

## Особенности холловских измерений в легированных полупроводниках

© В.Ф. Банная

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

(Получена 8 октября 2014 г. Принята к печати 6 ноября 2014 г.)

Рассмотрены пределы применимости холловского метода отдельного определения концентрации примесей для случая легирования одной основной примесью. Построена диаграмма в координатной плоскости, где ось абсцисс — безразмерный параметр  $N^{1/3}a$  (поскольку используются разные полупроводники), а ось ординат — степень компенсации примесей  $K$ . Полученная кривая является как обобщением имеющихся в литературе экспериментальных данных, так и результатом проведенного исследования слабо компенсированного Si. Полученная кривая делит плоскость  $N^{1/3}a-K$  на две части: в I — применим холловский метод определения концентрации примесей, в II — неприменим.

1. Задача отдельного определения концентрации примесей ( $N_a$  — концентрация акцепторов,  $N_g$  — концентрация доноров) в полупроводниках имеет самостоятельный научный и практический интерес и, конечно, не нова. Решение ее связано с большим числом методов, основанных на физических свойствах полупроводников, определяемых электрически активными примесными центрами. Среди них наиболее надежным, ставшим классическим методом считается холловский.

В работах [1,2] дан подробный анализ математических моделей, используемых для обработки холловских измерений, и оценены границы их применимости. Показано, что наиболее надежной холловская методика является в случае так называемой одноуровневой модели, когда полупроводник содержит один вид основной примеси. Однако даже в этом самом „простом“ случае легирования возникают определенные границы применимости холловского метода в зависимости от концентрации основной примеси и степени ее компенсации. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

2. Известно [1,3], что при низких температурах и достаточной степени легирования с проводимостью свободных носителей заряда, созданных за счет ионизации примесей, начинает конкурировать проводимость, определяемая движением электронов (дырок) по донорам (акцепторам). В зависимости от степени перекрытия волновых функций электронов на донорах (дырок на акцепторах) возможно несколько механизмов проводимости по примесям. Характеристикой степени перекрытия является введенный в [1,2] безразмерный параметр  $N^{1/3}a$  или  $Na^3$ , где  $N$  — концентрация примесей,  $a$  — боровский радиус.

При  $N^{1/3}a \geq 0.05$  и низких температурах ( $T$ ) возникает прыжковая проводимость по примесям в полупроводниках. Она возможна только при наличии компенсации и обусловлена перескоками носителей заряда между примесными центрами, основные состояния которых различаются на некоторую энергию в связи с существованием в полупроводнике флуктуационного потенциала случайно распределенных заряженных примесей. При

перескоке на соседний центр возникает так называемая  $\epsilon_3$ -проводимость, хорошо изученная и теоретически, и экспериментально в  $n$ -Ge и  $p$ -InSb [2,3].

Поскольку примесная проводимость в Si изучена существенно хуже, а этот материал представляет большой практический интерес, было проведено изучение примесной проводимости в легированном бором и слабо компенсированном Si. Однако, мы не ограничились только измерением удельного сопротивления  $\rho(T)$ . Во всех образцах исследовалась также температурная зависимость коэффициента Холла  $R_H(T)$  для выяснения вопроса, начиная с каких концентраций компенсирующей примеси ( $N_K$ ) и значений степени компенсации  $K$  найденная экспериментально энергия ионизации становится меньше расчетной. Последнее, как следует из сделанных ранее оценок, приведет к существенному завышению концентрации примесей, и потому является неприемлемым для холловского метода определения  $N_K$  и  $K$ . Поскольку мы исследовали только слабо компенсированный Si, то привлекли данные других авторов [2] для  $n$ -Ge и  $p$ -InSb с другими значениями  $K$ .

Графически представить эти результаты нам кажется наиболее удобным, если выделить область применимости холловского метода на координатной плоскости, где ось абсцисс — безразмерный параметр  $N^{1/3}a$  (поскольку используются разные полупроводники), а ось ординат — компенсация  $K$ . Кривая на рис. 1 является обобщением экспериментальных результатов вплоть до  $K \leq 0.7$ .

Рассмотрим теперь случай сильных компенсаций,  $1-K \ll 1$ , когда электроны локализуются на донорных парах типа иона молекулы водорода  $H_2^+$  [3].

В этом случае энергия электрона на комплексе  $H_2^+$   $\epsilon_1 > \epsilon_i$ , где  $\epsilon_i$  — энергия ионизации примеси, что и отражает экспоненциальная зависимость  $\rho(1/T)$ . В температурной зависимости  $R_H(T)$  тоже наблюдается экспоненциальный участок  $R_H = f(1/T)$ , однако определяемая из него энергия  $\epsilon'_1 < \epsilon_i < \epsilon_1$ , что объясняется иным характером возбужденных состояний комплекса  $H_2^+$  по сравнению с изолированным водородоподобным примесным центром. Спектр примесных состояний здесь настолько

сложен, что не позволяет использовать приведенные выше статистические соотношения.

Рис. 1 показывает ограничение холловского метода нахождения  $N_K$  и  $K$  для сильно компенсированных полупроводников по данным [1]. Таким образом, на рис. 1 в области I применим холловский метод определения  $N_K$

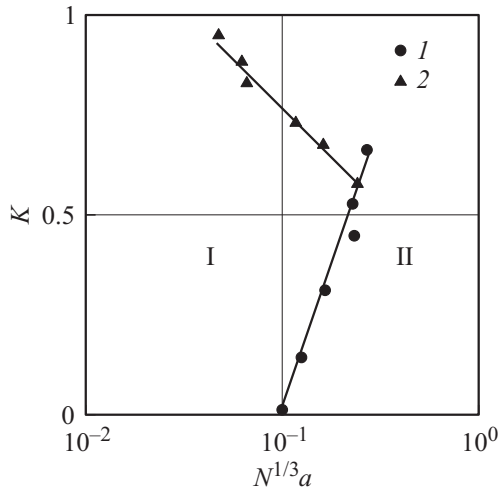


Рис. 1. Диаграмма, определяющая по  $N^{1/3}a$  и  $K$  области  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_3$  — проводимости: результат измерений Ge, Si (1) и  $p$ -InSb (2).

и  $K$ , в области II неприменим. Для определения концентрации примесей в области II могут быть использованы иные методы, в частности ряд особенностей прыжковой проводимости [2].

3. Мы рассмотрим один частный случай на примере слабо компенсированного Si:B, исследованного нами. Параметры типичных образцов представлены в таблице, зависимости  $\rho(1/T)$  — на рис. 2 (номер кривой соответствует номеру образца в таблице).

Кроме общих закономерностей, кривые  $\rho(1/T)$  имеют особенности: вслед за низкотемпературным экспоненциальным участком наблюдается „выполаживание“  $\epsilon_3$ -наклона, т.е. насыщение  $\epsilon_3$ -проводимости. Этот участок соответствует интервалу температур  $T = 10$ – $20$  К и тем сильнее выражен, чем чище образец.

Впервые на возможность возникновения участка насыщения слабокомпенсированных образцов было указано в [2]. Авторы работы [4] сделали более строгий расчет зависимости температуры начала (в низкотемпературной области) этого участка ( $T_s$ ) от параметров материала,

$$KT_s = \epsilon_3 \ln^{-1} Na/Ng,$$

что позволяет оценить степень компенсации. Выполненные таким образом оценки величины  $K$  также представлены в таблице. Видно хорошее соответствие со значениями  $K$ , полученными из холловских измерений.

Этот метод мог бы стать основным для определения степени компенсации в более легированных образцах, для которых наклон  $\rho(1/T)$  в области  $\epsilon_1$ -проводимости не соответствует энергии ионизации изолированных атомов  $\epsilon_i$ . Однако с ростом  $N_a$  участок истощения  $\rho(1/T)$  становится менее четким, „маскируясь“ проводимостью по примесям металлического типа.

Обращает на себя внимание экспериментальный результат (см. таблицу), что  $\epsilon_1 = \epsilon_i$  вплоть до  $N_a \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует сделанным выше оценкам и определяет верхнюю (по значениям концентрации  $N_a$ ) границу применимости холловской методики в слабокомпенсированном материале. (Увеличение компенсации, как видно из рис. 1, расширяет эту границу.)

Таким образом, представленная на рис. 1 диаграмма, являющаяся обобщением большого числа экспериментальных данных в Ge, Si,  $p$ -InSb, позволяет выделить область применимости холловского метода определения раздельной концентрации примесей для легированных полупроводников.

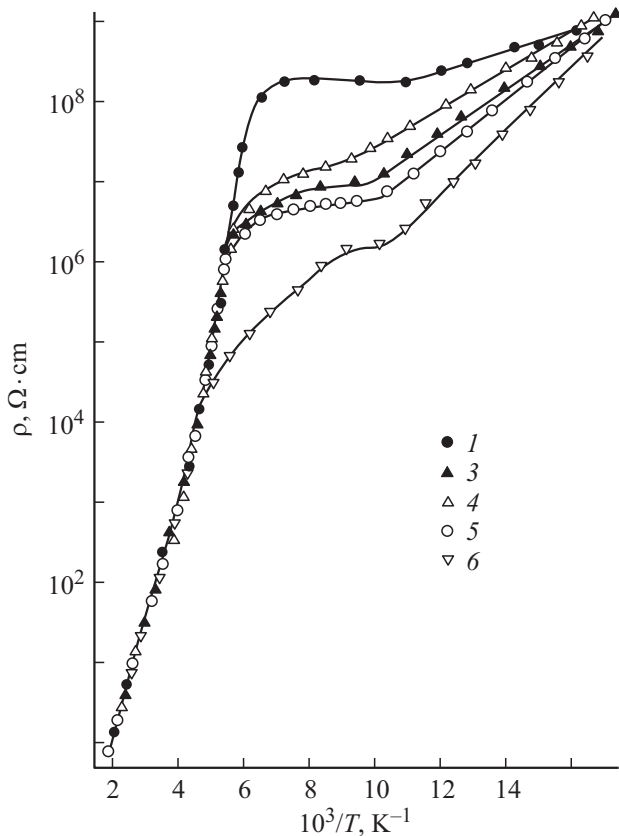


Рис. 2. Зависимость  $\rho(T)$  для образцов Si:B. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

Параметры образцов

$\epsilon_i, 10^{-2} \text{ эВ}$	$\epsilon_3, 10^{-3} \text{ эВ}$	$K, \%$ (по $R_H$ )	$K, \%$ (по $\rho$ )	$N_a - N_g, 10^{16} \text{ см}^{-3}$
4.5	3.0	2.2	2.5	2.2
4.5	3.5	0.32	0.4	3.1
4.5	4.5	0.19	0.2	6.8
4.5	4.5	0.4	0.4	7.0
4.0	6.3	0.2	—	9.4
3.3	6.8	0.1	—	1.7

## Список литературы

- [1] Л.Б. Литвак-Горская. Автореф. докт. дис. (М., 1983).
- [2] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979); *ЖЭТФ*, **60**, 867 (1971).
- [3] Г.Я. Луговая. Автореф. канд. дис. (М., 1981).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос, И.Я. Янчев. *Письма ЖЭТФ*, **14**, 348 (1971).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## Features of Hall measurements in doped semiconductors

*V.F. Bannaya*

Sholokhov Moscow State University for the Humanities,  
109240 Moscow, Russia

**Abstract** The paper discusses the limits of applicability of the Hall method of determining the separate concentrations of impurities for the special cases of doping with one main impurity. The graph is built in the coordinate plane, where the  $x$ -axis is the dimensionless parameter (because you are using different semiconductors), and the  $y$ -axis the degree of compensation of impurities. The obtained curve is a generalization of the available literature experimental data and the results of the current study of poorly compensated Si. The obtained curve divides the plane into two parts: in the I — Hall method of determination of the impurities concentration is applicable, in II — not applicable.