

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. SEMICONDUCTORS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24, № 3. С. 153—161.
DOI: 10.17073/1609-3577-2021-3-153-161

УДК 621.315.592

Сравнение результатов оптических и электрофизических измерений концентрации свободных электронов в образцах n -InAs

© 2021 г. Т. Г. Югова✉, А. Г. Белов, В. Е. Каневский, Е. И. Кладова,
С. Н. Князев, И. Б. Парфентьева

*АО «Государственный научно-исследовательский
и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет»,
Электродная ул., д. 2, Москва, 111524, Россия*

✉ Автор для переписки: P_Yugov@mail.ru

Аннотация. Разработана теоретическая модель, позволяющая определять концентрации свободных электронов в образцах n -InAs по характеристическим точкам на спектрах отражения в дальней инфракрасной области. Показано, что при этом необходимо учитывать плазмон–фононное взаимодействие (в противном случае значение концентрации электронов оказывается завышенным). Получена расчетная зависимость концентрации электронов $N_{\text{опт}}$ от характеристического волнового числа ν_+ , которая описывается полиномом третьей степени. Исследовались образцы арсенида индия, легированные оловом или серой. При комнатной температуре были проведены измерения концентрации электронов двумя способами: с помощью разработанного авторами оптического метода ($N_{\text{опт}}$) и по традиционной четырехконтактной холловской методике (метод Ван–дер–Пау, $N_{\text{холл}}$). Отражающие поверхности образцов обрабатывались с помощью химической полировки или шлифовки на мелкозернистом абразивном материале. Показано, что для всех исследованных образцов выполняется условие: $N_{\text{опт}} > N_{\text{холл}}$. Различие между оптическими и холловскими значениями концентрации электронов больше в случае полированной отражающей поверхности образца. Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными более ранними данными для образцов n -GaAs. Предложена качественная модель, объясняющая полученные экспериментальные результаты.

Ключевые слова: арсенид индия, концентрация электронов, эффект Холла, спектр отражения, плазмон–фононное взаимодействие

Для цитирования: Югова Т.Г., Белов А.Г., Каневский В.Е., Кладова Е.И., Князев С.Н., Парфентьева И.Б. Сравнение результатов оптических и электрофизических измерений концентрации свободных электронов в образцах n -InAs. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(3): 153—161. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-153-161>

Comparison between optical and electrophysical data on free electron concentration in n -InAs samples

T. G. Yugova✉, A. G. Belov, V. E. Kanevskii, E. I. Kladova,
S. N. Knyasev, I. B. Parfent'eva

*Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC)
2 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russia*

✉ Corresponding author: P_Yugov@mail.ru

Abstract. A theoretical model has been developed for determining free electron concentration in n -InAs from characteristic points in far infrared region of reflection spectra. We show that when determining free electron concentration one should take into account the plasmon–phonon coupling, otherwise free electron concentration will be overestimated. We have calculated electron concentration, N_{opt} , as a function of characteristic wave number, ν_+ , which is described by a third order polynomial.

Twenty one n -InAs samples (5-doped with tin and 16-doped with sulfur) have been tested at room temperature for electron concentration using two methods, i.e., the conventional four-probe (Van der Pau) method (N_{Hall}) and the optical method developed by us (N_{opt}). The reflective surfaces of investigated samples were processed either with chemical–mechanical polishing or treating with short-grained abrasive powder.

It was shown that for all the investigated samples the condition $N_{\text{opt}} > N_{\text{Hall}}$ was relevant. The difference between optical and electrophysical electron concentration values has been shown to be greater in case of chemically polished reflective surface of the sample and smaller in case of abrasive-treated one. The experimental results have been compared with the same data previously obtained for n -GaAs samples. Qualitative model has been suggested to explain obtained experimental data.

Keywords: indium arsenide, electron concentration, Hall-effect, reflection spectra, plasmon–phonon coupling

For citation: Yugova T.G., Belov A.G., Kanevskii V.E., Kladova E.I., Knyasev S.N., Parfent'eva I.B. Comparison between optical and electrophysical data on free electron concentration in n -InAs samples. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(3): 153–161. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-153-161>

Введение

Если значения одного и того же параметра можно измерить разными способами, то ценность полученной информации заметно возрастает. Целесообразно сопоставить результаты измерений, принимая во внимание, что у каждого метода есть свои характерные особенности. Так например, концентрацию свободных носителей заряда в образцах полупроводниковых материалов обычно определяют, используя эффект Холла или в его классической (шестиконтактной) геометрии, или (что гораздо удобнее) применяя четырехконтактную схему (метод Ван-дер-Пау).

Для сильно легированных полупроводников наряду с эффектом Холла для определения концен-

трации свободных носителей заряда (**КСНЗ**) часто используется так называемый метод плазменного отражения, выгодно отличающийся от холловского тем, что он является бесконтактным и неразрушающим. Записывается спектральная зависимость коэффициента отражения в дальней инфракрасной (**ДИК**) области, и по положению характеристических точек определяется значение КСНЗ.

Необходимо отметить, что значения КСНЗ, полученные из электрофизических измерений, относятся ко всему объему образца. Наоборот, значения КСНЗ, полученные из оптических измерений, характеризуют только узкий приповерхностный слой исследуемого образца. Следовательно, данные, полученные этими методами, вообще говоря, могут отличаться. Так, в работе [1] на примере n -GaAs бы-

ло показано, что значения концентрации свободных электронов, рассчитанные из холловских данных ($N_{\text{холл}}$), могут быть или меньше, или больше аналогичных значений, определенных из ДИК-спектров отражения ($N_{\text{опт}}$).

В течение ряда лет на образцах различных полупроводниковых материалов мы проводим исследование возможности замены традиционных холловских измерений (требующих нанесения контактов) на более удобные и экспрессные — оптические (бесконтактные и неразрушающие).

По аналогии с работой [1], в которой исследовались образцы арсенида галлия, легированные теллуром, ниже представлены результаты оптических и электрофизических измерений образцов $n\text{-InAs}$, легированных серой и оловом.

Образцы и методы исследования

Измерения проводились на 21 образце $n\text{-InAs}$, легированных серой (16 образцов) и оловом (5 образцов). Образцы представляли собой плоскопараллельные пластины в форме квадрата со стороной 6—10 мм и толщиной 1,03—2,26 мм (табл. 1). Из монокристаллических слитков арсенида индия ориентации (100), полученных методом Чохральского, вначале вырезались пластины толщиной ~ 2 мм перпендикулярно к оси роста, после чего из пластин вырезались образцы указанного выше размера. В дальнейшем образцы подвергались механической шлифовке, а затем — химической полировке. Все измерения проводились при комнатной температуре.

При проведении электрофизических измерений в качестве материала для изготовления контактов использовался индий. На держателе размещались два образца (по одному с каждой стороны); контактные медные луженые проволоочки припаивались к соответствующим выводам держателя. Держатель с образцами помещался в зазоре между полюсами сердечника электромагнита перпендикулярно к направлению вектора индукции магнитного поля. Измерения проводились при значении магнитной индукции $B = 0,5$ Тл, через образец пропусклся ток в 200 мА. Далее вычислялись значения удельного электрического сопротивления ρ , концентрации свободных электронов $N_{\text{холл}}$ и их подвижности μ . Случайная относительная погрешность определения значения $N_{\text{холл}}$ не превышала $\pm 10\%$.

Значения $N_{\text{опт}}$ определялись по спектрам отражения в ДИК-области (плазменный резонанс) [2—6]; при этом учитывалось взаимодействие плазменных колебаний с продольными оптическими фононами (плазмон-фононное взаимодействие) [7—17]. Зависимость спектра отражения от волнового числа $R(\nu)$ записывалась в спектральном интервале 340—1000 см^{-1} с помощью фурье-спектрометра Tensor-27. Далее спектры отражения обрабатывались с помо-

щью дисперсионных соотношений Крамерса—Кронига. Вычислялись зависимости действительной $\varepsilon_1(\nu)$ и мнимой $\varepsilon_2(\nu)$ частей комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ и вычислялась зависимость мнимой части ($-1/\varepsilon$) от волнового числа: $f_1(\nu) = \text{Im}(-1/\varepsilon) = \varepsilon_2/(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)$ [18]. Эта зависимость имеет характерный колоколообразный вид с явно выраженным максимумом [18—21]. Определялось характеристическое волновое число ν_+ , отвечающее этому максимуму, и далее по полученному значению ν_+ с помощью расчетной градуировочной зависимости вычислялось значение $N_{\text{опт}}$.

Более подробно метод определения $N_{\text{опт}}$ по спектру отражения изложен в работе [1] применительно к материалу $n\text{-GaAs}$ и в работе [22] применительно к материалу $n\text{-InSb}$. При построении градуировочной зависимости $N_{\text{опт}} = f_2(\nu)$ для $n\text{-InAs}$ учитывалась непараболичность зоны проводимости InAs. Ниже приведены значения параметров, входящих в расчетные формулы:

Ширина запрещенной зоны E_g , эВ.....	0,36 [23]
Высоочастотная диэлектрическая проницаемость ε_∞	11,6 [24]
Волновое число, отвечающее частоте продольного оптического фонона $\nu_{\text{ЛО}}$, см^{-1}	243 [24]
Волновое число, отвечающее частоте поперечного оптического фонона $\nu_{\text{ТО}}$, см^{-1}	219 [24]
Матричный элемент взаимодействия зон валентной и проводимости P_{cv} , эВ · см	$8,7 \cdot 10^{-8}$ [24]

В результате была построена расчетная градуировочная зависимость концентрации электронов от характеристического волнового числа (рис. 1), которая хорошо описывается полиномом третьей степени:

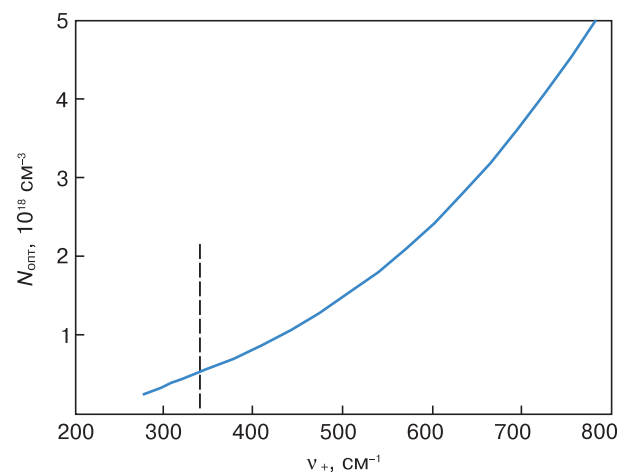


Рис. 1. Расчетная градуировочная зависимость концентрации электронов от характеристического волнового числа. Вертикальная штриховая линия — край рабочего диапазона Фурье-спектрометра Tensor-27

Fig. 1. Calculated electron concentration vs characteristic wave-number calibration curve. The vertical dotted line is the edge of the Tensor-27 Fourier spectrometer operation range

$$N_{\text{опт}} = 1,05 \cdot 10^{10}(v_+)^3 - 3,15 \cdot 10^{12}(v_+)^2 + 3,22 \cdot 10^{15}(v_+) - 6,27 \cdot 10^{17}. \quad (1)$$

Здесь $N_{\text{опт}}$ берется в см^{-3} ; v_+ — в см^{-1} .

Показано, что если плазмон–фононное взаимодействие не учитывать, то значение $N_{\text{опт}}$ оказывается завышенным, но это расхождение вблизи края рабочего диапазона фурье–спектрометра Tensor-27 (340 см^{-1}) не превосходит 10 %, а при увеличении значения v только уменьшается. Отметим, что аналогичное расхождение для $n\text{-GaAs}$ составляет 20 % [1], а для $n\text{-InSb}$ доходит до 30 % [22]. Поскольку абсолютная случайная погрешность определения значения v_+ обусловлена только разрешением спектрального прибора и составляет $\pm 2 \text{ см}^{-1}$, случайная относительная погрешность определения $N_{\text{опт}}$ не превосходит $\pm 0,6 \%$.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В табл. 1 приведены параметры исследованных образцов: толщина (d), v_+ , $N_{\text{опт}}$, $N_{\text{холл}}$ (образцы распо-

ложены в порядке возрастания значений $N_{\text{опт}}$). Здесь же представлены значения $\delta = 100 \%(N_{\text{опт}} - N_{\text{холл}})/N_{\text{опт}}$ (характеризует различие между оптическими и холловскими данными).

Как видно из табл. 1, для всех без исключения образцов выполняется условие: $N_{\text{опт}} > N_{\text{холл}}$. Максимальное значение δ наблюдается для образца № 10 (19,8 %), а минимальное — для образца № 7 (5,3 %).

На рис. 2 представлена зависимость холловской концентрации от оптической, которая описывается линейной функцией:

$$N_{\text{холл}} = 0,9002N_{\text{опт}} - 0,0309. \quad (2)$$

При проведении линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов необходимо оценить, насколько хорошо экспериментальные точки описываются линейной функцией. Критерием служит значение параметра R^2 : чем ближе оно к единице, тем лучше аппроксимация. В данном случае $R^2 = 0,9896$; это значение определено компьютерной программой в числе других параметров аппроксимации.

Из рис. 2 видно, что и образцы, легированные серой, и образцы, легированные оловом, подчиня-

Таблица 1

Параметры исследованных образцов
Parameters of test specimens

№ образца	Легированная примесь	d , мм	v_+ , см^{-1}	$N_{\text{опт}}$, 10^{18} см^{-3}	$N_{\text{холл}}$, 10^{18} см^{-3}	δ , %
1	S	1,30	369	0,660	0,564	14,5
2	S	1,50	457	1,19	1,04	12,6
3	S	1,74	491	1,43	1,28	10,5
4	Sn	1,03	496	1,48	1,27	14,2
5	S	2,26	532	1,78	1,59	10,7
6	S	1,90	538	1,83	1,59	13,1
7	S	1,77	545	1,89	1,79	5,3
8	S	1,93	573	2,15	1,93	10,2
9	Sn	1,43	591	2,34	2,14	8,5
10	S	1,39	600	2,43	1,95	19,8
11	Sn	1,24	617	2,63	2,32	11,8
12	S	1,01	635	2,84	2,44	14,1
13	S	1,57	639	2,89	2,50	13,5
14	S	2,12	656	3,09	2,79	9,7
15	S	1,47	668	3,25	2,95	9,2
16	S	1,75	673	3,31	3,11	6,0
17	Sn	1,10	677	3,36	2,98	11,3
18	S	2,17	678	3,38	3,05	9,8
19	S	1,79	683	3,44	3,09	10,2
20	S	1,92	684	3,46	3,13	9,5
21	Sn	1,32	684	3,46	2,92	15,6

Примечание: Спектры отражения сняты на полированных поверхностях.

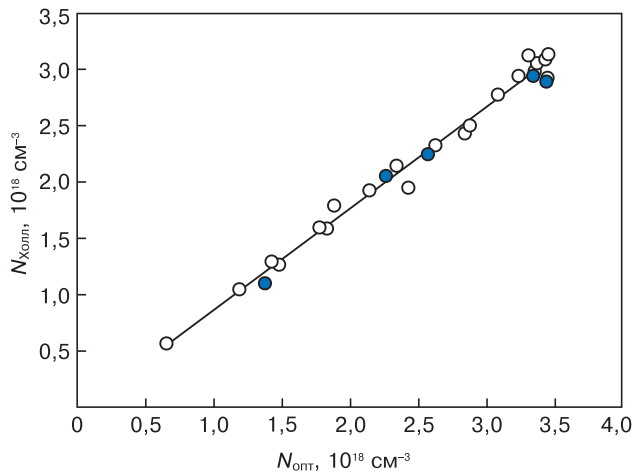


Рис. 2. Зависимость холловской концентрации от оптической:

○ — образцы, легированные серой; ● — образцы, легированные оловом

Fig. 2. Hall vs optical electron concentration:

○ sulfur-doped specimens and ● tin-doped specimens

ются одной и той же закономерности. То же самое относится и к значениям δ (см. табл. 1).

Таким образом, можно считать установленным, что имеет место расхождение между значениями $N_{Холл}$ и $N_{опт}$, при этом оно является односторонним, т. е. $N_{Холл}$ всегда меньше $N_{опт}$. Случайный фактор (разброс значений в ту или другую сторону относительно некоего среднего) также отсутствует.

Как уже упоминалось выше, для n -GaAs результат был другим: значения $N_{Холл}$ могли быть или меньше, или больше значений $N_{опт}$; равенство концентраций достигалось при значении $N_{равн} = 1,07 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [1]. В слабо легированном материале это отношение < 1 , но с увеличением концентрации теллура это отношение становится > 1 .

Такое различие в поведении легирующих примесей в монокристаллах GaAs и InAs может быть объяснено различием ширины области гомогенности этих соединений. Избыток галлия или индия определяет концентрацию вакансий мышьяка в объеме кристалла. Согласно работе [25], область гомогенности GaAs намного шире, чем у InAs; иначе говоря, концентрация вакансий мышьяка в InAs значительно ниже, чем в GaAs.

Меньшая концентрация вакансий мышьяка определяет меньшую долю электрически неактивной легирующей примеси в объеме кристалла, которая образует комплексы с вакансиями мышьяка. При измерении эффекта Холла магнитное поле разрушает эти комплексы, и примесь переходит в электрически активное состояние, увеличивая концентрацию $N_{Холл}$ [21]. Однако, поскольку доля электрически неактивной примеси невелика, то $N_{Холл}$, в отличие от кристаллов GaAs, легированных теллуrom, не может стать больше концентрации $N_{опт}$, что и наблюдается на опыте. Кроме того, концентрация вакансий мышьяка на поверхности пластины очень

мала; в результате практически вся легирующая примесь находится в электрически активном состоянии, обеспечивая максимальную концентрацию $N_{опт}$.

Ранее нами было показано [1], что для GaAs зависимость $N_{Холл}/N_{опт}$ от $N_{Холл}$ описывается параболой, причем при увеличении $N_{Холл}$ значение этого отношения стремится к единице. К сожалению, в случае InAs наблюдается заметный разброс экспериментальных точек, так что какая-либо определенная зависимость не прослеживается. Вместе с тем, тенденция к уменьшению разницы между оптическими и холловскими данными при увеличении $N_{Холл}$ сохраняется.

Известно, что при проведении оптических измерений обычно стремятся отполировать отражающую поверхность образца как можно лучше, максимально приблизив ее к зеркальной. Мы задались вопросом: что будет, если качество отражающей поверхности специально ухудшить, например, отшлифовав образец на абразивном порошке и сделав тем самым отражающую поверхность образца матовой? Насколько сильно изменятся при этом оптические параметры образца и, следовательно, значения $N_{опт}$?

Поставив перед собой такую задачу, мы провели следующий эксперимент: у четырех образцов из числа перечисленных в табл. 1, отражающие поверхности были обработаны шлифовальным порошком М10 (размер зерна — 10 мкм), и стали матовыми. Затем были записаны спектры отражения и вычислены значения $N_{опт}$, после чего были вновь повторены электрофизические измерения.

На рис. 3, а представлены спектры отражения образца № 14 (см. табл. 1), снятые на полированной (кривая 1) и на шлифованной (кривая 2) поверхностях. На рис. 3, б в том же масштабе приведены зависимости $f_1(v) = \text{Im}(-1/\epsilon)$, отвечающие спектрам отражения 1 и 2 для этого же образца.

Как видно из рис. 3, а, при ухудшении отражающих свойств поверхности спектр отражения смещается в сторону уменьшения значений волнового числа (что соответствует уменьшению значения $N_{опт}$), фронт нарастания кривой $R(v)$ размывается, а абсолютные значения коэффициента отражения уменьшаются. Следовательно, и зависимость $f_1(v) = \text{Im}(-1/\epsilon)$ размывается, а ее максимум также смещается в сторону меньших значений v . В пересчете на значения $N_{опт}$ уменьшение оказывается незначительным (см. табл. 2).

В табл. 2 приведены результаты оптических и электрофизических измерений на четырех образцах из числа перечисленных в табл. 1 (номера образцов одни и те же).

Из данных табл. 2 видно, что при переходе от полированной к шлифованной поверхности значения v_+ уменьшаются, что соответствует уменьшению значений $N_{опт}$. Уменьшаются и значения ΔN , т. е.

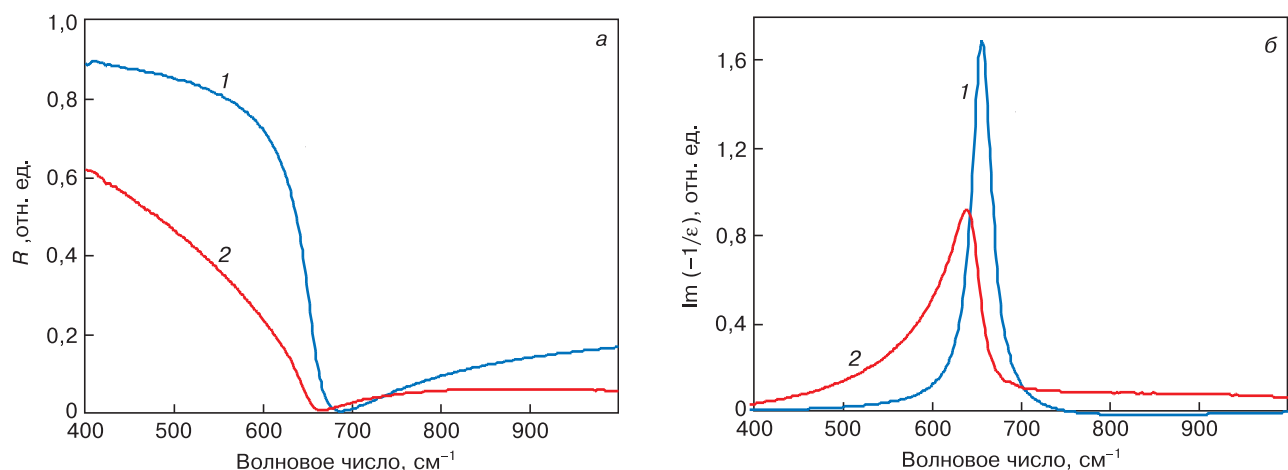


Рис. 3. Спектры отражения образца № 14 (а), снятые на полированной (1) и шлифованной (2) поверхностях, и зависимости $f_1(v) = \text{Im}(-1/\epsilon)$ (б), отвечающие спектрам отражения 1 и 2 для этого образца

Fig. 3. (a) reflection spectra of Specimen No. 14 for the polished surface (Curve 1) and the ground surface (Curve 2) and (b) $f_1(v) = \text{Im}(-1/\epsilon)$ functions for reflection spectra of Curves 1 and 2 of the same specimen

в случае шлифованной поверхности оптические данные лучше коррелируют с холловскими.

Кроме того, концентрация $N_{\text{опт}}$ для всех исследованных образцов уменьшается после шлифовки поверхности и приближается к концентрации $N_{\text{холл}}$ (см. табл. 2). Такой характер изменения концентрации $N_{\text{опт}}$ не совсем понятен, но можно предположить, что при шлифовке поверхности образца мы попадаем вглубь кристалла, где концентрация вакансий больше, чем на поверхности пластины, и легирующая примесь образует комплексы с вакансиями мышьяка. Комплексы снижают долю электрически активной примеси в объеме кристалла, что сопровождается уменьшением $N_{\text{опт}}$. Однако в любом случае $N_{\text{опт}}$ остается больше $N_{\text{холл}}$, что не совсем понятно.

Следовательно, можно утверждать, что наблюдается систематическое различие между концентрациями $N_{\text{опт}}$ и $N_{\text{холл}}$, причем первая всегда

больше последней. Это различие уменьшается при переходе от полированной отражающей поверхности к шлифованной.

Таким образом, при рассмотрении возможности замены традиционного холловского метода определения концентрации свободных электронов на более удобный — оптический необходимо учитывать результаты описанных выше экспериментов.

Заключение

Разработана теоретическая модель, позволяющая определять концентрацию свободных электронов в n -InAs ($N_{\text{опт}}$) по характеристическим точкам на спектрах отражения в ДИК-области. Показано, что при вычислении значения $N_{\text{опт}}$ необходимо учитывать плазмон-фононное взаимодействие; без этого значение $N_{\text{опт}}$ оказывается завышенным на 10 %.

Таблица 2

Результаты оптических и электрофизических измерений концентрации электронов для полированной и шлифованной отражающей поверхности образцов Optical and electrical measurement data on electron concentration for polished and ground reflecting surfaces of specimens

№ образца	Обработка отражающей поверхности	d , мм	ν_+ , см^{-1}	$N_{\text{опт}}$, 10^{18} см^{-3}	$N_{\text{холл}}$, 10^{18} см^{-3}	ΔN , 10^{17} см^{-3}
1	Полированная	1,30	369	6,60	5,64	0,96
	Шлифованная	1,14	364	6,35	5,67	0,68
10	Полированная	1,39	600	2,43	1,95	4,8
	Шлифованная	1,42	597	2,40	2,21	1,9
14	Полированная	2,12	656	3,09	2,79	3,0
	Шлифованная	2,05	639	2,89	2,69	2,0
18	Полированная	2,17	678	3,38	3,05	3,3
	Шлифованная	2,00	667	3,24	3,05	1,9

Примечание: $\Delta N = N_{\text{опт}} - N_{\text{холл}}$.

Построена расчетная зависимость концентрации электронов от характеристического волнового числа, которая описывается полиномом третьей степени.

Проведены измерения концентрации свободных электронов по спектрам отражения ($N_{\text{опт}}$) и с использованием традиционного метода Ван-дер-Пау ($N_{\text{холл}}$) при различных способах обработки отражающих поверхностей образцов: химической полировки и шлифовке на мелкозернистом абразивном ма-

териале. Показано, что всегда выполняется условие $N_{\text{опт}} > N_{\text{холл}}$, причем это различие уменьшается при переходе от полированной к шлифованной отражающей поверхности.

Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными более ранними данными для образцов GaAs, легированных теллуром. Предложена качественная модель, объясняющая полученные экспериментальные данные.

Библиографический список

1. Yugova T.G., Belov A.G., Kanevskii V.E., Kladova E.I., Knyazev S.N. Comparison between optical and electrophysical data on free electron concentration in tellurium doped n-GaAs. *Modern Electronic Materials*. 2020; 6(3): 85—89. <https://doi.org/10.3897/j.moem.6.3.64492>
2. Галкин Г.Н., Блинов Л.М., Вавилов В.С., Соломатин А.Г. Плазменный резонанс на неравновесных носителях в полупроводниках. *Письма в ЖЭТФ*. 1968; 7(3): 93—96.
3. Белогорохов А.И., Белов А.Г., Петрович П.Л., Рашевская Е.П. Определение концентрации свободных носителей заряда в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с учетом затухания плазменных колебаний. *Оптика и спектроскопия*. 1987; 63(6): 1293—1296.
4. Белогорохов А.И., Белогорохова Л.И., Белов А.Г., Рашевская Е.П. Плазменный резонанс свободных носителей заряда и оценка некоторых параметров зонной структуры материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. *Физика и техника полупроводников*. 1991; 25(7): 1196—1203. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/23491>
5. Шаров М.К. Плазменный резонанс в твердых растворах $\text{Pb}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Te}$. *Физика и техника полупроводников*. 2014; 48(3): 315—317. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27003>
6. Рокаш А.Г., Шишкин М.И., Скапцов А.А., Пузыня В.А. О возможности плазменного резонанса в пленках CdS-PbS в средней инфракрасной области спектра. *Прикладная физика*. 2014; (5): 58—60.
7. Varga B.B. Coupling of plasmons to polar phonons in degenerate semiconductors. *Phys. Rev.* 1965; 137(6A): 1896—1901. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.137.A1896>
8. Singwi K.S., Tosi M.P. Interaction of plasmons and optical phonons in degenerate semiconductors. *Phys. Rev.* 1966; 147(2): 658—662. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.147.658>
9. Shkerdin G., Rabbaa S., Stiens J., Vounckx R. Influence of electron scattering on phonon-plasmon coupled modes dispersion and free electron absorption in n-doped GaN semiconductors at mid-IR wavelengths. *Phys. Status Solidi (b)*. 2014; 251(4): 882—891. <https://doi.org/10.1002/pssb.201350039>
10. Ishioka K., Brixius K., Höfer U., Rustagi A., Thatcher E.M., Stanton C.J., Petek H. Dynamically coupled plasmon-phonon modes in GaP: an indirect-gap polar semiconductor. *Phys. Rev. B*. 2015; 92(20): 205203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.205203>
11. Володин В.А., Ефремов М.Д., Преображенский В.В., Семягин Б.Р., Болотов В.В., Сачков В.А., Галактионов Е.А., Кретинин А.В. Исследование фонон-плазмонного взаимодействия в туннельных сверхрешетках GaAs/AlAs. *Письма в ЖЭТФ*. 2000; 71(11): 698—704.
12. Kulik L.V., Kukushkin I.V., Kirpichev V.E., Klitzing K.V., Eberl K. Interaction between intersubband Bernstein modes and coupled plasmon-phonon modes. *Phys. Rev. B*. 2000; 61(19): 12717—12720. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.12717>
13. Mandal P.K., Chikan V. Plasmon-phonon coupling in charged n-type CdSe quantum dots: a THz time-domain spectroscopic study. *Nano Lett.* 2007; 7(8): 2521—2528. <https://doi.org/10.1021/nl070853q>
14. Степанов Н.П., Грабов В.М. Оптические свойства кристаллов висмут-сурьма, обусловленные электрон-плазмонным и плазмон-фононным взаимодействием. *Изв. РГПУ им. Герцена*. 2004; 4(8): 52—64.
15. Trajic J., Romcevic N., Romcevic M., Nikiforov V.N. Plasmon-phonon and plasmon-two different phonon interaction in $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ mixed crystals. *Mater. Res. Bull.* 2007; 42(12): 2192—2201. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.01.003>
16. Chudzinski P. Resonant plasmon-phonon coupling and its role in magneto-thermoelectricity in bismuth. *Eur. Phys. J. B*. 2015; 88(12): 344. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2015-60674-3>
17. Belov A.G., Denisov I.A., Kanevskii V.E., Pashkova N.V., Lysenko A.P. Determining the free carrier density in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ solid solutions from far-infrared reflection spectra. *Semiconductors*. 2017; 51(13): 1732—1736. <https://doi.org/10.1134/S1063782617130048>
18. Ю.П., Кардона М. Основы физики полупроводников. Пер. с англ. И.И. Решиной. Под ред. акад. Б.П. Захарчени. М.: Физматгиз; 2002. 560 с.
19. Виноградов Е.А., Водопьянов Л.К. Графический метод определения частот фононов из спектров отражения кристаллов в далекой инфракрасной области спектра. *Краткие сообщения по физике*. 1972; (11): 29—32.
20. Белогорохов А.И., Белогорохова Л.И. Оптические фононы в цилиндрических нитях пористого GaP. *Физика твердого тела*. 2001; 43(9): 1693—1697. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38320>
21. Югова Т.Г., Белов А.Г., Князев С.Н. Магнитоластический эффект в монокристаллах GaAs, легированных теллуром. *Кристаллография*. 2020; 65(1): 11—16. <https://doi.org/10.31857/S0023476120010270>
22. Belova I.M., Belov A.G., Kanevskii V.E., Lysenko A.P. Determining the concentration of free electrons in n-InSb from far-infrared reflectance spectra with allowance for plasmon-phonon coupling. *Semiconductors*. 2018; 52(15): 1942—1946. <https://doi.org/10.1134/S1063782618150034>
23. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках: монография. Пер. с англ. Под ред. Ж.И. Алферова, В.С. Вавилова. М.: Мир; 1973. 460 с.

24. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. Пер. с англ. Под ред. Б.И. Болтакса. М.: Мир; 1967. 480 с.

25. Бублик В.Т., Мильвидский М.Г. Собственные точечные дефекты, нестехиометрия и микродефекты в соединениях A^3B^5 . *Материаловедение*. 1997; (2): 21—29.

References

1. Yugova T.G., Belov A.G., Kanevskii V.E., Kladova E.I., Knyazev S.N. Comparison between optical and electrophysical data on free electron concentration in tellurium doped n -GaAs. *Modern Electronic Materials*, 2020; 6(3): 85—89. <https://doi.org/10.3897/j.moem.6.3.64492>
2. Galkin G.N., Blinov L.M., Vavilov V.S., Solomatina A.G. Plasma resonance on nonequilibrium carriers in semiconductors. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1968; 7(3): 93—96. (In Russ.)
3. Belogorokhov A.I., Belov A.G., Petrovitch P.L., Rashevskaya E.P. Determination of the concentration of free charge carriers in $Pb_{1-x}Sn_xTe$ taking into account the damping of plasma oscillations. *Optika i spektroskopiya*, 1987; 63(6): 1293—1296. (In Russ.)
4. Belogorokhov A.I., Belogorokhova L.I., Belov A.G., Rashevskaya E.P. Plasma resonance of free charge carriers and estimation of some parameters of the band structure of the material $Cd_xHg_{1-x}Te$. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1991; 25(7): 1196—1203. (In Russ.). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/23491>
5. Sharov M.K. Plasma resonance in $Pb_{1-x}Ag_xTe$ alloys. *Semiconductors*, 2014; 48(3): 299—301. <https://doi.org/10.1134/S1063782614030245>
6. Rokakh A.G., Shishkin M.I., Skaptsov A.A., Puzynya V.A. On the possibility of the plasma resonance in CdS – PbS films in the middle infrared region. *Prikladnaya Fizika*. 2014; (5): 58—60. (In Russ.)
7. Varga B.B. Coupling of plasmons to polar phonons in degenerate semiconductors. *Phys. Rev.*, 1965; 137(6A): 1896—1901. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.137.A1896>
8. Singwi K.S., Tosi M.P. Interaction of plasmons and optical phonons in degenerate semiconductors. *Phys. Rev.*, 1966; 147(2): 658—662. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.147.658>
9. Shkerdin G., Rabbia S., Stiens J., Vounckx R. Influence of electron scattering on phonon–plasmon coupled modes dispersion and free electron absorption in n -doped GaN semiconductors at mid-IR wavelengths. *Phys. Status Solidi (b)*, 2014; 251(4): 882—891. <https://doi.org/10.1002/pssb.201350039>
10. Ishioka K., Brixius K., Höfer U., Rustagi A., Thatcher E.M., Stanton C.J., Petek H. Dynamically coupled plasmon–phonon modes in GaP: an indirect-gap polar semiconductor. *Phys. Rev. B*. 2015; 92(20): 205203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.205203>
11. Volodin V.A., Efremov M.D., Preobrazhensky V.V., Semyagin B.R., Bolotov V.V., Sachkov V.A., Galaktionov E.A., Kretinin A.V. Investigation of phonon–plasmon interaction in GaAs/AlAs tunnel superlattices. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2000; 71(11): 698—704. (In Russ.)
12. Kulik L.V., Kukushkin I.V., Kirpichev V.E., Klitzing K.V., Eberl K. Interaction between intersubband Bernstein modes and coupled plasmon–phonon modes. *Phys. Rev. B*, 2000; 61(19): 12717—12720. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.12717>
13. Mandal P.K., Chikan V. Plasmon–phonon coupling in charged n -type CdSe quantum dots: a THz time-domain spectroscopic study. *Nano Lett.*, 2007; 7(8): 2521—2528. <https://doi.org/10.1021/nl070853q>
14. Stepanov N., Grabov V. Optical properties $Bi_{1-x}Sb_x$ crystals, related electron–plasmon and plasmon–phonon interactions. *Izv. RGPU im. Gertsena*, 2004; 4(8): 52—64. (In Russ.)
15. Trajic J., Romcevic N., Romcevic M., Nikiforov V.N. Plasmon–phonon and plasmon–two different phonon interaction in $Pb_{1-x}Mn_xTe$ mixed crystals. *Mater. Res. Bull.*, 2007; 42(12): 2192—2201. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.01.003>
16. Chudzinski P. Resonant plasmon–phonon coupling and its role in magneto–thermoelectricity in bismuth. *Eur. Phys. J. B*, 2015; 88(12): 344. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2015-60674-3>
17. Belov A.G., Denisov I.A., Kanevskii V.E., Pashkova N.V., Lysenko A.P. Determining the free carrier density in $Cd_xHg_{1-x}Te$ solid solutions from far-infrared reflection spectra. *Semiconductors*, 2017; 51(13): 1732—1736. <https://doi.org/10.1134/S1063782617130048>
18. Yu P. Y., Cardona M. Fundamentals of Semiconductors. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; 2010. 778 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00710-1>
19. Vinogradov E.A., Vodopyanov L.K. Graphical method for determining phonon frequencies from reflection spectra of crystals in the far infrared region of the spectrum. *Kratkie soobsheniya po fizike*, 1972; (11): 29—32. (In Russ.)
20. Belogorokhov A.I., Belogorokhova L. I. Optical phonons in cylindrical filaments of porous GaP. *Fizika tverdogo tela*, 2001; 43(9): 1693—1697. (In Russ.). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38320>
21. Yugova T.G., Belov A.G., Knyazev S.N. Magneto-plastic effect in Te-doped GaAs single crystals. *Crystallography Reports*, 2020; 65(1): 7—11. <https://doi.org/10.1134/S1063774520010277>
22. Belova I.M., Belov A.G., Kanevskii V.E., Lysenko A.P. Determining the concentration of free electrons in n -InSb from far-infrared reflectance spectra with allowance for plasmon–phonon coupling. *Semiconductors*, 2018; 52(15): 1942—1946. <https://doi.org/10.1134/S1063782618150034>
23. Pankove J.I. *Optical processes in semiconductors*. New York: Prentice Hall; 1971. 422 p.
24. Madelung O. Physics of III–V compounds. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1964. 409 p.
25. Bublik V.T., Milvidsky M.G. Intrinsic point defects, nonstoichiometry and microdefects in A^3B^5 compounds. *Materialovedenie*, 1997; (2): 21—29. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Югова Татьяна Георгиевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Россия; e-mail: P_Yugov@mail.ru

Белов Александр Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Россия; e-mail: IADenisov@rosatom.ru

Каневский Владимир Евгеньевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Россия

Кладова Евгения Исааковна — научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Россия

Князев Станислав Николаевич — канд. техн. наук, начальник лаборатории; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Россия; e-mail: Sn.kniazev@Yandex.ru

Парфентьева Ирина Борисовна — ведущий инженер-технолог; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Россия

Tatyana G. Yugova — Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia; e-mail: P_Yugov@mail.ru

Aleksandr G. Belov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia; e-mail: IADenisov@rosatom.ru

Vladimir E. Kanevskii — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia

Evgeniya I. Kladova — Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia

Stanislav N. Knyazev — Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia; e-mail: Sn.kniazev@Yandex.ru

Irina B. Parfenteva — Leading Engineer-Technologist; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia

*Поступила в редакцию 23.08.2021; поступила после доработки 17.09.2021; принята к публикации 30.09.2021
Received 23 August 2021; Revised 17 September 2021; Accepted 30 September 2021*

* * *