcal{E}}{4\pi\epsilon_0\epsilon}} \quad (7.1)$$



## Диэлектрические слои с малой подвижностью носителей заряда

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная пленки. Электрический ток в пленке в этом случае будет равен:

$$i = i_0 e^{-\frac{\Delta U}{kT}} = i_0 e^{\frac{2}{kT} \sqrt{\frac{e^3 \mathcal{E}}{4\pi \varepsilon_0}}} = i_0 e^{\frac{2}{kT} \sqrt{\frac{e^3 V_0}{4\pi \varepsilon_0 d}}} \quad (8.1)$$

где  $i_0$  — ток в пленке в отсутствии поля;  $d$  — толщина пленки;  $V_0$  — приложенная разность потенциалов.

Опыт показывает, что сила тока в пленках с малой подвижностью носителей действительно экспоненциально зависит от приложенного напряжения. Опыт подтверждает также тот факт, что параметр  $\beta = \frac{|\ln i| kT}{\sqrt{V_0}}$ , определяющий наклон прямой, выражающей зависимость  $\ln i / \sqrt{V_0}$  от  $1/kT$  для токов в пленках с малой подвижностью носителей оказывается в два раза больше, чем для токов, обусловленных эмиссией Шоттки.



## Диэлектрические слои с малой подвижностью носителей заряда

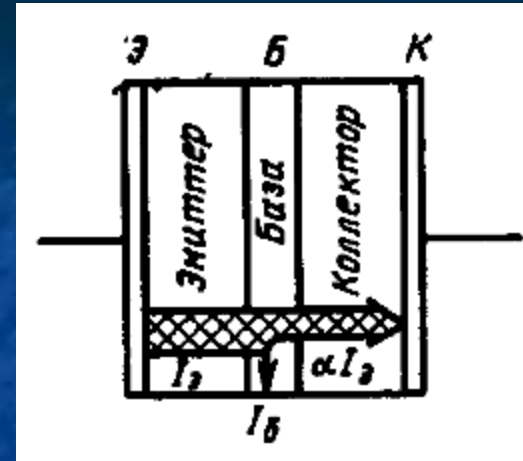
Согласно же 8.1

$$\beta = \sqrt{\frac{e^3 \mathcal{E}}{4\pi\epsilon_0 \epsilon}} \quad (9.1)$$

Незначительная подвижность носителей заряда в рассматриваемых пленках приводит к весьма высокой стабильности (в сильных электрических полях, поэтому они могут быть с успехом использованы там, где от пленок требуется высокая электрическая прочность).

## Активные пленочные элементы

Рассмотрим физические принципы создания активных пленочных элементов, основанных на использовании горячих электронов в тонких металлических пленках. На рис. 10.1 показана структура такого элемента. Ее основой является металлическая пленка, играющая роль базы. Толщина базы должна быть одного порядка с длиной пробега электронов в пленке ( $\sim 100 \text{ \AA}$ ). К этой пленке с обеих сторон примыкают диэлектрические или полупроводниковые слои, на внешней поверхности которых нанесены металлические электроды.



(10.1)

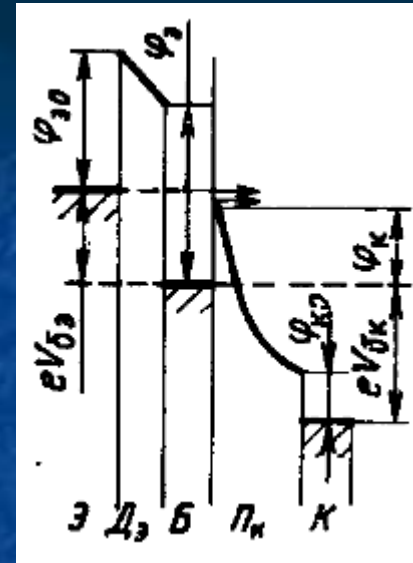
## Активные пленочные элементы

Один из этих слоев играет роль эмиттера, другой — роль коллектора. Эмиттер инжектирует в металлическую пленку (базу) поток электронов  $I_{\text{э}}$ . Часть их рассеивается в базе, образуя ток базы  $I_{\text{б}}$ . Оставшаяся часть  $I_{\text{к}} = I_{\text{э}} - I_{\text{б}} = \alpha I_{\text{б}}$  ( $\alpha$  — коэффициент переноса) проходит в коллекторный слой. Если величина тока  $\alpha I_{\text{э}}$ , обусловленного инжекцией горячих электронов в базу, много больше тока  $I_{\text{к}0}$ , который проходит через коллекторный слой в отсутствии такой инжекции, и если к коллекторному слою можно приложить достаточно высокое напряжение, то рассмотренная система может работать в качестве усилителя напряжения и мощности, подобно транзистору, включенному в схему с общей базой.

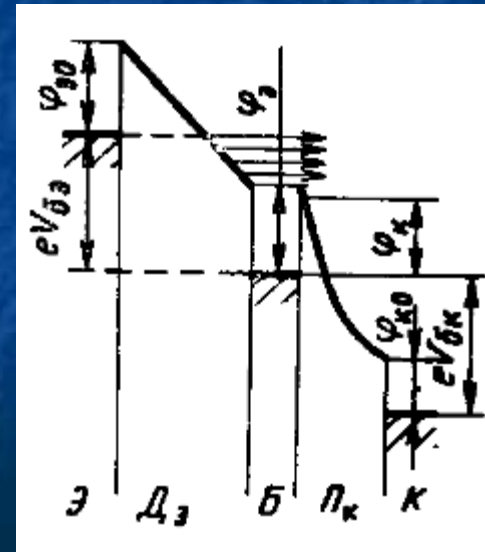


## Активные пленочные элементы

На рис. 12.1 и 21 показана энергетическая схема активного пленочного элемента, эмиттерной областью в котором служит слой диэлектрика  $D_3$ , покрытый металлическим электродом  $\mathcal{E}$ . При небольшой толщине этого слоя инжекция горячих электронов в базу  $B$  осуществляется путем прямого туннелирования их из металлического электрода  $\mathcal{E}$  через слой диэлектрика  $D$  (рис. 12.1).



(12.1)



(12.2)

## Активные пленочные элементы

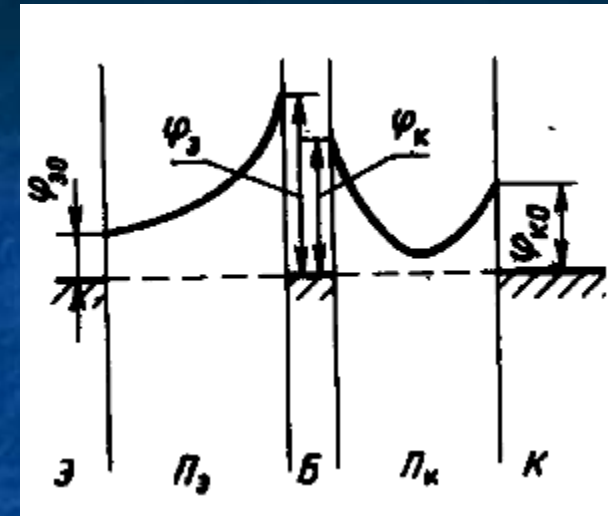
Поверхностные уровни выполняют у поверхности полупроводника ту же роль, какую выполняют примесные уровни в объеме кристалла. Они могут служить донорами (рис. 12.1,б), акцепторами (рис. 12.1в) и центрами рекомбинации (рис 12.1,а).

Необходимым условием для этого является  $\phi_{\text{Э}} > \phi_{\text{К}}$ .

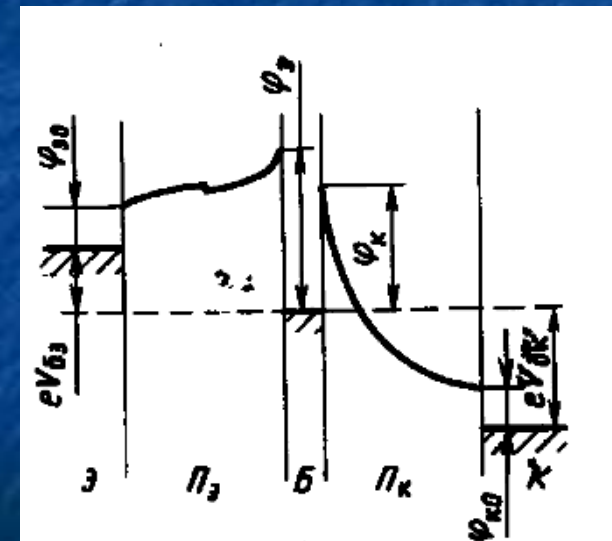
При относительно большой толщине диэлектрического слоя  $D_{\text{Э}}$  туннелирование электронов из электрода Э происходит в зону проводимости диэлектрика (рис. 12.1). Энергетический спектр электронов, входящий в базу, простирается в этом случае от уровня Ферми металлического электрода Э до уровня  $\phi_{\text{К}}$

## Активные пленочные элементы

В активных пленочных элементах типа полупроводник — металл — полупроводник (ПМП) к тонкой металлической базе с обеих сторон примыкают полупроводниковые слои, на которые нанесены металлические электроды Э и К, причем электрод Э должен образовывать с эмиттерным слоем Пэ практически омический контакт. Как видно из рис. 14.1, рассматриваемая пятислойная система состоит из двух шоттковских барьеров — эмиттерного  $\phi_э$  и коллекторного  $\phi_к$ .



(14.1)



(14.2)

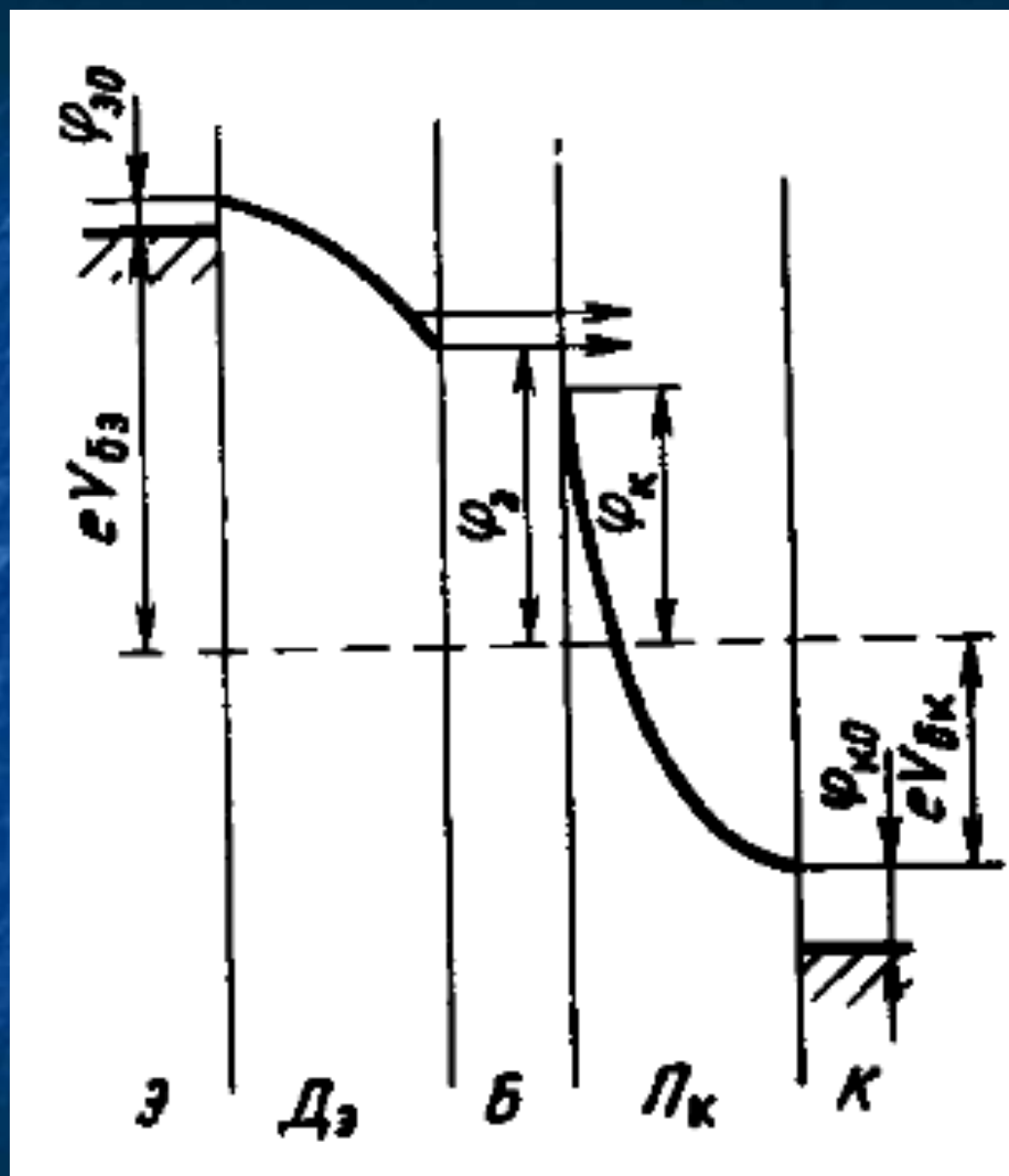


## Активные пленочные элементы

При подаче напряжений  $V_{бэ}$  и  $V_{бк}$  эмиттерный барьер включается в прямом направлении (рис. 14.2) и в базу инжектируются горячие электроны. Коллекторный барьер включен в обратном направлении. Для усиления по напряжению и мощности необходимо, чтобы  $V_{бк} > V_{бэ}$ .

На рис. 16.1 показана энергетическая схема активного пленочного элемента с толстым диэлектрическим эмиттерным слоем Дэ при включенных напряжениях  $V_{бэ}$  и  $V_{бк}$ . Инжекция горячих электронов в базу осуществляется в нем на основе токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), проходящих через диэлектрический слой Дэ.

## Активные пленочные элементы



(16.1)

## **Технологические основы микроэлектроники**

Технология полупроводниковых ИС развилась на основе планарной технологии транзисторов, а последняя, в свою очередь, впитала в себя весь предшествующий опыт производства полупроводниковых приборов. Поэтому чтобы разбираться в технологических циклах изготовления ИС, необходимо ознакомиться с типовыми технологическими процессами, из которых эти циклы складываются. Технология ГИС также зародилась не на пустом месте, а обобщила и развила те методы нанесения пленок, которые ранее использовались в радиотехнической промышленности, машиностроении и оптике.



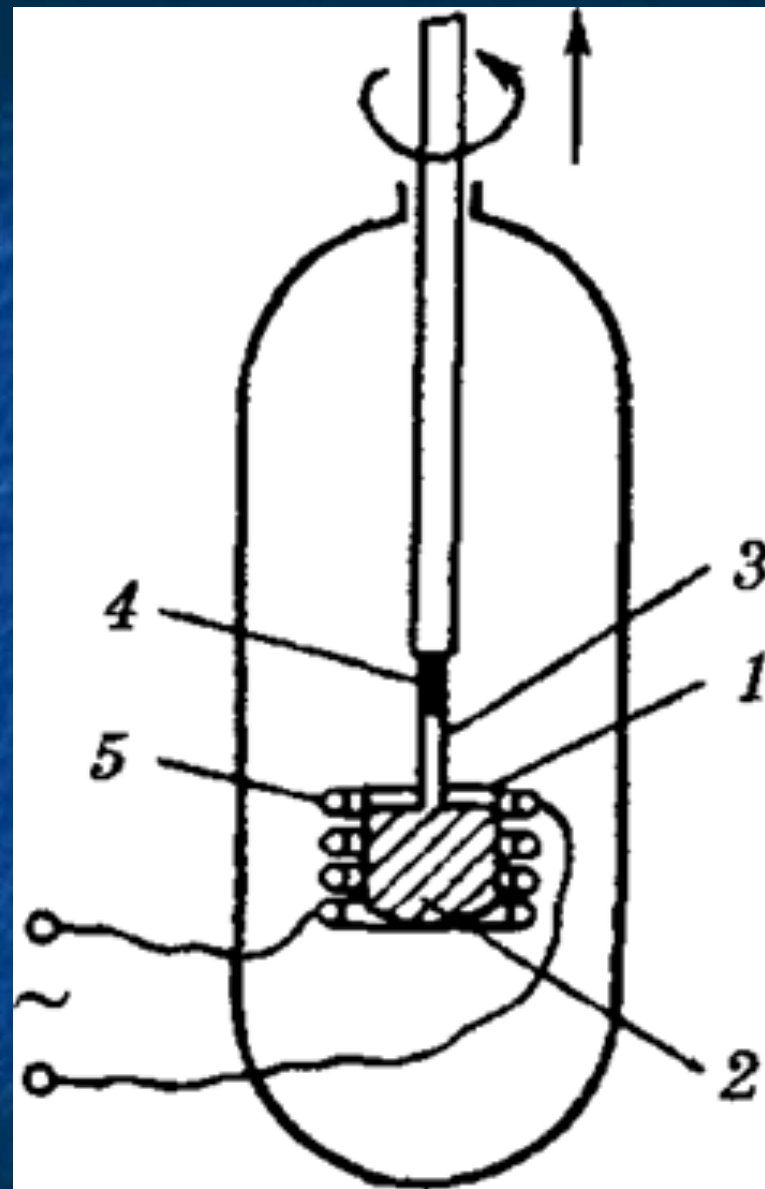
## Подготовительные операции

Монокристаллические слитки кремния, как и других полупроводников, получают обычно путем кристаллизации из расплава — методом Чохральского. При этом методе стержень с затравкой (в виде монокристалла кремния) после соприкосновения с расплавом медленно поднимают с одновременным вращением (рис. 19.1). При этом вслед за затравкой вытягивается нарастающий и застывающий слиток.

Кристаллографическая ориентация слитка (его поперечного сечения) определяется кристаллографической ориентацией затравки. Чаще других используются слитки с поперечным течением, лежащим в плоскости (111) или (100)

## Подготовительные операции

Рис. 19.1. Схема выращивания монокристалла методом Чохральского: 1 — тигель; 2 — Расплав полупроводника; 3 — выращиваемый монокристалл; 4 — затравка; 5 — катушка высокочастотного нагрева



(19.1)

## Подготовительные операции

Типовой диаметр слитков составляет в настоящее время 150 мм, а максимальный может достигать 300 мм и более. Длина слитков может достигать 3 м и более, но обычно она в несколько раз меньше.

Слитки кремния разрезают на множество тонких пластин (толщиной 0,4—0,5 мм), на которых затем изготавливают интегральные схемы или другие приборы. Во время резки слиток прочно закрепляют, причем очень важно обеспечить перпендикулярное расположение слитка относительно режущих полотен или дисков с тем, чтобы пластины имели необходимую кристаллографическую ориентацию.



## Подготовительные операции

Поверхность пластин после резки весьма неровная: размеры царапин, выступов и ямок намного превышают размеры будущих элементов ИС. Поэтому перед началом основных технологических операций пластины многократно шлифуют, а затем полируют. Цель шлифовки, помимо удаления механических дефектов, состоит в том, чтобы обеспечить необходимую толщину пластины (150-250 мкм), недостижимую при резке, и параллельность плоскостей. Шлифовку осуществляют на вращающихся шлифовальных кругах. Шлифующим агентом являются суспензии из микропорошков, размер зерен которых выбирают все меньшим при каждом цикле шлифовки, вплоть до 0,3-0,5 мкм.

(21.1)

## Подготовительные операции

По окончании шлифовки на поверхности все же остается механически нарушенный слой толщиной несколько микрон, под которым расположен еще более тонкий, так называемый физически нарушенный слой. Последний характерен наличием «не зримых» искажений кристаллической решетки и механических напряжений, возникающих в процессе шлифовки.

Полировка состоит в удалении обоих нарушенных слоев и снижении неровностей поверхности до уровня, свойственного оптическим системам — сотые доли микрона. Помимо механической (с помощью еще более мелкозернистых суспензий), используется химическая полировка (травление), т.е. по существу растворение поверхностного слоя полупроводника в тех или иных реактивах. Выступы и трещины на поверхности стравливаются быстрее, чем основной материал, и в целом поверхность выравнивается.

## Подготовительные операции

Достигаемая в процессе шлифовки и полировки параллельность плоскостей пластины составляет единицы в даже доли микрона на сантиметр длины. Важным процессом в полупроводниковой технологии является также очистка поверхности от загрязнений органическими веществами, особенно жирами. Очистку и обезжиривание проводят в органических растворителях (толуол, ацетон, этиловый спирт и др.) при повышенной температуре. Травление, очистка и многие другие процессы сопровождаются отмывкой пластик в деионизованной воде. Деионизация осуществляется в специальных установках путем пропускания предварительно дистиллированной воды через гранулированные смолы, в которых благодаря химическим реакциям происходит связывание растворенных ионов. Степень деионизации оценивается по удельному сопротивлению воды, которое обычно лежит в пределах 10-20 Мом на см и выше (удельное сопротивление бидистиллированной воды не превышает 1—2 МОм на см).



# Эпитаксия

Эпитаксией называют процесс наращивания монокристаллических слоев на подложку, при котором кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки.

В настоящее время эпитаксия обычно используется для получения тонких рабочих слоев однородного полупроводника на сравнительно толстой подложке, играющей роль несущей конструкции.

Типовой — хлоридный процесс эпитаксии применительно к кремния> состоит в следующем (рис. 25.1). Монокристаллические кремниевые пластины загружают в тигель «лодочку» и помещают в кварцевую трубу. Через трубу пропускают поток водорода, содержащий небольшую примесь тетрахлорида кремния  $\text{SiCl}_4$ .

# Эпитаксия

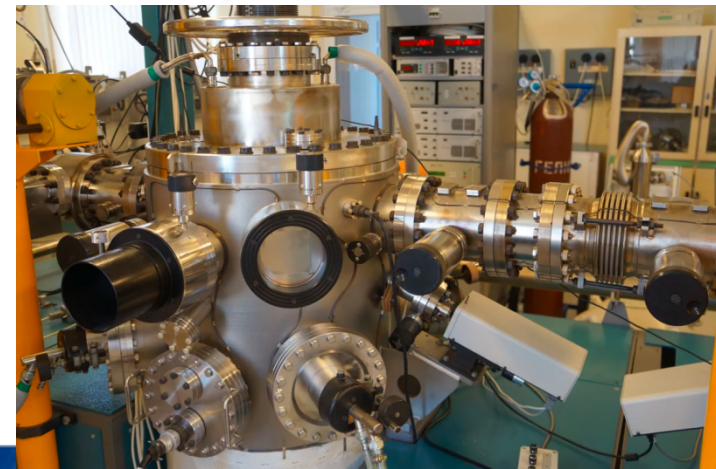
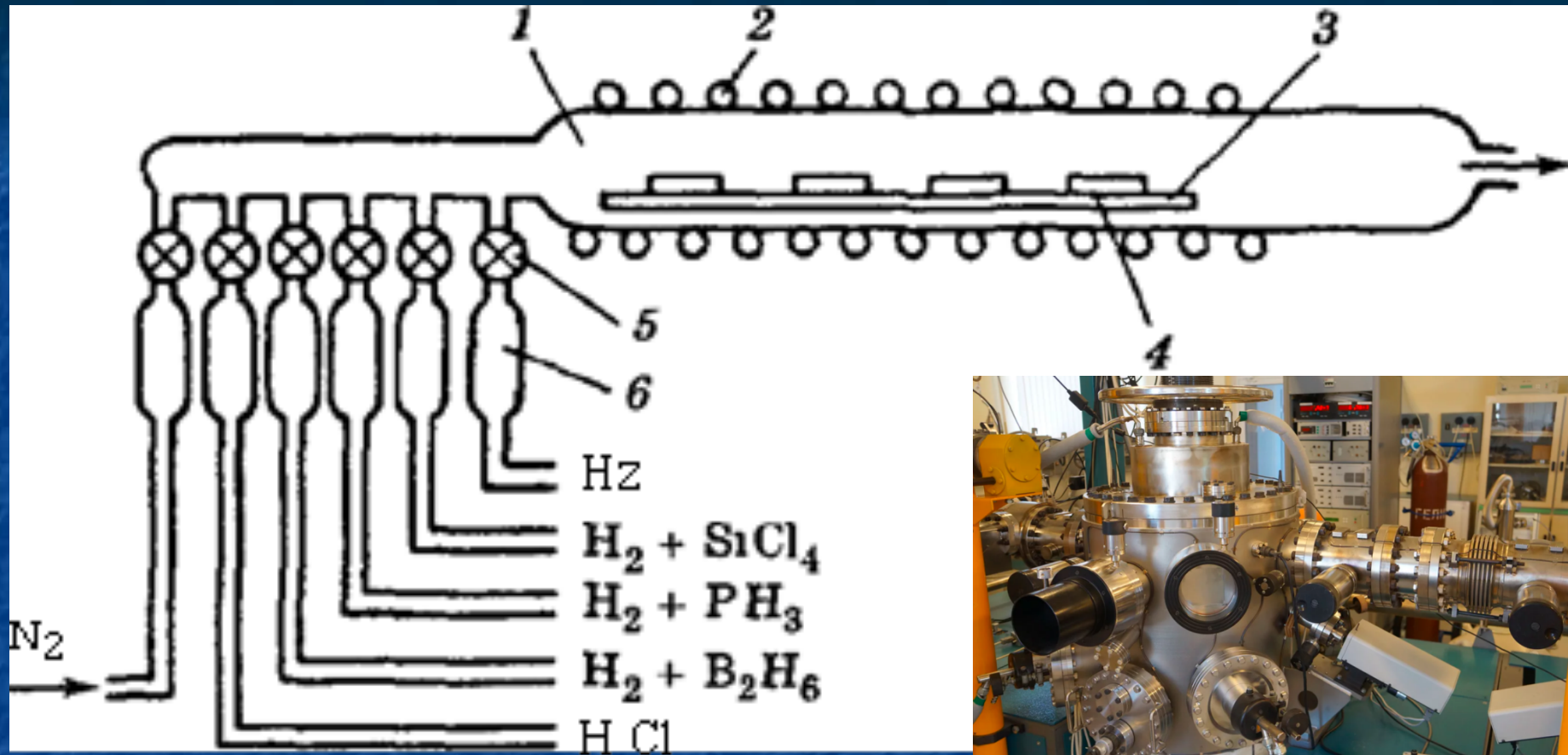


Рис. 25.1. Схема хлоридного процесса эпитаксии: 1 — кварцевая труба; 2 — катушка ВЧ нагрева; 3 — тигель с пластинами; 4 — пластина кремния; 5 — вентиль для перекрытия соответствующего газа; 6 — измеритель скорости потока

## Эпитаксия

При высокой температуре (около 1200 °С), которая обеспечивается высокочастотным нагревом тигля, на поверхности пластин происходит реакция



В результате реакции на подложке постепенно осаждается слой чистого кремния, а пары HCl уносятся потоком водорода. Эпитаксиальный слой осажденного кремния монокристаллический и имеет ту же кристаллографическую ориентацию, что и подложка. Химическая реакция, благодаря подбору температуры, происходит только на поверхности пластины, а не в окружающем пространстве.

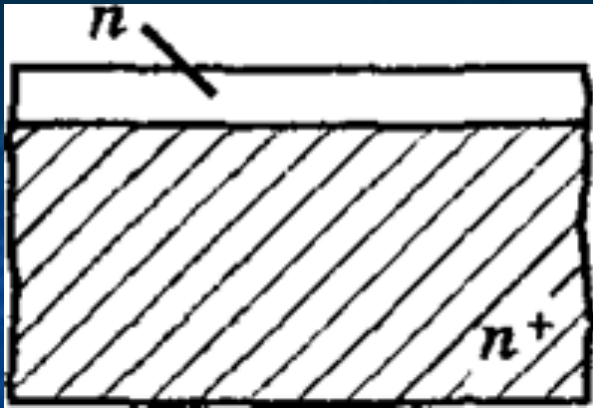
Процесс, проходящий в потоке газа, называют газотранспортной реакцией, а основной газ (в данном случае водород), переносящий примесь в зону реакции, — газом-носителем.



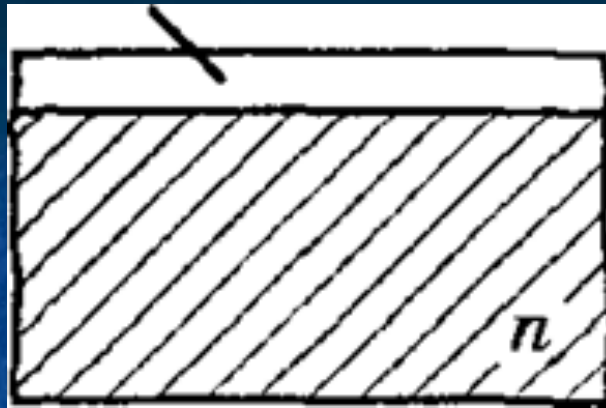
## Эпитаксия

Если к парам тетрахлорида кремния добавить пары соединений бора ( $B_2H_6$ ) или фосфора ( $PH_3$ ), то эпитаксиальный слой будет иметь уже не собственную, а соответственно дырочную или электронную проводимость, поскольку в ходе реакции в осаждающийся кремний будут внедряться акцепторные атомы бора или донорные атомы фосфора. Если к парам тетрахлорида кремния добавить пары соединений бора ( $B_2H_6$ ) или фосфора ( $PH_3$ ), то эпитаксиальный слой будет иметь уже не собственную, а соответственно дырочную или электронную проводимость, поскольку в ходе реакции в осаждающийся кремний будут внедряться акцепторные атомы бора или донорные атомы фосфора. В установке, показанной на рис. 28.1, предусмотрены некоторые дополнительные операции: продувка трубы азотом и неглубокое правление поверхности кремния в парах  $HCl$  (с целью очистки). Эти операции проводятся до основных.

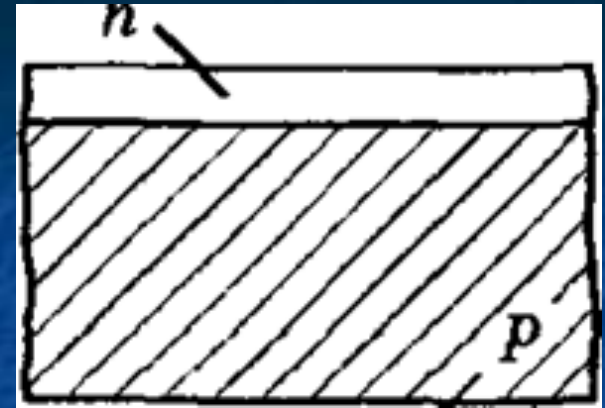
## Эпитаксия



пленка n-типа на  
n-подложке



пленка p-типа на  
n-подложке



пленка n-типа на  
p-подложке

(28.1)

## Эпитаксия

Таким образом, эпитаксия позволяет выращивать монокристаллические слои любого типа проводимости и любого удельного сопротивления на подложке, обладающей тоже любым типом и величиной проводимости (рис 28.1).

Эпитаксиальная пленка может отличаться от подложки по химическому составу. Способ получения таких пленок называют гетероэпитаксией, в отличие от гомоэпитаксии, описанной выше. Конечно, при гетероэпитаксии материалы пленки и подложки должны по-прежнему иметь одинаковую кристаллическую решетку. Например, можно выращивать кремниевую пленку на сапфировой подложке.

Разница между эпитаксиальным слоем и подложкой не получается идеально резкой, так как примеси в процессе эпитаксии частично диффундируют из одного слоя в другой. Это обстоятельство затрудняет создание сверхтонких (менее 1 мкм) и многослойных эпитаксиальных структур.



# Эпитаксия

Основную роль в настоящее время играет однослойная эпитаксия. Она существенно пополнила арсенал полупроводниковой технологии; получение таких тонких однородных слоев (1—10 мкм), какие обеспечивает эпитаксия, невозможно иными средствами.

В заключение заметил, что помимо описанной газовой эпитаксии, существует жидкостная эпитаксия, при которой наращивание монокристаллического слоя осуществляется из жидкой фазы, т.е. из раствора, содержащего необходимые компоненты.

## Термическое окисление

Окисление кремния — один из самых характерных процессов в технологии современных ИС. Получаемая при этом пленка двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) выполняет несколько важных функций, в том числе:

- функцию защиты — пассивации поверхности и, в частности, защиты вертикальных участков р-п-переходов, выходящих на поверхность (рис. 32. 1);

- функцию маски, через окна которой вводятся необходимые примеси (рис. 32.2);

- функцию тонкого диэлектрика под затвором МОП-транзистора (рис. 32.3).

Такие широкие возможности двуокиси кремния — одна из причин того, что кремний стал основным материалом для изготовления полупроводниковых ИС.

# Термическое окисление



Рис 32. Функции двуокисной пленки кремния  
а — пассивация поверхности, б — маска для локального легирования, в — тонкий подзатворный окисел



## Термическое окисление

Поверхность кремния всегда покрыта «собственной» оксидной пленкой, получающейся в результате естественного окисления при самых низких температурах. Однако эта пленка имеет слишком малую толщину (около 5 нм), чтобы выполнять какую-либо из перечисленных функций. Поэтому в технологии ИС пленки  $\text{SiO}_2$  получают искусственным путем.

Искусственное окисление кремния осуществляется обычно при высокой температуре (1000-1200 °C). Такое термическое окисление можно проводить в атмосфере кислорода (сухое окисление), в смеси кислорода с парами воды (влажное окисление) или просто в парах воды.

## Термическое окисление

Во всех случаях процесс проводится в окислительных печах. Основу таких печей составляет, как и при эпитаксии, кварцевая труба, в которой размещается «лодочка» с пластинами кремния, нагреваемая либо токами высокой частоты, либо иным путем. Через трубу пропускается поток кислорода (сухого или увлажненного) или пары воды, которые реагируют с кремнием в высокотемпературной зоне. Получаемая таким образом пленка  $\text{SiO}_2$  имеет аморфную структуру.

Механизм окисления имеет два варианта. Первый вариант состоит из следующих этапов: 1) диффузия атомов кремния через уже имеющуюся пленку окисла к поверхности, 2) адсорбация молекул кислорода поверхностью из газовой фазы, 3) собственно окисление, т.е. химическая реакция. В этом случае пленка нарастает над исходной поверхностью кремния.

## Термическое окисление

Второй вариант состоит из следующих этапов:

- 1) адсорбция кислорода поверхностью уже имеющегося окисла,
- 2) диффузия кислорода через окисел к еще не окисленному кремнию,
- 3) собственно окисление. В этом случае пленка нарастает вглубь от исходной поверхности кремния. На практике оба механизма сочетаются, но главную роль обычно играет второй.

Очевидно, что скорость роста окисла со временем должна убывать, так как новым атомам кислорода приходится диффундировать через все более толстый слой окисла. Полуэмпирическая формула, связывающая толщину окисной пленки со временем термического окисления, имеет вид:

$$d \approx k\sqrt{t},$$

(35.1)



## Термическое окисление

где  $k$  — параметр, зависящий от температуры и влажности кислорода

Сухое окисление идет в десятки раз медленнее влажного. Например, для выращивания пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,5 мкм в сухом кислороде при 1000 °С требуется около 5 ч, а во влажном — всего 20 мин. С уменьшением температуры на каждые 100 °С время окисления возрастает в 2-3 раза. В технологии ИС различают «толстые» и «тонкие» окислы  $\text{SiO}_2$ . Толстые окислы ( $d = 0,5\text{—}0,8$  мкм) выполняют функции защиты и маскировки, а тонкие ( $d = 0,05\text{—}0,15$  мкм) — функции подзатворного диэлектрика в МОП-транзисторах.

(36.1)

## Термическое окисление

Одной из важных проблем при выращивании пленки  $\text{SiO}_2$  является обеспечение ее однородности. В зависимости от качества поверхности пластины, от чистоты реагентов и режима выращивания в пленке возникают те или иные дефекты. Распространенным типом дефектов являются микро- и макропоры, вплоть до сквозных отверстий (особенно в тонком окисле).

Качество оксидной пленки повышается с уменьшением температуры ее выращивания, а также при использовании сухого кислорода. Поэтому тонкий подзатворный окисел, от качества которого зависит стабильность параметров МОП-транзистора, получают сухим окислением. При выращивании толстого окисла чередуют сухое и влажное окисление: первое обеспечивает отсутствие дефектов, а второе позволяет сократить время процесса.

(37.1)

# Легирование

Внедрение примесей в исходную пластину (или в эпитаксиальный слой) путем диффузии при высокой температуре является исходным и до сих пор основным способом легирования полупроводников с целью создания диодных и транзисторных структур. Этому способу мы уделим главное внимание. Однако за последние годы широкое распространение получил и другой способ легирования — ионная имплантация, — который рассматривается в конце раздела.

Способы диффузии.

Диффузия может быть общей и локальной. В первом случае она осуществляется по всей поверхности пластины (рис. 39.1), а во втором — на определенных участках пластины через окна в маске, например, в слое  $\text{SiO}_2$  (рис. 39. 2).



# Легирование

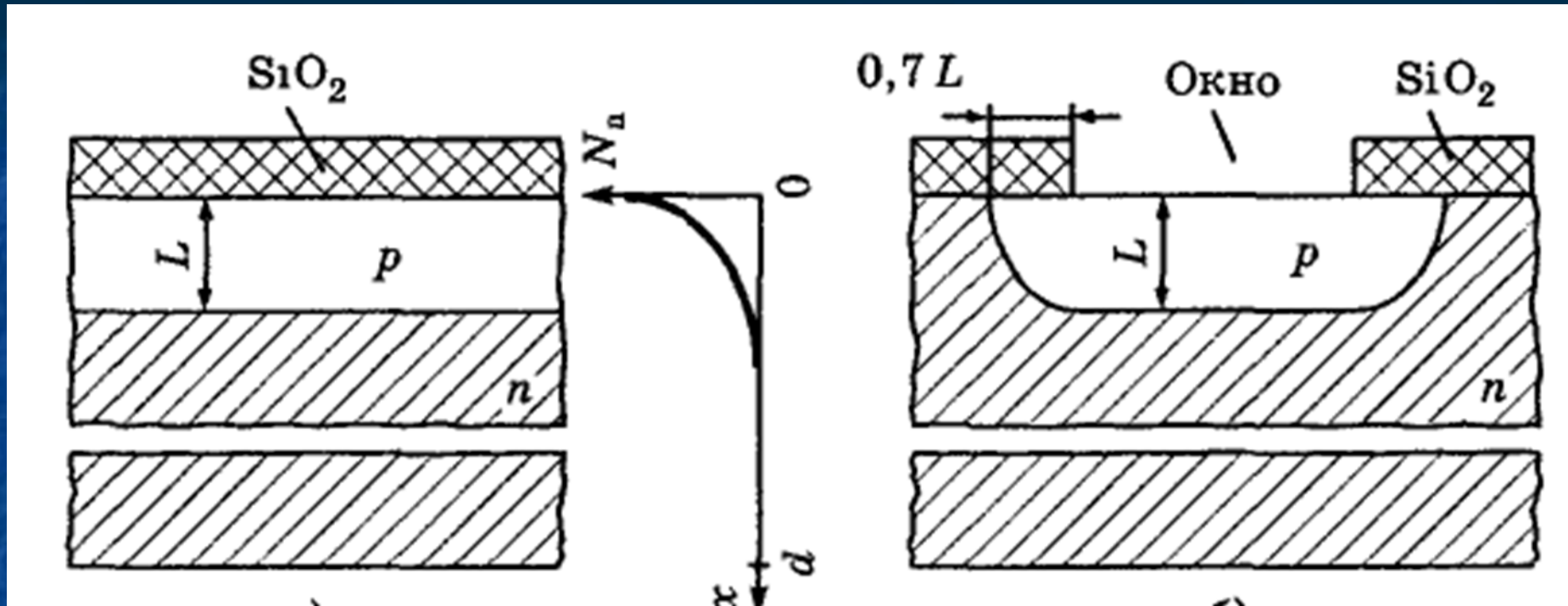


Рис. 39.1 и 2. Общая (1) и локальная (2) диффузия примеси в кремнии

(39.1)

## Легирование

Общая диффузия приводит к образованию в пластине тонкого диффузионного слоя, который отличается от эпитаксиального неоднородным (по глубине) распределением примеси (см. кривую  $N(x_1)$  на рис. 39).

В случае локальной диффузии примесь распространяется не только вглубь пластины, но и во всех перпендикулярных направлениях, т.е. под маску. В результате этой так называемой боковой диффузии участок  $p-n$ -перехода, выходящий на поверхность, оказывается автоматически защищенным окислом (рис. 39.2). Соотношение между глубинами боковой и основной — «вертикальной» — диффузии зависит от ряда факторов, в том числе от глубины диффузионного слоя  $L$ . Типичным для глубины боковой диффузии можно считать значение  $0,7 L$ .

Диффузию можно проводить однократно и многократно. Например, в исходную пластину n-типа можно во время 1-й диффузии внедрить акцепторную примесь и получить р-слой, а затем во время 2-й диффузии внедрить в полученный р-слой (на меньшую глубину) донорную примесь и тем самым обеспечить трехслойную структуру. Соответственно различают двойную и тройную диффузию.

При проведении многократной диффузии следует иметь в виду, что концентрация каждой новой вводимой примеси должна превышать концентрацию предыдущей, в противном случае тип проводимости не изменится, а значит, не образуется р—n-переход. Между тем концентрация примеси в кремнии (или другом исходном материале) не может быть сколь угодно большой: она ограничена особым параметром — предельной растворимостью примеси. Предельная растворимость зависит от температуры. При некоторой температуре она достигает максимального значения  $N_{\text{прмакс}}$  (41.1) и затем снова уменьшается.



## Легирование

Таблица 42.1. Максимальная предельная растворимость типичных примесей в кремнии

Примесь	As	P	B	Sb
$N_{пр}, \text{см}^{-3}$	$20 \cdot 10^{20}$ (1150 °C)	$13 \cdot 10^{20}$ (1150 °C)	$5 \cdot 10^{20}$ (1200 °C)	$0,6 \cdot 10^{20}$ (1300 °C)

Следовательно, если проводится многократная диффузия, то для последней диффузии важно выбирать материал с максимальной предельной растворимостью. Поскольку ассортимент примесных материалов ограничен, не удастся обеспечить более 3-х последовательных диффузий.

# Легирование

Примеси, вводимые путем диффузии, называют диффузантами (бор, фосфор и др.). Источниками диффузантов являются их химические соединения. Это могут быть и жидкости ( $\text{BBr}_3$ ,  $\text{POCl}_3$ ), и твердые тела ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), и газы ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ,  $\text{PH}_3$ ).

Внедрение примесей обычно осуществляется с помощью газотранспортных реакций — так же, как при эпитаксии и окислении. Для этого используются либо однозонные, либо двухзонные диффузионные печи.

Двухзонные печи используются в случае твердых диффузантов. В таких печах (рис. 44.1) имеются две высокотемпературные зоны, одна — для испарения источника диффузанта, вторая — собственно для диффузии. Пары источника диффузанта, полученные в 1-й зоне, примешиваются к потоку нейтрального газа-носителя (например, аргона) и вместе с ним доходят до 2-й зоны, где расположены пластины кремния. Температура во 2-й зоне выше, чем в 1-й. Здесь атомы диффузанта внедряются в пластины, а другие составляющие химического соединения уносятся газом-носителем из зоны.

# Легирование

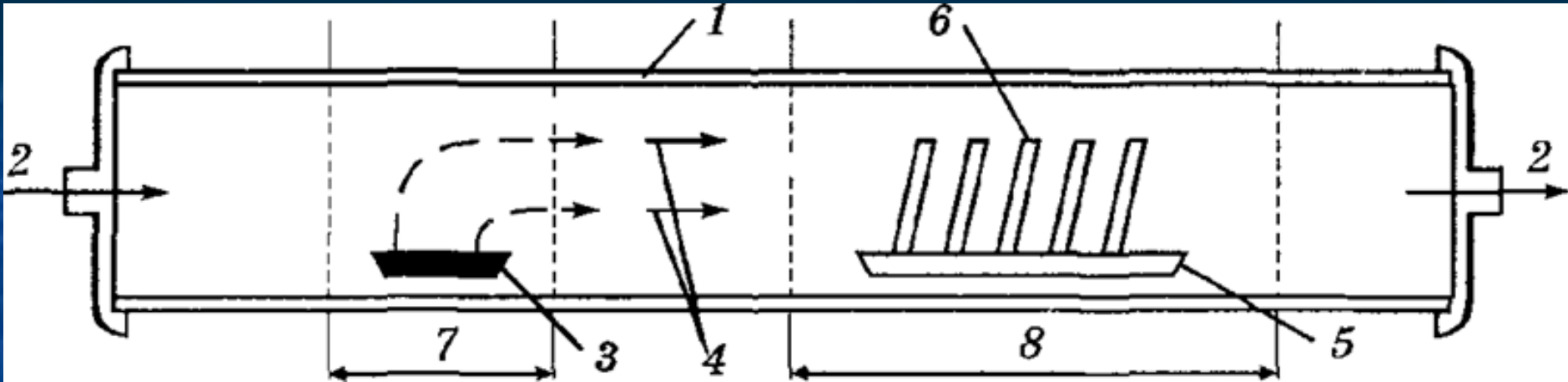


Рис. 44.1. Схема двухзонной диффузионной печи: 1 — кварцевая труба; 2 — поток газа-носителя; 3 — источник диффузанта; 4 — пары источника диффузанта; 5 — тигель с пластинами; 6 — пластина кремния; 7 — первая высокотемпературная зона; 8 — вторая высокотемпературная зона



## Легирование

В случае жидких и газообразных источников диффузанта нет необходимости в их высокотемпературном испарении. Поэтому используются однозонные печи, в которые источник диффузанта поступает уже в газообразном состоянии.

При использовании жидких источников диффузанта диффузию проводят в окислительной среде, добавляя к газу-носителю кислород. Кислород окисляет поверхность кремния, образуя окисел  $\text{SiO}_2$ , т.е. в сущности — стекло. В присутствии диффузанта (бора или фосфора) образуется боросиликатное или фосфорно-силикатное стекло. При температуре выше  $1000^\circ$  эти стекла находятся в жидком состоянии, покрывая поверхность кремния тонкой пленкой, так что диффузия примеси идет, строго говоря, из жидкой фазы. После застывания стекло защищает поверхность кремния в местах диффузии, т.е. в окнах окисной маски. При использовании твердых источников диффузанта — окислов — образование стекол происходит в процессе диффузии без специально вводимого кислорода.

# Теоретические основы диффузии

Теория диффузии основана на двух законах Фика. 1-й закон Фика связывает плотность потока частиц с градиентом их концентрации. В одномерном случае

$$J = -D (dN/dx) \quad (46.1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии,  $N$  — концентрация.

2-й закон Фика характеризует скорость накопления частиц (в нашем случае — атомов примеси):

$$\partial N / \partial t = D (\partial^2 N / \partial x^2) \quad (46.2)$$

Из уравнения (46.2) можно найти функцию  $N(x, t)$ , т.е. распределение концентрации  $N(x)$  в любой момент времени. Для этого нужно задаться двумя граничными условиями.

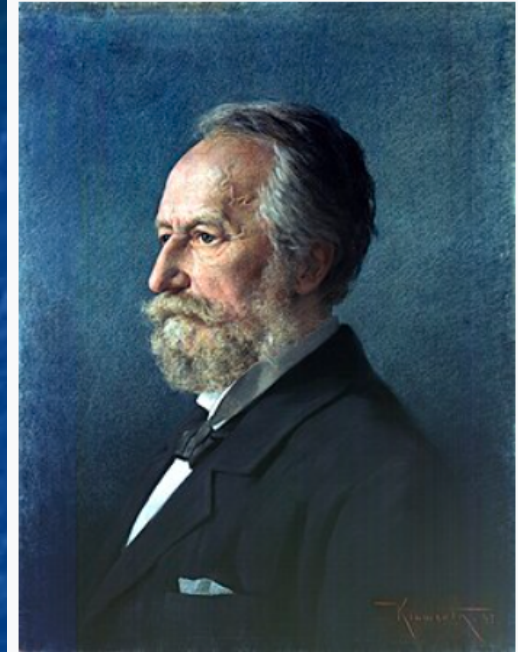
# Теоретические основы диффузии

Пусть координата  $x=0$  соответствует той плоскости пластины, через которую вводится примесь (рис. 39.1). Тогда координата противоположной плоскости равна толщине пластины  $d$ . На практике глубина диффузионных слоев всегда меньше толщины пластины (см. рис. 39.1): поэтому можно положить  $N(d) = 0$ . С математической точки зрения удобнее считать пластину бесконечно толстой и в качестве 1-го граничного условия принять

$$N(\infty, t) = 0 \quad (47.1)$$

Адольф Ойген Фик

нем. *Adolf Eugen Fick*



Дата рождения	3 сентября 1829
Место рождения	Кассель, Германия
Дата смерти	21 августа 1901 (71 год)
Место смерти	Бланкенберге, Бельгия
Страна	Германия
Научная сфера	физика, физиология
Место работы	JMU Цюрихский университет
Альма-матер	Марбургский университет
Научный руководитель	Франц Людвиг Фик



## Теоретические основы диффузии

2-е граничное условие имеет два варианта, которые соответствуют двум разновидностям реального технологического процесса.

1) Случай неограниченного источника примеси. В этом случае диффузانت непрерывно поступает к пластине, так что в ее приповерхностном слое концентрация примеси поддерживается П ОСТОЯННОЙ

Граничное условие для этого варианта имеет вид:

$$N(0, t) = N_s = \text{const} \quad (48.1)$$

где  $N$  —поверхностная (точнее — приповерхностная) концентрация. Обычно количество поступающего диффузанта обеспечивает режим предельной растворимости, т.е.  $N_s = N_{\text{прмакс}}$

## Теоретические основы диффузии

2) Случай ограниченного источника принеси. В этом случае сначала в тонкий приповерхностный слой пластины вводят некоторое количество атомов диффузанта, а потом источник диффузанта отключают и атомы примеси перераспределяются по глубине пластины при неизменном их общем количестве. Первую стадию процесса называют «загонкой», вторую — «разгонкой» примеси

Для этого варианта можно записать условие в виде.

$$\int_0^{\infty} N(x) dx = Q = \text{const.} \quad (49.1)$$

где  $Q$  — количество атомов примеси на единицу площади (задается на этапе загонки»).

## Теоретические основы диффузии

Решая уравнение (49.1) при граничных условиях (48.1) и (47.1), получаем распределение концентрации при неограниченном источнике (рис. 51.1):

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) \quad (50.1)$$

где  $\operatorname{erfc}(z)$  — дополнительная функция ошибок близкая к экспоненциальной функции  $e^{-z}$ .

Решая уравнение (49.1) при условиях (48. 1) и (47. 1), получаем распределение концентрации при ограниченном источнике (рис. 51. 2):

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi}\sqrt{Dt}} e^{-x^2/(4Dt)} \quad (50.2)$$



# Теоретические основы диффузии

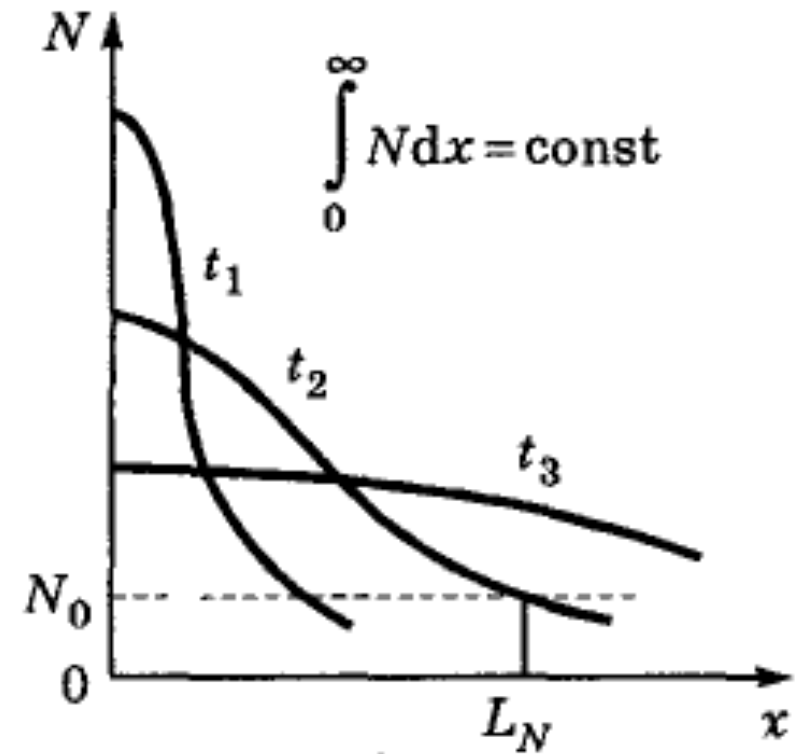
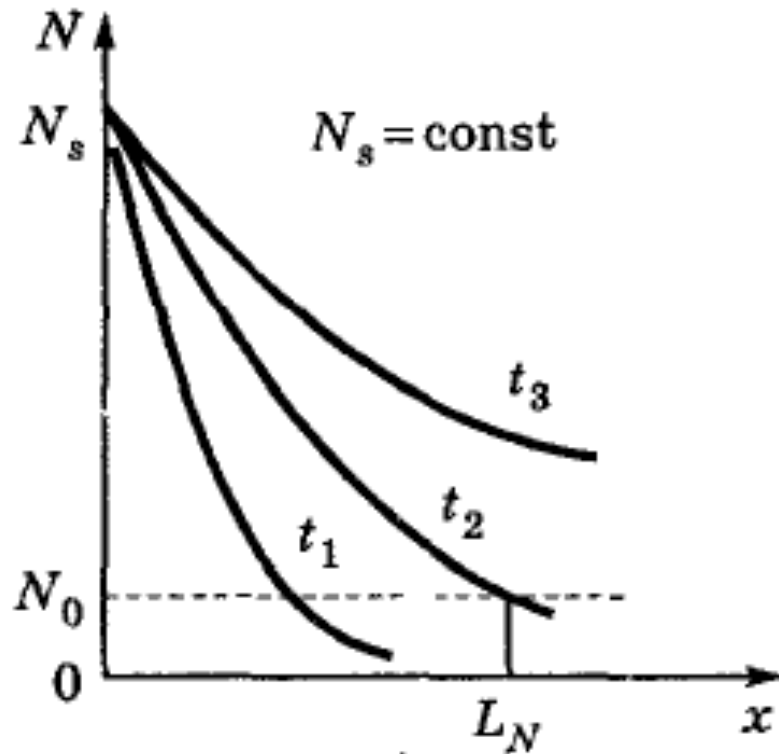


Рис. 51.1. Распределение примеси при диффузии из неограниченного (1) и ограниченного (2) источников для разных моментов времени

## Теоретические основы диффузии

В данном случае распределение описывается функцией Гаусса которая характерна нулевой начальной производной, наличием точки перегиба и почти экспоненциальным хвостом после этой точки.

Под глубиной диффузионного слоя (глубиной диффузии) понимают координату  $x = L_N$  которой концентрация введенной примеси  $N$  равна концентрации исходной примеси  $N_0$  (рис. 51.1). Величину  $L_N$  нетрудно найти из выражений (50.2), полагая в левой части  $N = N_0$

Аппроксимируя функцию (50.2) экспонентой, получаем для неограниченного источника

$$L_N \approx 2\sqrt{Dt} \ln(N_s/N_0) \quad (52.1)$$

# Теоретические основы диффузии

логарифмируя обе части, получаем для ограниченного источника

$$L_N = 2\sqrt{Dt} \ln \frac{Q}{N_0 \sqrt{\pi Dt}} \quad (53.1)$$

Оба выражения имеют одинаковую структуру и позволяют сделать два важных общих вывода:

- 1) время проведения диффузии пропорционально квадрату желательной глубины диффузии; поэтому получение глубоких диффузионных слоев требует большого времени; в ИС глубина рабочих диффузионных слоев обычно лежит в пределах 1-4 мкм;
- 2) при заданной глубине диффузионного слоя изменения коэффициента диффузии эквивалентны изменениям времени процесса



## Теоретические основы диффузии

Второй вывод заслуживает более детального рассмотрения. На рис. 55.1 показана температурная зависимость коэффициентов диффузии для некоторых материалов, применяемых в технологии ИС. Как видим, эта зависимость экспоненциальная, т.е. весьма сильная: при  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$  коэффициент диффузии меняется на порядок, а при  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  — на  $\pm 2,5\%$ . Последняя цифра, казалось бы, невелика, но ее истинное значение можно проиллюстрировать следующим простым расчетом. Если  $\Delta D/D = 2,5\%$ , то разброс глубины диффузии составит  $\pm 1,25\%$  или, при  $L_n = 4\text{ мкм}$ , около  $\pm 0,05\text{ мкм}$ . Значит, ширина базы  $w$ , равная  $L_n/6 \approx L_n/6$ , может получиться с ошибкой  $0,1\text{ мкм}$ , что при  $w = 0,5\text{ мкм}$  составит  $20\%$ . Поскольку коэффициент  $\beta$  и предельная частота  $f_t$  обратно пропорциональны величине  $w^2$ , их разброс превысит  $40\%$

(54.1)

# Теоретические основы диффузии

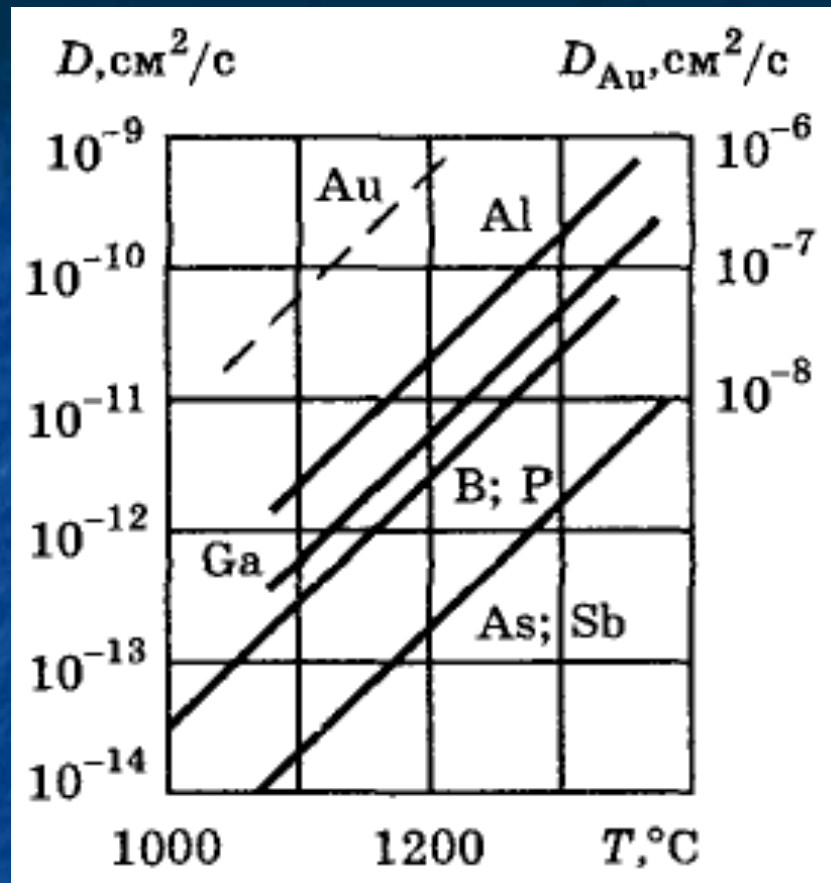


Рис. 55.1. Зависимость коэффициентов диффузии типичных (для кремния) примесей от температуры. Для золота масштаб на 3 порядка меньше

(55.1)

## Теоретические основы диффузии

Из сказанного ясна необходимость прецизионной регулировки температуры в диффузионных печах. Допустимая нестабильность температуры составляет до  $\pm 0,2$  °C (т.е. сотые доли процента).



## Ионная имплантация

Ионной имплантацией называют метод легирования пластины (или эпитаксиального слоя) путем бомбардировки ионами примеси, ускоренными до энергии, достаточной для их внедрения вглубь твердого тела.

Ионизация атомов примеси, ускорение ионов и фокусировка ионного пучка осуществляются в специальных установках типа ускорителей частиц в ядерной физике. В качестве примесей используются те же материалы, что и при диффузии.

Глубина внедрения ионов зависит от их энергии и массы. Чем больше энергия, тем больше получается толщина имплантированного слоя. Однако с ростом энергии возрастает и количество радиационных дефектов в кристалле, т.е. ухудшаются его электрофизические параметры. Поэтому энергию ионов ограничивают величиной 100—150 кэВ.

## Ионная имплантация

Нижний уровень составляет 5—10 кэВ. При таком диапазоне энергии глубина слоев лежит в пределах 0,1–0,4 мкм, т.е. она значительно меньше типичной глубины диффузионных слоев. Концентрация примеси в имплантированном слое зависит от плотности тока в ионном пучке и времени процесса или, как говорят, от времени экспозиции. В зависимости от плотности тока и желательной объемной концентрации время экспозиции составляет от нескольких секунд до 3–5 мин и более (иногда до 1—2 ч). Разумеется, чем больше время экспозиции, тем, опять же, больше количество радиационных дефектов.

Типичное распределение примеси при ионной имплантации показано на рис. 59.1 сплошной кривой. Как видим, это распределение существенно отличается от диффузионного наличием максимума. Вблизи максимума кривая хорошо аппроксимируется функцией Гаусса, см. (52.1)

# Ионная имплантация

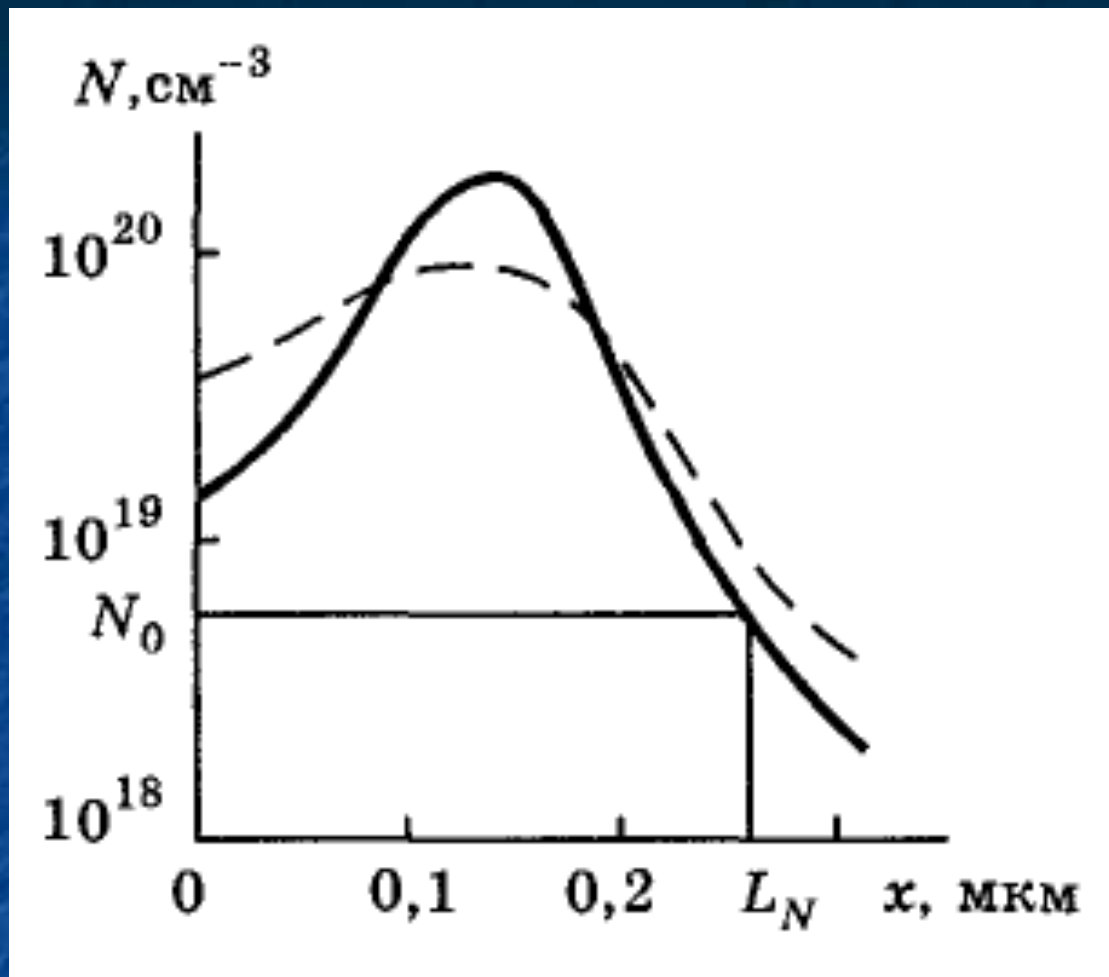


Рис. 59.1. Распределение примесей при ионной имплантации



## Ионная имплантация

Поскольку площадь ионного пучка меньше площади пластины (а иногда и кристалла), то приходится сканировать пучок, т.е. плавно или шагами перемещать его (с помощью специальных отклоняющих систем) поочередно по всем «строкам» пластины, на которых расположены отдельные ИС.

По завершении процесса легирования пластину обязательно подвергают отжигу при температуре 500—800 °С для того, чтобы упорядочить кристаллическую решетку кремния и устранить (хотя бы частично) неизбежные радиационные дефекты. При температуре отжига процессы диффузии несколько меняют профиль распределения (см. штриховую кривую на рис. 59. 1).

## Ионная имплантация

Ионная имплантация так же, как диффузия, может быть общей и локальной (избирательной). В последнем, более типичном случае облучение (бомбардировка) проводится через маски, в которых длина пробега ионов должна быть значительно меньше, чем в кремнии. Материалом для масок могут служить распространенные в ИС двуокись кремния и алюминий. При этом важным достоинством ионной имплантации является то, что ионы, двигаясь по прямой линии, внедряются только вглубь пластины, а аналогия боковой диффузии (под маску) практически отсутствует.

## Ионная имплантация

В принципе ионную имплантацию, как и диффузию, можно проводить многократно, «встраивая» один слой в другой. Однако сочетание энергий, времен экспозиции и режимов отжига, необходимое для многократной имплантации, оказывается затруднительным. Поэтому ионная имплантация получила главное распространение при создании тонких одинарных слоев.

Главными преимуществами ионной имплантации являются: низкая температура процесса и его хорошая контролируемость. Низкая температура обеспечивает возможность проведения ионной имплантации на любом этапе технологического цикла, не вызывая при этом дополнительной диффузии примесей в ранее изготовленных слоях.



**Спасибо за внимание**