

©1995 г.

ХОЛЛ-ФАКТОР ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛАХ $Ge_{1-x}Si_x$ ПРИ РАССЕЯНИИ НА ФОНОНАХ И СПЛАВНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ

Р.З.Кязимзадзе

Азербайджанская государственная нефтяная академия,
370601, Баку, Азербайджан
(Получена 13 декабря 1994 г. Принята к печати 14 декабря 1994 г.)

Определены экспериментальные значения холл-фактора электронов в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ с содержанием кремния до 30 ат% при доминировании рассеяния на акустических колебаниях решетки и сплавном потенциале. Холл-фактор определялся по отношению коэффициентов Холла в слабом и сильном магнитных полях. Экспериментально определенные значения холл-фактора составляют приблизительно 0.95 в германиеподобных кристаллах, 1.00 — в кремниеподобных, 1.05 — в гибридных составах, содержащих примерно 15 ат% Si, и удовлетворительно согласуются с расчетными значениями.

Холл-фактор r электронов и дырок, определяемый как отношение холловской подвижности к дрейфовой, является одним из фундаментальных параметров полупроводников. Далее представлены результаты экспериментального исследования r в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ с содержанием кремния до 30 ат% в той области температуры T и концентрации электронов n , где преобладает рассеяние на колебаниях решетки и сплавном рассеянии.

Известно, что в сильных магнитных полях $r = 1$ при любом механизме рассеяния. В области слабых полей для Ge и Si n -типа справедливо соотношение (в предположении изотропного времени релаксации)

$$r = \frac{\mu_H}{\mu_c} = \frac{3A_r K(K+2)}{(2K+1)^2}, \quad A_r = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2}, \quad (1)$$

где μ_H и μ_c — холловская и дрейфовая подвижности электронов соответственно; K — коэффициент анизотропии эффективной массы электронов проводимости; τ — время релаксации упругого рассеяния, $\langle X \rangle$ — среднее от величины X по распределению Ферми; A_r — холл-фактор для полупроводника со стандартной зоной, значение которого для невырожденного электронного газа при рассеянии на акустических фононах составляет $3\pi/8$. Для Ge и Si величина K равна 19.3 и 5.1 соответственно [1]. В результате при рассеянии электронов

только на колебаниях решетки величина r для Ge и Si равна 0.93 и 1.03 соответственно.

В системе $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ при концентрациях кремния до 15 ат% дно зоны проводимости формируется долинами в направлениях (111), как и в Ge (германиеподобные составы). При более высоких концентрациях Si дно зоны кристаллов определяется минимумами (100), как и в Si (кремниеподобные). При составах с содержанием Si около 15 ат% дно зоны формируется долинами обоих типов и их число равно десяти («гибридные» составы) [2].

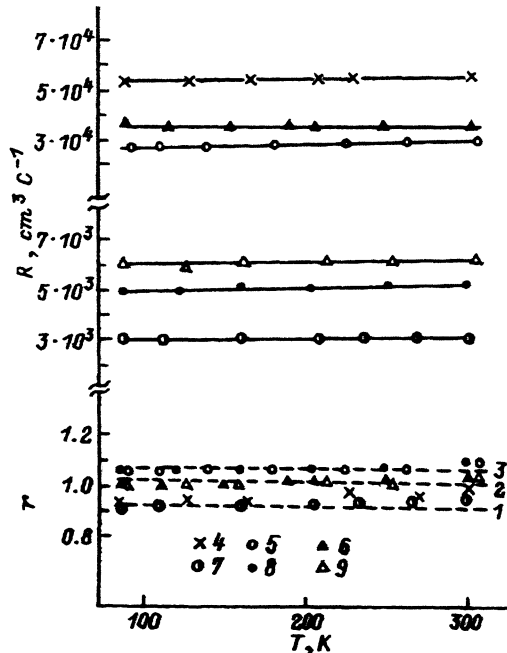
В работе [3] показано, что в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ значение K слабо зависит от состава в области гибридных кристаллов в рассматриваемом диапазоне температур и концентраций. Величина r практически не чувствительная к малым изменениям K , поэтому теоретические значения r раздельно для электронов долин (111) и (100) во всех составах будут фактически постоянными и равны соответствующим значениям в Ge и Si.

В исследованных кристаллах концентрация ионизированных примесных центров составляла $N_d - N_a \simeq 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Ввиду относительно низкой концентрации примеси при $T > 80 \text{ К}$ доминирующими механизмами рассеяния электронов являются рассеяния на колебаниях решетки и на сплавном потенциале [3]. Поэтому мы будем проводить анализ значений r с учетом только этих механизмов рассеяния. Так как зависимости времени релаксации электрона τ от энергии E при рассеянии на колебаниях решетки и на сплавном потенциале подобны ($\tau \sim E^{-1/2}$ [1]), при одновременном действии обоих механизмов и сделанных предположениях теоретическое значение r остается в германиеподобных составах таким же, как в Ge, т.е. 0.93, а в кремниеподобных — таким же, как в Si, т.е. 1.03.

Для гибридных составов кристаллов с содержанием кремния около 15 ат%, где действующими являются оба типа долин, $r = R/R_\infty$, где $R_\infty = 1/e(n_1 + n_2)$ — коэффициент Холла в сильном магнитном поле, n_1 и n_2 — концентрация электронов в долинах (111) и (100). Соотношение для коэффициента Холла R в слабом магнитном поле, полученное сложением поперечных холловских составляющих тока при действии двух сортов электронов, имеет вид [4]

$$R = \frac{1}{en_1} \frac{\langle \tau_i^2 \rangle}{\langle \tau_i \rangle^2} \frac{3K_1(K_1 + 2)}{(2K_1 + 1)^2} \frac{\left[1 + \left(\frac{m_{+1}}{m_{+2}} \right)^2 \frac{K_1}{K_2} \frac{(K_2 + 2)}{(K_1 + 2)} \frac{n_2}{n_1} \frac{\langle \tau_2^2 \rangle}{\langle \tau_1^2 \rangle} \right]}{\left[1 + \frac{m_{+1}}{m_{+2}} \frac{K_1}{K_2} \frac{(2K_2 + 1)}{(2K_1 + 2)} \frac{n_2}{n_1} \frac{\langle \tau_2 \rangle}{\langle \tau_1 \rangle} \right]^2}. \quad (2)$$

Индексы 1 и 2 относятся к электронам долин (111) и (100), m_{ti} — поперечная масса в эллипсоиде типа i . Подставляя в (2) значения K_i , m_{ti} и $\langle \tau_i \rangle \sim m_{ti} m_{ei}^{1/2}$ (m_{ei} — продольная масса в эллипсоиде типа i), получим, что при рассеянии электронов на колебаниях решетки в гибридных составах $r \simeq 1.08$. Это же значение r будет и при одновременном действии двух механизмов рассеяния на колебаниях решетки и на сплавном потенциале. На рисунке пунктирные линии 1-3 отвечают теоретическим значениям r для германиеподобных, кремниеподобных и гибридных составов соответственно.



Температурные зависимости коэффициента Холла R при $B = 1000$ Э и холл-фактора r электронов в кристаллах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с концентрацией Sb порядка $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Пунктирные линии — расчет для: 1 — германиеподобных составов, 2 — кремниеподобных составов, 3 — гибридных составов. Содержание кремния в ат%: 4 — 7.4, 5 — 15.1, 6 — 29.8, 7 — 8.2, 8 — 14.9, 9 — 30.1.

Эксперименты по исследованию холл-фактора электронов проводились на кристаллах, легированных легко ионизируемой донорной примесью (Sb) с концентрацией $N_d - N_a \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Относительно небольшие концентрации примесных центров позволяют пренебречь вкладом в рассеяние электронов на ионизованных центрах при температурах $T \gtrsim 100$ К, когда доминирующими механизмами рассеяния являются фоновый и сплавной [3]. На рисунке представлены характерные температурные зависимости коэффициента Холла кристаллов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с концентрацией примеси сурьмы порядка 10^{14} и 10^{15} см^{-3} в интервале $100 \div 300$ К. Коэффициент Холла для этих образцов измерялся в магнитном поле $B \approx 1000$ Э. Ввиду малой энергии активации примеси сурьмы (порядка 0.01 эВ) в кристаллах в рассматриваемой области T все атомы Sb полностью ионизованы и концентрация свободных электронов остается постоянной. Небольшие изменения R , наблюдающиеся на кривых, очевидно связаны с изменением холл-фактора электронов.

Экспериментальные значения холл-фактора при различных T определялись как $r = R/R_\infty$. За величину R_∞ принимались значения R при $B = 4 \cdot 10^4$ Э и $T = 130$ К. В нижней части рисунка представлены определенные таким образом значения r . Как видно из рисунка экспериментально полученные значения удовлетворительно согласуются с теоретическими для всех составов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$. Однако в отличие от теории экспериментальные значения r претерпевают определенное изменение с температурой. Такое изменение r может быть связано с влиянием дополнительных механизмов рассеяния, таких, как оптические фононы, междолинное рассеяние, рассеяние на ионах примесей, а также не достаточно строгое выполнение условия слабого магнитного поля. Не вдаваясь в подробный анализ всех этих явлений, ввиду их

достаточной малости, отметим лишь то, что наибольшее отклонение r во всех кристаллах составляет не более $\pm 5\%$ от его среднего значения. При этом для кристаллов с $n \simeq (10^{14} \div 10^{15}) \text{ см}^{-3}$ за среднее значение можно принять величины: для германиеподобных кристаллов $r \simeq 0.95$, для кремниеподобных $r \simeq 1.00$ и для гибридных $r \simeq 1.05$. В работе [4] проведены исследования r для кристаллов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с содержанием кремния до 15 ат%. Согласие между данными [4] и настоящей работы удовлетворительное.

Таким образом, при доминировании рассеяния электронов на акустических колебаниях решетки и сплавноm потенциале экспериментальные значения r удовлетворительно описываются теорией как для германиеподобных и кремниеподобных, так и для гибридных составов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$.

Список литературы

- [1] Р. Смит. *Полупроводники* (М., 1982).
- [2] F. Herman, M. Glicksman, R.P. Parmanter. *Program. Semicond.*, 2, 3 (1957).
- [3] В.И. Тагиров. *Полупроводниковые твердые растворы германий-кремний* (Баку, Элм, 1983).
- [4] Н.А. Агаев, В.В. Мир-Багиров, Г.Х. Аждаров. *Материалы VII координационного совещания по исследованию и применению твердых растворов германий-кремний* (Баку, 1988).

Редактор Т.А. Полянская

Hall factor of electrons in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ crystals when phonon scattering and scattering due to alloy disorder are dominant

R.Z. Khasimzade

State Oil Academy, 370000 Baku, Azerbaijan