

Методы исследования электрофизических характеристик эпитаксиальных слоёв твердых растворов типа $n/p\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ для приборных структур большой площади

Н. Д. Платонов, А. А. Лебедев, В. Л. Матухин,
А. А. Смирнов, А. Ф. Иванов

Проведен поиск оптимальной методики исследования электрофизических характеристик тонких полупроводниковых слоев типа $n/p\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с различным уровнем легирования. Основная задача — измерение основных электрофизических характеристик различными способами: удельного сопротивления (проводимости), концентрации основных носителей заряда, зависимость основных электрических параметров от типа и уровня легирования и их сравнение. На примере полученных методом МОС-гидридной эпитаксии твердых растворов $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ р- и n-типов рассмотрена предложенная методика исследования основных электрофизических характеристик эпитаксиальных слоев с учетом оценки однородности на образцах большой площади. Приведено сопоставление результатов, полученных различными методами: фотолюминесценции, бесконтактного измерения поверхностного сопротивления (индуктивный метод), Ван-дер-Пау (эффект Холла) и вольфарадного (электрохимического профилирования (ЭХП), методы *in situ* контроля. На основе анализа полученных результатов и сравнения с литературными данными сделаны выводы о необходимости, достаточности и взаимодополнении методов контроля и исследования полупроводниковых эпитаксиальных структур.

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

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-11-80-91

Введение

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].

Рост требований к характеристикам современных полупроводниковых приборов, одним из которых является многокаскадный фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) с гетероструктурой типа InGaP/InGaAs/Ge , побуждает к совершенствова-

нию методов их создания и исследования. Такие ФЭП находят применение в составе солнечных батарей в качестве первичного источника энергии для питания бортовой аппаратуры космических аппаратов. Они имеют рекордную среди планарных полупроводниковых приборов площадь, поэтому актуальным является сохранение однородности каждого из тонких слоёв структуры на площадях более 60 см^2 . Гетероэпитаксиальная структура таких ФЭП состоит из элементов, различающихся толщиной, составом основного материала и легирующими компонентами, благодаря чему возможно эффективное поглощение и преобразование излучения широкого спектрального диапазона, а также минимизация потерь. Так, эмиттер и база каскадов, созданные на основе твердых растворов:

верхний каскад $n/p\text{-In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$ (со значением ширины запрещенной зоны $\Delta E_g = 1,9$ эВ [3, 4]), средний каскад $n/p\text{-In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ ($\Delta E_g = 1,41$ эВ [3, 4]), и нижний каскад $n/p\text{-Ge}$ ($\Delta E_g = 0,66$ эВ [3, 4, 5]), позволяют поглощать фотоны в диапазонах длин волн от 0 до 670 нм, от 670 до 900 нм и от 900 до 1900 нм, соответственно [4, 5]. Наличие широкозонных окон в структурах каскадов (для верхнего каскада может применяться (30 нм) $n\text{-Al}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P:Si}$ ($3 \cdot 10^{18}$), для среднего — (100 нм) $n\text{-In}_{0,49}(\text{GaAl})_{0,51}\text{P:Si}$ ($3 \cdot 10^{18}$) и тыльных потенциальных барьеров (для верхнего каскада применяется (30 нм) $p\text{-In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P:Zn}$ ($3 \cdot 10^{18}$), для среднего каскада — (50 нм) $p\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As:Zn}$ ($2 \cdot 10^{18}$)) препятствует поверхностной рекомбинации носителей заряда за счет пассивации поверхностных состояний на границе структурных элементов. Для электрической развязки каскадов используют сформированные слоями с высоким уровнем легирования туннельные диоды (между каскадами InGaAs/Ge : (10 нм) $p^{++}\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As:C}$ ($2 \cdot 10^{20}$)/(10 нм) $n^{++}\text{-In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As:Te}$ ($8 \cdot 10^{18}$), между каскадами InGaP / InGaAs : (15 нм) $p^{++}\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As:C}$ ($2 \cdot 10^{20}$)/(15 нм) $n^{++}\text{-In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P:Te}$ ($8 \cdot 10^{18}$)).

Из приведенного выше описания становятся понятными сложности, возникающие на пути создателей таких приборов: многообразие материалов требует точной настройки технологических процессов эпитаксиального роста каждого из слоев структуры и их периодической корректировки, а многослойность всей приборной структуры не позволяет проводить её исследования целиком [6] и требует создания отдельных калибровочных образцов, что значительно увеличивает трудоемкость проведения исследований [2, 7].

В последнее время все более отчетливой тенденцией становится оснащение установок эпитаксиального роста из газовой фазы (металлоорганических соединений (МОС) гидридной эпитаксии) разнообразными средствами *in situ* контроля процесса. Эти методы, которые ранее сопровождали только установки молекулярно-лучевой эпитаксии, где их проще реализовать из-за необходимости проведения ростовых процессов при достижении глубокого вакуума, значительно упрощают контроль параметров растущих слоев. К наиболее распространенным методам контроля параметров слоев непосредственно во время эпитаксиального роста относятся:

- а) оптическая рефлектометрия и интерферометрия;
- б) эллипсометрия;

в) спектроскопия анизотропного отражения света;

г) эмиссионная пирометрия;

д) дифлектометрия.

Все они предназначены для получения информации о характеристиках эпитаксиальных слоев в реальном времени непосредственно в процессе роста, однако характеристики эти ограничиваются скоростью роста (а), толщиной слоев (а, б) и её равномерностью (при наличии распределенных по ростовой камере устройств, контролирующих разные участки подложки), степенью совершенства морфологии поверхности (а, б, в), температурой поверхности (г), кривизной (д), составом твердых растворов (а, б — при известных значениях оптических констант или при одновременных измерениях на разных длинах волн) [8]. Менее распространенными и перспективными представляются методы фотолюминесцентной спектроскопии, спектроскопии рассеянного рентгеновского излучения и др. [8].

Тем не менее, приведённые методы не позволяют контролировать легирование растущих слоев, определяющее их электрофизические характеристики. Легирующие добавки эффективно влияют на состояние ансамбля собственных точечных дефектов в кристаллах, на особенности поведения в них дислокаций и фоновых примесей, что в итоге приводит к существенному расширению возможностей управляемого воздействия на свойства полупроводникового материала и структур на его основе [9]. Однако основной целью легирования является задание типа проводимости и концентрации основных носителей заряда [10].

Большое количество параметров, определяющих процесс равномерного роста полупроводниковых структур, а также их нетривиальная зависимость друг от друга, значительно осложняют построение единого алгоритма и методики исследования их свойств. Также следует отметить, что разные типы ростовых машин, имеющие конструктивные особенности (вертикальные, горизонтальные, планетарные, с быстрым вращением подложконосителя, с распределенным впрыском реагентов) требуют индивидуального подхода к заданию однородности всех свойств слоев, что особенно принципиально для таких больших по площади приборов, какими являются ФЭП. Разработка алгоритма исследования полупроводниковых структур требует привлечение различных методов и методик, направленных на измерение и обработку оптических, электрических и физических свойств отдельных слоев: рентгеновской дифрактометрии, спектрофо-

тометрии, электрохимической профилометрии, измерения эффекта Холла, бесконтактное измерение поверхностного сопротивления, вторичных ионов масс-спектрометрии, сканирующей электронной микроскопии и т.д. Однако, большинство методов позволяют проводить только косвенные измерения, являются разрушающими или требуют создания специальных экспериментальных образцов. Так, для каждого из более чем 15 уникальных слоев структуры ФЭП необходимо проведение измерений и сопоставление результатов, полученных несколькими методами, что значительно усложняет проведение исследований, отработки структуры и технологического процесса.

Цель работы — поиск оптимальной методики исследования электрофизических характеристик тонких полупроводниковых слоев типа $n/p\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с различным уровнем легирования, определение области применимости более простых в реализации методов и методик и получение корреляции результатов различных прямых и косвенных методов измерения, выработка единого подхода к проведению исследований.

Методика эксперимента

Для возможности построения зависимости электрофизических параметров эпитаксиальных слоев от состава газовой фазы была разработана методика, опирающаяся на опыт обработки экспериментальных данных и экспериментальной работы по исследованию свойств слоев твердых растворов эпитаксиально выращенных на установках промышленного типа [2, 7]. В этих работах исследовали основные свойства матрицы – твердых растворов, с контролем однородности на образцах большой площади (диаметр подложек 100 мм) и однородности/воспроизводимости свойств на об-

разцах их разных зон ростовой камеры. Таким образом, для корректности исследования электрофизических свойств, определяемых легированием, необходимо повторить исследования, описанные в данных работах (подтвердить состав твердого раствора, оценить дефектность слоя, однородность и др.) и измерить интересующие нас свойства, такие, как проводимость и концентрация носителей заряда. Особенностью методики является ориентированность на мультипликативность методов, то есть возможность определения одних и тех же, или близких, связанных параметров несколькими методами, для чего предусмотрена специальная структура образцов, а также контроль однородности характеристик по площади образцов.

Методом газовой фазовой эпитаксии из металлоорганических и гидридных соединений (МОСГЭ) в вертикальном реакторе промышленного типа с быстро вращающимся подложконосителем на 13 подложек и распределенным впрыском реагентов в АО “НПП “Квант” были изготовлены 2 серии образцов (6 образцов S-серии и 12 образцов Z-серии) с различным типом проводимости (n и p) и уровнем легирования (по 2 пластины каждого вида).

Экспериментальные образцы S-серии и 6 образцов Z-серии представляли собой следующую структуру: полупроводниковый слой из исследуемого материала ($\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$) толщиной $\sim 1,3$ мкм с различным типом проводимости (n и p) и номинальными уровнями легирования 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} см^{-3} , подслой из AlAs толщиной $\sim 0,05$ мкм, выращенные на полужолирующих монокристаллических подложках арсенида галлия (100) толщиной 600 мкм, диаметром 100 мм разориентированных на 2° в направлении $\langle 110 \rangle$ при следующих условиях: температура роста ~ 640 °C, отношение концентраций прекурсоров компонентов в газовой фазе V/III ~ 9 , скорость вращения стола с подложко-

Образцы S1, S2, S3	Образцы Z1, Z2, Z3	Образцы Z4, Z5, Z6
InGaAs:Si — исследуемый слой (1,32 мкм)	InGaAs:Zn — исследуемый слой (1,32 мкм)	InGaAs:Zn — исследуемый слой (1,32 мкм)
AlAs — промежуточный слой (0,05 мкм)	AlAs — промежуточный слой (0,05 мкм)	AlAs:Zn — промежуточный слой (0,05 мкм)
GaAs — подложка (600 мкм)	GaAs — подложка (600 мкм)	Подложка GaAs и GaAs:Zn (600 мкм)
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>

Рис. 1. Структура исследуемых образцов: *a* — серии S-образцов, *b* — Z-образцов на нелегированной подложке, *c* — Z-образцов на легированной подложке.

Fig. 1. The structure of the samples: *a* — S-series of samples, *b* — Z-series of samples on an undoped substrate, *c* — Z-series of samples on a doped substrate.

Таблица 1

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

Table 1

The parameters of the gas phase in comparison with the concentration of the main charge carriers in the epitaxial layers determined by different methods

Образцы	Концентрация легирующего компонента в газовой фазе, см ⁻³	Средняя измеренная концентрация основных носителей заряда, $N_{изм}$, см ⁻³ (по маленьким образцам) в твердом теле методами		
		ХЭ	ЭХП	БИПС
S1	$5,28 \cdot 10^{19}$	$6,87 \cdot 10^{18}$	$5,57 \cdot 10^{18}$	$7,03 \cdot 10^{18}$
S2	$1,17 \cdot 10^{19}$	$1,63 \cdot 10^{18}$	$1,37 \cdot 10^{18}$	$1,65 \cdot 10^{18}$
S3	$5,87 \cdot 10^{18}$	$8,89 \cdot 10^{17}$	$7,43 \cdot 10^{17}$	$9,44 \cdot 10^{17}$
Z1	$1,15 \cdot 10^{19}$	$1,22 \cdot 10^{17}$	—	$1,84 \cdot 10^{17}$
Z2	$4,30 \cdot 10^{18}$	$6,49 \cdot 10^{16}$	—	$1,04 \cdot 10^{17}$
Z3	$2,91 \cdot 10^{17}$	$2,34 \cdot 10^{15}$	—	$6,05 \cdot 10^{16}$
Z4	$1,15 \cdot 10^{19}$	$1,21 \cdot 10^{17}$	$1,58 \cdot 10^{17}$	$2,30 \cdot 10^{17}$
Z5	$4,30 \cdot 10^{18}$	$2,88 \cdot 10^{16}$	$5,36 \cdot 10^{16}$	$1,54 \cdot 10^{17}$
Z6	$2,91 \cdot 10^{17}$	$3,27 \cdot 10^{15}$	$3,67 \cdot 10^{15}$	$1,33 \cdot 10^{17}$

сителем 500 об/мин, суммарный расход топлива 80 л/мин, давление, 5 кПа.

Схематичная структура образцов изображена на рис. 1а – 1с, где видны отличия образцов Z-серии Z4 – Z6 от остальных.

Прекурсоры ростовой реакции — Ga(CH₃)₃, In(CH₃)₃, AsH₃, дисилан (газовая смесь 200 ppm Si₂H₆ в водороде) использовали в качестве прекурсора акцепторной примеси и диметилцинк (Zn(CH₃)₂) — в качестве прекурсора донорной примеси [10]. Рассчитанные значения концентрации прекурсоров примесей в газовой фазе, применяли при создании экспериментальных образцов, приведены в табл. 1 [7].

В целом, серия образцов Z4 – Z6 полностью повторяют образцы Z1 – Z3, за исключением их роста на легированной подложке, что сделано для возможности исследования образцов идентичной структуры на электрохимическом профилометре (образцы Z4 – Z6) и на установке бесконтактного измерения поверхностного сопротивления (образцы Z1 – Z3). Поскольку индуктивный метод бесконтактного измерения поверхностного сопротивления основан на определении изменения добротности электрического колебательного контура за счет вихревых токов, наводимых в образце, помещенном в зазор катушки индуктивности контура, наличие в образце помимо исследуемого нескольких проводящих слоёв, в каждом из которых будут возникать вихревые токи, не позволит получить достоверные данные об исследуемом

слое [11]. В тоже время, отсутствие толстого проводящего подслоя при измерении концентрации носителей заряда в тонком невырожденном слое методом вольт-фарадной (электрохимической) профилометрии вызовет возникновение протяженной (полубесконечной) области пространственного заряда, что не позволит получить адекватные результаты [11].

Также из соображений необходимости применения системы компенсационной пирометрии-интерферометрии, между подложкой (GaAs) и исследуемым слоем (In_{0,01}Ga_{0,99}As) создан тонкий слой из материала, сильно отличного по оптическим параметрам (AlAs). Это позволяет непосредственно во время роста получить информацию о скорости роста исследуемого слоя на основе анализа изменения интенсивности света, отраженного от поверхности растущего слоя и границы слой-подложка (в данном случае без промежуточного слоя эта граница прибором не видна) и не влияет на другие свойства и результаты последующих измерений (так как параметр решетки слоя близок к параметру решетки подложки и исследуемого слоя, слой имеет собственную проводимость, как и подложка).

Данные, полученные с помощью методов *in situ* контроля, использовали при обработке и анализе электрофизических параметров образцов [12]. Возможность сопоставления данных от распределенных по ростовой камере датчиков системы контроля с результатами картографирования образцов,

а также с исходными заданными технологическими параметрами газораспределительной системы установки (объемный расход через форсунки, давление, состав парогазовой смеси и др.) лежит в основе алгоритма достижения требуемой однородности свойств слоёв реакторов промышленного типа [2, 11].

Так, по кривым качания, полученным с помощью рентгеновской дифрактометрии от нескольких областей образцов, был определен параметр решетки эпитаксиальных слоёв и подтверждён состав твердого раствора $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$. Анализ серии кривых качания, снятых вдоль радиуса пластин, оказался полезен при анализе поведения легирующей примеси в разных областях образца [12].

На примере работ по достижению необходимых свойств эпитаксиальных слоёв на основе твердого раствора $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$, показаны возможности и ограничения применимости имеющихся систем *in situ* контроля эпитаксиального роста для задачи получения и оценки электрофизических характеристик. В [2] рассмотрена роль методов *in situ* контроля эпитаксиального роста, а в работах [7, 12] — практическая применимость этих методов в совокупности с методами фотолитографии и рентгеновской дифрактометрии для анализа и свойств эпитаксиальных слоёв. В данной же работе рассмотрено сопоставление трёх основных электрофизических методов измерения: бесконтактное измерение поверхностного сопротивления (БИПС), электрохимическая профилометрия (ЭХП) и эффект Холла (ХЭ).

Для исследования основных электрофизических параметров использовали четыре метода. Из анализа спектров фотолюминесценции определена ширина запрещенной зоны исследуемых слоёв и показана тенденция изменения этого параметра с увеличением концентрации легирующей примеси.

На второй стадии исследования с помощью индуктивного метода бесконтактного измерения поверхностного сопротивления (БИПС, он же БИЭС) было определено значение удельного сопротивления ρ , Ом·см, его однородность по пластине и рассчитаны концентрации основных носителей заряда N , см⁻³ в исследуемых слоях по формуле [13]:

$$n = \frac{1}{\rho \cdot \mu \cdot e}, \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом·см; μ — подвижность основных носителей заряда, см²/(В·с); e — элементарный электрический заряд, Кл.

Основное преимущество метода БИПС, что это неразрушающий метод, поэтому нет необхо-

димости в резке и дополнительной подготовке образцов, измеренные образцы в ходе исследования не теряют своей структуры и сохраняют все свойства. Недостатком данного метода является то, что с помощью него возможно определить напрямую лишь один электрофизический параметр — удельное поверхностное сопротивление (проводимость). Для определения основных параметров, таких как ширина запрещённой зоны, концентрация основных носителей заряда, постоянная Холла и т.д. необходимы дополнительные данные (либо литературные), например такие как подвижность (которую возможно измерить напрямую методом, используемым на 4-й стадии данного исследования — методом Ван-дер-Пау).

На третьей стадии исследования были получены профили распределения основных носителей заряда (ОНЗ) в слоях структуры образцов, в результате травления на электрохимическом профилометре, физические принципы, лежащие в основе этого метода рассмотрены в [11, 14, 15]. По этим данным определены концентрации легирующей примеси (Si и Zn) в каждом из образцов. Измерения проводили в нескольких областях поверхности образцов.

Преимущество данного метода — прямое измерение концентрации основных носителей заряда. Недостатки: для определения дополнительных основных электрофизических параметров требуются аналогичные дополнительные данные, как и в методе БИПС; данный метод является разрушающим, так как при измерении профиля концентрации основных носителей заряда происходит точечное травление образца.

Заключительным этапом исследования была пробоподготовка образцов для измерения эффекта Холла (ХЭ) методом Ван-дер-Пау, проведение измерений и анализ результатов. Одна из пластин каждого вида (рис. 1) была порезана на образцы, размером 10 × 10 мм диском с внешней режущей алмазной кромкой на полуавтоматической установке. Методом резистивного термовакуумного напыления сквозь каптоновую маску на поверхности образцов были созданы металлические (серебро с золотым покрытием) омические контакты [4]. 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, как показано на рис. 2. Достоверность измерений подтверждена их многократным повторением.

Преимуществом метода Ван-дер-Пау является прямое определение множества параметров: поверхностных, объемных сопротивлений, соот-

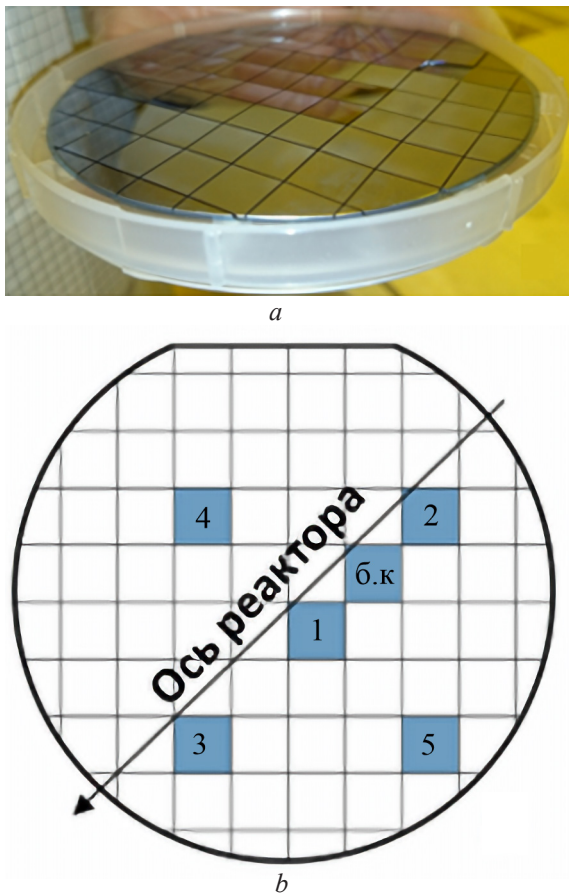


Рис. 2. Изображение пластины, порезанной на образцы размером 10×10 мм: *a* — внешний вид, *b* — схема выбора образцов для измерений эффекта Холла.

Fig. 2. Image of the wafer which was cut into 10×10 mm samples: *a* — the appearance, *b* — sample selection scheme for Hall effect measurements.

ветствующих проводимостей, концентрации и подвижности основных носителей заряда, постоянной Холла. Недостатком метода является то, что образцы требуют довольно трудозатратной подготовки описанной выше, а также его разрушающий характер (образцы после этого измерения остаются негодными, как и в случае метода ЭХП). В связи с этим, в каждой партии роста целесообразно проведение одновременного роста двух аналогичных структур (in- и out-пластин).

Результаты

Основные результаты реализации предлагаемой методики исследования полупроводниковых слоев — получение зависимостей удельной про-

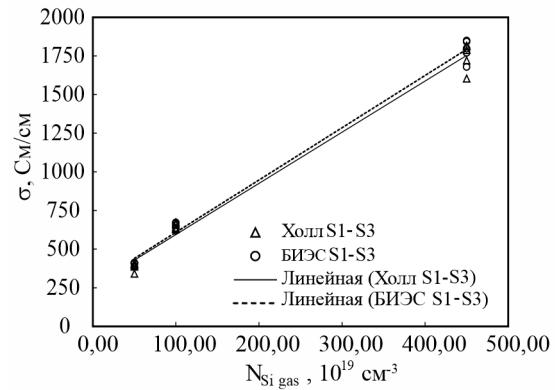


Рис. 3. Зависимость удельной проводимости σ от концентрации легирующего компонента (Si) в газовой фазе для образцов S1, S2, S3.

Fig. 3. The dependence of the conductivity layers σ on the concentration of the alloying component (Si) in the gas phase for samples S1, S2, S3.

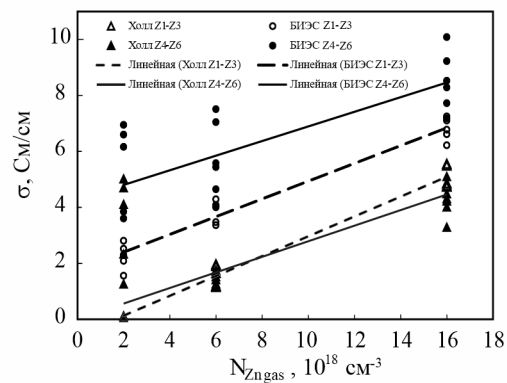


Рис. 4. Зависимость удельной проводимости σ от концентрации легирующего компонента (Zn) в газовой фазе для образцов Z1 – Z6.

Fig. 4. The dependence of the conductivity layers σ on the concentration of the alloying component (Zn) in the gas phase for samples Z1 – Z6.

водимости (обратная величина удельному сопротивлению) от измеренной концентрации основных носителей заряда исследуемых слоев от параметров газовой фазы, приведенные в табл. 1 и на рис. 3 и 4.

В случае легирования эпитаксиального слоя $In_{0,01}Ga_{0,99}As$ кремнием, все три метода определения концентрации (ХЭ, БИПС и ЭХП) позволяют получить схожую зависимость. На рис. 3 видно, что, как и ожидалось, удельная проводимость для образцов S1 – S3 линейно растет с ростом концентрации легирующего компонента (дисилана DSi) в

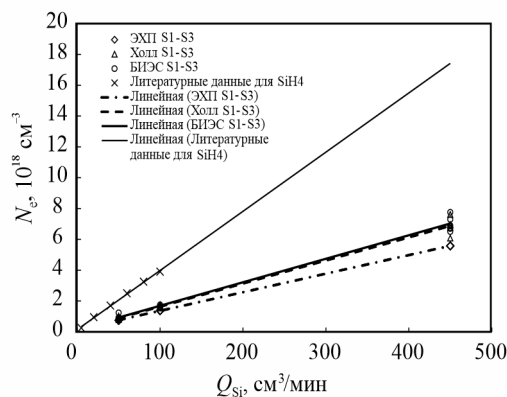


Рис. 5. Зависимость концентрации легирующего компонента (Si) в твердой фазе в зависимости от потока/расхода лигатуры в газовой фазе.

Fig. 5. The dependence of the concentration of the alloying component (Si) in the solid phase depending of the flow concentration in gas phase.

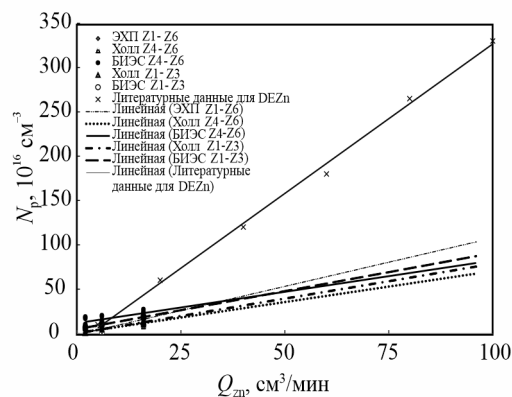


Рис. 6. Зависимость концентрации легирующего компонента (Zn) в твердой фазе в зависимости от потока/расхода лигатуры.

Fig. 6. The dependence of the concentration of the alloying component (Zn) in the solid phase depending of the flow concentration in gas phase.

газовой фазе и имеет хорошее совпадение по двум методам (БИЭС и Ван-дер-Пау).

На рис. 5 представлен аналогичный график для образцов Z1 – Z6, из которого видна худшая сходимость результатов, полученных разными методами.

Следует отметить, что измерения серий образцов Z1 – Z3 и Z4 – Z6 методом Ван-дер-Пау показывают близкие значения, особенно при большой концентрации примеси, несмотря на ожидание присутствия вклада в результаты измерений от нижележащего слоя AlAs:Zn и легированной подложки. Метод БИЭС оказался более чувствительным к этим различиям, что видно из сравнения результатов для серий образцов Z1 – Z3 и Z4 – Z6 (рис. 5).

Несмотря на то, что в литературе достаточно широко описаны результаты работ, посвященных изучению процессов легирования GaAs указанными примесями в условиях МОСГЭ [16 – 20], прямое сравнение осложнено вариативностью условий роста.

Часто, в качестве источника Si используется силан (SiH_4), который имеет ярко выраженную зависимость уровня легирования от температуры процесса, что объясняется увеличением степени его разложения, и что не характерно для дисилана и других нелетучих примесей [8]. Для таких примесей ожидается отсутствие зависимости уровня легирования от температуры процесса и отношения V/III и уменьшение уровня легирования с ростом температуры, в отличие от летучих примесей, к которым относится Zn (где свойства структур демонстрируют рост уровня легирования с умень-

шением температуры и увеличением соотношения элементов V/III, которые также независимы от скорости роста) [8]. Для возможности сравнения литературных и экспериментальных данных, были построены аппроксимационные линии тренда в координатах концентрации основных носителей заряда от расхода лигатуры ($\text{cm}^3/\text{мин}$), приведенные на рис. 5 и 6. Следует учесть, что в работе [8] в качестве легирующих прекурсоров использовали силан (SiH_4) и диэтилцинк $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$, также отличались температуры роста (640°C и 770°C соответственно).

На рис. 5 можно заметить, что увеличение концентрации легирующего компонента (Si) в твердой фазе в исследуемых слоях происходит линейно, по мере увеличения потока прекурсора (аналогично [8]). В зависимости от прекурсора, вид линейной зависимости меняется.

На рис. 6 отображена аналогичная рис. 5 линейная зависимость для образцов, легированных Zn: при увеличении концентрации легирующего прекурсора в газовом потоке, линейно повышается и концентрация легирующего компонента в твердой фазе. Несмотря на то, что между методами ХЭ, БИЭС и ЭХП на рис. 4 имеется довольно широкий разброс, в масштабах больших концентраций при сравнении с литературными данными [8], мы видим, что сходимость результатов данных методов довольно хорошая. В связи с этим, большую ошибку экспериментальных данных на рис. 4 можно объяснить узким диапазоном исследуемых концентраций ОНЗ.

Таблица 2

Относительная погрешность измерений

Table 2

Relative measurement error			
Серия образцов	Концентрация легирующего компонента в газовой фазе (Zn, Si), см ⁻³	Относительное отклонение метода БИПС (от ХЭ), %	Относительное отклонение метода ЭХП (от ХЭ), %
S1	$5,28 \cdot 10^{19}$	2,32	18,84
S2	$1,19 \cdot 10^{19}$	0,76	15,94
S3	$5,87 \cdot 10^{18}$	6,18	16,51
Z1, Z4	$1,15 \cdot 10^{19}$	63,61	25,28
Z2, Z5	$4,30 \cdot 10^{18}$	217,90	24,02
Z3, Z6	$2,91 \cdot 10^{17}$	1035,61	84,60

Систематическая погрешность определения электрофизических параметров методом ХЭ не превышает 0,5 % [21]. В связи с этим, оценка схожести различных методов и вычисление относительной погрешности методов в данной работе выполнено относительно четырех зондового метода ХЭ (Ван-дер-Пау). Техническая реализация метода ХЭ (использование постоянного магнита и антивибрационной системы его перемещения, усреднение по результатам измерений при всех возможных вариантах направления магнитного поля, приложения электрического поля и измерения тока и др., применение минимально допустимого пропускаемого через образец тока) позволяет минимизировать вклад ряда других источников погрешностей: колебания магнитного поля и прикладываемого напряжения, различий размеров контактных площадок, асимметрию образца, асимметрию в установке зондов, колебание температуры и др. Для простоты сравнения и грубой оценки пригодности методов использовали относительную погрешность. Относительные погрешности методов БИПС и ЭХП относительно метода ХЭ приведены в табл. 2.

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 $5,87 \cdot 10^{18} - 5,28 \cdot 10^{19}$ см⁻³ методы БИПС и ЭХП имеют относительные отклонения 3,1 % (для БИПС) и 17,1 % (для ЭХП) от результатов, полученных методом ХЭ. Линии тренда, построенные по данным, полученными методами БИПС (БИЭС) и ХЭ максимально совпадают между собой, и по графику на рис. 5 практически невозможно отличить их друг от друга: пунктирную и сплошную линии.

Результаты, полученные для образцов серии Z, имеют куда большее отклонение. В диа-

пазоне концентраций Zn в газовой фазе $1,15 \cdot 10^{17} - 2,91 \cdot 10^{19}$ см⁻³ по методу БИПС получаем отличие в разы и даже в десятки раз (отклонение от результатов ХЭ увеличивается с уменьшением концентрации легирующего компонента), а для метода ЭХП получаем сравнимые с серией S отклонения для концентраций $1,15 \cdot 10^{19}$ и $4,3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ — около 25 %.

Приведенные результаты показывают потенциальную применимость методики, но не претендуют на максимальную полноту получаемых сведений о слоях. Так, в работе [22] показана возможность оценки качества эпитаксиальных слоев GaAs с помощью метода Ван-дер-Пау посредством сравнения результатов измерений одних и тех же образцов, выполненных при комнатной (300 К) и пониженной (77 К) температурах. В частности, при измерении серии образцов, созданных при разных температурах роста, показан оптимальный диапазон ростовых температур, составивший 620 – 630 °С (максимальная подвижность носителей заряда).

Таким образом показано, что с соответствующими изменениями (уровней легирования, составов основных и дополнительных слоев и т.д.), предложенная методика может быть применена для исследования широкого перечня твердых растворов замещения, используемых и планируемых к использованию в многокаскадных ФЭП с гетероструктурой на основе материалов A^{III}B^V и получения заданных свойств слоев на приборных структурах большой площади.

Обсуждение результатов

Результаты трех рассмотренных методов довольно неплохо согласуются между собой: в случае легирования кремнием (n-тип структур)

совпадение более точное, а в случае легирования полупроводниковых слоев цинком для р-структур появляется довольно большой разброс в данных ввиду конструктивных или концентрационных особенностей, которые, вероятно, связаны с изучением узкого диапазона концентраций прекурсора. Полученные линейные зависимости концентрации основных носителей заряда и проводимости в слое $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ от доли легирующего прекурсора (дисилана и диметилцинка) в газовой смеси подтверждаются данными работы [8], они повышаются линейно по мере увеличения концентрации легирующего компонента в составе исследуемых структур. Поскольку в работе [8] приведены результаты для других прекурсоров легирующих компонентов в газовой фазе (силан и диэтилцинк), а также отличается температура роста для исследуемых структур, можно лишь заключить, что для аналогичных прекурсоров получена аналогичная зависимость тремя разными методами.

Метод, основанный на эффекте Холла (Ван-дер-Пау), как известно, позволяет определять широкий перечень электрофизических характеристик образцов: подвижности и концентрации ОНЗ, удельные поверхностные и объёмные сопротивления (удельные проводимости), коэффициенты Холла, типы проводимости исследуемых слоев. При этом его техническая реализация позволяет исключить целый ряд источников погрешности измерений. Но данный метод является разрушающим и требует трудоёмких процедур пробоподготовки, поэтому целесообразно его применение на стадии отработки роста новых эпитаксиальных слоёв материалов.

Основным преимуществом метода ЭХП является возможность исследования слоистых приборных структур и определения концентрации ОНЗ в каждом из слоёв структуры без дополнительной пробоподготовки, а также возможность определения глубины залегания р-п-перехода. Но данный метод также является разрушающим, а процедура проведения измерений достаточно трудоёмка: работа со слоями, сильно отличными по составу требует индивидуального подбора электролита и его смены в процессе измерений; получение профиля ОНЗ по глубине в структурах с большими перепадами концентрации легирующей примеси не всегда возможно. С учетом этих особенностей, данный метод находит применение при отработке роста новых материалов и частей элементов приборной структуры.

Преимуществом БИПС является его неразрушающий характер, возможность проведения экспресс измерений удельного поверхностного и объёмного сопротивления и картографирования образцов.

Исходя из этого, целесообразно его применение для периодической проверки технологической точности ростового оборудования, в частности, на однородность образцов большой площади. Как показано, на основе результатов измерений возможно рассчитать концентрацию ОНЗ в исследуемом слое. Однако наблюдаемая расхожимость результатов с другими методами для образцов с низким уровнем легирования не позволяет использовать этот метод, как основной.

Каждый из рассмотренных методов занимает свое место в комплексе работ по достижению требуемых электрофизических характеристик приборной структуры, методы являются взаимодополняющими и органично вписываются в общую методику. Приведенное сопоставление результатов измерений, проведенных при одинаковых условиях на однотипных образцах, позволяет, при необходимости, говорить о достаточности использования одного из трех рассмотренных методов.

Выводы

Предложена методика исследования основных электрофизических характеристик эпитаксиальных слоев с учетом оценки однородности на образцах большой площади, на примере полученных методом МОС-гидридной эпитаксии твердых растворов $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ р- и п-типов.

Приведено сопоставление результатов, полученных различными методами: фотолюминесценции, бесконтактного измерения поверхностного сопротивления, Ван-дер-Пау (эффект Холла) и вольтфардного (электрохимического) профилирования (ЭХП), методы *in situ* контроля.

Определены области применимости наиболее простых в реализации методов и методик.

Получена корреляция результатов различных прямых и косвенных методов измерения.

Выработан единый подход к проведению характеристики эпитаксиальных слоёв структур типа InGaP/InGaAs/Ge ФЭП космического назначения, применимый в производстве.

Авторы выражают благодарность своим коллегам: к.х.н. Н.Т. Вагановой, к.х.н. С.К. Шарову, к.ф.-м.н. Б.В. Жалнину, А.О. Стрельникову, А.А. Наумовой за ценные консультации и проведение экспериментальных работ.

Литература/References

1. Якимов Е.Б. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. Черноголовка,

- Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, 2012, с. 18 – 21.
- Yakimov E.B. Poverkhnost' [Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques], 2012, pp. 18 – 21. (in Russ.)
 2. Лебедев А.А., Цыникин С.А., Леднев А.М. Система контроля параметров эпитаксиального роста полупроводниковых наногетероструктур солнечных элементов космического назначения. Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. 2013, № 31, с. 15 – 24.
 - Lebedev A.A., Tsynikin S.A., Lednev A.M. Sistema kontrolya parametrov epitaksial'nogo rosta poluprovodnikovyyh nanogeterostruktur solnechnyyh elementov kosmicheskogo naznacheniya [System of monitoring the parameters of epitaxial growth of semiconductor nanoheterostructures of solar cells for space purposes], Avtonomnaya energetika: tekhnicheskij progress i ekonomika [Autonomous energy: technical progress and economics], 2013, no. 31, p. 15 – 24. (In Russ.)
 3. Интернет база данных Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук [Электронный ресурс]. <http://www.matprop.ru> (дата обращения 13.09.2017).
 - <http://www.matprop.ru>.
 4. Слыщенко Е.В., Наумова А.А., Лебедев А.А., Генали М.А., Вагапова Н.Т., Жалнин Б.В. Обзор современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АІІІВ. Сибирский журнал науки и технологий. Красноярск, 2018, Т 19, № 2, с. 308 – 324.
 - Slyshchenko E.V., Naumova A.A., Lebedev A.A., Genali M.A., Vagapova N.T., Zhalnin B.V. Obzor sovremennyh fotoelektricheskikh preobrazovatelej kosmicheskogo naznacheniya na osnove soedinenij АІІІВ [Review of modern photoelectric space converters based on III–V compounds]. Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologii [Siberian journal of science and technology], Krasnoyarsk, 2018, v 19, no. 2, pp. 308 – 324. (in Russ.)
 5. Андреев В.М., Калюжный Н.А., Лантратов В.М. и др. Каскадный фотопреобразователь и способ его изготовления. Пат. № 2382439; заявл. 05.06.2008; опубл.: 20.02.2010, Бюл. № 5. РФ. https://i.moscow/patents/ru2382439c1_20100220.
 - Andreev V.M., Kalyuzhnyj N.A., Lantratov V.M. et al. Kaskadnyj fotopreobrazovatel' i sposob ego izgotovleniya [Cascade photoconverter and method of its manufacture]. Pat. 2382439; 05.06.2008; publ.: 20.02.2010, Vyul. No. 5, RF
 6. Воеводкин Г.С., Рябцева М.В., Бадурин И.В., Вагапова Н.Т. и др. Адаптированная методика оценки радиационной деградации фотоэлектрических преобразователей концентрированного солнечного излучения и их каскадов на базе InGaP, InGaAs и Ge. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2021, № 3, с. 5 – 10.
 - Voevodkin G.S., Ryabceva M.V., Badurin I.V., Vagapova N.T. et al. Adaptirovannaya metodika ocenki radiacionnoj degradacii fotoelektricheskikh preobrazovatelej koncentrirovannogo solnechnogo izlucheniya i ih kaskadov na baze InGaP, InGaAs i Ge. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu [Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment], 2021, № 3, pp. 5 – 10.
 7. Naumova A.A., Lebedev A.A., Zhalnin B.V., Vagapova N.T., Kagan M.B., Smirnov A.A., Sharov S.K. Investigation In_xGa_{1-x}P and In_xAl_{1-x}P heterostructures for cascade solar cells. AIP Conference Proceedings, 2021, v. 2318. <https://doi.org/10.1063/5.0036170>.
 8. Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А. МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники, Москва, ТЕХНОСФЕРА, 2018, гл. 7, с. 104.
 - Akchurin R.Kh., Marmalyuk A.A. MOS-gidridnaya epitaksiya v tekhnologii materialov fotoniki i elektroniki [MOS-hydride epitaxy in the technology of photonics and electronics materials], Moscow, Technosphere, 2018, ch. 7, 104 p. (In Russ.)
 9. Хлудков С.С., Толбанов О.П., Вилисова М.Д., Прудаев И.А. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами, 2016, глава 1, 258 с.
 - Khludkov S.S., Tolbanov O.P., Vilisova M.D., Prudaev I.A. Poluprovodnikovyye pribory na osnove arsenida galliya s glubokimi primesnymi centrami [Semiconductor devices based on gallium arsenide with deep impurity centers], 2016, chapter 1, 258 p. (In Russ.)
 10. Акимова Г.Н. Электронная техника. Москва, Маршрут, 2003, 290 с. ISBN 5-89035-105-2. Akimova G.N. Elektronnaya tekhnika [Electronic technology], Moscow, Route, 2003, 290 p. (In Russ.) ISBN 5-89035-105-2.
 11. Лебедев А.А., Вагапова Н.Т., Наумова А.А., Смирнов А.А. Технология и оборудование для производства наногетероструктурных солнечных элементов: лаб. Практикум. М.: Изд. Дом НИТУ “МИСиС”, 2019, 119 с.
 - Lebedev A.A., Vagapova N.T., Naumova A.A., Smirnov A.A. Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva nanogeterostrukturnyyh solnechnyyh elementov [Technology and equipment for the production of nanoheterostructural solar cells], Moscow, Ed. House of NUST MISIS, 2019, 119 p. (In Russ.)
 12. Лебедев А.А., Смирнов А.А., Наумова А.А., Вагапова Н.Т., Жалнин Б.В. Получение заданных электрофизических характеристик слоев In_{0,01}Ga_{0,99}As: (Zn/Si) солнечных элементов в процессе эпитаксии из газовой фазы. Инженерный журнал: наука и инновации, 2020, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-2001>.

- Lebedev A.A., Smirnov A.A., Naumova A.A., Vagapova N.T., Zhalnin B.V. Poluchenie zadannykh elektrofizicheskikh harakteristik sloev In_{0,01}Ga_{0,99}As: (Zn/Si) solnechnykh elementov v processe epitaksii iz gazovoy fazy [Obtaining the specified electrical characteristics of In_{0.01}Ga_{0.99}As: (Zn/Si) layers of solar cells in the process of epitaxy from the gaseous phase], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2020, no. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-2001>. (In Russ.).
- 13. Горбачев В.В., Спицына Л.Г. Физика полупроводников. Москва, Металлургия, 1982, 336 с.
- Gorbachev V.V., Spitsyna L.G. Fizika poluprovodnikov [Physics of semiconductors], Moscow, Metallurgy, 1982, 336 p. (In Russ.).
- 14. Frolov D., Yakovlev G., Zubkov V. Investigation of delta-doped pHEMT InGaAs/GaAs/AlGaAs structures by the electrochemical capacitance-voltage technique. *Conf. Ser.*, 2016, v. 690, no. 1, art. 012015.
- 15. Фролов Д.С., Яковлев Г.Е., Зубков В.И. Диагностика морфологии и электронного спектра pHEMT-гетероструктур. Физические явления в твердых телах, жидкостях и газах. *Изв. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”*, 2016, № 2., с. 6 – 11.
- Frolov D.S., Yakovlev G.E., Zubkov V.I. Diagnostika morfologii i elektronnoy spektra pHEMT-geterostruktur [Diagnostics of the morphology and electronic spectrum of pHEMT heterostructures. Physical phenomena in solids, liquids and gases]. *Fizicheskie yavleniya v tverdykh telah, zhidkostyakh i gazah. Izv. SPb-GETU LETI*, 2016, № 2, pp. 6 – 11.
- 16. Bass S.J. Silicon and germanium doping of epitaxial gallium arsenide grown by the trimethylgalliumarsine method. *J. Cryst. Growth*, 1979, v. 47, pp. 613 – 618.
- 17. Kuech T.F., Veuhoff E., Meyerson B.S. Silicon doping of GaAs and Al_xGa_{1-x}As using disilane in metalorganic chemical vapor deposition. *J. Cryst. Growth*, 1984, v. 68, pp. 48 – 53.
- 18. Field R.J., Ghandhi S.K. Doping of gallium arsenide in a low pressure organometallic CVD system: I. Silane. *J. Cryst. Growth*, 1986, v. 74, pp. 543 – 550.
- 19. Glew R.W. Zinc Doping of MOCVD GaAs. *J. Cryst. Growth*, 1984, v. 68, pp. 44 – 47.
- 20. Hageman P.R., J. te Nijenhuis, Anders M.J., Gilling L.J. Dependence of impurity incorporation upon substrate misorientation during GaAs growth by metalorganic vapour phase epitaxy. *J. Cryst. Growth*, 1997, v. 170, pp. 270 – 275.
- 21. Шутов Д.А., Ситанов Д.В. Методы исследования материалов и структур. Иваново, Иван. Гос. хим.-технолог. ун-т, 2009, 19 с.
- Shutov D.A., Sitanov D.V. Metody issledovaniya materialov i struktur [Methods of research of materials and structures], Ivanovo, Ivan. State. Chemical technologist. university, 2009, 19 p. (In Russ.).
- 22. Скачков А.Ф. Физико-технологические основы создания трехкаскадных фотопреобразователей GaInP/GaAs/Ge с повышенной радиационной стойкостью. Краснодар, 2020, 154 с.
- Skachkov A.F. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy sozdaniya trekhkaskadnykh fotopreobrazovatelej GaInP/GaAs/Ge s povyshennoy radiacionnoy stojkost' [Physico-technological foundations for the creation of three-stage GaInP/GaAs/Ge photoconverters with increased radiation resistance], Krasnodar, 2020, 154 p. (In Russ.).

*Статья поступила в редакцию — 29.12.2022 г.
после доработки — 06.03.2023 г.
принята к публикации — 07.03.2023 г.*

Платонов Николай Дмитриевич — ФГБОУ ВО “Казанский Государственный Энергетический Университет” (Казань, 420066, ул. Красносельская 51), аспирант, специализируется в области физики полупроводников. E-mail: nickiplatonov@gmail.com.

Лебедев Андрей Александрович — АО “Научно-производственное предприятие “Квант” (Москва, 129626, 3-я Мытищинская улица, 16, стр. 26), начальник отдела АО “НПП “Квант”; НИТУ “МИСиС” (119049, Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1), старший преподаватель кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, специалист в области создания перспективных ФЭП космического назначения. E-mail: lebedev_aa@npp-kvant.ru.

Матухин Вадим Леонидович — ФГБОУ ВО “Казанский Государственный Энергетический Университет” (Казань, 420066, ул. Красносельская 51), доктор физико-математических наук, профессор кафедры “физика” ФГБОУ КГЭУ, специалист в области спектроскопии ядерного квадрупольного резонанса. E-mail: matukhinvl@mail.ru.

Смирнов Александр Андреевич — АО “Научно-производственное предприятие “Квант” (Москва, 129626, 3-я Мытищинская улица, 16, стр. 26), инженер-технолог 1 категории АО “НПП “Квант”, специалист в области создания перспективных ФЭП космического назначения. E-mail: smirnov_aa@npp-kvant.ru.

Иванов Александр Федорович — ФГБОУ ВО “Казанский Государственный Энергетический Университет” (Казань, 420066, ул. Красносельская 51), аспирант, специализируется в области физики полупроводников. E-mail: ivanovaleksandr@yandex.ru.

Methods for Studying the electrophysical characteristics of epitaxial layers of solid layers n/p- types of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ for large area device structures

N. D. Platonov, A. A. Lebedev, V. L. Matukhin, A. A. Smirnov, A. F. Ivanov

The production of epitaxial layers requires the search for simple, technologically advanced and accurate methods for assessing the basic properties of layers and compositions made from them. The issue is especially acute for developers of multistage photovoltaic converters (PVCs) for space applications, which are distinguished by a complex heterostructure, including 5 or more p-n junctions and a large area. The work carried out a search for an optimal method for studying the electrical characteristics of thin semiconductor layers of the n/p- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ type with different doping levels. The main task is to measure the basic electrical characteristics in various ways: resistivity (conductivity), concentration of the main charge carriers, the dependence of the main electrical parameters on the type and level of doping and their comparison. Using the example of p- and n-type $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ solid solutions obtained by MOS-hydride epitaxy, a technique for studying the main electrical characteristics of epitaxial layers is proposed, taking into account the assessment of homogeneity on large-area samples. A comparison of the results obtained by various methods is presented: photoluminescence, non-contact measurement of surface resistance, Van der Pauw (Hall effect) and capacitance-voltage (electrochemical profiling (ECP), in situ control methods. Based on the results obtained and comparison with literature data, conclusions are drawn about the need, sufficiency and complementarity of methods for monitoring and studying semiconductor epitaxial structures.

Key words: photoelectric converter (PVC), semiconductor layers, epitaxial layer (EL), resistivity, conductivity, majority charge carrier concentration (MCC), doping level.

Platonov Nikolai — Kazan State Power Engineering University (Kazan, 420066, Krasnoselskaya st. 51), postgraduate student of department of physics, scientific specialty Semiconductor physics). E-mail: nickiplatonov@gmail.com.

Lebedev Andrey — JSC “Scientific and Production Enterprise “KVANT” (Moscow, 129626, 3rd Mytishchinskaya street, 16, building 26), head of the department of JSC “NPP “Kvant”, National University of Science and Technology “MISIS” (Moscow, 119049, Leninskiy Prospekt 4, NUST MISIS), senior lecturer of the Department of Semiconductor Electronics and Semiconductor Physics, a specialist in the field of creating promising solar cells for space purposes. E-mail: lebedev_aa@npp-kvant.ru.

Matukhin Vadim — Kazan State Power Engineering University (Kazan, 420066, Krasnoselskaya st. 51), Dr of Sci (Phys Math), professor of the department of physics, FGBOU KSUE, specialist in the field of nuclear quadrupole resonance spectroscopy. E-mail: matukhinvl@mail.ru.

Smirnov Alexander — JSC “Scientific and Production Enterprise “KVANT” (Moscow, 129626, 3rd Mytishchinskaya street, 16, building 26), engineer-technologist of the 1st category of JSC NPP Kvant, a specialist in the field of creating promising solar cells for space purposes. E-mail: smirnov_aa@npp-kvant.ru.

Ivanov Alexander — Kazan State Power Engineering University (Kazan, 420066, Krasnoselskaya st. 51), postgraduate student of the department of physics, scientific specialty Semiconductor Physics). E-mail: ivanovaleksandr@yandex.ru.