

Метод определения степени компенсации электрически активных примесей в многодолинных полупроводниках

© П.И. Баранский, Г.П. Гайдар*[¶]

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

* Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины, 03680 Киев, Украина

(Получена 15 марта 2012 г. Принята к печати 19 сентября 2012 г.)

Предложен метод определения степени компенсации $k = N_a/N_d$ для примесей мелкого залегания в кристаллах n -Si с невырожденным электронным газом. Приведены необходимые данные, которые обеспечивают удобство при практическом нахождении степени компенсации.

1. Введение

Наиболее используемый метод определения степени компенсации электрически активных примесей в полупроводниках базируется, как известно [1], на анализе температурных зависимостей концентрации носителей тока в широком температурном интервале ($20 \leq T \leq 300$ К). Однако удобным данный метод признать достаточно сложно, поскольку применение его требует значительных временных затрат, а также использования криогенных жидкостей, имеющих низкую температуру кипения. К тому же этот метод не позволяет определять степень компенсации примесей при наличии в кристалле нескольких сортов донорных центров.

Существует, однако, метод (по сути модификация метода [1]), который позволяет определять степень компенсации и при наличии в кристалле нескольких типов примесей [2]. Но этот метод настолько громоздкий, что на протяжении длительного времени своего существования так и не получил широкого практического применения. Все это послужило стимулом для разработки более эффективного (и приемлемого в работе) метода определения степени компенсации $k = N_a/N_d$ (где N_a, N_d — концентрации акцепторных и донорных примесей соответственно) в полупроводниках.

Цель данной работы заключалась в разработке метода определения степени компенсации k в кристаллах n -Si. Метод базировался на расчете параметра анизотропии подвижности $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$ (где $\mu_{\parallel}, \mu_{\perp}$ — подвижности носителей заряда вдоль и поперек большой оси изоэнергетического эллипсоида соответственно) по результатам измерений концентрации носителей тока $n_e = N_d - N_a$ и пьезосопротивления $\rho_X/\rho_0 = f(X)$, где X — механическая нагрузка на кристалле, ρ_0, ρ_X — удельное сопротивление недеформированного и деформированного кристалла соответственно. Измерения, необходимые для определения k согласно предлагаемому методу, требуют много меньше времени и материальных затрат. Как будет показано далее, окончательное выражение для вычисления k получается достаточно простым. При этом результаты могут быть доведены до уровня номограмм,

по которым, имея в распоряжении измеренные значения n_e (по эффекту Холла) и пьезосопротивления, можно, не прибегая вообще к каким-либо формулам, определить значение k . Предложенный метод применим в случае примесей мелкого залегания в интервале концентраций $10^{13} \leq N_i \equiv N_a + N_d \leq 10^{16}$ см³ и для значений степени компенсации в пределах $0 \leq k \leq 0.8$ в монокристаллах n -Si.

2. Результаты и обсуждение

Рассмотрим физическую суть предложенного метода. Известно [3], что одноосная упругая деформация многодолинных полупроводников (типа n -Si и n -Ge) по направлениям несимметричного расположения оси деформации относительно изоэнергетических эллипсоидов в этих полупроводниках приводит к межминимумному перераспределению носителей заряда в зоне проводимости (c -зоне) (при неизменной их общей концентрации). В результате чего изменяется удельное сопротивление образца, измеряемое вдоль приложенного механического напряжения X и пропускаемого через образец тока J ($X \parallel J$). При условии $X \parallel J \parallel \langle 001 \rangle$ и $|X| \geq 6000$ кгс/см² для монокристаллов n -Si (при $T = 77.4$ К) перераспределение носителей между долинами прекращается, поскольку все электроны (c 4 минимумов, поднявшихся по шкале энергий) перешли в 2 минимума, опустившихся вниз. Вследствие этого удельное сопротивление образца (в случае, когда сдвиговая компонента равна нулю) при дальнейшем росте X выходит на насыщение $\rho(X \rightarrow \infty) = \rho_{\infty}$. При указанных выше условиях деформирования кристалла будем иметь, согласно [3],

$$\frac{\rho_{\infty}^{(001)}}{\rho_0} = \frac{2K + 1}{3}. \quad (1)$$

В соответствии с теорией [4,5] в условиях смешанного рассеяния (на колебаниях решетки и ионизированных примесях)

$$K = \frac{K_m}{K_r}, \quad (2)$$

[¶] E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

где $K_m = m_{\parallel}/m_{\perp}$ — параметр анизотропии эффективной массы, который в случае *n*-Si составляет

$$K_m \approx 4.69 = \text{const}, \quad (3)$$

$$K_{\tau} = \frac{\langle \tau_{\parallel} \rangle}{\langle \tau_{\perp} \rangle} = \frac{a_{\parallel} J_1}{a_{\perp} J_2}, \quad (4)$$

m_{\parallel} и m_{\perp} — эффективные массы для отдельно взятого изоэнергетического эллипсоида вдоль длинной оси и перпендикулярно к ней соответственно; K_{τ} — параметр анизотропии рассеяния; τ_{\parallel} и τ_{\perp} — компоненты тензора времени релаксации при отсутствии магнитного поля в линейном приближении; a_{\parallel} и a_{\perp} — численные коэффициенты, которые для *n*-Si составляют

$$\left. \begin{aligned} a_{\parallel} &= 3.50 \cdot 10^{-17} \text{ эрг}^{1/2} \cdot \text{К} \cdot \text{с} \\ a_{\perp} &= 5.25 \cdot 10^{-17} \text{ эрг}^{1/2} \cdot \text{К} \cdot \text{с} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Интегралы J_1 и J_2 в случае невырожденного электронного газа для *n*-Si (а также для *n*-Ge) задаются формулами (П.5), представленными в *Приложении*; величины b_0 и b_1 , которые входят в состав интегралов J_1 и J_2 соответственно, в случае *n*-Si имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 9.68 \cdot 10^5 \frac{a_{\parallel} N_i}{T^3} \left(32.0 + \ln \frac{T^2 x}{n'} + 10^{-14} \frac{n'}{T^2 x} \right) \\ b_1 &= 3.47 \cdot 10^6 \frac{a_{\perp} N_i}{T^3} \left(31.4 + \ln \frac{T^2 x}{n'} + 1.46 \cdot 10^{-14} \frac{n'}{T^2 x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где N_i — концентрация ионизованной примеси.

Приведенные выражения (1)–(6), а также формулы (П.5) из *Приложения*, позволяют рассчитать зависимость

$$\left. \frac{\rho_{\infty}}{\rho_0} \right|_{T=\text{const}} = f(N_i). \quad (7)$$

Результаты такого расчета (т.е. графическое изображение зависимости (7)) представлены на рис. 1. Эта зависимость позволяет по данным измерения пьезосопротивления ρ_{∞}/ρ_0 найти концентрацию ионизованной примеси в кристалле

$$N_i = N_d + N_a. \quad (8)$$

Измеряя эффект Холла при той же температуре, для которой предварительно рассчитывалась зависимость $\rho_{\infty}/\rho_0 = f(N_i)$, показанная на рис. 1, т.е. при 77.4 К, находим концентрацию свободных электронов

$$n_e = N_d - N_a. \quad (9)$$

Решая систему уравнений (8) и (9), получим искомую степень компенсации примесей в кристалле в виде соотношения

$$k = \frac{N_a}{N_d} = \frac{N_i - n_e}{N_i + n_e}. \quad (10)$$

Чтобы упростить описанную выше процедуру определения степени компенсации k , можно воспользоваться номограммой (рис. 2), которая построена на основе формулы (10) и зависимости $\rho_{\infty}/\rho_0 = f(N_i)$ (рис. 1). В этом случае определение k сводится к следующему. По эффекту Холла определяют концентрацию электронов. Затем при этой же температуре и в отсутствие магнитного поля пропускают через образец электрический ток, измеряют падение напряжения на продольных зондах V_0 , прикладывают одноосную механическую нагрузку $X = 6000\text{--}10\,000$ кгс/см² и измеряют падение напряжения V_{∞} . Рассчитывают отношение $\frac{\rho_{\infty}}{\rho_0} = \frac{V_{\infty}}{V_0}$ и на основании номограммы (рис. 2) находят степень компенсации $k = N_a/N_d$.

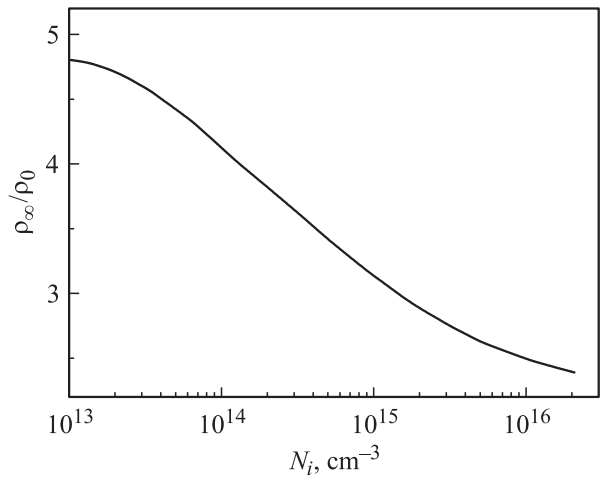


Рис. 1. Рассчитанная зависимость $\rho_{\infty}/\rho_0 = f(N_i)$ в кристаллах *n*-Si при температуре $T = 77.4$ К.

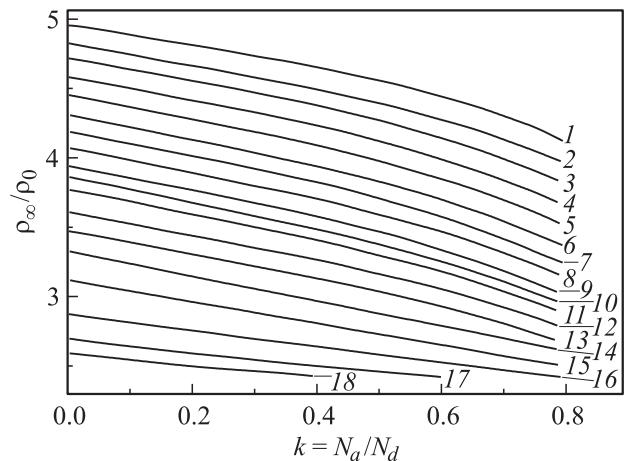


Рис. 2. Зависимости, которые связывают ρ_{∞}/ρ_0 при 77.4 К в кристаллах *n*-Si со степенью компенсации $k = N_a/N_d$, для образцов с разными концентрациями носителей заряда в зоне проводимости в качестве фиксированных параметров n_e , см⁻³: 1 — 10^{13} , 2 — $1.5 \cdot 10^{13}$, 3 — $2 \cdot 10^{13}$, 4 — $3 \cdot 10^{13}$, 5 — $4 \cdot 10^{13}$, 6 — $6 \cdot 10^{13}$, 7 — $8 \cdot 10^{13}$, 8 — 10^{14} , 9 — $1.4 \cdot 10^{14}$, 10 — $1.7 \cdot 10^{14}$, 11 — $2 \cdot 10^{14}$, 12 — $3 \cdot 10^{14}$, 13 — $4 \cdot 10^{14}$, 14 — $6 \cdot 10^{14}$, 15 — 10^{15} , 16 — $2 \cdot 10^{15}$, 17 — $4 \cdot 10^{15}$, 18 — $6 \cdot 10^{15}$.

Следует заметить, что, так как даже при больших механических напряжениях ($X \gg 6000 \text{ кгс/см}^2$) изменение геометрической формы образцов *n*-Si является незначительным, вместо отношения ρ_∞/ρ_0 можно брать соответствующее отношение V_∞/V_0 , не рискуя при этом снижением точности при определении искомой величины k , которая характеризует степень компенсации имеющихся в объеме кристалла примесей донорного и акцепторного типов.

Предложенный метод определения k пригоден для практического использования в случае монокристаллов *n*-Si, когда ρ_∞/ρ_0 (или V_∞/V_0) находят в экспериментах с направленно-деформированными кристаллами при условии $X \parallel J \parallel \langle 100 \rangle$. Для применения этого метода в случае с *n*-Ge необходимо использовать данные по пьезосопротивлению этих кристаллов, полученных в опытах при условии $X \parallel J \parallel \langle 111 \rangle$, и соответствующие номограммы необходимо рассчитывать по формулам, приведенным в *Приложении*.

3. Заключение

В работе предложен метод определения в монокристаллах *n*-Si степени компенсации $k = N_a/N_d$ для примесей мелкого залегания в интервале концентраций $10^{13} \leq N_i \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$, который обладает рядом преимуществ перед известными методами. Надежность и простота данного метода позволяет поставить его на службу не только в научных лабораториях, но и в производственных условиях.

Для удобства практического использования предложенного метода графически изображена рассчитанная зависимость $\rho_\infty/\rho_0 = f(N_i)$, где N_i — суммарная концентрация примесей в исследуемом кристалле. Разницу $N_d - N_a = n_e$ определяют по измерениям эффекта Холла.

Приближенные оценки степени компенсации примесей в объеме образцов *n*-Si можно получить с помощью номограммы для расчета k по результатам измерений пьезосопротивления, т.е. по данным рис. 2, на котором для дискретных (и уже известных) значений концентрации носителей n_e приведены зависимости $\rho_\infty/\rho_0 = f(k)$, где $k = N_a/N_d$ — степень компенсации примесей.

Приложение

В *Приложении*, согласно [5], представлены формулы для расчета номограмм, предназначенных для использования предложенного метода определения степени компенсации примесей $k = N_a/N_d$ в случае монокристаллов *n*-Ge:

$$K = \frac{K_m}{K_r}, \quad (\text{П.1})$$

$$K_m = \frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}} \approx 19.3, \quad (\text{П.2})$$

$$K_r = \frac{\langle \tau_{\parallel} \rangle}{\langle \tau_{\perp} \rangle} = \frac{a_{\parallel} J_1}{a_{\perp} J_2}, \quad (\text{П.3})$$

$$\left. \begin{aligned} a_{\parallel} &= 3.40 \cdot 10^{-17} \text{ эрг}^{1/2} \cdot \text{К} \cdot \text{с} \\ a_{\perp} &= 2.84 \cdot 10^{-17} \text{ эрг}^{1/2} \cdot \text{К} \cdot \text{с} \end{aligned} \right\}, \quad (\text{П.4})$$

$$J_1 = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x} x^3 dx}{x^2 + b_0}, \quad J_2 = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x} x^3 dx}{x^2 + b_1}, \quad (\text{П.5})$$

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 2.65 \cdot 10^5 \frac{a_{\parallel} N_i}{T^3} \left(32.0 + \ln \frac{T^2 x}{n'} + 1.26 \cdot 10^{-14} \frac{n'}{T^2 x} \right) \\ b_1 &= 3.23 \cdot 10^6 \frac{a_{\perp} N_i}{T^3} \left(31.0 + \ln \frac{T^2 x}{n'} + 2.8 \cdot 10^{-14} \frac{n'}{T^2 x} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (\text{П.6})$$

где $N_i = N_d + N_a$ — общая концентрация примесных центров в кристалле; n_e — концентрация электронов в зоне проводимости, N_d и N_a — концентрация донорных и акцепторных примесей в кристалле. Величина

$$n' = n_e + (n_e + N_a) \left(1 - \frac{n_e + N_a}{N_d} \right)$$

учитывает влияние компенсирующей примеси на экранирование. Так, при отсутствии компенсирующих примесей $N_a = 0$ и $n' = n_e = N$. Величины b_0 и b_1 зависят от температуры, общей концентрации примесей в кристалле, степени их компенсации и являются разными для кристаллов *n*-Ge и *n*-Si.

Список литературы

- [1] P.A. Lee. Brit. J. Appl. Phys., **8**, 340 (1957).
- [2] В.О. Баррис, Э.Э. Клотыньш. *Определение параметра локального уровня в полупроводниках* (Рига, Зинатне, 1978).
- [3] С. Herring. Bell Syst. Techn. J., **34** (2), 237 (1955).
- [4] П.И. Баранский, И.В. Даховский, В.В. Коломоец, А.В. Федосов. ФТП, **10** (7), 1345 (1976).
- [5] П.И. Баранский, И.С. Буда, И.В. Даховский, В.В. Коломоец. *Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1977).

Редактор Т.А. Полянская

Method for determination of the compensation factor of electrically active impurities in the many-valley semiconductors

P.I. Baranskii, G.P. Gaidar*

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 03028 Kyiv, Ukraine

* Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, 03680 Kyiv, Ukraine

Abstract The method for determination of the compensation factor $k = N_a/N_d$ for the shallow impurities in the crystals of *n*-Si with a nondegenerate electron gas has been proposed. The necessary data, which provide the convenience for the practical finding of compensation factor, are represented.