**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ТИПА N/P-INXGA1-XAS ДЛЯ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ**

Николай Дмитриевич Платонов1, Андрей Александрович Лебедев2,3, Вадим Леонидович Матухин1, Иванов Александр Федорович1, Евгений Иванович Теруков4,5

Науч. рук. д. ф.-м. наук, профессор Вадим Леонидович Матухин (matukhinvl@mail.ru)

**1**ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан

2АО «НПП «Квант», г. Москва, Россия

3НИТУ«МИСиС», г. Москва, Россия

4ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

5СПбГТЭУ«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия

[1nickiplatonov@gmail.com](mailto:1nickiplatonov@gmail.com), [2lebedev\_aa@npp-kvant.ru](mailto:2lebedev_aa@npp-kvant.ru), 4e.terukov@hevelsolar.com

**Аннотация:** Полупроводниковые структуры современных приборов микро-, оптоэлектроники содержат слои толщиной в несколько нанометров и размеры отдельных элементов в них достигают нескольких десятков нанометров [1]. В связи с этим, разработка и создание новых материалов и структур для полупроводниковой электроники требует соответствующего развития точных методов и средств контроля их параметров [2, 3]. Рост требований к характеристикам современных полупроводниковых приборов, одним из которых является применяемый в составе солнечных батарей в энергоустановках космических аппаратов многокаскадный фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) с гетероструктурой типа InGaP/InGaAs/Ge, побуждает к совершенствованию методов их создания и исследования. Вместе с этим, для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), самыми эффективными из которых сегодня являются многокаскадные приборы с гетероструктурой типа InGaP/InGaAs/Ge, находящие применение в составе солнечной батареи в качестве первичного источника энергии для питания бортовой аппаратуры космических аппаратов, актуальным является сохранение однородности каждого из тонких слоёв структуры на площадях более 60 см2. [4]

В данной работе на примере полученных методом МОС-гидридной эпитаксии твердых растворов In0.01Ga0.99As p- и n-типов легирования, предложена и апробирована методика исследования основных электрофизических характеристик эпитаксиальных полупроводниковых слоев с учетом необходимости оценки их однородности на образцах большой площади – например, для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

**Ключевые слова:** фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), полупроводниковые слои, эпитаксиальный слой (ЭП), удельное сопротивление, удельная проводимость, концентрация основных носителей заряда (ОНЗ), уровень легирования.

Nikolai Dmitrievich Platonov1, Andrey Alexandrovich Lebedev2,3, Vadim Leonidovich Matukhin1, Ivanov Alexander Fedorovich1, Evgeny Ivanovich Terukov4,5

1 Federal State State-subsidized Educational Institution of Higher Professional Education «KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY». Republic of Tatarstan

2 JSC NPP Kvant, Moscow, Russia

3 National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia

4 FTI im. A.F. Ioffe RAS, St. Petersburg, Russia

5 SPbGTEU "LETI" them. IN AND. Ulyanova (Lenin), St. Petersburg, Russia

1nickiplatonov@gmail.com, 2lebedev\_aa@npp-kvant.ru, [4e.terukov@hevelsolar.com](mailto:4e.terukov@hevelsolar.com)

**Abstract:** Semiconductor structures of modern micro- and optoelectronic devices contain layers several nanometers thick and the sizes of individual elements in them reach several tens of nanometers [1]. In this regard, the development and creation of new materials and structures for semiconductor electronics requires the corresponding development of accurate methods and means of controlling electrical parameters [2, 3]. The growing requirements for the characteristics of modern semiconductor devices, one of which is a multistage photoelectric converter (PVC) with an InGaP/InGaAs/Ge type heterostructure used as part of solar batteries in spacecraft power plants, encourages the improvement of methods for their creation and research. At the same time, for photovoltaic converters (PVCs), the most efficient are multi-stage devices with an InGaP/InGaAs/Ge heterostructure, which are used as part of a solar battery as a primary energy source for powering spacecraft onboard equipment. It is important to maintain the homogeneity of each of the thin layers of the structure over areas larger than 60 cm2. [4]

In this work, using the example of p- and n-doped In0.01Ga0.99As obtained by MOS-hydride epitaxy, we propose and test a method for studying the main electrical characteristics of epitaxial semiconductor layers, taking into account the need to assess their homogeneity on samples of a large area - for example, for photoelectric converters (PVC).

**Keywords:** photovoltaic converter (PEC), semiconductor layers, epitaxial layer (EP), resistivity, conductivity, majority charge carrier concentration (MCC), doping level.

**Методика эксперимента**

Методом газофазовой эпитаксии из металлоорганических и гидридных соединений (МОСГЭ) в вертикальном реакторе промышленного типа были выращены экспериментальные образцы двух серий: S-серии (3 шт. легированные Si) и Z-сериz (6 шт. легированные Zn). Образцы представляли собой следующую структуру: полупроводниковый слой из исследуемого материала (In0,01Ga0,99As) толщиной ~ 1,3 мкм с различным типом проводимости (n и p) и номинальными уровнями легирования 1016, 1017, 1018 см–3, с подслоем из AlAs толщиной ~ 0,05 мкм, выращенные на полуизолирующих монокристаллических подложках арсенида галлия (100) толщиной 600 мкм. На первой стадии исследования с помощью метода бесконтактного измерения поверхностного сопротивления (БИПС) было определено значение удельного сопротивления σ, Ом⸱см (УС), его однородность по пластине и рассчитаны концентрации основных носителей заряда N, см-3 в исследуемых слоях. На второй стадии исследования были получены профили распределения основных носителей заряда (ОНЗ) в слоях структуры образцов, в результате травления на электрохимическом профилометре. На основе этих данных были определены концентрации легирующей примеси (Si и Zn) в каждом из образцов. На третьем этапе исследования была проведена пробоподготовка образцов для измерения эффекта Холла (ХЭ), проведение измерений и анализ результатов. Одна из пластин каждого вида (рисунок. 1) была порезана на образцы, размером (10 × 10) мм. Для возможности усреднения результатов и установления их корреляции с геометрией ростовой камеры было выбрано и измерено методом Ван дер Пау по 5 образцов с каждой пластины. Достоверность измерений подтверждена их многократным повторением.

**Результаты**

В качестве основных результатов реализации предлагаемой методики исследования полупроводниковых слоев выступают зависимости удельной проводимости и концентрация основных носителей заряда исследуемых слоев от параметров газовой фазы, приведенные в таблице 1.

По данным из таблицы 1 были построены экспериментальные зависимости концентрации основных носителей заряда от количества легирующего прекурсора в газовой фазе. В случае легирования эпитаксиального слоя In0.01Ga0.99As кремнием, все три метода определения концентрации (ХЭ, БИПС и ЭХП) позволяют получить схожую зависимость. Зависимость удельной проводимости для образцов S1-S3 линейно растет с ростом концентрации легирующего компонента (дисилана DSi) в газовой фазе и имеет хорошее совпадение по двум методам (БИПС и Ван дер Пау). В зависимости от прекурсора, вид линейной зависимости меняется.

Таблица 1

Параметры газовой фазы в сопоставлении с определенной разными методами концентрацией основных носителей заряда в эпитаксиальных слоях

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Образцы | Концентрация легирующего компонента в газовой фазе, см-3 | Измеренная концентрация основных носителей заряда *Nизм* (по маленьким образцам) разными методами в твердом теле | | |
| ***Nизм*** по ХЭ, см-3 | ***Nизм*** по ЭХП, см-3 | ***Nизм*** по БИПС, см-3 |
| S1 | 5,28∙1019 | 6,87∙1018 | 5,57∙1018 | 7,03∙1018 |
| S2 | 1,17∙1019 | 1,63∙1018 | 1,37∙1018 | 1,65∙1018 |
| S3 | 5,87∙1018 | 8,89∙1017 | 7,43∙1017 | 9,44∙1017 |
| Z1 | 1,15∙1019 | 1,22∙1017 | - | 1,84∙1017 |
| Z2 | 4,30∙1018 | 6,49∙1016 | - | 1,04∙1017 |
| Z3 | 2,91∙1017 | 2,34∙1015 | - | 6,05∙1016 |
| Z4 | 1,15∙1019 | 1,21∙1017 | 1,58∙1017 | 2,30∙1017 |
| Z5 | 4,30∙1018 | 2,88∙1016 | 5,36∙1016 | 1,54∙1017 |
| Z6 | 2,91∙1017 | 3,27∙1015 | 3,67∙1015 | 1,33∙1017 |

Так, при увеличении концентрации легирующего прекурсора Zn в газовом потоке, линейно увеличивается и концентрация легирующего компонента в твердой фазе. Несмотря на то, что между методами ХЭ, БИПС и ЭХП имеется довольно широкий разброс, в масштабах больших концентраций при сравнении с литературными данными [5]. В связи с этим, большую ошибку экспериментальных данных для образцов Z-серии можно объяснить узким диапазоном исследуемых концентраций ОНЗ.

**Выводы**

Линейные зависимости, построенные по трем разным методам: Ван дер Пау, БИПС и ЭХП для образцов S-серии, легированных Si, довольно хорошо сходятся. В диапазоне концентраций в газовой фазе 5,87⸱1018 ÷ 5,28⸱1019 см-3 методы БИПС и ЭХП имеют относительные отклонения 3,1 % (для БИПС) и 17,1 % (для ЭХП) от результатов, полученных методом ХЭ. Методы БИПС и ХЭ дают максимальное совпадение между собой.

Результаты, полученные для образцов серии Z, имеют куда большее отклонение. В диапазоне концентраций Zn в газовой фазе 1,15⸱1017 ÷ 2,91⸱1019 см-3 по методу БИПС получаем отличие в разы и даже в десятки раз (отклонение от результатов ХЭ увеличивается с уменьшением концентрации легирующего компонента).

Приведенные результаты показывают потенциальную применимость методики, но не претендуют на максимальную полноту получаемых сведений о слоях.

Таким образом показано, что предложенная методика в указанных диапазонах концентраций легирующих компонентов, может быть применена для исследования широкого перечня твердых растворов замещения, используемых и планируемых к использованию в многокаскадных ФЭП с гетероструктурой на основе материалов AIIIBV и получения заданных свойств слоёв на приборных структурах большой площади.

## Источники

[1] Якимов Е. Б. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования (Черноголовка, Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, 2012, с. 18 – 21).

[2] Фролов Д. С., автореф. кандид. дисс. Диагностика полупроводниковых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования (Санкт-Петербург, «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова, 2016).

[3] Система контроля параметров эпитаксиального роста полупроводниковых наногетероструктур солнечных элементов космического назначения / А.А. Лебедев, С.А. Цыникин, А.М. Леднев и др. // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. – М, № 31 – 2013. – С. 15-24.

[4] Наумова А. А., Лебедев А.А., Вагапова Н. Т. Разработка фотопреобразователей космического назначения с увеличенной фотоактивной площадью // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия». – 2021. – С. 301-303.

[5] A.A. Naumova, A.A. Lebedev, B. V. Zhalnin, N. T. Vagapova, M. B. Kagan, A. A. Smirnov A.A., S. K. Sharov. Investigation InxGa1-хP and InхAl1-хP heterostructures for cascade solar cells / «АIP Conference Proceedings». – 2021.

**Информация об авторах:**

**Платонов Николай Дмитриевич** – аспирант кафедры «Физика» ФГБОУ ВО «КГЭУ». Электронная почта: [nickiplatonov@gmail.com](mailto:nickiplatonov@gmail.com).

**Лебедев Андрей Александрович** – начальник отдела АО «НПП «Квант», старший преподаватель кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ «МИСиС». Электронная почта: [lebedev\_aa@npp-kvant.ru](mailto:lebedev_aa@npp-kvant.ru).

**Матухин Вадим Леонидович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «физика» ФГБОУ КГЭУ. Электронная почта: [matukhinvl@mail.ru](mailto:matukhinvl@mail.ru).

**Иванов Александр Федорович** – аспирант кафедры «Физика» ФГБОУ ВО «КГЭУ». Электронная почта: [ivanovaleksandrf@yandex.ru](mailto:ivanovaleksandrf@yandex.ru).

**Смирнов Александр Андреевич** – инженер-технолог 1 категории АО «НПП «Квант». Электронная почта: [smirnov\_aa@npp-kvant.ru](mailto:smirnov_aa@npp-kvant.ru).

**Теруков Евгений Иванович** – доктор техн. наук, старший научный сотрудник СПбГТЭУ«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, заместитель генерального директора ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф.Иоффе**.** Электронная почта: [e.terukov@hevelsolar.com](mailto:e.terukov@hevelsolar.com).