

РАВНОВЕСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЛУБОКИХ ОБЪЕМНЫХ УРОВНЕЙ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ

Шемелина О. С., Новотоцкий-Власов Ю. Ф.

Предложен метод определения всех равновесных параметров глубоких объемных уровней (РП ГОУ) — типа уровня, степени вырождения, энергии, концентрации из температурной зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ — и получены критерии необходимой точности экспериментальных измерений для обеспечения однозначной интерпретации результатов. На серии образцов p -InSb проведены измерения $\rho(T)$ в диапазоне $78 \div 160$ К в условиях, когда отклонения снимаемых значений температуры T от стационарных не превышают ± 0.01 К. С привлечением литературных данных по примесному поглощению и примесной фотопроводимости в InSb определены все РП трех доминирующих ГОУ. Эта система ГОУ одинакова для всех исследованных образцов и не зависит от технологии изготовления материала, что позволяет говорить о ее биографическом происхождении.

Введение. Сейчас наиболее популярным методом изучения глубоких уровней (ГОУ) стал DLTS [1]. Этот метод удобен для экспрессной оценки ряда параметров ГОУ, как равновесных, так и кинетических. Однако DLTS принципиально не может определять такие фундаментальные параметры ГОУ, как тип уровня (ТУ) (донор—акцептор) и его степень вырождения g_i . В то же время, как было показано в [2], температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда (ТЗК СНЗ) чувствительна ко всем равновесным параметрам ГОУ, РП ГОУ, в том числе ТУ и g_i .

Наиболее активно методом ТЗК СНЗ исследовались РП ГОУ в InSb (табл. 1). Однако во всех цитированных работах ТУ и g_i постулировались. Обращает на себя

Таблица 1

Параметры ГОУ в p -InSb по данным электрофизических работ

Литературный источник	Год публикации	p (77 К)	ГОУ-1				ГОУ-2			
			$E_i - E_V$	N_i	тип	g_i	$E_i - E_V$	N_i	тип	g_i
[3]	1961	60—300	55	8	D	2	120	8	D	2
[4]	1962	0.25	—	—	—	—	106	13	A	2
[5]	1966	1—10	—	—	—	—	100	10	D	2
[6]	1967	0.4	—	—	—	—	120*	—	D	2
[7]	1967	15	71	0.5	D	2	110	13	D	2
[8]	1073	0.2	71*	2.5	D	2	132*	12	D	2
[9]	1973	0.1—0.5	65	1—8	A	4	120	100—200	A	4
[10]	1975	5—20	65	1—4	D	1	120	10—40	A	4
[11]	1976	—	—	—	—	—	90	1—7	D	2

Примечание. Концентрации даны в единицах 10^{13} см^{-3} , энергии — в эВ. * Оценка по энергии активации.

внимание не только большой разброс в значениях РП ГОУ, но и разное число ГОУ в этих работах.

Анализа причин этого в литературе нет. Неопределенность литературных данных о РП ГОУ привела к широкому распространению мнения, что разные образцы InSb обладают разными системами ГОУ, иными словами, что ГОУ в

InSb носят случайный характер. Такая позиция плохо согласуется с воспроизводимостью фотоэлектрических характеристик материала, а также с данными оптических работ.

Из анализа [12] экспериментальных данных оптических работ [5, 13, 14] следует, что они дают совпадающие значения энергий нескольких ГОУ E_j и их температурных коэффициентов γ_j (табл. 2). Оговорка об анализе эксперимен-

Таблица 2
 Параметры ГОУ в InSb по данным оптических работ

Тип ГОУ	$E_j - E_V$ (77 К), мэВ	γ_j , мэВ/К	Литературный источник
ГОУ-1	65 ± 3	0.06 ± 0.02	[14]
ГОУ-2	99 ± 2	0.14 ± 0.01	[4, 14]
ГОУ-3	130 ± 2	0.04 ± 0.02	[14, 15]

тальных данных существенна, так как интерпретация, даваемая авторами, подчас ошибочна.

В настоящей работе приводятся результаты анализа решений прямой и обратной задач. Под прямой задачей понимается реакция ТЗК СНЗ на РП ГОУ, а под обратной — определение РП ГОУ из ТЗК СНЗ. Из анализа результатов модельных экспериментов делаются выводы о причинах некорректности данных электрофизических работ по РП ГОУ и предлагается корректный метод определения РП ГОУ.

Результаты применения этого метода к определению РП ГОУ в InSb приводятся во втором разделе. В обоих разделах акцент сделан на однозначности определения ТУ и g_j .

Анализ возможностей метода ТЗК СНЗ и условий их экспериментальной реализации

Связь между РП ГОУ и равновесной концентрацией свободных носителей заряда определяется уравнением электронейтральности, которое для дальнейшего анализа удобно записать в виде

$$p - n = N_A - N_D - \sum N_{jD} + \sum \frac{N_j}{1 + \exp \frac{E_{j\text{eff}} - F}{kT}}, \quad (1)$$

где

$$E_{j\text{eff}} \equiv E_j \pm kT \ln g_j, \quad (2)$$

знак «+» относится к акцепторам, а знак «-» — к донорам, p , n — концентрации свободных дырок и электронов; N_A , N_D — суммарные концентрации акцепторов и доноров, полностью ионизованных в условиях эксперимента; N_{jD} — концентрация j -го ГОУ донорного типа; N_j , E_j , g_j — концентрация, энергия и степень вырождения j -го ГОУ; F — положение уровня Ферми; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Вводя в явном виде зависимость E_j от температуры

$$E_j = E_{j0} - \gamma_j T, \quad E_{j0} \equiv E_j(0 \text{ К}),$$

запишем (2) как

$$E_{j\text{eff}} \equiv E_{j0} - \gamma_j T \pm kT \ln g_j. \quad (3)$$

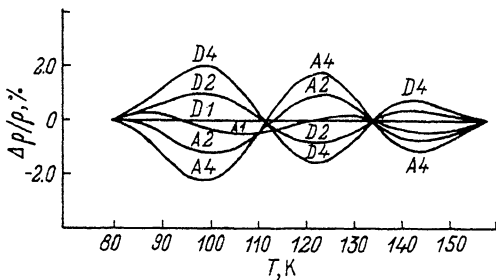


Рис. 1. Решение обратной задачи для модели одного ГОУ.

Буквы у кривых обозначают тип ГОУ, цифры — g_j . Модельная кривая считалась для случая D_j .

В случае $\gamma_j = 0$ $E_{j \text{ eff}}$ является однозначной функцией типа уровня и степени его вырождения. В условиях фермиевской статистики для ГОУ каждому $E_{j \text{ eff}}$ соответствует своя зависимость $p-n = f(T)$ [см. (1)]. Таким образом, в этом случае существует однозначная связь между РП ГОУ и ТЗК СНЗ. По-видимому, неверный вывод работы [15] о нечувствительности ТЗК СНЗ к типу ГОУ связан с ошибками при математических преобразованиях уравнения электронейтральности.

В реальном случае $\gamma_j \neq 0$ однозначная связь между ТУ, g_j и $E_{j \text{ eff}}(T)$ нарушается. Для однозначного определения типа и степени вырождения ГОУ необходимы данные независимых экспериментов о значениях γ_j , например, данные примесных поглощения и фотопроводимости (табл. 2).

Для анализа условий экспериментальной реализации возможностей метода ТЗК СНЗ были разработаны программы решения обратной задачи — определения РП ГОУ из зависимостей $(p-n)(T)$ либо $\rho(T)$ [12]. В них используется дифференциальный способ сравнения теории с экспериментом, в котором анализируются отклонения от нуля относительной разности сравниваемых зависимостей:

$$\frac{\Delta f}{f} \equiv \frac{f_{\text{эксп}} - f_{\text{теор}}}{f_{\text{теор}}},$$

где f — анализируемая функция $(p-n)(T)$ либо $\rho(T)$. Этот метод не ограничивает точности сравнения, как традиционный метод графического сопоставления.

По программе решения обратной задачи (РОЗ) обрабатывались расчетные ТЗК СНЗ, моделирующие различные экспериментальные ситуации. Здесь приводятся некоторые результаты для InSb.

Моделирование случая одного ГОУ позволяет оценить максимально возможное влияние ГОУ на ТЗК СНЗ (рис. 1). Видно, что в этом наиболее благоприятном варианте можно однозначно определить ТУ и g_j , если случайная ошибка при измерениях ρ не превышает 1%.

В реальной ситуации нескольких ГОУ требования к точности измерений существенно возрастают. Был промоделирован случай трех ГОУ в p -InSb. При этом анализировались условия однозначного определения числа ГОУ и условия однозначного определения РП ГОУ.

На рис. 2 приведен результат обработки в модели одного ГОУ по программе РОЗ модельной кривой $\rho(T)$, рассчитанной для случая трех ГОУ. Как видно, максимальное отклонение теоретической кривой от модельной равно 0.3% в условиях отсутствия ошибок.

В свете этого результата становится понятным расхождение в числе ГОУ у разных авторов (табл. 1). При интерпретации данных в литературе используется исключительно способ графического сопоставления теории с экспериментом. Графический способ может фиксировать совпадение кривых с точностью ~1%,

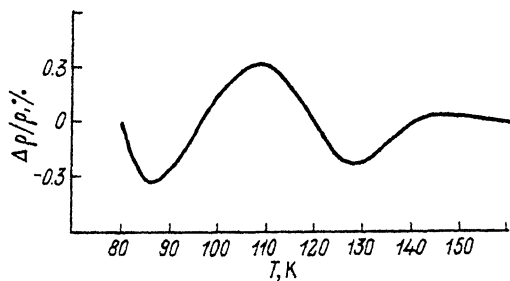


Рис. 2. Описание модельной кривой $\rho(T)$ для трех ГОУ, теоретической кривой для одного ГОУ. Параметры модельной кривой: $A_2-D_2-D_2$; $E_j - E_v = 75, 100, 125$ мэВ; $N_j = 5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$; $\gamma_j = 0$. Параметры теоретической кривой: A_2 ; $E_j - E_v = 80.1$ мэВ; $N_j = 1.64 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$; $g_j = -0.24$ мэВ/К.

которая явно недостаточна для индентификации числа ГОУ, не говоря уже об определении их РП.

Для оценки влияния ошибок измерения на однородность определения РП ГОУ считались модельные кривые $p-n=f(T)$ и $\rho(T)$ с введением соответствующих ошибок, которые затем обрабатывались по программе РОЗ [2, 12].

Моделирование систематических ошибок показало, что допустимые ошибки в определении концентрации СНЗ должны быть меньше 5%. До сих пор все измерения ТЗК СНЗ на InSb проводились методом Холла, а при обсчете холл-фактор принимался равным единице, хотя все эксперименты проводились при полях, меньших 25 кГс. В этих условиях систематическая ошибка в определении концентрации свободных носителей заряда достигает десятков процентов, что делает невозможным однозначное определение РП ГОУ.

Корректная, с этой точки зрения, ТЗК СНЗ может быть получена при измерениях $\rho(T)$ [2, 12]. При измерении $\rho(T)$ систематическая ошибка по ρ связана только с погрешностями в определении размеров образца, а она не превышает 1%. Для получения ТЗК СНЗ из $\rho(T)$ нужно знать температурные зависимости решеточных подвижностей $\mu_{pL}(T)$ и $\mu_{nL}(T)$. Для InSb такие данные в литературе имеются [4, 16]. Заметим, что $\rho(T)$, помимо РП ГОУ, позволяет раздельно определять концентрации мелких доноров и акцепторов [2, 12].

Модельные эксперименты позволили выявить причины разброса данных табл. 1. Основными причинами являются использование графического метода сравнения теории с экспериментом и неопределенность холл-фактора при использовании метода $R_H(T)$. Для задачи определения РП ГОУ из ТЗК СНЗ более предпочтительным оказывается метод $\rho(T)$.

Экспериментальное определение РП ГОУ в p -InSb

Методика. В эксперименте измерялась зависимость $\rho(T)$ на образцах p -InSb в диапазоне температур 78÷160 К.

Моделирование показало, что при измерениях $\rho(T)$ основным источником ошибок в определении РП ГОУ являются случайные ошибки, основной причиной которых является нестационарность снимаемых точек по температуре. Для однозначного определения РП ГОУ отклонения снимаемых значений T от стационарных не должны превышать ± 0.01 К.

Степень нестационарности снимаемых точек по температуре характеризуется допустимой скоростью дрейфа температуры $(dT/dt)_{\max}$ в момент снятия «стационарной» точки. Из серий контрольных измерений было определено, что в нашей системе критерий $|T_{\text{изм}} - T_{\text{стац}}| < 0.01$ К выполняется в условиях $(dT/dt)_{\max} = 0.005$ К/мин.

С учетом этих результатов была разработана измерительная установка, управляемая ЭВМ «Искра-226». Датчиком температуры служил пленочный алюминиевый термометр сопротивления Al-TC [17], нанесенный на пластину

Рис. 3. Экспериментальные кривые $\rho(T)$ для нескольких образцов p -InSb.

1 — 1E7, 2 — 167, 3 — T89, 4 — T13, 5 — 1C6, 6 — T48.

держателя образца. Чтобы минимизировать разность температур между Al-TС и образцом InSb, пластины держателя изготавливались из лейкосапфира, обладающего большой теплопроводностью при рабочих температурах. В рабочем диапазоне температур чувствительность Al-TС составляет $5 \div 7$ Ом/К, что позволяет уверенно фиксировать изменения температуры $\Delta T = \pm 0.002$ К.

Образцы p -InSb с $\rho(77 \text{ K}) = 2 \cdot 10^{12} \div 1 \cdot 10^{14}$ см⁻³ вырезались из слитков, легированных Ge. Слитки были выращены по двум технологиям [18]: по методу Чохральского с предварительной зонной очисткой и с многократным вытягиванием по Чохральскому. Размеры образцов перед травлением $20 \times 5 \times 1$ мм, ориентация больших граней {211}.

Химическое травление InSb создает приповерхностный слой пространственного заряда ОПЗ, обогащенный дырками [19]. Проводимость этого слоя $\sigma_{\text{опз}}$ может внести заметный вклад в суммарную проводимость образца. Влияние $\sigma_{\text{опз}}$ на определение РП ГОУ было исследовано в работе [12].

Чтобы минимизировать вклад $\sigma_{\text{опз}}$ в суммарную проводимость образца, до измерений $\rho(T)$ проводилась термообработка образца в рабочем вакууме при 400 К в течение двух часов¹ [20], так что практически исключалось влияние поверхности на определение РП ГОУ. Для контроля ситуации служил эффект поля.

Типичные экспериментальные кривые $\rho(T)$ показаны на рис. 3.

Определение числа ГОУ. Чтобы определить число ГОУ, экспериментальные кривые обрабатывались по программе РОЗ в моделях двух и трех ГОУ.²

Выбор ТУ ГОУ был основан на литературных данных по фотоэлектрике, которые говорят о доминировании в InSb ГОУ донорного типа [3] и о возможном существовании акцепторного ГОУ в нижней половине запрещенной зоны [21]. Для всех ГОУ принималось $g_j = 2$, а γ_j соответствовали табл. 2.

В первом варианте (табл. 3) рассматривался случай двух уровней — акцептора и донора, во втором — двух доноров, в третьем — акцептора и двух доноров.

Как видно из рис. 4, в обоих вариантах с двумя ГОУ регулярные отклонения $\Delta\rho/\rho$ от нуля по меньшей мере на порядок величины превышают отклонения за счет случайных ошибок в экспериментальном массиве $\rho(T)$. В варианте трех ГОУ отклонения $\Delta\rho/\rho$ от нуля носят случайный характер. Параметры теоретических кривых приведены в табл. 3. Здесь S — среднее абсолютное отклонение теоретической кривой от экспериментальной:

$$S \equiv \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|\Delta\rho_j|}{\rho_j},$$

где N — число экспериментальных точек.

¹ Такая термообработка не влияет на объемные свойства материала

² Обработка экспериментальных кривых в модели четырех ГОУ дает $N_4 \ll N_1, N_2, N_3$, т. е. сводится к варианту трех ГОУ.

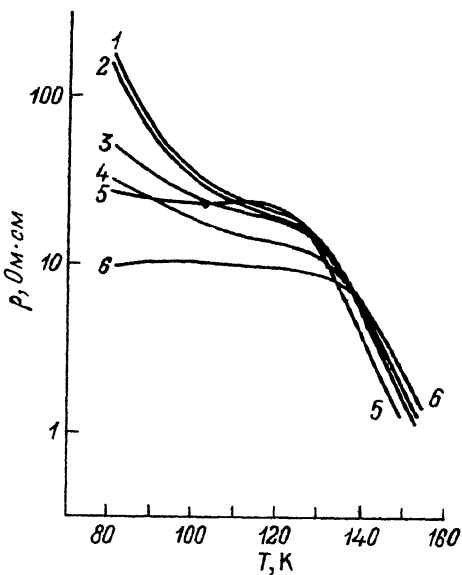


Таблица 3

Параметры теоретических кривых (к рис. 4)

№ образца	Модель	S, %	$E_1 - E_V$ мэВ	$E_2 - E_V$ мэВ	$E_3 - E_V$ мэВ	N_1	N_2	N_3
1	ГОУ-1 + ГОУ-2	0.262	83.1	108.5	—	12.2	-0.03	—
2	ГОУ-2 + ГОУ-3	0.437	—	95.0	121.0	—	9.3	2.6
3	ГОУ-1 + ГОУ-2 + + ГОУ-3	0.018	75.3	99.7	134.0	3.4	7.4	1.8

Концентрации ГОУ даны в единицах 10^{13} см^{-3} , энергии — для 77 К.

Заметим, что обработка по варианту, принятому в литературе (ГОУ-1 + ГОУ-2) дает $N_2 = 0$, т. е. описывает всю кривую $\rho(T)$ одним ГОУ акцепторного типа, что противоречит результатам фотоэлектрических измерений и совпадает с результатами работы [4] (табл. 1).

Однако существует принципиальная разница в условиях получения этих результатов. В работе [4] γ_j, g_j, T_U использовались в качестве свободных параметров. По существу такой способ обработки эксперимента демонстрирует, с какой точностью можно описать систему нескольких ГОУ одним эффективным ГОУ.

В нашем случае значения γ_j, g_j, T_U для всех ГОУ фиксированы. Единственным допущением при этом варианте обработки экспериментальных массивов является пренебрежение вкладом ГОУ-3. Учет ГОУ-3 снимает противоречие с фотоэлектрическими работами (табл. 3).

При измерениях ТЗК СНЗ принятым в литературе методом Холла обнаружение ГОУ-3 весьма проблематично, поскольку его вклад в ТЗК СНЗ попадает в окрестности точки инверсии знака эффекта Холла (см. [2]).

Определение РП ГОУ. Для определения РП трех ГОУ использовались измерения $\rho(T)$ на образцах $p\text{-InSb}$ с $p(77 \text{ К}) = 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$. При такой степени легирования обеспечивается условие пересечения уровней Ферми всех $E_{j \text{ eff}}$ в диапазоне температур $78 \div 160 \text{ К}$.

При обработке экспериментальных массивов $\rho(T)$ по программе РОЗ задавались значения γ_j , полученные оптическими методами (табл. 2). При этих значениях γ_j осуществлялся перебор $T_U (A-D)$ и $g_j (2-4)$ каждого из трех ГОУ. Хотя общее число вариантов перебора 64, программа РОЗ составлена так, что циклов счета всего 7. В каждом цикле определялись E_j, N_j, N_A, N_D . Искомые РП трех ГОУ соответствовали циклу с минимальным значением среднего абсолютного отклонения теоретических кривых от экспериментальных S (табл. 4).

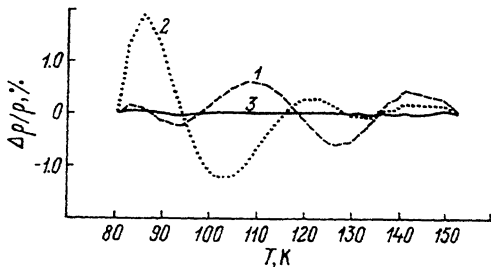


Рис. 4. Описание экспериментальной кривой $\rho(T)$ моделями двух и трех ГОУ (образец $T13$).

Параметры теоретических кривых представлены в табл. 3.

Таблица 4

Параметры теоретических кривых (к рис. 5)

№ образца	Тип и степень нахождения ГОУ			S, %	$E_1 - E_V$, мэВ	$E_2 - E_V$, мэВ	$E_3 - E_V$, мэВ	N_1	N_2	N_3	N_A	N_D	$\frac{H_D}{B} \cdot c$
	1	2	3										
1	D2	D2	D2	0.0176	62.6	99.0	131.8	2.38	7.13	2.21	30.0	9.6	7602
2	A2	D2	D2	0.0136	73.6	99.0	132.5	3.22	6.60	2.11	26.9	9.7	7734
3	A4	D2	D2	0.0117	69.5	98.9	133.6	3.79	6.21	2.01	26.4	9.8	7755
4	A4	A2	D2	0.0434	38.2	84.5	139.8	3.35	10.16	1.78	17.3	10.2	8090
5	A4	D4	D2	0.0152	71.5	105.8	133.4	5.40	4.72	1.94	25.0	10.0	7825
6	A4	D2	A2	0.0131	69.1	98.7	115.8	3.60	6.30	2.09	25.9	11.1	7783
7	A4	D2	D4	0.0126	69.7	99.0	141.6	3.91	6.14	1.87	26.3	9.9	7761

Все концентрации даны в единицах 10^{13} см^{-3} , энергии ГОУ — для 77 К.

Для всех обработанных экспериментальных массивов $\rho(T)$ предпочтительным оказался вариант A4—D2—D2, т. е. ГОУ-1 является четырежды вырожденным акцептором, а ГОУ-2 и ГОУ-3 — дважды вырожденными донорами. На этот вывод не влияют возможные ошибки в определении значений γ_j оптическими методами. Выбор ТУ и g_j для ГОУ-1 и ГОУ-2 может быть также сделан из визуального сравнения дифференциальных кривых $\Delta\rho/\rho$ (рис. 5).

Как видно из сравнения табл. 4 и 2, значения E_j для выбранного по минимуму величины S варианта типа и степени вырождения трех ГОУ лучше всего согласуются с данными оптических методов. Это совпадение является независимым подтверждением правильности выбора ТУ и g_j каждого из трех ГОУ. В других вариантах расхождения в значениях E_j превышают суммарные ошибки нашего и оптических экспериментов.

Тип и степень вырождения этих трех ГОУ одинаковы для всех исследованных образцов, а значения энергий совпадают с точностью до ошибок эксперимента. От образца к образцу изменяются только концентрации уровней, причем концентрация ГОУ-2, как правило, выше, чем концентрации ГОУ-1 и ГОУ-3 (табл. 5).

Поскольку основным источником ошибок в определении РП ГОУ являются случайные ошибки эксперимента, на каждом образце снималась серия кривых $\rho(T)$. По программе РОЗ было обработано несколько десятков кривых. Усредненные данные по всем кривым $\rho(T)$ представлены в табл. 5.

Из совместного анализа полученных нами данных о РП ГОУ и концентрациях мелких доноров и акцепторов, литературных данных по концентрации и

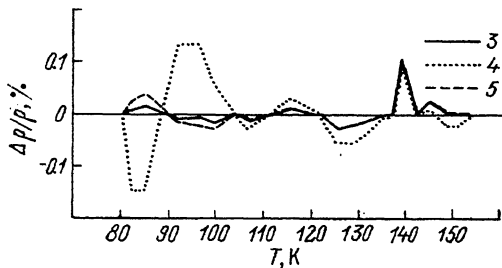


Рис. 5. Характерный вид дифференциальных кривых при вариациях ТУ и g_j для ГОУ-2 (образец Т48).

Номера кривых соответствуют номерам циклов счета. Параметры теоретических кривых представлены в табл. 4. Выброс при $T = 140$ К соответствует ошибке в измерении температуры величиной 0.013 К.

Таблица 5

Равновесные параметры доминирующих ГОУ в p -InSb

ГОУ	Тип	g_j	$E_j - E_v$ (77 К), мэВ	N_j , см ⁻³
1	A	4	68±2	(3+4) · 10 ¹³
2	D	2	99±0.5	(6+8) · 10 ¹³
3	D	2	132±3	(2+3) · 10 ¹³

подвижности электронов в «чистом» n -InSb [18], а также данных известных фотоэлектрических измерений на n - и p -InSb [3, 21] можно заключить, что исследованные в нашей работе ГОУ являются доминирующими по концентрации во всей запрещенной зоне InSb.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Показано, что температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда несет информацию о всех РП ГОУ в условиях, когда температура, при которой уровень Ферми пересекает эффективный уровень ГОУ, находится внутри рабочего диапазона температур. Для однозначного определения типа ГОУ и его степени вырождения необходимо знание температурного коэффициента энергии ГОУ, что может быть получено из измерений примесных поглощения и фотопроводимости.

2. Показано, что случайные ошибки при измерениях, превышающие 0.5%, либо использование графического сравнения теории и эксперимента качественно искажают результаты, не позволяя однозначно определить не только РП ГОУ, но и число ГОУ. Однозначное определение РП ГОУ в InSb для случая трех ГОУ возможно, если отклонения снимаемых значений температуры T от стационарных не превышают ± 0.01 К.

3. Определены все равновесные параметры трех ГОУ в InSb. Эти три ГОУ являются доминирующими в InSb по концентрации. Три параметра уровней — тип, степень вырождения, энергия — одинаковы для всех исследованных образцов и не зависят от технологии изготовления материала, что позволяет говорить о единой системе ГОУ, которая свойственна самому материалу и имеет биографическое происхождение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [2] Новотоцкий-Власов Ю. Ф., Шемелина О. С. // Препринт ИФП СО АН СССР. Новосибирск, 1988. № 26—88.
- [3] Laff R. A., Fan H. V. // Phys. Rev. 1961. V. 121. N 1. P. 53—62.
- [4] Cunningham R. W., Harp E. E., Bullis M. B. // Proc. Int. Conf. Phys. Semicond. Exeter, 1962. P. 732—736.
- [5] Барышев Н. С., Вдовкина Е. Е., Мартынович А. П., Несмелова Н. М., Цицина Н. П., Аверьянов И. С. // ФТП. 1966. Т. 7. В. 7. С. 2258—2260.
- [6] Волков А. С., Галаванов В. В. // ФТП. 1967. Т. 2. В. 2. С. 163—171.
- [7] Hollis G. E., Choo S. C., Heasell E. L. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 4. P. 1626—1636.
- [8] Баев И. А. // Докл. АН Болгарии. 1973. Т. 26. В. 12. С. 1603—1606.
- [9] Галаванов В. В., Ивченко Е. Л., Одинг В. Г. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 10. С. 798—801.
- [10] Галаванов В. В., Одинг В. Г. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 10. С. 2013—2016.
- [11] Kanazaki K., Miyaou W. // J. Appl. Phys. Japan. 1976. V. 15. N 1. P. 1113—1116.
- [12] Шемелина О. С., Новотоцкий-Власов Ю. Ф. // Препринт ИФП СО АН СССР. Новосибирск, 1989. № 41—89. 54 с.
- [13] Валашко Е. Г., Плескачева Т. Б. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 4. P. 836—839.
- [14] Колчанова Н. М., Сиповская М. А., Сметанникова Ю. С. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 12. С. 2194—2196.
- [15] Look D. C., Sizelove J. R. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. N 4. С. 1650—1651.
- [16] Hrostovski H. J., Morin F. J., Geballe T. H., Wheatley G. H. // Phys. Rev. 1955. V. 100. N 6. P. 1672—1676.
- [17] Шемелина О. С., Новотоцкий-Власов Ю. Ф., Черепанов В. Я. // ПТЭ. 1986. № 4. С. 200—202.

- [18] Ивлева В. С., Ольховикова Т. И., Слободина Е. Н., Халимов Ф. Р. // Обзоры по эл. технике. Сер. 66. Материалы. 1982. № 2. С. 43.
- [19] Бриллиантов Э. И., Коротков А. В., Новоцкий-Власов Ю. Ф. // Электронная техника. Материалы. 1969. № 6. С. 61—63.
- [20] Бриллиантов Э. И., Новоцкий-Власов Ю. Ф. // ФТП. 1968. Т. 2. В. 9. С. 1393.
- [21] Коротин В. Г., Кривоногов С. Н., Наследов Д. Н., Сметанникова Ю. С. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 1. С. 20—24.

Институт физики полупроводников СО РАН
Новосибирск

Получена 17.07.1991
Принята к печати 4.12.1991
