

Отчет о выполнении лабораторной работы 3.3.4

Эффект Холла в полупроводниках

Выполнил: Голубович Тимур, группа Б01-108
08.10.2022

Цель работы

Измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках.

Оборудование и приборы

Электромагнит с регулируемым источником питания GPR ;
батарейка 1,5 В;
амперметр;
реостат;
цифровой вольтметр В7-78/1;
милливеберметр М119;
образцы легированного германия.

Теоретическое введение

В электрическом поле \vec{E} на заряды действует сила $q\vec{E}$. Во внешнем магнитном поле \vec{B} на движущиеся заряды также действует сила Лоренца:

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

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 току

Работа 3.3.4

электрического поля в образце, помещённом во внешнее магнитное поле, называют эффектом Холла.

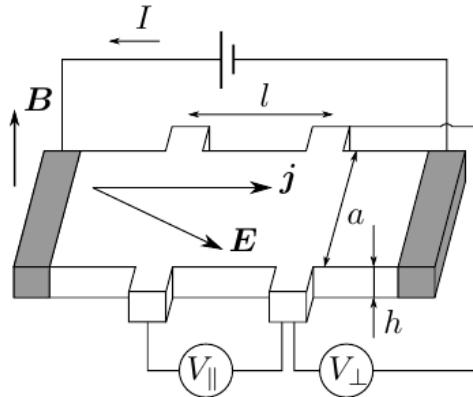


Рис. 1: Схема мостика Холла

В данной работе для проверки эффекта Холла будем использовать мостик Холла 1.

Для поперечного (холловского) напряжения получаем:

$$U_{\perp} = E_y a = \rho_{yx} \cdot j_x a = \frac{j_x B}{nq}.$$

Учитывая, что $j_x = \frac{I}{ah}$, получаем:

$$U_{\perp} = \frac{B}{nqh} \cdot I = R_H \cdot \frac{B}{h} \cdot I, \quad (1)$$

где $R_H = \frac{1}{nq}$ — постоянная Холла.

Для продольной составляющей напряжения:

$$U_{\parallel} = E_x l = j_x / \sigma_0 l = I R_0,$$

где $R_0 = \frac{l}{\sigma_0 ah}$.

$$\sigma_0 = \frac{I \cdot l}{U_{35} \cdot h \cdot a}. \quad (2)$$

Экспериментальная установка

Установка, используемая в работе, представлена на рис. 2.

Работа 3.3.4

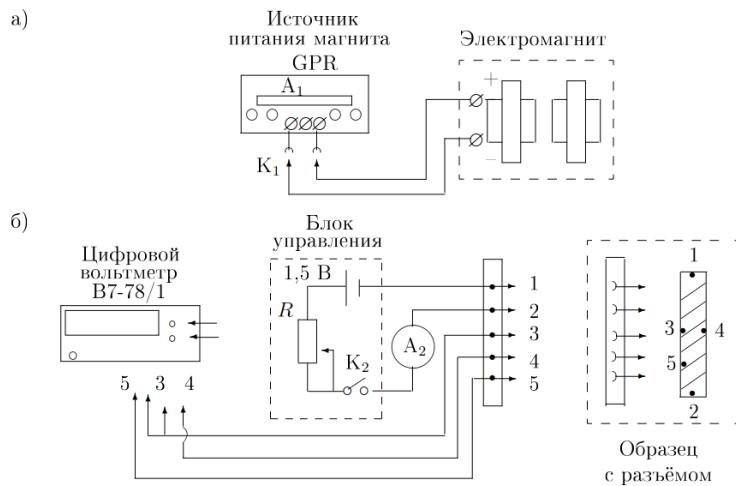


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

В зазоре электромагнита 2 создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регулятора источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром A_1 .

Градуировка электромагнита проводится при помощи милливеберметра и миллитесламетра.

Прямоугольный образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе 2, подключается к источнику питания ($\approx 1,5$ В). При замыкании ключа K_2 вдоль длинной стороны образца (контакты 3, 5) течёт ток, величина которого регулируется реостатом R_2 и измеряется миллиамперметром A_2 .

В образце с током, помещенном 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 могут не лежать на эквипотенциали, для устранения этого эффекта будем измерять начальное значение напряжения U_0 (при выключенном магните) в каждой серии измерений.

Ход работы

Градуировка электромагнита

Занесём все параметры установки в таблицу 1.

$S \cdot N, \text{см}^2 \cdot \text{вит}$	$r_{\text{внеш}}, \text{Ом}$	$a, \text{мм}$	$L_{3,5}, \text{мм}$	$l, \text{мм}$
72	$<= 5$	1,5	3,0	1,7

Таблица 1: Результаты измерений индукции магнита

Проведем градуировку электромагнита. Для этого измерим зависимость $B(I)$, где B – модуль вектора индукции магнитного поля в зазоре, I_M – ток, протекающий через обмотки магнита. Измерения проведем милливеберметром. Погрешности данных приборов:

$$\varsigma_{B6} = 0.15$$

Точность измерения I_M определяется точностью амперметра, встроенного в лабораторный блок питания GPR:

$$\varsigma_{A_1} = 0.005 \text{ А}$$

$I_M, \text{А}$	$\Phi_n, \text{мВб}$	$\Phi_k, \text{мВб}$	$\Phi, \text{мВб}$	$B, \text{Тл}$
0,00	0,2	0,4	0,2	0,028
0,25	0,1	1,7	1,6	0,222
0,50	0,1	3,1	3,0	0,417
0,75	0,2	4,5	4,3	0,597
1,00	0,1	5,6	5,5	0,764
1,25	0,1	6,7	6,6	0,917
1,50	0,2	7,5	7,3	1,014
1,75	0,1	7,9	7,8	1,083
2,00	0,1	8,3	8,2	1,139

Таблица 2: Результаты измерений индукции магнита

Построим графики $B(I)$ по результатам измерения магнитного поля милливеберметром.

Работа 3.3.4

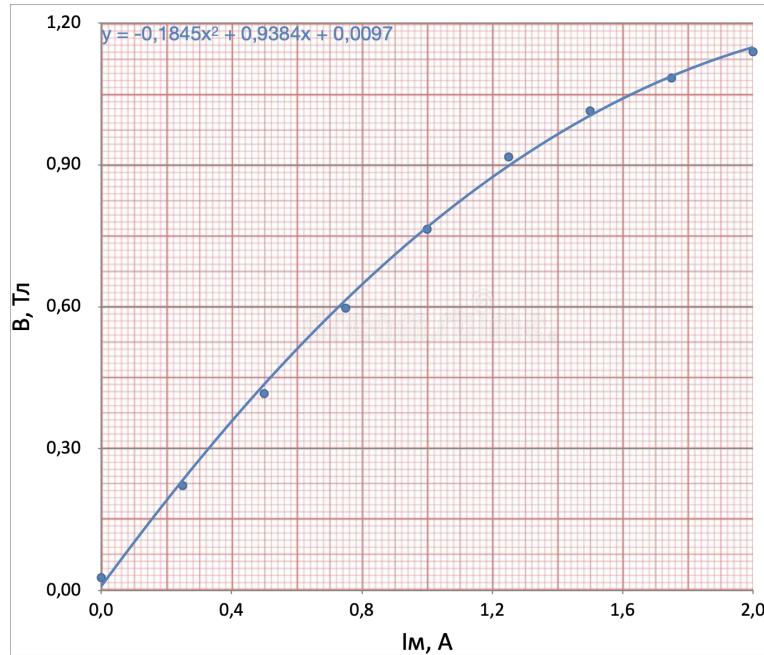


Рис. 3: $B(I_M)$

Как видно из графика, зависимость индукции от тока в обмотке нелинейная. Поэтому для дальнейших расчётов интерполируем ее полиномом второй степени.

ЭДС Холла

Проведем измерения $U_{34}(I_M)$ для различных I . Рассчитаем значения B и занесем в таблицу. Измерения I делаются миллиамперметром с $\varsigma_{A_2} = 5$ мА. Измерения U проводятся вольтметром V_1 , модель В7-78/1: $\varsigma_{V_1} = 3.5$ мкВ. В измерениях учитывается U_0 – сдвиг напряжения при нулевом магнитном поле, возникающий из-за неточности подпайки.

Работа 3.3.4

U , мВ	I_M , А	B , Тл	$I \cdot B$, мА·Тл	U , мВ	I_M , А	B , Тл	$I \cdot B$, мА·Тл
$I = 0,3$ мА				$I = 0,4$ мА			
-0,017	0,00	0,01	0,003	-0,023	0,00	0,01	0,004
0,004	0,25	0,23	0,070	0,005	0,25	0,23	0,093
0,026	0,50	0,43	0,130	0,036	0,50	0,43	0,173
0,049	0,75	0,61	0,183	0,060	0,75	0,61	0,244
0,067	1,00	0,76	0,229	0,091	1,00	0,76	0,305
0,083	1,25	0,89	0,268	0,114	1,25	0,89	0,358
0,095	1,50	1,00	0,301	0,130	1,50	1,00	0,401
0,104	1,75	1,09	0,326	0,140	1,75	1,09	0,435
0,110	2,00	1,15	0,345	0,148	2,00	1,15	0,459
0,112	2,08	1,16	0,349	0,150	2,06	1,16	0,464
$I = 0,5$ мА				$I = 0,6$ мА			
-0,028	0,00	0,01	0,005	-0,035	0,00	0,01	0,006
0,006	0,25	0,23	0,116	0,010	0,25	0,23	0,140
0,045	0,50	0,43	0,216	0,055	0,50	0,43	0,260
0,080	0,75	0,61	0,305	0,097	0,75	0,61	0,366
0,113	1,00	0,76	0,382	0,136	1,00	0,76	0,458
0,140	1,25	0,89	0,447	0,170	1,25	0,89	0,537
0,160	1,50	1,00	0,501	0,194	1,50	1,00	0,601
0,173	1,75	1,09	0,543	0,210	1,75	1,09	0,652
0,184	2,00	1,15	0,574	0,223	2,00	1,15	0,689
0,186	2,06	1,16	0,580	0,225	2,05	1,16	0,695
$I = 0,7$ мА				$I = 0,8$ мА			
-0,040	0,00	0,01	0,007	0,047	0,00	0,01	0,008
0,010	0,25	0,23	0,163	0,010	0,25	0,23	0,186
0,063	0,50	0,43	0,303	0,072	0,50	0,43	0,346
0,115	0,75	0,61	0,427	0,133	0,75	0,61	0,488
0,159	1,00	0,76	0,535	0,183	1,00	0,76	0,611
0,197	1,25	0,89	0,626	0,228	1,25	0,89	0,716
0,226	1,50	1,00	0,702	0,258	1,50	1,00	0,802
0,246	1,75	1,09	0,761	0,281	1,75	1,09	0,869
0,260	2,00	1,15	0,804	0,297	2,00	1,15	0,919
0,262	2,04	1,16	0,809	0,298	2,02	1,15	0,922
$I = 0,9$ мА				$I = 1,0$ мА			
-0,053	0,00	0,01	0,009	-0,059	0,00	0,01	0,010
0,012	0,25	0,23	0,209	0,016	0,25	0,23	0,233
0,080	0,50	0,43	0,389	0,091	0,50	0,43	0,433
0,147	0,75	0,61	0,549	0,164	0,75	0,61	0,610
0,205	1,00	0,76	0,687	0,230	1,00	0,76	0,764
0,255	1,25	0,89	0,805	0,283	1,25	0,89	0,894
0,291	1,50	1,00	0,902	0,324	1,50	1,00	1,002
0,316	1,75	1,09	0,978	0,352	1,75	1,09	1,087
0,334	2,00	1,15	1,034	0,374	2,00	1,15	1,149
0,335	2,01	1,15	1,035				

Таблица 3: Результаты измерений $U_{34}(I_M)$ и обработки B и $B \cdot I$

Работа 3.3.4

По методу наименьших квадратов рассчитаем параметры графиков, считая зависимость линейной. В результате получим значение углового коэффициента $K = \frac{\Delta \mathcal{E}_H}{\Delta B}$ для каждого графика. Построим график $K(I)$ и рассчитаем его параметры.

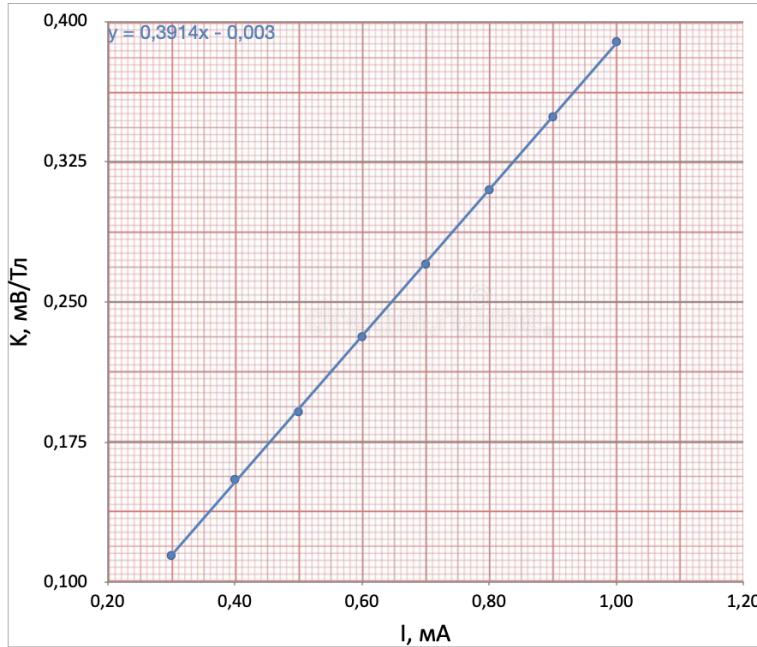


Рис. 4: График зависимости углового коэффициента от тока через образец

$I, \text{ мА}$	$K, \frac{\text{мВ}}{\text{Тл}}$
0,3	0,114
0,4	0,155
0,5	0,191
0,6	0,231
0,7	0,270
0,8	0,310
0,9	0,349
1,0	0,389

Таблица 4: Зависимость углового коэффициента от тока через образец

Выясним знак носителей заряда в легированном германии. Мы знаем, что электрическое поле направлено от 4 к 3,5 из знака напряжения

Работа 3.3.4

	$a, \frac{\text{Ом}}{\text{Тл}}$	$\varepsilon_a, \%$	$b, \frac{\text{мВ}}{\text{Тл}}$	$\varepsilon_b, \%$
$K = a \cdot I + b$	0,391	0,8	-0,003	70

Таблица 5: Параметры графика $K(I)$

на вольтметре $V1$. Воспользовавшись правилом буравчика и правилом левой руки получим, что сила Лоренца направлена от 4 к 3, 5 для обоих знаков зарядов. Следовательно, носитель заряда в легированном германии имеет положительный заряд (дырочная проводимость).

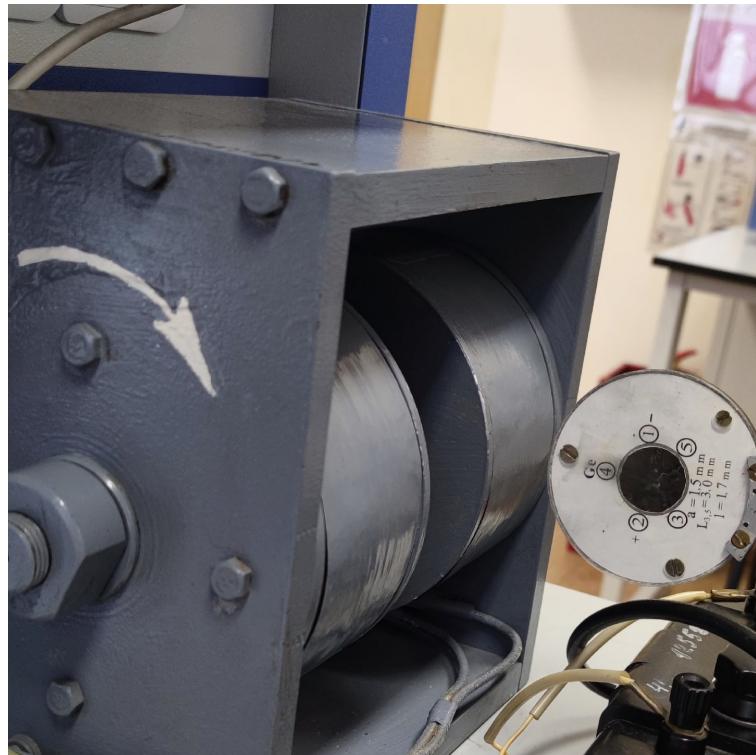


Рис. 5: Пробная катушка и ее положение относительно магнита

Определим коэффициент Холла R_H по формуле (1):

$$R_H = h \frac{U_\perp}{BI} = h \cdot a_K = 1.5 \text{ мм} \cdot 0,391 \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}} = (5.87 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию n :

$$n = \frac{1}{R_H e} = (1.06 \pm 0.4) \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{м}^3}$$

Работа 3.3.4

Альтернативный метод обработки

Также для определения искомого параметра можно воспользоваться тем, что:

$$\mathcal{E}_H = \frac{R_H}{h} \cdot BI$$

Построим график $\mathcal{E}_H(BI)$ и определим его параметры.

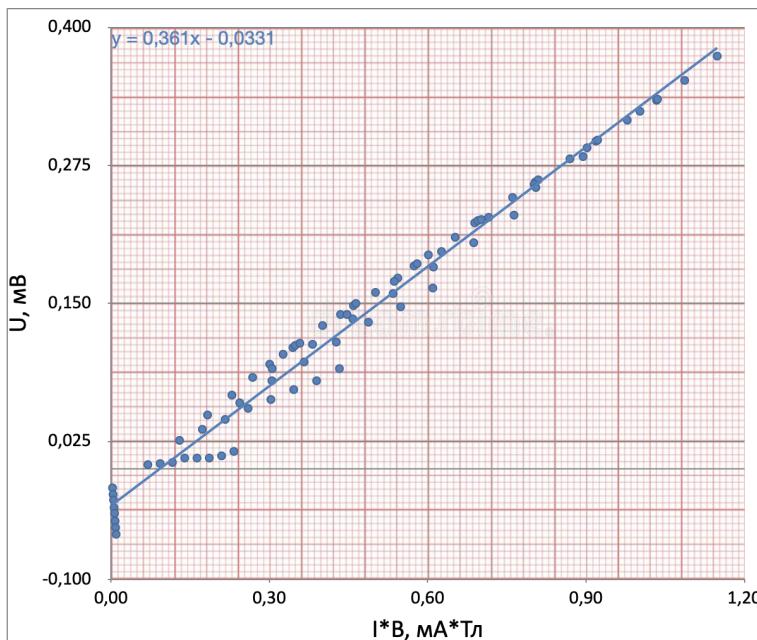


Рис. 6: Зависимость холловского напряжения от произведения индукции поля и тока в образце

	$a, \frac{\text{Ом}}{\text{Тл}}$	$\varepsilon_a, \%$	$b, \frac{\text{мВ}}{\text{Тл}}$	$\varepsilon_b, \%$
$U = a \cdot IB + b$	0,382	0,8	-0,021	3

Таблица 6: Параметры графика $\mathcal{E}_H(IB)$

Определим коэффициент Холла R_H по формуле (1):

$$R_H = h \frac{U_\perp}{BI} = h \cdot a_{IB} = 1.5 \text{ мм} \cdot 0.382 \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}} = (5.73 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию n :

$$n = \frac{1}{R_H e} = (1.09 \pm 0.5) \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{м}^3}$$

Работа 3.3.4

Удельная проводимость

Измерим $U_{35}(I)$ в образце. Построим график $U_{35}(I)$ и рассчитаем его параметры.

$I, \text{ mA}$	$U_{35}, \text{ мВ}$
0,3	0,114
0,4	0,155
0,5	0,191
0,6	0,231
0,7	0,270
0,8	0,310
0,9	0,349
1,0	0,389

Таблица 7: Результаты измерений $I(U_{35})$

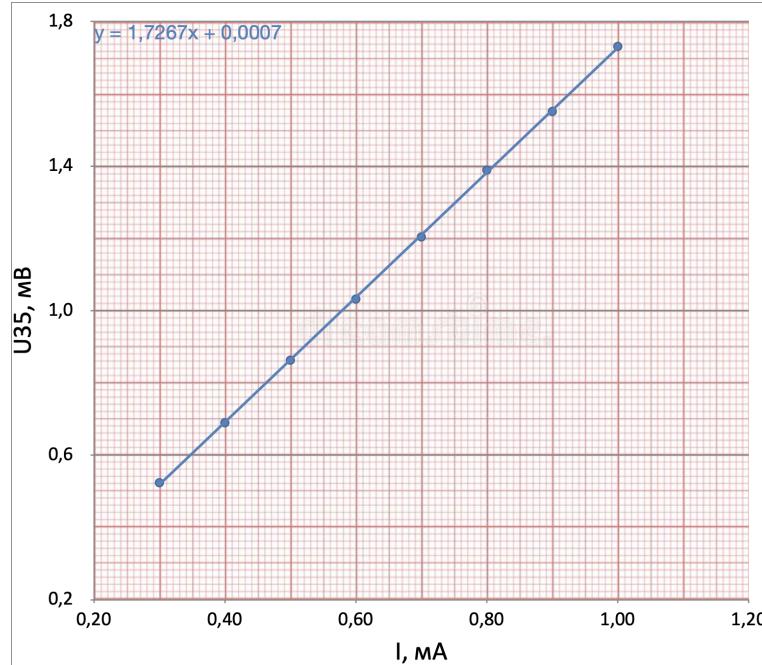


Рис. 7: Зависимость напряжения U_{35} от основного тока в образце

Рассчитаем удельную проводимость σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{I \cdot l}{U_{35} \cdot h \cdot a} = \frac{3.0 \text{ мм}}{1.73 \text{ Ом} \cdot 1.5 \text{ мм} \cdot 1.7 \text{ мм}} = (681 \pm 51) \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Работа 3.3.4

	a , Ом	ε_a , %	b , мВ	ε_b , %
$U = a \cdot I + b$	1,727	0,9	0,001	1600

Таблица 8: Параметры графика $U_{35}(I)$

Рассчитаем подвижность зарядов b :

$$b = \frac{\sigma_0}{en} = (4015 \pm 420) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Вывод

Данная работа подтверждает существование эффекта Холла в полупроводниках.

Получено значение коэффициента Холла $R_H = (5.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$. Также в работе оценено значение концентрации носителей тока в образце $n = (1.06 \pm 0.4) \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{м}^3}$, удельная проводимость $\sigma_0 = (681 \pm 51) \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$, подвижность носителей $b = \frac{\sigma_0}{en} = (4015 \pm 420) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Справочные данные для данного образца германия отсутствуют, большинство параметров зависят от степени легирования. Значения подвижности носителей зависит от легирующего элемента и лежат в пределах $(2000 \div 3000) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Список литературы

- [1] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева, М. Г. Никулина
- [2] *Эффект Холла в германии, легированном различными примесями* Г. П. Гайдар, Е. Ю. Гайворонская, 2017