

Лабораторная работа №3.3.4

Эффект Холла в полупроводниках

Джокер Бэтмен, Б02-000, 25.09.2021

Введение

Цель работы: измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках.

В работе используются: электромагнит с источником питания GPR, батарейка 1,5 В, амперметр, реостат, цифровой вольтметр В7-78/1, милливольтметр, образцы легированного германия.

Теоретическая справка

Эффект Холла

Во внешнем магнитном поле \vec{B} на заряды действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}.$$

Эта сила вызывает движение носителей, направление которого в общем случае не совпадает с \vec{E} . Действительно, траектории частиц будут либо искривляться, либо, если геометрия проводника этого не позволяет, возникнет дополнительное электрическое поле, компенсирующее магнитную составляющую силы Лоренца. Возникновение поперечного тока электрического поля в образце, помещённом во внешнее магнитное поле, называют *эффектом Холла*.

Мостик Холла

Для исследования зависимости проводимости среды от магнитного поля используют т.н. *мостик Холла*. В данной схеме (см. рисунок 1) ток вынуждают течь по оси x вдоль плоской пластинки (ширина пластинки a , толщина h , длина l). Сила Лоренца, действующая со стороны перпендикулярного пластинке магнитного поля, "прибивает" носители заряда к краям образца, что создаёт холловское электрическое поле, компенсирующее эту силу. Поперечное напряжение между краями пластинки (*холловское напряжение*) равно $U_{\perp} = E_y a$, где

$$E_y = \frac{j_x B}{nq}.$$

Плотность тока, текущего через образец, равна $j_x = \frac{I}{ah}$, где I – полный ток, ah – поперечное сечение. Таким образом, для холловского напряжения имеем

$$U_{\perp} = \frac{B}{nqh} I = R_H \frac{B}{h} I,$$

где константу

$$R_H = \frac{1}{nq}$$

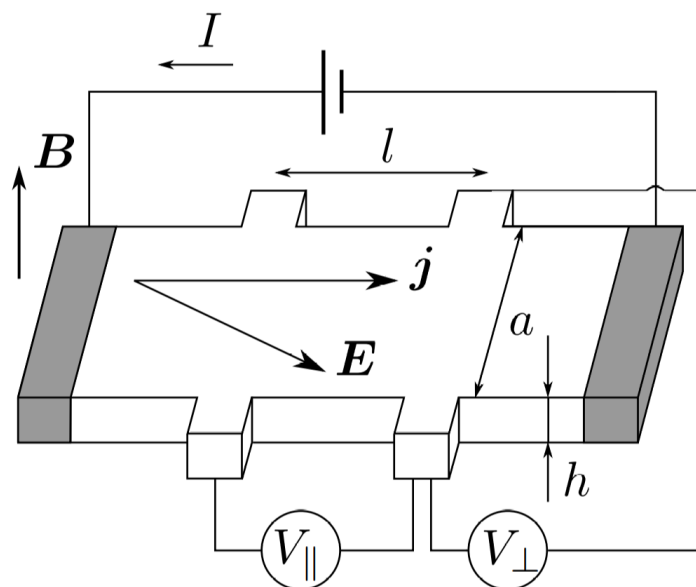


Рис. 1 — Схема мостика Холла

называют *постоянной Холла*. Знак постоянной Холла определяется знаком заряда носителей.

Продольная напряжённость электрического поля равна

$$E_x = \frac{j_x}{\sigma_0},$$

и падение напряжения $U_{\parallel} = E_x l$ вдоль пластинки определяется омическим сопротивлением образца $R_0 = \frac{l}{\sigma_0 a h}$:

$$U_{\parallel} = I R_0.$$

Интересно отметить, что несмотря на то, что тензор проводимости явно зависит от B , продольное сопротивление образца в данной геометрии от магнитного поля *не зависит*.

Экспериментальная установка

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рисунке 2.

В зазоре электромагнита создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов источника питания. Ток измеряется амперметром источника питания A_1 . Разъём K_1 позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита.

Градуировка магнита проводится при помощи милливексметра.

Образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе, подключается к батарее ($\approx 1,5$ В). При замыкании ключа K_2

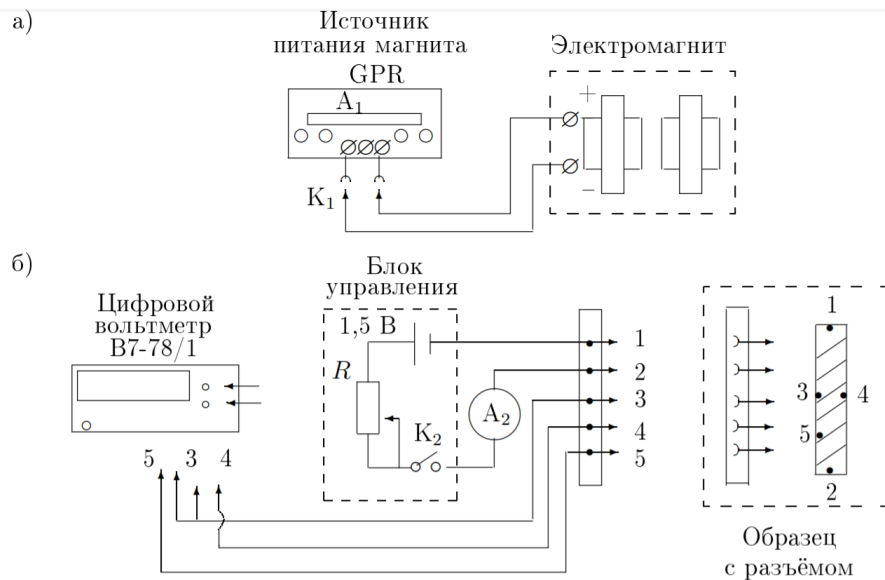


Рис. 2 — Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

вдоль длинной стороны образца течёт ток, величина которого регулируется реостатом R и измеряется миллиамперметром A_2 .

В образце с током, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 3 и 4 возникает разность потенциалов U_{34} , которая измеряется с помощью цифрового вольтметра.

Контакты 3 и 4 вследствие неточности подпайки не всегда лежат на одной эквипотенциали, и тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения, вызванным протеканием основного тока через образец. Измеряемая разность потенциалов при одном направлении магнитного поля равна сумме ЭДС Холла и омического падения напряжения, а при другом – их разности. В этом случае ЭДС Холла ε_H может быть определена как половина алгебраической разности показаний вольтметра, полученных для двух противоположных направлений магнитного поля в зазоре. Знак измеряемого напряжения высвечивается на цифровом табло вольтметра.

Можно исключить влияние омического падения напряжения иначе, если при каждом токе через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение U_0 остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла: $\varepsilon_H = U_{34} \pm U_0$. При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля.

По знаку ε_H можно определить характер проводимости – электронный или дырочный. Для этого необходимо знать направление тока в образце и направление магнитного поля. Измерив ток I в образце и напряжение U_{35} между контактами 3 и 5 в отсутствие магнитного поля, можно, зная пара-

метры образца, рассчитать проводимость материала образца по очевидной формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al},$$

где L_{35} – расстояние между контактами 3 и 5, a – толщина образца, l – его ширина.

Ход работы

Параметры образца германия, используемого в работе: толщина $a = 2,2$ мм, ширина $l = 7$ мм, расстояние между контактами 3 и 5 $L_{35} = 6,0$ мм.

0.1 I. Градуировка электромагнита

С помощью милливеберметра снимем зависимость магнитного потока Φ , пронизывающего пробную катушку, находящуюся в зазоре, от тока I_M ($\Phi = BSN$, где значение $SN = 72 \text{ см}^2 = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – произведение площади сечения пробной катушки на число витков в ней – указано на установке (погрешностью его пренебрежём)). Для измерения магнитного потока необходимо сначала поместить пробную катушку в зазор электромагнита и записать показания милливеберметра Φ_1 при этом. Затем её нужно очень быстро убрать из зазора и записать показания милливеберметра Φ_2 . Разность $\Phi_1 - \Phi_2$ и будет определять величину магнитного потока Φ через пробную катушку, откуда с лёгкостью можно найти соответствующую величину магнитного поля B . Проведём измерения при 8 различных значениях тока I_M вплоть до максимального $I_{Mmax} = 1,65$ А. Все полученные данные занесём в таблицу 1. В дальнейшем будем учитывать также погрешность милливеберметра. При измерении $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ погрешность равна $\sigma_\Phi = \sqrt{\sigma_{\Phi_1}^2 + \sigma_{\Phi_2}^2} = \sqrt{2}\Delta\Phi$, откуда погрешность определения индукции магнитного поля равна $\sigma_B = \frac{\sigma_\Phi}{SN} = \frac{\sqrt{2}\Delta\Phi}{SN} \approx 0,01$ Тл. Погрешность измерения тока будет равна $\sigma_I = 0,005I + 0,02$ А, также внесём её в таблицу.

Таблица 1 – Зависимость индукции магнитного поля B в зазоре электромагнита от тока I_M через обмотки

I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,65
σ_I , А	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Φ_1 , мВб	5,1	6,2	7,1	7,0	7,9	7,7	8,1	8,4
Φ_2 , мВб	3,9	3,9	3,8	2,6	2,6	1,8	1,7	1,7
Φ , мВб	1,2	2,3	3,3	4,4	5,3	5,9	6,4	6,7
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,93

Пользуясь значениями из таблицы 1, построим теперь градуировочную кривую для электромагнита $B(I_M)$. Результат приведён ниже на графике 3.

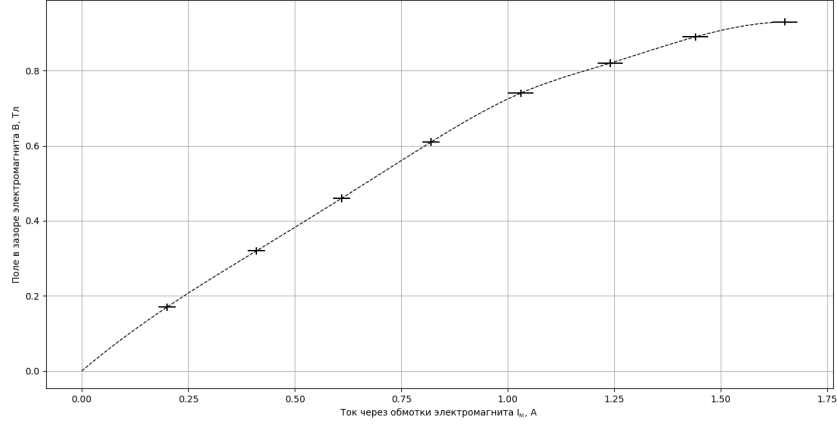


Рис. 3 — Градуировочная кривая $B(I_M)$ для электромагнита. Сглаживающая кривая проведена с помощью кубических сплайнов

II. Измерение ЭДС Холла

Вставим держатель с образцом в зазор электромагнита. Установим по миллиамперметру минимальное значение тока через образец (в нашем случае $I_{min} = 0,14$ мА). В отсутствие магнитного поля вольтметр будет показывать постоянное напряжение U_0 , вызванное несовершенством контактов 3, 4 и наводками. Будем в дальнейшем учитывать это значение и для каждого значения тока через образец принимать U_0 за начало отсчёта. Проведём измерения $U_{34}(I_M)$ для нескольких значений тока в диапазоне от I_{min} до $I_{max} = 1,00$ мА. При максимальном токе также проведём измерения при другом направлении магнитного поля через образец. Вычислим по этим данным ЭДС Холла ε_X . Все результаты занесём в таблицы 2 и 3.

Таблица 2 – Зависимость U_0 от I

$I, \text{А}$	0,14	0,25	0,35	0,44	0,53	0,63	0,72	0,81	0,91	1,00
$U_0, \text{мкВ}$	-19	-36	-50	-64	-77	-92	-106	-119	-134	-148

По данным из таблицы 3 построим семейство характеристик $\varepsilon_X(B)$ при разных значениях тока через образец (показано ниже на рисунке 4). Для измерений с обратной полярностью на максимальном токе построим модуль ЭДС Холла. Определим с помощью МНК угловые коэффициенты $K(I) \equiv \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta B}$ полученных прямых. Для максимального тока возьмём среднее значение угловых коэффициентов. Внесём данные в таблицу 4.

Построим теперь график $K(I)$, он представлен ниже на рисунке 5. Угловой коэффициент прямой на графике можно найти с помощью МНК. Он равен $\frac{\Delta K}{\Delta I} = (453,9 \pm 4,7) \frac{\text{мкВ}}{\text{мА} \cdot \text{Тл}} = (0,4539 \pm 0,0047) \frac{\text{В}}{\text{А} \cdot \text{Тл}}$. Тогда постоянную Холла можно найти как

$$R_X = a \frac{\Delta K}{\Delta I} = (2,66 \pm 0,04) \cdot 10^{-1} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}.$$

Таблица 3 – Зависимость U_{34} от I_M при токах через образец, указанных в таблице 2

I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,60
U_{34} , мкВ	-8	1	11	19	26	30	33	35
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,93
ε_X , мкВ	11	20	30	38	45	49	52	54
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,59
U_{34} , мкВ	-16	3	20	35	47	55	60	63
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,93
ε_X , мкВ	20	39	56	71	83	91	96	99
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,59
U_{34} , мкВ	-23	4	27	50	67	77	85	89
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,93
ε_X , мкВ	27	54	77	100	117	127	135	139
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,58
U_{34} , мкВ	-30	5	34	61	83	98	107	111
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	34	69	98	125	147	162	171	175
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,58
U_{34} , мкВ	-36	6	41	75	100	118	128	134
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	41	83	118	152	177	195	205	211
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,57
U_{34} , мкВ	-43	7	48	88	119	140	153	159
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	49	99	140	180	211	232	245	251
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,57
U_{34} , мкВ	-49	7	55	103	135	160	174	181
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	57	113	161	209	241	266	280	287
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,55
U_{34} , мкВ	-57	7	62	115	154	178	196	202
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	62	126	181	234	273	297	315	321
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,55
U_{34} , мкВ	-63	8	69	128	171	198	220	228
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	71	142	203	262	305	332	354	362
I_M , А	0,20	0,41	0,61	0,82	1,03	1,24	1,44	1,55
U_{34} , мкВ	-72	8	76	140	188	219	241	250
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	76	156	224	288	336	367	389	398
I_M , А	-0,20	-0,41	-0,61	-0,82	-1,03	-1,24	-1,44	-1,55
U_{34} , мкВ	-238	-322	-393	-465	-518	-551	-572	-582
B , Тл	0,17	0,32	0,46	0,61	0,74	0,82	0,89	0,92
ε_X , мкВ	-75	-159	-230	-302	-355	-388	-409	-419

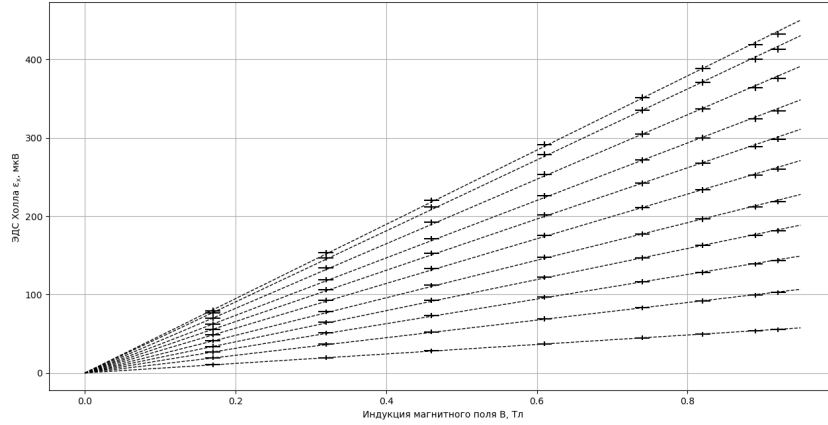


Рис. 4 — Семейство характеристик $\varepsilon_X(B)$ при различных значениях тока через образец. Прямые проведены с помощью МНК

Таблица 4 – Зависимость K от I

I, A	0,14	0,25	0,35	0,44	0,53	0,63	0,72	0,81	0,91	1,00
$K, \frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$	60,5	112,3	157,1	198,6	239,8	285,4	327,4	366,9	412,0	463,6
$\sigma_K, \frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$	3,2	3,4	3,6	3,7	3,9	4,0	4,2	4,3	4,5	4,6

Теперь можем рассчитать концентрацию носителей тока в образце по формуле

$$n = \frac{1}{eR_X} = (2,35 \pm 0,03) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} = (2,35 \pm 0,03) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3},$$

что в пределах погрешности совпадает с табличным значением $n = 2,33 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

III. Определение характера проводимости

Определим знак носителей заряда. Это можно сделать, зная направление тока через образец, направление магнитного поля и знак ЭДС Холла. Направление тока в образце показано знаками + и – на его держателе. Направление тока в обмотках электромагнита показано стрелкой на его торце. Отсюда можно определить направление магнитного поля в зазоре электромагнита, затем по правилу векторного произведения определить номер клеммы, к которой движутся холловские частицы. В нашем случае это клемма 3.

Подадим на образец небольшой ток и сравним показания вольтметра без магнитного поля и с полем. Видим, что знак ЭДС Холла – +. Отсюда следует, что направление движения холловских частиц противоположно направлению напряжённости, вызванной эффектом Холла.

Значит, знак носителей заряда –.

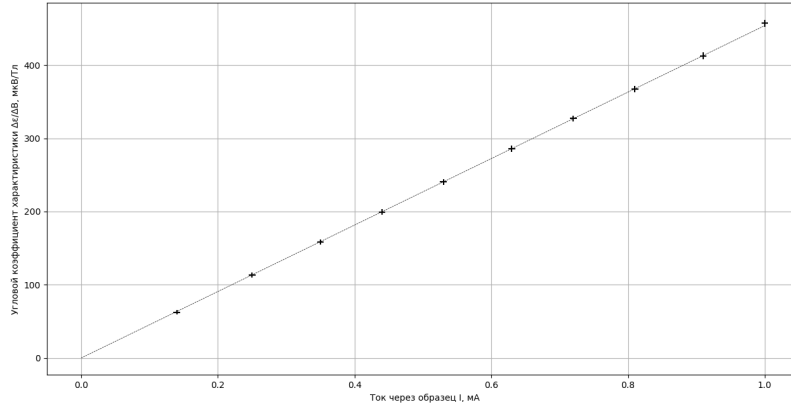


Рис. 5 — Зависимость углового коэффициента K характеристики от тока I через образец. Прямая проведена с помощью МНК

IV. Определение удельной проводимости

Выключим источник питания и удалим держатель с образцом из зазора. Подключим к клеммам вольтметра потенциальные концы 3 и 5 и измерим падение напряжения при токе $I = (1,000 \pm 0,005)$ мА. Оно равно $U_{3,5} = (2,494 \pm 0,015)$ мВ. Тогда удельная проводимость σ германия может быть найдена по формуле

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al} = (1,982 \pm 0,019) \cdot 10^3 \frac{1}{\Omega \cdot \text{м}},$$

что в пределах погрешности совпадает с табличным значением $\sigma = 2,0 \cdot 10^3 \frac{1}{\Omega \cdot \text{м}}$.

Зная концентрацию и проводимость германия, можно вычислить подвижность носителей тока по формуле

$$b = \frac{\sigma}{en} = (3,86 \pm 0,05) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

Это с хорошей точностью совпадает со справочным значением $b = 3,9 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Вывод

В данной работе был исследован эффект Холла в германии и были измерены подвижность и концентрация носителей заряда в полупроводниках.

В первой части работы была проведена градуировка используемого в работе электромагнита с помощью милливексметра.

Во второй части работы были проведены измерения ЭДС Холла при различных величинах магнитного поля и тока через образец. В результате обработки данных получены линейные зависимости, совпадающие с теоретическими. По ним определена концентрация носителей заряда в германии.

Она равна $n = (2,35 \pm 0,03) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что в пределах погрешности совпадает со справочным значением $n = 2,33 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

В третьей части работы был определён характер проводимости. Знак носителей заряда в германии —.

В четвёртой части была найдена удельная проводимость германия. Она оказалась равна $\sigma = (1,982 \pm 0,019) \cdot 10^3 \frac{1}{\Omega \cdot \text{м}}$, что в пределах погрешности совпадает со справочным значением $\sigma = 2,0 \cdot 10^3 \frac{1}{\Omega \cdot \text{м}}$. Также была вычислена проводимость носителей тока как $b = (3,86 \pm 0,05) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$, что в пределах погрешности совпадает со справочным значением $b = 3,9 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Относительно небольшие погрешности полученных значений и совпадение их со справочными говорит о корректности проведения эксперимента, правильности метода и исправной работе оборудования.