

- [13] Чернавская О. Д., Чернавский Д. С., Сурис Р. А. О спонтанном образовании простраивенной периодической структуры в полупроводниковых кристаллах. — В кн.: Дефекты структуры, методы их исследований и влияния на свойства кристаллов и пленок. М., 1982, с. 3—16.
- [14] Dohler G. H., Kunzel H., Ploog K. — Phys. Rev., 1982, v. 25, N 4, p. 2616—2626.
- [15] Бирюлин Ю. Ф., Прудникова И. А., Семиколенова Н. А., Шляхов А. Т. Фотолюминесценция в легированном арсениде галлия при фазовом переходе типа беспорядок—порядок. — В кн.: Тр. Всес. совещ. «Химическая связь, электронная структура и физико-химические свойства полупроводников и полуметаллов». Калинин, 1985, с. 143.

Омский государственный
университет

Получено 10.12.1986
Принято к печати 16.04.1987

ФТП, том 22, вып. 1, 1988

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛЛ-ФАКТОРА В СЛОЖНОЙ ВАЛЕНТНОЙ ЗОНЕ p -Ge

Алексеев М. В., Андреев А. Г., Забродский А. Г., Попов В. В.

1. Особенности гальваномагнитных свойств p -Ge определяются, как известно, его сложной зонной структурой: наличием зон легких и тяжелых дырок и несферичностью последней [1, 2]. Сложность задачи теоретического исследования эффекта Холла в такой системе привела к тому, что пути ее решения были намечены лишь в пределе слабого легирования. Было доказано, что наличие высокоподвижных дырок существенно увеличивает измеряемый коэффициент Холла R [1]. Однако уже в достаточно слабых магнитных полях ($H \leq 1$ кЭ) исключение влияния легких дырок приводит к быстрому уменьшению R (рис. 1). Поскольку изменение суммарной концентрации дырок в магнитном поле мало, указанное поведение $R(H)$ отражает магнитополевою зависимость эффективного холл-фактора $r_p(H)$, определяющего связь между измеренным коэффициентом Холла и суммарной концентрацией дырок p : $R(H) = r_p(H)/ep$.

Эксперименты, выполненные в пределе слабого легирования, подтвердили эффект уменьшения $r_p(H)$ по мере исключения вклада легких дырок и показали, что в достаточно сильных полях картина усложняется появлением максимума так называемой «тонкой структуры», что показано на рис. 1. Сложнее обстоит дело с самой величиной r_p . На опыте, как правило, измерялось значение r_p по отношению к его минимальной величине в полях ~ 10 кЭ в предположении, что это минимальное значение соответствует пределу сильного легирования и равно единице [3]. Однако, как видно из рис. 1, это на самом деле не так, в частности, из-за наличия тонкой структуры. Другой подход к экспериментальному определению величины r_p основан на различных способах определения отношения холловской подвижности к дрейфовой [4, 5], погрешность которых трудно оценить. Таким образом, несмотря на давность, проблема определения величины холл-фактора в p -Ge и влияния на нее легких дырок до сих пор не была решена даже в пределе фононного рассеяния (слабого легирования), не говоря уже о других механизмах релаксации.

2. Наш подход к решению задачи нахождения холл-фактора в p -Ge основывается на предлагаемом методе. Идея его заключается в том, чтобы производить одинаковые изменения концентрации свободных носителей в материале n - и p -типа при близких исходных уровнях легирования и невысоких компенсациях. При этом

$$\Delta n = \Delta p. \quad (1)$$

Это позволяет измерять отношение r_p/r_n и далее, используя известные для n -Ge значения r_n , определить r_p . Условие (1) реализовалось путем нейтронного леги-

рования пар образцов, в одном из которых регистрировалось изменение концентрации электронов, а в другом — дырок. В процессе нейтронного легирования Ge с природным изотопным составом хорошо замедленными нейтронами, как известно, получается материал со степенью компенсации $K=0.3$ [6, 7]. Исходно чистый Ge, на котором мы измеряли Δp , облучался совместно с n -Ge либо с германием, обогащенным изотопом ^{74}Ge , где регистрировалось изменение концентрации электронов Δn . Рассмотрим эти случаи количественно.

3. Воспользуемся известными соотношениями концентраций трансмутационных примесей [8]. Получим для совместного облучения чистого и моноизотопного Ge

$$\frac{r_p}{r_n} = \frac{R_{0p}}{R_{0n}} \frac{\alpha_{70}\text{Ge}}{\alpha_{74}\text{Ge}} \frac{\sigma_{70}\text{Ge}}{\sigma_{74}\text{Ge}} \frac{(1-K)}{(1-K')} \quad (2)$$

Здесь R_{0p} и R_{0n} — коэффициенты Холла в материалах p - и n -типа, полученных при нейтронном легировании исходно чистого Ge; $\alpha_{70}\text{Ge}=0.205$ — содержание изото-

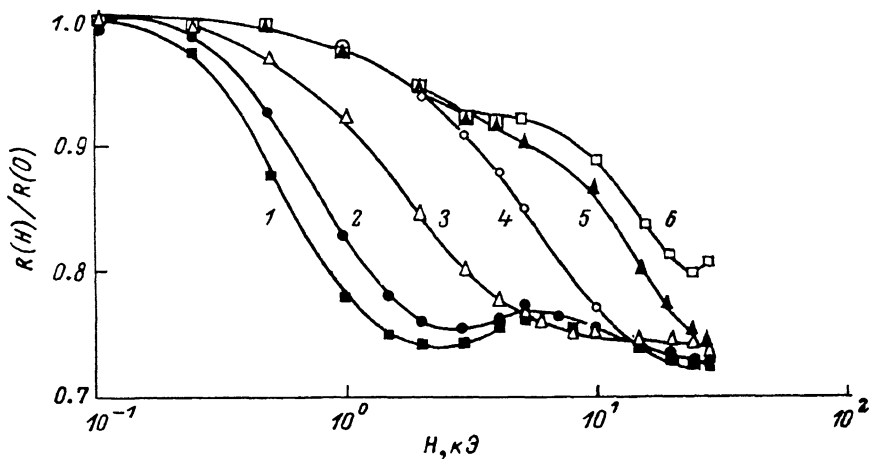


Рис. 1. Полевая зависимость коэффициента Холла в p -Ge при 77 К.

Холловская концентрация дырок $(R_0)^{-1}$, см^{-3} : 1 — $2.27 \cdot 10^{13}$, 2 — $2.08 \cdot 10^{14}$, 3 — $1.44 \cdot 10^{15}$, 4 — $1.1 \cdot 10^{16}$, 5 — $5.62 \cdot 10^{16}$, 6 — $6.26 \cdot 10^{17}$.

па ^{70}Ge в природной смеси, $\alpha_{74}\text{Ge} = 0.988$ — содержание изотопа ^{74}Ge в обогащенной смеси [9]; $\sigma_{70}\text{Ge}$ и $\sigma_{74}\text{Ge}$ — сечение захвата изотопами ^{70}Ge и ^{74}Ge : $\sigma_{70}\text{Ge}/\sigma_{74}\text{Ge} = 6.67$ [9]; $K=0.3$ — коэффициент компенсации, полученный в нейтронно легированном (НЛ) исходно чистом материале, $K'=0.02$ — коэффициент компенсации в моноизотопном материале.

Аналогично при облучении чистого Ge и Ge n -типа при относительно малых и больших флюенсах тепловых нейтронов, когда из n -Ge образуется материал n - или p -типа, соответственно получаем

$$\frac{r_p}{r_n} = \frac{R_{0p} (R_{nn} - R_n)}{R_{nn} R_n} \quad (3)$$

$$\frac{r_p}{r_n} = \frac{R_{0p} R_{np}}{R_n (R_{0p} - R_{np})} \quad (4)$$

где R_n — коэффициент Холла в исходном n -Ge; R_{nn} и R_{np} — коэффициенты Холла в n - и p -Ge, полученном нейтронным легированием n -Ge.

Использовано также то обстоятельство, что концентрации как в НЛ исходно чистом, так и в перекомпенсированном в ходе нейтронного легирования p -Ge не сильно различаются и соответствующие им холл-факторы близки. В качестве величины r_n брались ее значения в пределе слабого поля, рассчитанные в рамках теории анизотропного рассеяния [10].

4. Исследовались образцы специально не ориентированные, вырезанные в плоскости, перпендикулярной оси [111], в пределе $H \rightarrow 0$ (образцы n - и p -

типа) и полях 5.2 и 28.6 кЭ (образцы p -типа) при 300 и 77 К. Полученные экспериментальные результаты для концентрационной зависимости r_p приведены на рис. 2.

В пределе $H \rightarrow 0$ при азотной температуре (рис. 2, б) в области высоких уровней легирования, соответствующих вырождению, величина $r_p \approx 1$. С уменьшением уровня легирования по мере снятия вырождения и перехода к рассеянию на ионизованных примесях величина r_p быстро возрастает, достигая значения 2.5. Дальнейшее уменьшение концентрации примесей приводит к усилению рассеяния на фонах, что сопровождается падением r_p до значения ~ 1.3 . Затем величина r_p снова несколько увеличивается и в пределе слабого легирования составляет ~ 1.7 . Это значение соответствует теоретическим оценкам [11]. Для комнатной температуры (рис. 2, а) максимум концентрационной зависимости

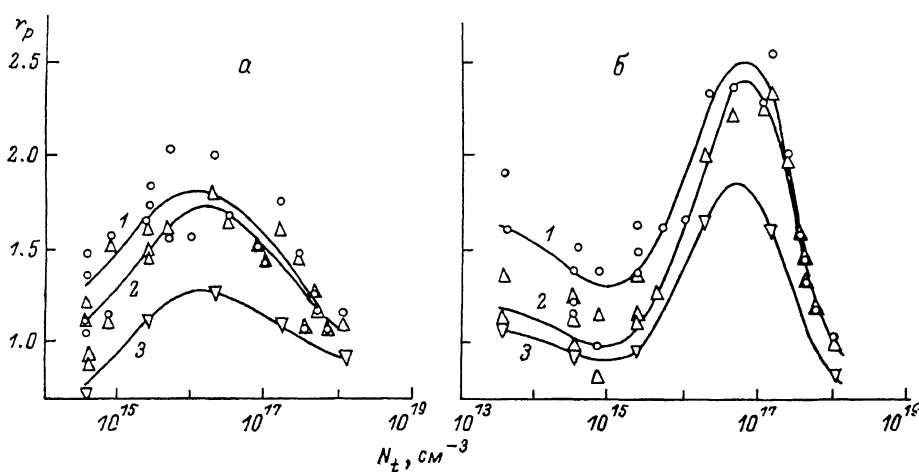


Рис. 2. Концентрационная зависимость холл-фактора в p -Ge при 300 (а) и 77 К (б).
 H , кЭ: 1 — 0, 2 — 5.2, 3 — 28.6.

сти r_p слабее и выражен не столь резко, как при азотной. Однако объяснить положение этого максимума по аналогии с азотным невозможно, так как при этом следовало бы ожидать его смещения в сторону более высоких уровней легирования.

Аномально большое значение холл-фактора в пределе $H \rightarrow 0$ обусловлено вкладом высокоподвижных легких дырок. Выделить этот вклад позволяют измерения в магнитном поле (кривые 2, 3). Сравнение кривых 2, 3 и 1 показывает, что магнитное поле снижает величину r_p в соответствии с исключением вклада легких дырок. Величина этого эффекта «исключения» уменьшается по мере снижения подвижности легких дырок. В сильном поле (кривая 3) уже практически вся концентрационная зависимость определяется механизмом релаксации лишь тяжелых дырок.

5. Полученные результаты позволяют значительно увеличить точность определения концентрации дырок в p -Ge. Это существенно, например, при исследовании перехода металл—диэлектрик и прыжковой проводимости. Так, использование полученных данных (рис. 2) вместе со значением $K=0.3$ для НЛ p -Ge позволяет преодолеть расхождение между теорией и экспериментом в концентрационной зависимости ϵ_3 — прыжковой проводимости [12] (экспериментальное значение коэффициента α в формуле (22.10) из [12] становится равным 1.71 ± 0.03 , что в пределах погрешности совпадает с теоретической оценкой 1.73 ± 0.03).

Авторы благодарят А. Р. Шабаева за обсуждение результатов.

- [1] Harman T. C., Willardson R. K., Beer A. C. — Phys. Rev., 1954, v. 94, N 4, p. 1065—1067.
- [2] Бир Г. Л., Нормантас Э., Пикус Г. Е. Гальваномагнитные эффекты в полупроводниках с вырожденными зонами. — ФТТ, 1962, т. 4, в. 5, с. 1180—1195.
- [3] Fritzsche H., Cuevas M. — Phys. Rev., 1960, v. 119, N 4, p. 1238—1245.
- [4] Willardson R. K., Harman T. C., Beer A. C. — Phys. Rev., 1956, v. 96, N 6, p. 1512—1518.
- [5] Beer A. C. — J. Phys. Chem. Sol., 1959, v. 8, N 3, p. 507—511.
- [6] Забродский А. Г. Экспериментальное определение степени компенсации нейтроном легированного германия. — Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, в. 5, с. 258—262.
- [7] Оспьян Ю. А., Прокопенко В. М., Тальянский В. И. Кинетика трансмутационного легирования как метод спектроскопии глубоких центров. — ЖЭТФ, 1984, т. 87, в. 1 (7), с. 269—278.
- [8] Ларк-Горовиц К. Бомбардировка полупроводников нуклонами. — В кн.: Полупроводниковые материалы. М., 1954, с. 62—92.
- [9] Mughabhab S. F., Divadeeman M., Holden N. E. Neutron cross sections, BNL-325. N. Y., Upton, 1981. 4-th ed. 418 p.
- [10] Бабич В. М., Баранский П. Н., Даховский И. В., Самойлович А. Г. Концентрационная зависимость коэффициента Холла в *n*-Ge в слабых магнитных полях. — УФЖ, 1969, т. 14, в. 3, с. 418—422.
- [11] Beer A. C., Willardson R. K. — Phys. Rev., 1958, v. 110, N 6, p. 1286—1294.
- [12] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 7.04.1987
Принято к печати 17.04.1987

ФТТ, том 22, вып. 1, 1988

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА НАКОПЛЕНИЕ А-, Е-ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ

Бобрикова О. В., Стась В. Ф.

Эксплуатация полупроводниковой аппаратуры при воздействии дефектообразующих излучений, а также трудности, связанные с объяснением ионизационного отжига, поставили вопрос о влиянии электрического поля на процессы радиационного дефектообразования (ПРДО) и роли кулоновского взаимодействия между компонентами пар Френкеля [1].

Целью данной работы являлось выяснение различий в ПРДО в областях с напряженностью электрического поля $E=10^4 \div 10^5$ В/см, которые характерны для активной части полупроводниковых приборов, и нейтральным объемом полупроводника.

Исследования проводились на кремнии *n*-типа, для которого достоверно известна структура радиационных дефектов (РД) [2], методом DLTS, позволяющим получить данные о конкретном дефектном комплексе [3]. На базовом материале КЭФ-4.5 диффузией бора на глубину 2 мкм создавался $p^+ - n$ -переход. РД вводились облучением электронами с энергией $E=3.5$ МэВ на импульсном ускорителе «Микротрон». Частота следования импульсов составляла $\omega=100$ Гц, длительность одного импульса $\Delta t=3$ мкс, средняя плотность тока электронов $j=3 \cdot 10^{-8}$ А/см². Облучение проводилось в интервале доз $\Phi=10^{14} \div 3 \cdot 10^{15}$ см⁻², температура облучения $T_{0.1}=78 \div 300$ К. При облучении к образцам прикладывалось внешнее напряжение $U_{см}$ так, что $p^+ - n$ -переход находился в обратно смещенном состоянии.

На рис. 1 представлены данные относительного изменения концентрации комплексов вакансии—кислород (А-центров) по глубине. При определении профиля концентрации дефектов область зондирования составляла 0.3 мкм.

Видно, что эффективность введения А-центров в базе $p^+ - n$ -структур монотонно уменьшается по мере приближения к границе $p^+ - n$ -перехода. Для об-