

## Методы оценки концентрации компенсирующей примеси в германии, легированном ртутью

© В.Ф. Банная<sup>†</sup>

Московский государственный гуманитарный университет им. М.А. Шолохова (факультет точных наук и инновационных технологий),  
109240 Москва, Россия

(Получена 17 декабря 2013 г. Принята к печати 24 января 2014 г.)

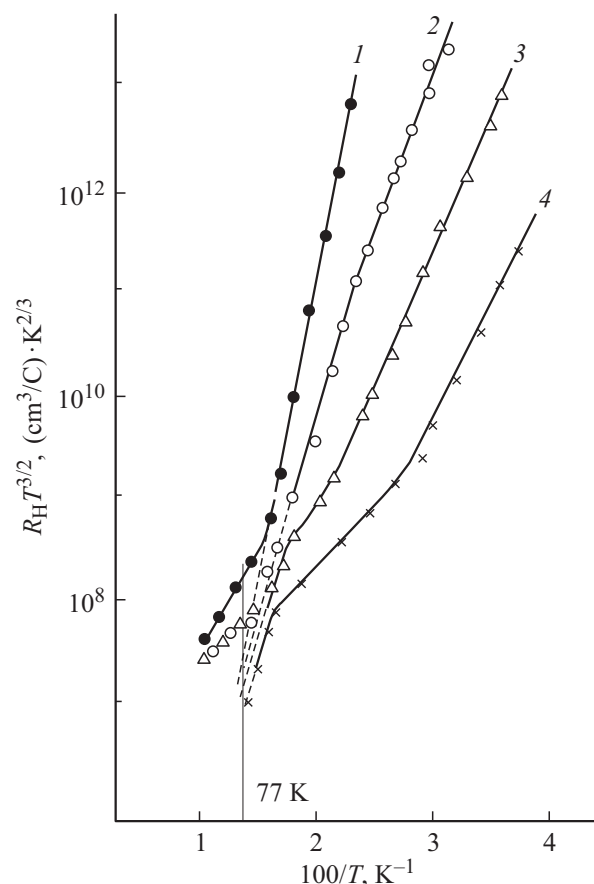
На основании анализа результатов измерений постоянной Холла и подвижности в широком диапазоне температур в образцах германия, легированного ртутью, предложены методы оценки концентрации компенсирующей примеси из участков кривых, соответствующих температурам  $T > 50$  К. Делается вывод, что в указанном интервале температур локальные образования ртути в матрице образца ионизованы и оба метода применимы вне зависимости от химической природы примеси.

1. Известно, что при создании приемников инфракрасного (ИК) диапазона волн одним из перспективных материалов является германий, легированный ртутью (Ge:Hg), с энергией ионизации примеси  $\varepsilon_p = 8.7 \cdot 10^{-2}$  эВ. Однако, как показано в [1], при концентрациях акцепторной ртути  $N_A \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в матрице образца возникают локальные комплексы ртути и наклоны холловских зависимостей  $R_H T^{3/2} = f(1/T)$  ( $R_H$  — постоянная Холла,  $T$  — абсолютная температура) при  $T < 50$  К соответствуют энергии ионизации, меньшей  $\varepsilon_p$ . Эта величина для таких образцов (они названы в [1] аномальными) варьируется в интервале  $(5.9-1.12) \cdot 10^{-2}$  эВ в зависимости от концентрации ртути и концентрации компенсирующей донорной примеси  $N_D$ . Точный расчет отдельных концентраций примесей в аномальных образцах затруднителен, так как в этом случае систему нельзя рассматривать как простую одноуровневую модель. В интервале температур  $T > 50$  К (50–300 К) зависимости  $R_H T^{3/2} = f(1/T)$  для всех образцов (и нормальных, и аномальных) имеют нелинейный характер, и стандартный холловский метод определения концентрации компенсирующей примеси здесь также неприменим. Цель настоящей работы — дальнейшее изучение *p*-Ge, легированного ртутью, с целью рассмотрения возможностей определения концентрации компенсирующей примеси  $N_D$  из высокотемпературных участков холловских кривых ( $T \geq 50$  К) и анализа температурной зависимости подвижности  $\mu = R_H/\rho$ , где  $\rho$  — удельное сопротивление образца.

2. Все измерения выполнялись по стандартной холловской методике. Исследовались температурные зависимости постоянной Холла и удельного сопротивления. Измерено более 30 образцов в интервале температур  $T = 18-300$  К. Исходным материалом был *p*-Ge, содержащий остаточные водородоподобные примеси в концентрации  $\sim (1-5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Более подробно условия эксперимента, ход  $R_H T^{3/2} = f(1/T)$ ,  $\rho = f(T)$  и параметры образцов описаны в [1]. Здесь только подчеркнем, что концентрация ртути в измеренных образцах варьировалась в интервале  $(1.4-9.3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , величина

энергии ионизации в них была приведена ранее, а концентрация компенсирующей примеси в нормальных образцах укладывалась в указанный выше интервал.

На рис. 1 представлены четыре характерные зависимости  $R_H T^{3/2} = f(1/T)$  для нормального (кривая 1) и трех аномальных образцов (кривые 2, 3, 4), заимствованные из [1]. Видно, что кривые сильно различаются при



**Рис. 1.** Температурные зависимости коэффициента Холла для образцов *p*-Ge:Hg: 1 —  $\varepsilon_p = 8.7 \cdot 10^{-2}$  эВ,  $N_A = 2.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; 2 —  $\varepsilon_p = 5.9 \cdot 10^{-2}$  эВ,  $N_A = 5.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; 3 —  $\varepsilon_p = 4.2 \cdot 10^{-2}$  эВ,  $N_A = 5.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; 4 —  $\varepsilon_p = 4.0 \cdot 10^{-2}$  эВ,  $N_A = 6.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

<sup>†</sup> E-mail: kurovaf@yandex.ru

**Таблица 1.** Расчет слагаемых в знаменателях (1)

$T, K$	$N_D \exp(\epsilon_p/kT), \text{см}^{-3}$	$N'_v T^{3/2}, \text{см}^{-3}$
40	$9.6 \cdot 10^{23}$	$6.8 \cdot 10^{16}$
50	$6.1 \cdot 10^{21}$	$9.3 \cdot 10^{16}$
60	$2.1 \cdot 10^{20}$	$1.2 \cdot 10^{17}$
77	$5.1 \cdot 10^{18}$	$1.8 \cdot 10^{17}$
100	$2.5 \cdot 10^{17}$	$2.6 \cdot 10^{17}$

низких температурах (где в координатах рис. 1 зависимости линейны) и достаточно близки при  $T > 50 K$ . Это позволяет предположить, что термогенерация носителей заряда при этих температурах во всех образцах осуществляется с изолированных атомов ртути, так как энергия ионизации комплексов существенно меньше, чем  $\epsilon_p$  [2].

Исходя из уравнения нейтральности легко получить:

$$p = \frac{(N_A - N_D)N_v}{N_D \exp(\epsilon_p/kT) + N_v} - \frac{p^2 \exp(\epsilon_p/kT)}{N_D \exp(\epsilon_p/kT) + N_v}, \quad (1)$$

где  $N_A, N_D$  — концентрации акцепторов и доноров соответственно,  $N_v$  — плотность состояний в валентной зоне,  $p$  — концентрация свободных дырок,  $k$  — постоянная Больцмана. Сравним значения слагаемых, стоящих в знаменателе (1). Расчеты выполнены для следующих величин, соответствующих Ge : Hg:  $\epsilon_p = 8.7 \cdot 10^{-2}$  эВ,  $N_v = N'_v T^{3/2} \text{см}^{-3}$ ,  $N'_v = 2.64 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3} \cdot K^{-3/2}$ ,  $N_D = 1 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$ .

В табл. 1 представлены результаты такого расчета для нескольких значений температур. Видно, что в интервале температур  $40 \leq T \leq 77 K$  вторым слагаемым в знаменателе (1) можно пренебречь. Если принять значение  $N_D > 1 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$ , то неравенство только усилится. В этом случае выражение для концентрации свободных дырок  $p_H$  принимает вид

$$p_H = \frac{(N_A - N_D)N_v}{N_D \exp(\epsilon_p/kT)} - \frac{p^2}{N_D}. \quad (2)$$

При низких температурах ( $T < 40 K$ ), для которых  $p \ll N_D$ , концентрация свободных дырок есть

$$p_L = \frac{(N_A - N_D)N_v}{N_D \exp(\epsilon_p/kT)}. \quad (3)$$

Сравнивая (2) и (3), легко видеть, что отклонение от линейной зависимости  $\lg R_H T^{3/2} = f(1/T)$  обусловлено величиной  $p^2/N_D$ .

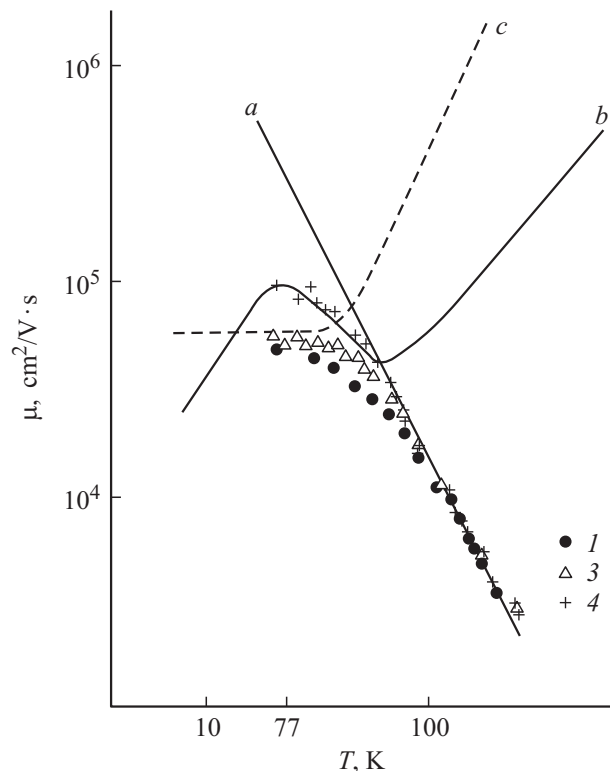
Учитывая сказанное, можно предложить метод оценки концентрации компенсирующих примесей в аномальных образцах. На зависимостях  $R_H T^{3/2} = f(1/T)$  линейный наклон экстраполируется в область более высоких температур. Для любой  $T$ , для которой выполняется соотношение (2), из прямой находится величина  $\Delta R_H T^{3/2}$ , а из нее вычисляется  $\Delta p = p^2/N_D$ ,  $p$  определяется значением  $R_H$  при выбранной температуре. В табл. 2

представлены значения  $N_D$  для нормального образца, полученные по формуле (3), и  $N'_D$ , полученные с использованием предложенного метода, при этом  $N_D$  — концентрация компенсирующей примеси, определенная по стандартной холловской методике,  $N'_D$  — концентрация доноров, вычисленная с использованием экстраполяции холловских кривых.

Видно, что величины  $N'_D$  не выходят за пределы значений остаточных примесей в используемых образцах, а для нормального образца хорошо коррелируют с величиной  $N_D$ .

**3. Образцы Ge : Hg**, как правило, являются слабо компенсированными, так как концентрация ртути в них  $N_A \approx 1 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$ , а концентрация остаточных доноров, как уже отмечалось,  $N_D \approx 5 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$ . В [3] предложен метод определения концентрации примеси в слабо компенсированных образцах Si и Ge, который учитывает особенности механизмов рассеяния носителей в таких образцах и практически не зависит от химической природы примесей.

На рис. 2 представлены температурные зависимости подвижности  $\mu(T)$  при разных механизмах рассеяния — линии заимствованы из [3]:  $a$  — акустическое рассеяние,  $\mu_{ac}(T)$ ;  $b$  — рассеяние на ионизованных примесях,  $\mu_I(T)$ ;  $c$  — рассеяние на нейтральных центрах,  $\mu_N(T)$ . Точки



**Рис. 2.** Температурные зависимости подвижности  $\mu(T)$ . Точки — эксперимент для образцов 1 (нормальный) и 3, 4 (аномальные), параметры образцов см. в подписи к рис. 1. Кривые — расчет из [3]:  $a$  —  $\mu_{ac}(T)$ ,  $b$  —  $\mu_I(T)$  для концентрации центров  $N_I = 1 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$ ,  $c$  —  $\mu_N(T)$  для концентрации центров  $N_N = 5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$ .

Таблица 2. Концентрации компенсирующих примесей

Номер	$\varepsilon_p, 10^{-2}$ эВ	$N_A, 10^{15}$ см $^{-3}$	$N_D, 10^{13}$ см $^{-3}$	$N'_D, 10^{13}$ см $^{-3}$	$N''_D, 10^{13}$ см $^{-3}$
1	8.7	2.3	6.4	7.8	4.2
2	5.9	5.5		6.5	
3	4.2	5.8		10	6.5
4	4.0	6.2		16	7.3

Примечание.  $N_D$  — концентрация компенсирующей примеси, определенная по стандартной холловской методике;  $N'_D$  — концентрация доноров, вычисленная с использованием экстраполяции холловских кривых;  $N''_D$  — концентрация доноров, вычисленная по [3] из значений холловской подвижности носителей при  $T = 77$  К.

на рис. 2 — экспериментальные значения холловской подвижности  $\mu = R_H/\rho$  образцов Ge : Hg, как нормального (1), так и аномальных (3,4). Параметры образцов указаны в подписи к рис. 1. Видно, что при низких температурах ( $T < 77$  К) подвижность аномальных образцов заметно выше, чем нормального, хотя концентрация ртути в них в  $\sim 2$  раза больше, чем в образце 1. При этом концентрация остаточных доноров, которые обуславливают рассеяние на ионизованных центрах, примерно одного порядка. Можно предположить, что такое отличие связано с возможным наличием локальных комплексов ртути в аномальных образцах, протекание по которым уменьшает вклад механизма рассеяния на ионизованных центрах [2].

При  $T > 77$  К основным механизмом рассеяния носителей заряда становится акустический и  $\mu(T)$  для всех образцов хорошо описывается кривой  $\mu_{ac}(T)$ . Из рис. 2 также видно, что при  $T \approx 77$  К измеренная подвижность меньше, чем  $\mu_{ac}$ , что позволяет выделить по методу, описанному в [3], вклад рассеяния на ионизованных примесях и рассчитать концентрацию ионизованных центров и компенсирующей примеси. В табл. 2 представлены результаты такого расчета для нескольких образцов Ge : Hg, где  $N''_D$  — концентрация доноров, вычисленная по [3] из значений подвижностей носителей заряда, измеренных при  $T = 77$  К. Видно, что все полученные результаты соответствуют значениям остаточных примесей в измеренных образцах.

Таким образом, сопоставление всех значений  $N_D, N'_D, N''_D$  позволяет считать, что предложенные методы могут быть использованы для оценки концентрации компенсирующей примеси в германии, легированном ртутью. При этом можно ограничиваться более узким интервалом температур при измерении постоянной Холла и удельного сопротивления,  $50 \lesssim T \lesssim 100$  К.

## Список литературы

- [1] В.Ф. Банная, Л.Б. Литвак-Горская, Г.Л. Луговая. ФТП, **27**, 1661 (1993).
- [2] В.Ф. Банная, Е.М. Гершензон, Л.А. Гончаров, Л.П. Орлова, С.Л. Орлов. ФТП, **15**, 1264 (1981).
- [3] В.Ф. Банная, Л.И. Веселова, Е.М. Гершензон. ФТП, **23**, 338 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова

## Methods for estimation of compensating impurity concentration in mercury doped germanium

V.F. Bannay

Sholokhov Moscow State University for the Humanities  
109240 Moscow, Russia

**Abstract** On the basis of measurements of Hall coefficient and mobility in the wide range of temperatures in the samples of mercury-doped germanium, methods for estimation of compensating impurity concentration from the curves parts corresponding to temperatures  $T > 50$  K are suggested. It is concluded that in the specified temperature range, the local mercury inclusions in the sample matrix are ionized. Both methods are applicable independent of the chemical nature of the impurities.