

УДК 621.315.592
EDN: NPUZSY

PACS: 81.10-h

Исследование распределения концентрации свободных электронов вдоль оси монокристалла GaAs, легированного теллуром

Н. Ю. Комаровский, А. Г. Белов, М. С. Нестюркин, Н. Г. Хихеев,
А. Н. Кузнецов, Н. А. Ларионов, Е. И. Кладова, С. Н. Князев, И. Б. Парфентьева,
Е. В. Молодцова, Д. А. Тихонов

Исследовано распределение концентрации свободных электронов вдоль оси для двух монокристаллов n-GaAs, выращенных методом Чохральского и легированных теллуром. Значение концентрации свободных электронов определялось двумя методами: традиционным холловским с использованием четырёхконтактной геометрии (метод Ван дер Пау) и с помощью разработанного авторами оптического метода, основанного на анализе спектров инфракрасного отражения. Все измерения проводились при комнатной температуре. Показано, что зависимости холловской и оптической концентраций свободных электронов от координаты вдоль оси монокристалла описываются линейными функциями. Соответственно, значения реального коэффициента распределения теллура в слитке могут заметно отличаться от общепринятого (табличного). Установлено, что холловская концентрация превышает оптическую, то есть приповерхностные слои исследованных образцов обеднены свободными электронами (по сравнению с объёмом), причём расхождение между значениями холловской и оптической концентраций увеличивается вдоль оси слитка.

Ключевые слова: арсенид галлия; теллур; распределение концентрации свободных электронов вдоль оси слитка; метод Ван дер Пау; спектры инфракрасного отражения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-62-67

Введение

Вопрос, как распределяются свободные носители заряда вдоль оси монокристалла или по площади пластины, вырезанной перпенди-

кулярно направлению выращивания, всегда представляет интерес для разработчиков полупроводникового материала. Помещая легирующую примесь непосредственно в загрузку, можно проследить её распределение в выра-

Комаровский Никита Юрьевич^{1,2}, рук. направления.
E-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

Белов Александр Георгиевич¹, в.н.с., к.ф.-м.н.

Нестюркин Михаил Сергеевич^{1,2}, рук. направления.

Хихеев Николай Германович^{1,2}, инженер.

Кузнецов Антон Николаевич³, нач. ДЦФЭ.

Ларионов Никита Александрович³, инженер 1 кат.

Кладова Евгения Исааковна¹, н.с.

Князев Станислав Николаевич¹, нач. лаб., к.т.н.

Парфентьева Ирина Борисовна¹, вед. инженер-технолог.

Молодцова Елена Владимировна¹, в.н.с., к.т.н.

Тихонов Дмитрий Александрович^{1,2}, стажер-исследователь.

¹ АО «Гиредмет».

Россия, 111524, Москва, Электродная ул., 2 стр. 1.

² НИТУ «МИСиС».

Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4, стр. 1.

³ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024

После доработки 13.11.2024

Принята к публикации 11.12.2024

© Комаровский Н. Ю., Белов А. Г., Нестюркин М. С., Хихеев Н. Г., Кузнецов А. Н., Ларионов Н. А., Кладова Е. И., Князев С. Н., Парфентьева И. Б., Молодцова Е. В., Тихонов Д. А., 2024

ценном кристалле, однако, применяемые для этого методы громоздки, дорогостоящи, а главное, не дают всей полноты картины. Даже если известен профиль распределения атомов легирующей примеси, отсутствует информация о том, вся ли примесь ионизована, имеются ли в кристалле разного рода комплексы, влияющие на электропроводность, как ведут себя электрически активные точечные дефекты и т. д.

Большой интерес представляет исследование распределения свободных носителей заряда и сопоставление полученных результатов с данными о распределении примеси вдоль оси монокристалла (если вообще можно получить такую информацию). Для этого можно использовать традиционные холловские методы, а в дополнение к ним еще и оптические. В данной работе подобный подход был использован для исследования распределения концентрации свободных электронов вдоль оси монокристалла арсенида галлия, легированного теллуrom.

Методика эксперимента

Для исследований были выбраны два монокристалла *n*-GaAs диаметром 2 дюйма, выращенные методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава в направлении [100] и легированные теллуrom.

Разделение монокристаллов GaAs на пластины проводили с помощью многопроволочной резки на установке Takatori. Полученные пластины обладали высоким качеством и оптимальными поверхностными параметрами (TTV, BOW, WARP, TIR менее 10 мкм) при низком расходе разрезаемого материала.

Полученный кристалл разрезался на пластины, ориентированные перпендикулярно оси роста. Исследуемые образцы вырезались из центральных частей пластин (рис. 1); они имели форму, близкую к квадратной, с линейными размерами (10–12) мм; толщина образцов изменялась в пределах (0,86–1,26) мм (см. таблицу). Размеры образцов выбирались исходя из следующих соображений. Линейные размеры должны быть, с одной стороны, по возможности, малыми, чтобы нивелировать электрическую неоднородность по площади образца. С другой стороны, расстояние между контактами должно быть, как минимум, на

порядок большим, чем размеры самих контактов. Этим требованиям и удовлетворяли приведенные выше размеры образцов.

Электрофизические измерения проводились с использованием стандартной четырехконтактной геометрии (метод Ван дер Пау). Контакты припаивались оловом в торец по углам образца. На каждой стороне двустороннего держателя монтировалось по одному образцу. Держатель с образцами помещался в зазор между полюсами сердечника электромагнита перпендикулярно направлению вектора магнитной индукции. Измерения удельного электрического сопротивления проводились в отсутствие магнитного поля; ЭДС Холла измерялась при значении индукции магнитного поля $B = 0,5$ Тл; значение силы тока через образец составляло 200 мА.

В дополнение к электрофизическим, на тех же образцах проводились и оптические измерения концентрации свободных электронов. Ранее в Гиредмете был разработан метод определения концентрации свободных носителей заряда (КСНЗ) в сильно легированных полупроводниковых материалах по спектрам отражения в инфракрасной области. Суть метода состоит в следующем. Записывается спектр отражения в средней или дальней области (в зависимости от возможностей спектрального прибора). Полученный спектр обрабатывается с помощью соотношений Крамерса-Кронига, после чего вычисляются спектральные зависимости действительной, ϵ_1 , и мнимой, ϵ_2 , частей комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ и строится так называемая «функция потерь»:

$$LF = \text{Im}(-1/\epsilon) = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}. \text{ Частотная зави-}$$

симость этой функции имеет характерный колоколообразный вид с явно выраженным максимумом, которому отвечает характеристическое волновое число, ν_+ . По значению ν_+ с помощью расчетной градуировочной кривой определяется значение КСНЗ.

Подробнее оптический метод определения концентрации свободных электронов в образцах материала *n*-GaAs изложен в работах [1, 2].

Все измерения проводились при комнатной температуре. Образцы измерялись не все подряд, а каждый четвертый.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В работе исследованы два монокристалла *n*-GaAs, на одном из которых (№ 1) были выполнены только электрофизические измерения, а на другом – и оптические, и электрофизические (№ 2). Значения оптической концентрации электронов, $N_{\text{опт}}$, для образцов из монокристалла № 1 определить не удалось, так как значения характеристического волнового числа лежали за пределами рабочего диапазона нашего спектрального прибора (Tensor 27).

В таблице представлены параметры исследованных образцов. За начало координат ($x = 0$) принята плоскость, отвечающая цилиндрической части монокристаллов (рис. 1).

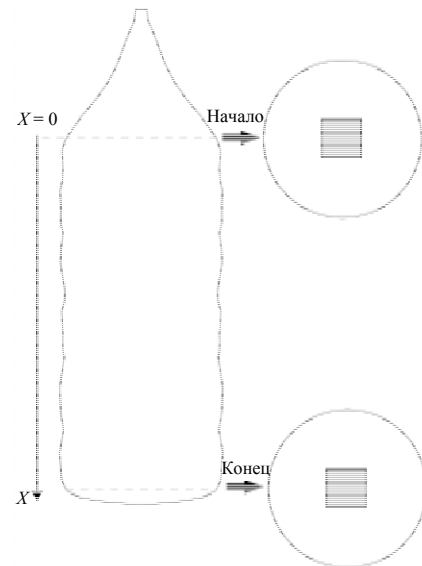


Рис. 1. Схематический чертеж монокристалла. Начало координат соответствует цилиндрической части монокристалла

Таблица

Параметры исследованных образцов

№ п/п	Толщина, мм	X , мм	$N_{\text{холл}} \times 10^{17}$, см ⁻³	$N_{\text{опт}} \times 10^{17}$, см ⁻³
Монокристалл 66-165 (№ 1)				
1	1,01	0	5,98	–
2	0,93	4,38	5,85	–
3	0,86	10,22	6,07	–
4	0,92	16,06	6,34	–
5	0,91	21,9	6,33	–
6	0,92	27,74	6,55	–
7	0,92	33,58	6,56	–
8	0,93	39,42	6,61	–
9	0,87	45,26	6,59	–
10	0,86	51,1	6,99	–
11	0,91	56,94	7,22	–

Монокристалл 66-115 (№ 2)				
1	1,02	0	7,24	–
2	1,26	5,84	7,46	–
3	1,26	11,68	7,68	7,79
4	1,25	16,06	7,89	7,92
5	1,24	19,72	8,28	8,12
6	1,24	25,56	8,38	8,12
7	1,24	31,4	8,43	8,18
8	1,23	37,24	8,79	8,45
9	1,23	45,28	9,47	9,05
10	1,23	51,12	9,7	9,25
11	1,23	56,96	10,3	9,39
12	1,23	62,8	10,5	9,66

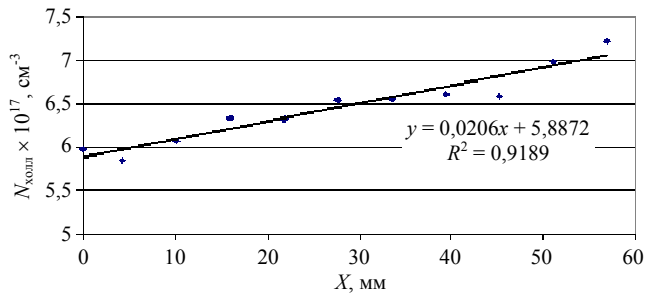


Рис. 2. Зависимость холловской концентрации от координаты (монокристалл № 1)

На рисунке 2 представлена зависимость концентрации свободных электронов от расстояния, где находится рабочая поверхность образца, на которой проводились оптические измерения. За начало отсчета принята координата, где монокристалл приобретает цилиндрическую форму (см. рис. 1). Как видно из рисунка 2, зависимость концентрации электронов от координаты вполне удовлетворительно описывается линейной функцией.

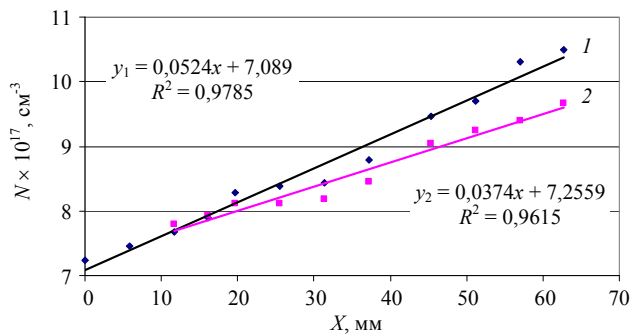


Рис. 3. Зависимости холловской (1) и оптической (2) концентраций от координаты (монокристалл № 2)

На рисунке 3 приведены значения холловской концентрации, $N_{холл}$, и оптической, $N_{опт}$, для образцов, вырезанных из монокристалла № 2. Обращает на себя внимание тот факт, что при увеличении X значения $N_{холл}$ и $N_{опт}$ расходятся. Если в левой части рисунка 3 они практически совпадают друг с другом, то с ростом X наблюдается явная тенденция: холловская концентрация заметно превышает оптическую, причем этот разрыв увеличивается. Из рисунка 3 видно также, что обе координатные зависимости удовлетворительно описываются линейными функциями. Чем ближе значение коэффициента детерминации R^2 к единице, тем лучше линейная аппроксимация. Если принять допущение, что все атомы теллура ионизованы, то концентрация теллура в

пластинах C_{Te} будет прямо пропорциональна значению КСНЗ. Можно предположить, что коэффициент распределения атомов теллура $k_{эф}$ не является, как принято считать, постоянным (табличное значение 0,06), а изменяется вдоль оси слитка, т. е. определяется изменением тепловых и динамических условий процесса выращивания монокристалла [5, 6].

$$n = N \cdot k_{эф} \cdot (1 - g)^{k_{эф} - 1} \quad (1)$$

где $k_{эф}$ – эффективный коэффициент распределения; n – КСНЗ в начале монокристалла; N – начальная концентрация теллура в расплаве; g – доля закристаллизовавшегося расплава (зависит от координаты x).

Из формулы (1) видно, что если $k_{эф} = const$, то зависимость $n(x)$ не может быть линейной. Иначе говоря, значение $k_{эф}$ должно зависеть от координаты.

С другой стороны, линейные зависимости $N_{опт}$, $N_{холл}$ от координаты могут быть вызваны формированием в монокристалле комплексов точечных дефектов различной природы, чей вклад в концентрацию электронов проводимости может изменяться нелинейно [7]. Этот вопрос является предметом самостоятельного исследования, выходящего за рамки данной работы.

Необходимо иметь в виду, что результаты холловских измерений относятся ко всему объему образца, тогда как результаты оптических – только к узкому приповерхностному слою, в котором формируется отраженный световой сигнал. В работе [2] приведена оценка толщины этого слоя (предполагается, что он совпадает со скин-слоем). Показано, что для образца n -GaAs с $N = 1,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ толщина упомянутого слоя не превышает 3 мкм.

Иначе говоря, поверхностные слои исследованных образцов обеднены свободными электронами (по сравнению с объемом образца), причем чем больше концентрация электронов, тем это различие заметнее (рис. 2). Ранее аналогичный результат был получен нами в работе [2]. Там же было высказано предположение, что наблюдаемое различие в значениях концентрации электронов может быть связано с наличием на поверхности исследованных образцов некоего естественного окисного слоя [3, 4].

Выводы

1. На двух монокристаллах *n*-GaAs, выращенных методом Чохральского и легированных теллуром, проведены исследования распределения концентрации свободных электронов вдоль оси монокристалла. Значения концентрации электронов определялись двумя способами: по методу Ван дер Пау и по спектрам отражения в инфракрасной области.

2. Построены зависимости концентрации электронов от координаты образца в монокристалле и показано, что они описываются линейными функциями. Данная закономерность говорит о том, что реальный коэффициент распределения теллура в монокристалле GaAs может быть отличен от эффективного (табличного значения).

3. Показано, что приповерхностные слои исследованных образцов обеднены свободными электронами (по сравнению с объемом), причем это расхождение увеличивается с ростом значений концентрации электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Югова Т. Г., Белов А. Г., Каневский В. Е., Кладова Е. И., Князев С. Н. / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23. № 1. С. 27–33. doi: 10.17073/1609-3577-2020-1-27-33.
2. Комаровский Н. Ю., Белов А. Г., Кладова Е. И., Князев С. Н., Молодцова Е. В., Парфентьева И. Б., Трофимов А. А. / Прикладная физика. 2023. № 6. Р. 54–59.
3. Берковиц В. Л., Гордеева А. Б., Кособукин В. А. / Физика твёрдого тела. 2001 Т. 43. № 6. С. 985–991.
4. Торхов Н. А. / Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 10. С. 1205–1213.
5. Нашельский А. Я. Технология полупроводниковых материалов. Т. 233. – М.: Металлургия, 1987.
6. Романенко В. Н., Саидов М. С., Абдукаримов Э. Т. и др. Коэффициенты распределения в сложных полупроводниковых системах. – Ташкент: Фан, 1987.
7. Комаровский Н. Ю., Журавлев Е. О., Молодцова Е. В., Кудря А. В., Козлов Р. Ю., Белов А. Г., Кормилицина С. С. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90 (7). С. 32–39. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-7-32-39>

PACS: 81.10-h

Investigation of free electron concentration distribution along tellurium doped GaAs single crystal axis

N. Yu. Komarovskiy^{1,2}, A. G. Belov¹, M. S. Nestyurkin¹, N. G. Khikheev¹, A. N. Kusnetsov³, N. A. Larionov³, E. I. Kladova¹, S. N. Knyazev¹, I. B. Parfent'eva¹, E. V. Molodtsova¹ and D. A. Tikhonov¹

¹ Giredmet, JSC

Bd. 1, 2 Elektrodnaya st., Moscow, 111524, Russia
E-mail: nickkomasrovskiy@mail.ru

² National University of Science and Technology MISiS
Bd. 1, 4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia

³ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 29.10.2024; revised 13.11.2024; accepted 11.12.2024

*The distribution has been investigated of free electron concentration along the axis for two *n*-GaAs single crystal ingots, grown by Cz method and doped with tellurium. Free electron concentration values have been determined using two methods: by traditional Hall effect with four-contact geometry (Van der Pau method) and with the help of developed by authors optical method, based upon infrared reflectivity spectra analysis. All measurements have been carried out at room temperature.*

It has been shown, that the dependencies of Hall and optic free electron concentrations upon the coordinate along ingot axis may be described by linear functions. Thus, the values of real tellurium distribution coefficient by the ingot may considerably differ from accepted (tabled) value.

It has been established, that Hall concentration exceeds optic one, i. e. surface layers of investigated samples are depleted of electrons (compared to the volume), and the discrepancy between Hall and optic concentrations increases along the ingot axis.

Keywords: gallium arsenide; tellurium; free electron concentration distribution along ingot axis; Van der Pau method; infrared reflectivity spectra.

REFERENCES

1. Yugova T. G., Belov A. G., Kanevsky V. E., Kladova E. I. and Knyazev S. N., *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki* **23** (1), 27–33 (2020). doi: 10.17073/1609-3577-2020-1-27-33 [in Russian].
2. Komarovskiy N. Yu., Belov A. G., Kladova E. I., Knyazev S. N., Molodtsova E. V., Parfentyeva I. B. and Trofimov A. A., *Applied Physics*, № 6, 54–59 (2023) [in Russian].
3. Berkowitz V. L., Gordeeva A. B. and Kosobukin V. A., *Phizika tverdogo tela* **43** (6), 985–991 (2001) [in Russian].
4. Torkhov N. A., *Semiconductors* **37** (10), 1205–1213 (2003) [in Russian].
5. Nashelsky A. Ya., *Tekhnologiya poluprovodnikovyykh materialov*, Moscow, Metallurgiya **233**, 1987 [in Russian].
6. Romanenko V. N., Saidov M. S., Abdugarimov E. T. and others., *Koeffitsienty raspredeleniya v slojnykh poluprovodnikovyykh sistemakh*, Tashkent, 1987 [in Russian].
7. Komarovskiy N. Yu., Zhuravlev E. O., Molodtsova E. V., Kudrya A. V., Kozlov R. Yu., Belov A. G. and Kormilitsina S. S., *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* **90** (7), 32–39 (2024). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-7-32-39> [in Russian].