

Рассеяние электронов проводимости на пространственно коррелированной системе зарядов в сильно легированном GaAs:Te

© В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев[¶], Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров

Омский филиал Института физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 644077 Омск, Россия

(Получена 12 марта 2005 г. Принята к печати 9 июня 2005 г.)

Представлены результаты исследования поглощения инфракрасного излучения свободными носителями заряда в монокристаллах GaAs:Te, выращенных методом Чохральского с концентрацией электронов $n_0 = 5 \cdot 10^{17} - 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Анализ спектральных зависимостей коэффициента поглощения проводился с учетом пространственной корреляции в распределении примесных зарядов. Показано, что модель корреляции ближнего порядка позволяет объяснить уменьшение величины коэффициента поглощения и ослабление его спектральной зависимости в области поглощения свободными носителями заряда, обусловленного рассеянием на ионах примеси.

PACS: 78.20.Di, 78.30.Fs, 71.55.Eq

В монокристаллах GaAs:Te при концентрации примеси $N_{\text{Te}} > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наблюдаются немонотонные изменения ряда параметров, характеризующих зависимости экспериментальных данных от концентрации дефектов. Такие изменения интерпретируются с точки зрения упорядочения в примесной подсистеме. Предполагается, что кулоновское и (или) упругое взаимодействие сложных примесных дефектов — комплексов — приводят к упорядочению в примесной подсистеме с образованием сверхструктуры дальнего порядка [1,2]. Возражения против такой модели связаны с тем, что при указанных концентрациях примеси среднее расстояние между ионами примеси больше радиуса экранирования кулоновского потенциала. Концентрация примесных комплексов, возрастая пропорционально уровню легирования, остается на порядок меньше концентрации примеси. В этих условиях экранирование еще более ослабляет кулоновское взаимодействие между комплексами. Поэтому мы полагаем, что упорядочение дефектов, позволяющее объяснить экспериментальные данные, можно рассматривать как переход из состояния с неоднородным распределением примесных дефектов в состояние с их пространственно коррелированным распределением — структурный переход с перестройкой ближнего порядка.

В данной работе предпринята попытка учета упорядочения в примесной подсистеме с использованием модели корреляции ближнего порядка. Исследовалось поглощение инфракрасного излучения свободными носителями заряда в монокристаллах GaAs:Te, выращенных методом Чохральского, с концентрацией электронов $n_0 = 5 \cdot 10^{17} - 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Цель работы — показать что учет влияния локального окружения примесных дефектов позволяет объяснить существенное изменение механизма рассеяния при $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [3]. Исследовались спектральные зависимости коэффициента поглощения свободными носителями заряда $\alpha_{\text{exp}}(\hbar\omega)$ при $T = 300 \text{ К}$. Величина относительной погрешности α_{exp} составляла 2–5%. Расчет коэффициента α_{theor} проводился в рамках традиционного подхода к процессам пере-

носа — нестационарной теории возмущения 2-го порядка. При расчете α_{theor} , обусловленного двумя конкурирующими механизмами рассеяния — рассеянием на ионах примеси и рассеянием на полярных фононах, — использовались соотношения для полупроводников с вырожденным электронным газом [4,5] с учетом непараболического закона дисперсии и экранирования.

Спектральную зависимость коэффициента поглощения свободными носителями заряда принято аппроксимировать зависимостью

$$\alpha \propto \hbar\omega^{-r},$$

где r — спектральный параметр, характеризующий доминирующий механизм рассеяния. На рис. 1 штриховой линией представлена концентрационная зависимость расчетного значения r_{theor} , монотонный рост которой демонстрирует возрастающую роль ионов примеси в рассеянии электронов с ростом уровня легирования. Анализ экспериментальных зависимостей $\alpha_{\text{exp}}(\hbar\omega)$ показал, что концентрационная зависимость экспериментального значения r_{exp} немонотонна и согласуется с результатами работы [3] (рис. 1). В интервале $5 \cdot 10^{17} < n_0 < 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $\alpha_{\text{exp}}(\hbar\omega)$ имеет более сильную спектральную зависимость, чем $\alpha_{\text{theor}}(\hbar\omega)$, указывающую на наличие дополнительных рассеивающих центров. В качестве таких центров можно рассматривать заряженные примесные комплексы [6]. При $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $\alpha_{\text{exp}}(\hbar\omega)$ имеет более слабую спектральную зависимость, чем $\alpha_{\text{theor}}(\hbar\omega)$, так как $r_{\text{theor}} > r_{\text{exp}}$. Последнее может быть проинтерпретировано и как увеличение рассеяния на дефектах с более слабой спектральной зависимостью, например рассеяния на акустических фононах, так и снижение рассеяния на ионах примеси.

В работе [3] был сделан вывод о том, что образование сверхструктуры дальнего порядка при $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ сопровождается увеличением рассеяния на акустических фононах. Действительно, упорядочение в расположении примеси приводит к дополнительным деформационным напряжениям в кристалле и изменению параметров

[¶] E-mail: davlet@univer.omsk.su

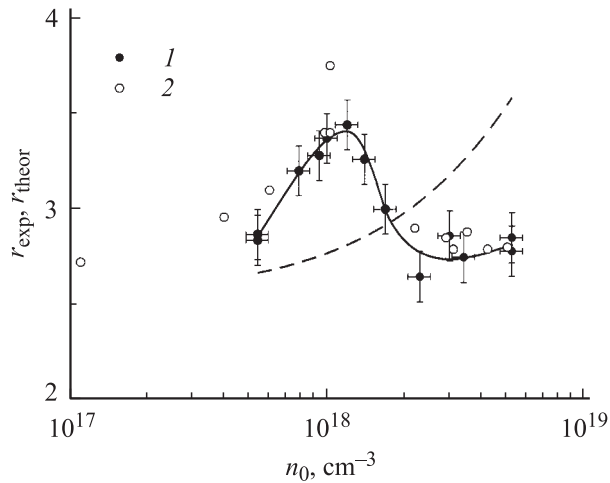


Рис. 1. Экспериментальные (r_{exp}) и расчетные (r_{theor}) концентрационные зависимости спектрального параметра r в монокристаллах GaAs:Te: 1 — эксперимент, 2 — данные работы [3], штриховая линия — расчет.

системы: увеличению деформационного потенциала и увеличению почти на порядок величины пьезоэлектрической константы по сравнению со значениями для нелегированных и слабо легированных образцов. Однако это противоречит данным, полученным в работе [7]. Исследования микротвердости и подвижности дислокаций в исследуемом материале позволяют сделать вывод о том, что в этой области концентраций происходит уменьшение деформационных напряжений. Кроме того, такое увеличение пьезоэлектрической константы привело бы к значительному увеличению параметра электрон-фононного взаимодействия, что в свою очередь привело бы к росту величины эффективной массы на дне зоны проводимости, что нами не наблюдалось [8].

В работах [9–12] показано, что пространственное упорядочение заряженных примесей уменьшает вероятность рассеяния электронов. Эффект примесного упорядочения учитывается при помощи структурного фактора $S(q)$, который равен 1 при случайном распределении примеси. В рамках модели корреляции ближнего порядка структурный фактор может быть учтен через парную функцию вида [11]

$$g(r) = \begin{cases} 0, & r < r_c \\ 1, & r > r_c. \end{cases} \quad (1)$$

Такой вид функции предполагает, что в результате отталкивания между заряженными донорами существует область с радиусом r_c , окружающая каждый ионизованный донор, в которой нет других доноров. Тогда выражение для структурного фактора запишется в виде

$$S(q) = 1 - \frac{4\pi n_0}{q^3} [\sin r_c - q r_c \cos q r_c]. \quad (2)$$

Коэффициент поглощения в рамках квазиклассического приближения можно вычислить при помощи следующе-

го соотношения [13]:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{cn} \frac{\omega_p^4}{\omega^2} \epsilon_0 \text{Re} \rho, \quad (3)$$

где c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления, ω_p — плазменная частота, ϵ_0 — электрическая постоянная, $\text{Re} \rho$ — действительная часть комплексного динамического сопротивления. В работе [14] с использованием квантово-механического кинетического уравнения для электронов с учетом их столкновений с ионами получено следующее выражение для $\text{Re} \rho$:

$$\text{Re} \rho = \frac{1}{6\pi^2} \frac{e^2}{\epsilon_\infty^2 \epsilon_0^2 m^* \omega_p^2} \frac{1}{\omega} \int dk k^2 S(k) \text{Im} \epsilon, \quad (4)$$

где m^* — эффективная масса электрона, $\epsilon_\infty \epsilon_0$ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость, $\text{Im} \epsilon$ — мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости. Используя для $\text{Im} \epsilon$ соотношение для квантового случая ($\omega > \omega_F$) [14] и соотношения (3) и (4), можно записать:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{cn} \frac{\omega_p^4}{\omega^3} \frac{\beta r_s}{2} \int_{A_-}^{A_+} \frac{dq}{q} S(q) \left[1 - \left(\frac{\Omega}{4q} - q^2 \right) \right], \quad (5)$$

где

$$A_+ = \frac{1}{2} [(\Omega + 1)^{1/2} + 1],$$

$$A_- = \frac{1}{2} [(\Omega + 1)^{1/2} - 1],$$

$$\beta = \left(\frac{4}{9\pi} \right)^{1/3}, \quad a_0 = \frac{4\pi \hbar^2 \epsilon_0}{e^2 m^*}, \quad r_0 = \left(\frac{3}{4\pi n_0} \right)^{1/3},$$

$$r_s = \frac{r_0}{a_0}, \quad q = \frac{k}{2k_F}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_F}, \quad \hbar\omega_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m^*},$$

k_F — волновой вектор электрона на уровне Ферми.

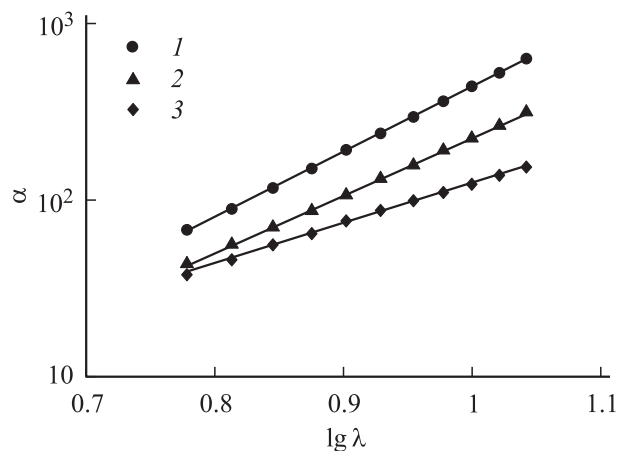


Рис. 2. Расчетные спектральные зависимости коэффициента поглощения, обусловленного рассеянием на ионах примеси: 1 — без учета корреляции в расположении примесей, $r_c = 0$; 2, 3 — с учетом корреляции ближнего порядка: 2 — $r_c = 40 \text{ \AA}$, 3 — $r_c = 50 \text{ \AA}$. Полученные значения спектрального параметра r : 1 — 3.7, 2 — 3.3, 3 — 2.3.

На рис. 2 приведен расчет коэффициента поглощения свободными носителями заряда при рассеянии на ионах примеси с использованием соотношений (2) и (5). Видно, что учет корреляции ближнего порядка в распределении примесных дефектов позволяет объяснить снижение величины спектрального параметра r и уменьшение коэффициента поглощения, обусловленного рассеянием на ионах примеси.

Корреляция в распределении заряженных дефектов устанавливается при температурах, когда они в состоянии диффундировать в процессе роста. Доминирующими дефектами в исследуемом материале являются: доноры Te_{As}^+ , комплексы $(V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}})^{2-}$, вакансии мышьяка V_{As}^+ [15,16]. Кулоновское отталкивание между одноименно заряженными дефектами обуславливает расстояние максимального сближения между дефектами — радиус корреляции r_c , который составляет величину 45–50 Å. Кулоновское притяжение приводит к эффектам спаривания дефектов с образованием крупномасштабных пар, которые ведут себя как дипольные рассеивающие центры с малой эффективностью рассеяния и меньшей величиной спектрального параметра r .

Таким образом, пространственная корреляция в распределении примесных дефектов в GaAs:Te при $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ приводит к снижению величины спектрального параметра и уменьшению коэффициента поглощения, обусловленного рассеянием на ионах примеси.

Список литературы

- [1] V.V. Prudnikov, I.A. Prudnikova, N.A. Semikolenova. Phys. Status Solidi (a), **181**, 87 (1994).
- [2] V.A. Bogdanova, V.I. Dubovik, V.V. Prudnikov, N.A. Semikolenova. *Abstracts Int. Conf. on Solid State Devices and Materials* (Osaka, Japan, 1995) p. 1057.
- [3] Е.А. Балагурова, Ю.Б. Греков, А.Ф. Кравченко, И.А. Прудникова, В.В. Прудников, Н.А. Семиколонова. ФТП, **19**, 1566 (1985).
- [4] З.А. Демиденко. ФТП, **4**, 2106 (1970).
- [5] Т.А. Алиев, Ф.М. Гашимзаде. ФТП, **6**, 458 (1972).
- [6] Е.П. Рашевская, В.И. Фистуль. ФТТ, **9**, 3618 (1967).
- [7] В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, А.А. Коротенко, М.М. Нукенов, Н.А. Семиколонова, Е.Н. Сидоров. *Матер. VIII Росс. конф. „GaAs-2002“* (Томск, 2002) с. 21.
- [8] В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Н.А. Семиколонова, Е.Н. Сидоров. ФТП, **36**, 407 (2002).
- [9] J. Mycielski. Sol. St. Commun., **60**, 165 (1986).
- [10] K. Kossut, W. Dobrowolski, Z. Wilamowski, T. Dietl, K. Swiatek. Semicond. Sci. Technol., **5**, 260 (1990).
- [11] K. Kossut, Z. Wilamowski, T. Dietl, K. Swiatek. Acta Physica Polon. A, **79**, 49 (1991).
- [12] A.F. Levi, S.L. McCall, P.M. Platzman. Appl. Phys. Lett., **54**, 940 (1989).
- [13] E. Gerlach, P. Grosse. *Festkörperprobleme XVII* (Braunschweig, F. Vieweg & Sohn, 1977) p. 157.
- [14] A. Ron, N. Tzoar. Phys. Rev., **131**, 1943 (1963).
- [15] Н.С. Задорожный, В.Ф. Коваленко, В.Д. Лисовенко, М.Г. Мильвидский, А.В. Прохорович. Кристаллография, **36**, 958 (1991).

- [16] J. Gebauer, E.R. Weber, N.D. Jäger, K. Urban, Ph. Ebert. Appl. Phys. Lett., **82**, 2059 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

Scattering of free electrons on spatially correlated system of charges in high doped GaAs:Te

V.A. Bogdanova, N.A. Davletkildeev,
N.A. Semikolenova, E.N. Sidorov

Omsk Branch of Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
644077 Omsk, Russia

Abstract Results of investigation of a free-carrier optical absorption of Czochralski grown Te-doped GaAs single crystals with free carriers concentration $n_0 = 5 \cdot 10^{17} - 6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ are presented. Impurity-mediated free-carrier absorption is analyzed theoretically taking into account the possible spatial impurity correlations. It is demonstrated that of a short-range correlation model allows to explain both the diminution of value and the weakness of spectral dependence of impurity-mediated free-carrier absorption.