

Получение заданных электрофизических характеристик слоев $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$: (Zn и Si) солнечных элементов в процессе эпитаксии из газовой фазы

© А.А. Лебедев^{1,2}, А.А. Смирнов^{1,2}, А.А. Наумова^{1,2},
Н.Т. Вагапова^{1,2,3}, Б.В. Жалнин¹

¹АО «НПП «Квант», Москва, 129626, Россия

²НИТУ «МИСиС», Москва, 119049, Россия

³РТУ МИРЭА, Москва, 119454, Россия

Приведены результаты исследований проводимости и концентрации основных носителей заряда слоев $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ среднего каскада и других структурных частей солнечного элемента $\text{InGaP} / \text{InGaAs} / \text{Ge}$ космического назначения в зависимости от типа и уровня легирования, задаваемого в процессе эпитаксиального роста из газовой фазы варьированием параметров подачи источников примесей Si и Zn. Исследования выполнены методами рентгеновской дифрактометрии, бесконтактного измерения проводимости, электрохимической профилометрии, Ван дер Пау. Подтверждена линейная зависимость концентрации основных носителей заряда в слое от доли легирующего прекурсора в газовой смеси. Определены коэффициенты пропорциональности для кремния и дисилана в качестве его прекурсора, для цинка и его прекурсора диметилцинка. Показаны результаты исследований на равномерность распределения легирующей примеси, выдвинуты и обсуждены предположения о влиянии градиента температурного поля и напряженного состояния в слое и подложке.

Ключевые слова: солнечный элемент, газозная эпитаксия, легирование, электрофизические характеристики, арсенид индия галлия, диметилцинк, дисилан, метод Ван дер Пау, рентгеновская дифрактометрия, электрохимическая профилометрия, бесконтактное измерение проводимости

Введение. Современный уровень развития солнечных элементов (СЭ) во многом обусловлен совершенными технологиями эпитаксиального роста из газовой фазы (ГФЭ) [1]. Действительно, рекордную эффективность преобразования солнечного излучения показывают СЭ на основе соединений АПВВ, сложная многослойная гетероструктура которых создается таким методом. Это утверждение относится прежде всего к каскадным СЭ с КПД $\approx 30\%$, изготавливаемым серийно для создания из них фотогенерирующей части солнечных батарей современных космических аппаратов [1]. Тем не менее перспективные разработки по 4-, 5-, 6-каскадным СЭ космического назначения (для преобразования внеатмосферного излучения — спектра АМ0 с КПД $\approx 36\%$ [2–4]) ведущие мировые компании-разработчики выполняют с применением метода ГФЭ или с использованием комбинации методов ГФЭ и молекулярно-лучевой эпитаксии [5]. Следует отметить, что наибольшее распространение получил

метод эпитаксии из газовой фазы с использованием металлоорганических и гидридных источников (МОСГЭ) благодаря обеспечению высокой производительности: скорость роста до 2000 Å/мин в сочетании с возможностью обработки большого количества (до 15 шт.) подложек диаметром 100 мм, а также достаточной точностью по составу и минимальным толщинам слоев [6, 7].

Описание и управление процессом создания полупроводниковой структуры с заданными свойствами в процессе эпитаксиального роста сводится фактически к установлению зависимости технологический параметр — условия роста — свойство эпитаксиального слоя. К ключевым электрофизическим характеристикам слоев структуры СЭ относятся:

- удельная электрическая проводимость;
- концентрация основных носителей заряда N (ОНЗ).

Характеристики задаются прецизионным легированием, т. е. подачей в ростовую камеру газовой смеси, содержащей прекурсора (источники веществ) легирующей примеси. Наиболее часто используемыми для легирования материалов типа АПВВ примесями являются Si, Te, Se, S в качестве донорных примесей и Zn, C — в качестве акцепторных [6, 8–10]. Процесс МОСГЭ в целом протекает в условиях, далеких от равновесных, его чувствительность ко многим параметрам роста, включая аппаратное оформление, побуждает к проведению исследований, направленных на получение требуемого профиля легирования для конкретной приборной структуры и условий роста [6, 8–10]. В частности, широкое распространение получили горизонтальные реакторы промышленного типа, конструкция которых определяет несколько меньшую скорость роста и другие особенности по сравнению с аналогичными вертикальными реакторами [11, 12].

Цель настоящей статьи — экспериментально подтвердить применимость полученных в ходе исследования обобщенных результатов и рассчитанных на основе теоретических выкладок зависимостей к получению конкретного материала, представить технологам методическую составляющую исследования, изложенного в настоящей статье.

Так, для получения в горизонтальном реакторе МОСГЭ структуры СЭ со слоем InGaAs среднего каскада с заданной проводимостью предварительно необходимо для этого слоя построить зависимость измеряемого свойства (проводимости) от задаваемого технологического параметра (потока прекурсора) при прочих заданных параметрах (условиях роста) в данной конкретной машине эпитаксиального роста. В ряде работ [6, 8] было показано, что такие зависимости имеют линейный характер. Тем не менее, как отмечают специалисты [6], даже на фактически одинаковых машинах (одного производителя, одной модели и, соответственно, конструкции) для получе-

ния материалов с заданными свойствами необходима тонкая настройка, подразумевающая установление указанной зависимости, и простой перенос технологии (технологического рецепта) с одной машины на другую невозможен.

Экспериментальная часть. Для подтверждения линейной зависимости концентрации легирующих примесей от концентрации лигатуры в газовой фазе процесса МОСГЭ в вертикальном реакторе промышленного типа с вращающимся подложконосителем на 13 подложек и распределенным впрыском реагентов были изготовлены две серии (S и Z), включающие 27 образцов (эпитаксиальная структура $In_{0,01}Ga_{0,99}As$ толщиной $\sim 1,3$ мкм на подложках арсенида галлия толщиной 600 мкм, диаметром 100 мм) с различным типом проводимости (n и p соответственно) и номинальными уровнями легирования 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} $см^{-3}$.

В качестве прекурсоров примеси n -типа проводимости использован дисилан (Si_2H_6), p -типа — диметилцинк ($Zn(CH_3)_2$), остальные прекурсоры — $Ga(CH)_3$, $In(CH)_3$, AsH_3 . Характеристика процесса приведена ниже:

Температура роста, °С	~ 640
Отношение концентраций прекурсоров компонентов в газовой фазе V / III	≈ 9
Скорость вращения стола с подложконосителем, об / мин	500
Суммарный расход топлива, л / мин	80
Давление, мбар	50

По кривым качания, полученным с помощью рентгеновской дифрактометрии, определен параметр решетки эпитаксиальных слоев исследуемых образцов и подтвержден состав твердого раствора $In_{0,01}Ga_{0,99}As$.

Методом бесконтактного измерения проводимости (БИП) найдено значение удельного сопротивления R исследуемых слоев. По профилям распределения ОНЗ в слоях структуры образцов, полученных в результате травления на электрохимическом профилометре (ЭХП), установлена концентрация легирующей примеси (Si или Zn). Проведена пробоподготовка (резка, нанесение металлических контактов) образцов для измерения R и концентрации ОНЗ методом Ван дер Пау. Результаты измерений проанализированы и сопоставлены между собой [13]

Обсуждение результатов. Анализ кривых качания показал, что при различном легировании эпитаксиальных слоев InGaAs (Si и Zn) параметр решетки изменяется незначительно:

- максимальное относительное отклонение параметра решетки при различных типах и уровнях легирования составило 0,009 %;
- максимальное рассогласование с подложкой 0,07 %.

Состав материала матрицы $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ составил (по In): $\Delta C_{\text{In}}^{\text{Tв}} = 0,0099 \pm 0,00038$.

Однако рентгенограммы образцов с примесями разного типа (*S*-серия $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$: Si и *Z*-серия $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$: Zn), приведенные на рис. 1, *a*, несколько различаются. При легировании образцов кремнием интенсивность пиков выше; ширина пиков исследуемых слоев остается примерно одинаковой; более высокие и широкие пики соответствуют более высокому уровню легирования. При легировании

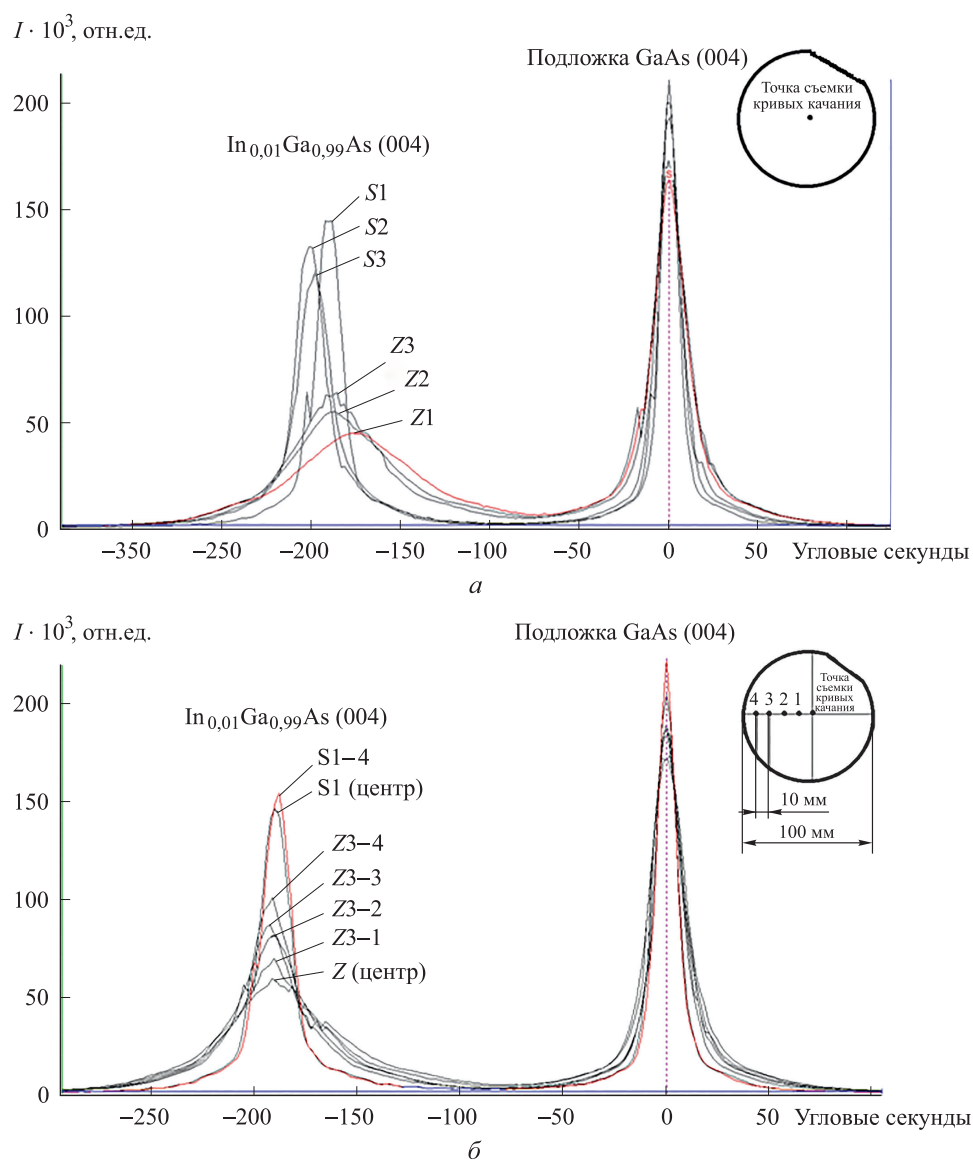


Рис. 1. Кривые качания, полученные рентгеновской дифрактометрией:

a — съемка в центре пластины образцов S1–S3 и Z1–Z3;

б — съемка вдоль радиуса образца Z3

слоев цинком видна тенденция потери интенсивности и уширения пиков с увеличением концентрации легирующего компонента (Zn). Вероятно, это связано с диффузным рассеянием рентгеновского излучения искаженной кристаллической структурой, возникающей вследствие превалирующего встраивания цинка в вакантные узлы решетки арсенида галлия при конкуренции между атомами цинка и индия, что объясняется близкими значениями радиусов $d_{ат}$ этих атомов ($d_{атZn} = 138$ пм, $d_{атGa} = 141$ пм в сравнении с $d_{атIn} = 166$ пм).

В [14] приведены данные, свидетельствующие о том, что тенденция уширения кривых качания имеет место и в случае высокого легирования ($2,18 \cdot 10^{17} \dots 5,82 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) арсенида галлия кремнием. Ряд предыдущих исследований указывает на тот факт, что при концентрациях кремния, превышающих 10^{18} см^{-3} , можно наблюдать снижение электрической активности Si ввиду возникновения компенсирующих дефектов соединений SiAs (амфотерное включение атомов Si в кристаллическую решетку GaAs), образования пар Si-Si, кластеров Si и комплекса донорных Ga-вакансий SiGa-VGa.

Анализ серии кривых качания, снятых вдоль радиуса пластин, показал, что форма и интенсивность пиков рентгенограмм, полученных в центре и на краях легированных кремнием пластин, почти совпадают, в то время как в случае легирования Zn прослеживается тенденция уширения пиков и уменьшения их интенсивности при съемке от центра к краям, как показано на рис. 1, б для образца Z3 с малым легирование. Схема съемки кривых качания также приведена на рис. 1, б.

Если сопоставить зависимость уширения пиков (отношение площадей исследуемого пика и пика подложки) от радиуса пластины (от центра к краям) с диаметральной профилем проводимости, полученным методом БИП, можно увидеть схожесть этих кривых, что, вероятно, свидетельствует о наличии неравномерности распределения Zn по площади пластины. Радиальный профиль уширения отражен относительно центра пластины (рис. 2).

Учитывая тот факт, что все условия эпитаксиального роста обеих серий (S и Z) образцов были идентичны (за исключением состава газовой смеси, и то только в части подачи прекурсора легирующей примеси), такое различие в поведении лигатуры можно попытаться объяснить с точки зрения термодинамики.

По соотношению между входным парциальным давлением лигатуры P_0 и ее равновесным парциальным давлением на поверхности роста P^* легирующие примеси можно условно подразделить на две группы [6, 8]:

- нелетучие примеси с низким значением P^* , которое много меньше P_0 (Si, Ge), для них ожидается независимость уровня легиро-

вания от температуры процесса и отношения V / III при одновременном уменьшении уровня легирования с увеличением скорости роста;

- летучие примеси со сравнимыми значениями P_0 и P^* (Zn, S, Se, Te), демонстрирующие увеличение уровня легирования с уменьшением температуры (отражая температурную зависимость равновесного парциального давления) и увеличением отношения V / III при отсутствии влияния изменения скорости роста на уровень легирования.

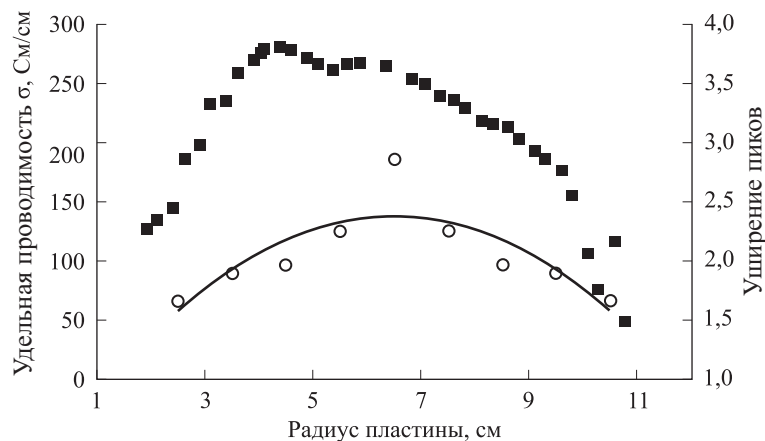


Рис. 2. Профиль проводимости и относительного уширения рентгеновских пиков для образца Z3:

■ — удельная проводимость σ ; ○ — уширение пиков на кривых качания

Анализируя приведенный на рис. 2 профиль, можно предположить, что увеличенное содержание Zn в центре образца Z3 по сравнению с содержанием его на краях связано с наличием градиента температуры по площади пластины во время эпитаксиального роста. Причиной тому, вероятно, является кривизна подложки, неплотное ее прилегание к подложконосителю и, как следствие, различный теплоотвод в центре и на краях пластины. Тогда от более нагретых краев цинк диффундирует в менее нагретую центральную часть и там задерживается.

Наличие дефлектометра системы *in-situ* контроля позволяет свидетельствовать, что во время роста структур всех образцов обеих серий наблюдалась схожая картина — изменение кривизны (от слабо положительной, что соответствует изгибу с возвышением краев относительно центра, до слабо отрицательной — центр выше краев), которое во время роста слоя было незначительным и составляло до 10 км^{-1} . Динамика изменения кривизны соответствует предположению о возникновении в структуре [10, 11]:

- сжимающего напряжения в эпитаксиальном слое;
- растягивающего напряжения в подложке из-за роста слоя с большим, чем у подложки, параметром решетки.

Однако распределенная система пирометрии-интерферометрии, позволяющая контролировать температуру и скорость роста на трех областях пластины, не подтверждает наличие значимого градиента температуры: разница в значениях температуры во время роста слоев между разными зонами площади пластины не превышала $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($639...642\text{ }^{\circ}\text{C}$), что соответствует погрешности измерительной системы.

Похожий вид профилей проводимости образцов серии Z , имеющих W -форму, и слабо выраженный U -образный вид профилей образцов S -серии близки к профилям напряжений, возникающих во время роста слитков (из них получают подложки для эпитаксиального роста) по методу Чохральского вследствие наличия градиента температуры. Можно сделать предположение о наследовании напряжений подложки растущим слоем, что приводит к особенностям во встраивании легирующей примеси. Наблюдаемый эффект незначителен и проявляется при низких уровнях легирования ($\sim 10^{16}$), что позволило пренебречь им при построении искомых зависимостей концентрации легирующих примесей от концентрации лигатуры в газовой фазе путем усреднения экспериментальных значений при многократных измерениях и использования нескольких независимых измерительных систем.

Полученные зависимости проводимости и концентрации ОНЗ (легирующего компонента) в твердом теле от доли прекурсора легирующего компонента в потоке прекурсоров элементов III группы приведены на рис. 3, 4.

Как и предполагали авторы настоящей статьи, искомые зависимости носят линейный характер (см. рис. 3, 4). Считая, что процесс легирования нелетучими примесями Si лимитируется подачей лигатуры к поверхности роста, когда концентрация в ядре потока $C_{\text{л}}^0$ существенно превышает концентрацию на поверхности роста $C_{\text{л}}^*$, для мольной доли легирующей примеси $x_{\text{л}}$ можем записать следующее соотношение с учетом $C_{\text{л}} \ll C_{\text{III}}$ и при условии постоянной подачи элемента III группы [6]:

$$x_{\text{л}} = KP_{\text{л}}^0 = kn_{\text{л}}^0,$$

где K — отношение коэффициентов массоотдачи прекурсоров; $P_{\text{л}}^0$ — исходное парциальное давление лигатуры в парогазовой смеси, Па; $n_{\text{л}}^0$ — расход лигатуры, подаваемой в реактор, моль/мин.

Считая концентрацию носителей заряда N прямо пропорциональной доле легирующего элемента в слое $x_{\text{л}}$, можно заключить, что экспериментально определенное по образцам S -серии значение k (для кремния и дисилана в качестве его прекурсора) составило $1 \cdot 10^{22} \dots 1,2 \cdot 10^{22}\text{ см}^{-3}$.

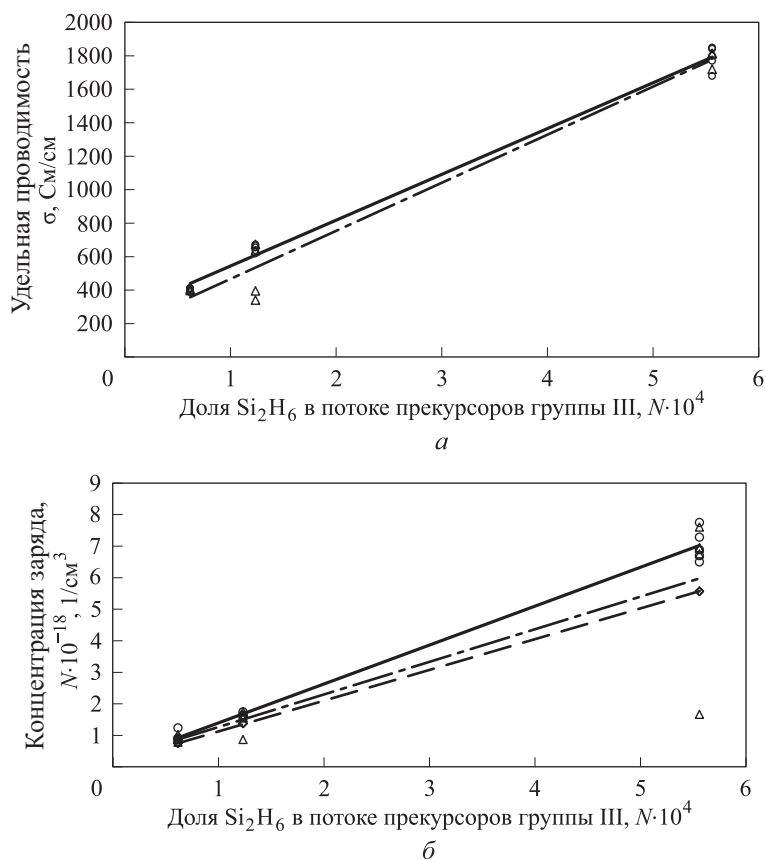


Рис. 3. Зависимость электрофизических характеристик от доли Si_2H_6 в потоке прекурсоров группы III для образцов S-серии:

a — удельная проводимость σ ; *b* — концентрация носителей заряда; \circ и — — — — бесконтактное измерение проводимости; Δ и — — — — метод Ван дер Пау; \diamond и — — — — электрохимический профилометр

Для образцов Z-серии значение k (для цинк и диметилцинк в качестве его прекурсора) составило $2,5 \cdot 10^{20} \dots 3,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Однако следует учитывать, что поскольку легирование летучими примесями Zn считают лимитированным поверхностным процессом, когда порядки величин $C_{\text{л}}^*$ и $C_{\text{л}}^0$ становятся близкими, величиной $C_{\text{л}}^*$ нельзя пренебрегать. Тогда для содержания лигатуры, согласно закону Генри, можно записать [6]:

$$x_{\text{л}} = k_{\text{л}} (C_{\text{л}}^0 - C_{\text{л}}^*) = k_{\text{л}} (P_{\text{л}}^0 - P_{\text{л}}^*),$$

где $P_{\text{л}}^0$ и $P_{\text{л}}^*$ — исходное и равновесное парциальное давление лигатуры в парогазовой смеси и у поверхности роста соответственно.

Таким образом, зависимость доли легирующей примеси от расхода лигатуры должна спрямляться в координатах $x_{\text{л}} = f(P_{\text{л}}^0 - P_{\text{л}}^*)$.

Тем не менее в [15] была получена линейная зависимость дырочной концентрации в $In(Al_{0,25}Ga_{0,75})As$ от потока диэтилцинка в газовой фазе при температуре 650 и 600 °С:

- при более низкой температуре наблюдается больший угол наклона (бóльшая k) и выполаживание зависимости, свидетельствующее о насыщении;
- при температуре 650 °С экспериментальные зависимости (рис. 4, б) имеют похожий наклон [15].

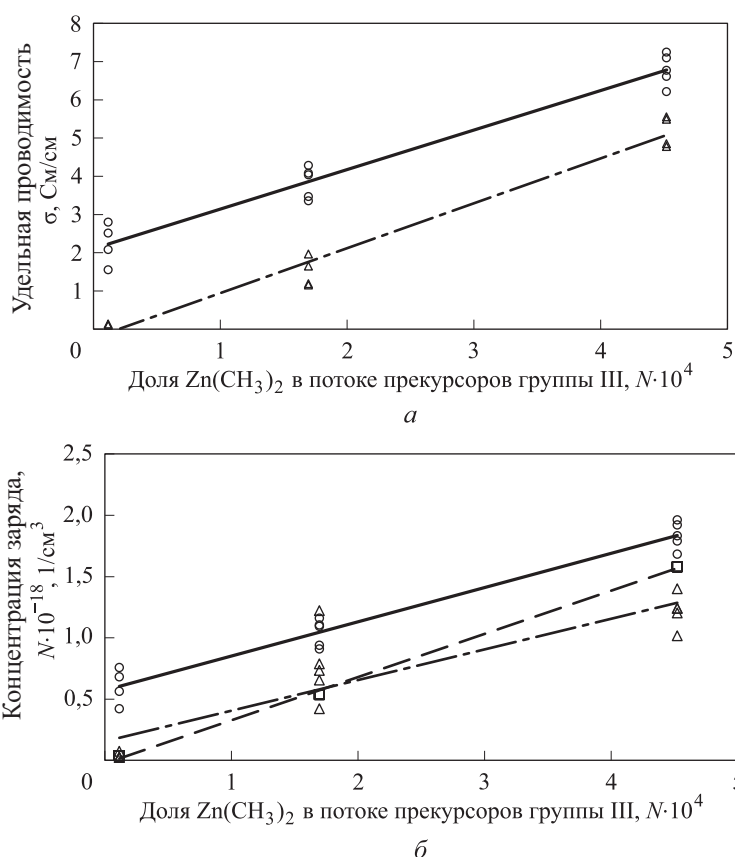


Рис. 4. Зависимости электрофизических характеристик от доли $Zn(CH_3)_2$ в потоке прекурсоров группы III для образцов Z-серии: а — удельная проводимость σ ; б — концентрация носителей заряда; \circ и — бесконтактное измерение проводимости; Δ и — метод Ван дер Пау; \square и — электрохимический профилометр

Заклучение. Дальнейшее развитие космической фотовольтаики, продиктованное увеличением потребности в высокой энергооборуженности современных и перспективных космических аппаратов различного назначения, в среднесрочной перспективе неразрывно связано с совершенствованием каскадных солнечных элементов [6],

что делает актуальным исследование и совершенствование методов эпитаксиального роста и их аппаратного оформления. Несмотря на достаточное упоминание в литературе [6, 8, 14, 15], особенности некоторых аспектов эпитаксиального роста из газовой фазы, например легирования, до сих пор не до конца исследованы и поддаются управлению.

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, встречающимися в [14, 15]. Коэффициенты пропорциональности, составившие для кремния и дисилана в качестве его прекурсора $1 \cdot 10^{22} \dots 1,2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, для цинка и его прекурсора диметилцинка $2,5 \cdot 10^{20} \dots 3,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, должны позволить создавать слои $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ (Zn и Si) солнечных элементов с заданными электрофизическими характеристиками эпитаксией из газовой фазы в вертикальном реакторе промышленного типа. Результаты исследований на равномерность распределения легирующей примеси, важные для получения больших по площади приборных структур солнечных элементов [9, 12], подлежат дополнительному обсуждению: выдвинутые предположения о влиянии градиента температурного поля не подтверждаются экспериментальными данными, а предположения о влиянии напряженного состояния в слое и подложке нуждаются в подтверждении.

Авторы выражают благодарность своим коллегам С.К. Шарову, А.М. Болотину, А.М. Ледневу и Н.Д. Платонову.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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 АІІВV. *Сибирский журнал науки и технологий*, 2018, № 2, с. 308–324.
- [2] Sharps P., Aiken D., Cho B., Cruz S., Derkacs D., Fatemi N., Haas A., Kerestes C., Miller N., Pantha B., Patel P., Stan M., Stavrides A., Steinfeldt J., Struempel C., Whipple S. Next generation radiation hard IMM space solar cells. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 16, no. 03002, pp. 1–5. URL: <https://www.e3s-conferences.org/> (дата обращения 03.02.2020). DOI: 10.1051/e3sconf/20171603002
- [3] Suarez F., Liu T., Sukiasyan A., Lang J., Pickett E. Advances in dilute nitride multi-junction solar cells for space power applications. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 16, no. 03006, pp. 1–3. URL: <https://www.e3s-conferences.org/> (дата обращения 03.02.2020). DOI: 10.1051/e3sconf/20171603006
- [4] Паханов Н.А., Андреев В.М., Шварц М.З., Пчеляков О.П. Современные архитектуры и технологии высокоэффективных солнечных элементов на гетероструктурах III-V для космического и наземного применения. *Автоматрия*, 2018, № 2, с. 93–112.

- [5] Guter W., Dunzer F., Ebel L., Hillerich K., Köstler W., Kubera T., Meusel M., Postels B., Wächter C. Space solar cells — 3G30 and next generation radiation hard products. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 16, article 03005. URL: <https://www.e3s-conferences.org/> (дата обращения 03.02.2020). DOI: 10.1051/e3sconf/20171603005
- [6] Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А. *МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники*. Москва, Изд-во ТЕХНОСФЕРА, 2018, 488 с.
- [7] Petrova-Koch V., Hezel R., Goetzberger A. *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics: Recent Developments*. 2nd Edition. Cham, Springer Nature, 2020, 300 p.
- [8] Stringfellow G.B. *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice*. 2nd Edition. New York, Academic Press, 1999, 572 p.
- [9] Лебедев А.А., Наумова А.А., Смирнов А.А., Гуляева Д.А., Леднев А.М. Достижение высокой однородности эпитаксиального роста слоев $In_xGa_{1-x}P$, $In_xGa_{1-x}As$ фотопреобразователей на установке МОСГФЭ промышленного типа. *Электронные и электромеханические системы и устройства: Тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов. АО «НПЦ «Полюс», 12–13 апреля 2018 г.* Томск, Изд-во АО «НПЦ «Полюс», 2018, с. 201–202.
- [10] Наумова А.А., Лебедев А.А., Слыщенко Е.В. Влияние технологических параметров роста на характеристики эпитаксиальных слоев $In_xGa_{1-x}P$ и $In_xAl_{1-x}P$ современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения. *Тез. докл. XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», 30 октября–3 ноября 2017 г.* Королёв, ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», 2017, т. 1, с. 128–129.
- [11] Наумова А.А., Лебедев А.А., Жалнин Б.В., Слыщенко Е.В., Вагапова Н.Т. Влияние соотношения In/Ga в газовой фазе на характеристики эпитаксиальных слоев $In_xGa_{1-x}P$ каскадных солнечных элементов. *Сибирский журнал науки и технологий*, 2018, № 1, с. 137–145.
- [12] Лебедев А.А., Смирнов А.А., Гуляева Д.А., Цыникин С.А., Наумова А.А. Моделирование газодинамики эпитаксиального роста полупроводниковой структуры фотоэлектрических преобразователей на основе материалов АШВУ. *Актуальные проблемы космонавтики: Труды XLIII Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сб. тез.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, т. 1, с. 84–86.
- [13] Платонов Н.Д. Исследование электрических характеристик слоев эпитаксиальных монокристаллических структур на основе $In_{0,01}Ga_{0,99}As$, в зависимости от типа и степени легирования. *Тез. докл. 71-х Дней науки студентов НИТУ «МИСиС»: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции*. Москва, Изд-во НИТУ «МИСиС», 2016, с. 439–440.
- [14] Tosaporn C. *Impurity Doping Effect in Compound Semiconductors*. Shinjuku, Kagami Memorial Research Institute for Materials Science and Technology, Waseda University, 2007, 131 p.
- [15] Huang Y. *InAlGaAs/InP Light Emitting Transistors and Transistor Lasers Operating Near 1.55 μm* . Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2010, 125 p.

Статья поступила в редакцию 23.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лебедев А.А., Смирнов А.А., Наумова А.А., Вагапова Н.Т., Жалнин Б.В. Получение заданных электрофизических характеристик слоев $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$: (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>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Королёвские чтения — 2020), Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 28–31 января 2020 г.

Лебедев Андрей Александрович — заместитель начальника отдела АО «НПП «Квант», ассистент преподавателя НИТУ «МИСиС». e-mail: otdel_17@npp-kvant.ru

Смирнов Александр Андреевич — инженер 2-й категории АО «НПП «Квант», аспирант НИТУ «МИСиС». e-mail: umc@npp-kvant.ru

Наумова Анастасия Александровна — заместитель начальника отдела АО «НПП «Квант», аспирант НИТУ «МИСиС». e-mail: naumova_aa@msk.npp-kvant.ru

Вагапова Наргиза Тухтамышевна — канд. хим. наук, начальник отдела АО «НПП «Квант», старший преподаватель НИТУ «МИСиС», доцент РТУ МИРЭА. e-mail: vagapova_nt@msk.npp-kvant.ru

Жалнин Борис Викторович — канд. физ.-мат. наук, начальник отдела, АО «НПП «Квант». e-mail: otdel_17@npp-kvant.ru

Obtaining the specified electrophysical parameters of $In_{0.01}Ga_{0.99}As:(Zn/Si)$ layers of solar cells in the epitaxial process from the gas phase

© A.A. Lebedev^{1,2}, A.A. Smirnov^{1,2}, A.A. Naumova^{1,2},

N.T. Vagapova^{1,2,3}, B.V. Zhalnin¹

¹Joint-Stock Company “Scientific-Production Enterprise “Kvant”,
Moscow, 129626, Russia

²National University of Science and Technology “MISIS”,
Moscow, 119049, Russia

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“MIREA — Russian Technological University”, Moscow, 119454, Russia

The paper presents the results of studying the electrophysical characteristics (conductivity and concentration of the main charge carriers) of $In_{0.01}Ga_{0.99}As$ layers of the middle cascade and other structural parts of the space-based $InGaP/InGaAs/Ge$ solar cell depending on the doping type and level specified during epitaxial growth from the gas phase by varying the supply parameters of the sources of Si and Zn impurities. The studies were performed using X-ray diffractometry, non-contact conductivity measurement, electrochemical C–V profilometry, van der Pau method (Hall effect). A linear dependence of the main charge carrier concentration in the layer on the fraction of the doping precursor in the gas mixture was confirmed. The proportionality coefficients were determined for silicon and its disilane precursor, for zinc and its dimethylzinc precursor. The results of the dopant distribution uniformity study are shown and discussed as well as the assumptions about the effects of the temperature field gradient and the stress state in the layer and substrate.

Keywords: solar cell, gas phase epitaxy with organometallic and hydride sources, doping, electrophysical characteristics, indium gallium arsenide, dimethylzinc, disilane, van der Pau method, X-ray diffractometry, C–V profilometry, non-contact conductivity measurement

REFERENCES

- [1] Slyshchenko Ye.V., Naumova A.A., Lebedev A.A., Genali M.A., Vagapova N.T., Zhalnin B.V. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii — Siberian Journal of Science and Technology*, 2018, no. 2, pp. 308–324.
- [2] Sharps P., Aiken D., Cho B., Cruz S., Derkacs D., Fatemi N., Haas A., Kerestes C., Miller N., Pantha B., Patel P., Stan M., Stavrides A., Steinfeldt J., Struempel C., Whipple S. Next generation radiation hard IMM space solar cells. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 16, no. 03002, pp. 1–5. Available at: <https://www.e3s-conferences.org/> (accessed February 3, 2020). DOI: 10.1051/e3sconf/20171603002
- [3] Suarez F., Liu T., Sukiasyan A., Lang J., Pickett E. Advances in dilute nitride multi-junction solar cells for space power applications. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 16, no. 03006, pp. 1–3. Available at: <https://www.e3s-conferences.org/> (accessed February 3, 2020). DOI: 10.1051/e3sconf/20171603006
- [4] Pakhanov N.A., Andreyev V.M., Shvarts M.Z., Pchelyakov O.P. *Avtometriya*, 2018, no. 2, pp. 93–112.

- [5] Guter W., Dunzer F., Ebel L., Hillerich K., Köstler W., Kubera T., Meusel M., Postels B., Wächter C. Space solar cells – 3G30 and next generation radiation hard products. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 16, no. 03005, pp. 1–6. Available at: <https://www.e3s-conferences.org/> (accessed February 3, 2020). DOI: 10.1051/e3sconf/20171603005
- [6] Akchurin R.Kh., Marmalyuk A.A. *MOS-gidridnaya epitaksiya v tekhnologii materialov fotoniki i elektroniki* [Organometallic hydride epitaxy in the technology of photonics and electronics materials]. Moscow, TEKHNOFERA Publ., 2018, 488 p.
- [7] Petrova-Koch V., Hezel R., Goetzberger A. *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics: Recent Developments*. 2nd Edition. Cham, Springer Nature Publ., 2020, 300 p.
- [8] Stringfellow G.B. *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice* 2nd Edition. New York, Academic Press Publ., 1999, 572 p.
- [9] Dostizheniye vysokoy odnorodnosti epitaksialnogo rosta sloyev $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ fotopreobrazovateley na ustanovke MOSGFE promyshlennogo tipa [Achieving high homogeneity of the epitaxial growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers of photoconverters using an industrial-type MOSGFE installation]. In: *Abstracts of the XIX scientific and technical conference. JSC «Scientific and Production Center «Polyus», 12–13 April 2018*. Tomsk, JSC «SPC «Polyus» Publ., 2018, pp. 201–202.
- [10] Naumova A.A., Lebedev A.A., Slyshchenko E.V. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov rosta na kharakteristiki epitaksialnykh sloyev $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ i $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{P}$ sovremennykh fotoelektricheskikh preobrazovateley kosmicheskogo naznacheniya [The influence of technological growth parameters on the characteristics of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{P}$ epitaxial layers of modern space-based photoelectric converters]. *Tezisy dokladov XXI Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov. PAO «RKK «Energiya» im. S.P. Koroleva», 30 oktyabrya — 3 noyabrya 2017 g.* [XXI Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists. S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, October 30 — November 3, 2017. Abstracts]. Korolyov, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya” Publ., 2017, vol. 1, pp. 128–129.
- [11] Naumova A.A., Lebedev A.A., Zhalnin B.V., Slyshchenko Ye.V., Vagapova N.T. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy — Siberian Journal of Science and Technology*, 2018, no. 1, pp. 137–145.
- [12] Lebedev A.A., Smirnov A.A., Gulyaeva D.A., Tsynikin S.A., Naumova A.A. Modelirovaniye gazodinamiki epitaksial'nogo rosta poluprovodnikovoy struktury fotoelektricheskikh preobrazovateley na osnove materialov AIIIBV [Simulation of the gas dynamics of the epitaxial growth of the photoelectric converter semiconductor structure based on AIIIBV materials]. *Trudy XLIII akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh-pionerov osvoyeniya kosmicheskogo prostranstva “Aktualnyye problemy kosmonavtiki”. Tezisy dokladov. Bauman MSTU*. [Proceedings of the XLIII Academic readings in cosmonautics, dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other prominent domestic pioneer scientists in space exploration “Actual problems of cosmonautics”. Abstracts. Bauman Moscow State Technical University]. Moscow, BMSTU Publ., 2019, vol. 1, pp. 84–86.
- [13] Platonov N.D. Issledovaniye elektricheskikh kharakteristik sloyev epitaksialnykh monokristallicheskikh struktur na osnove $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$, v zavisimosti ot tipa i stepeni legirovaniya [Study of the electrical characteristics of epitaxial sin-

- gle crystal structure layers based on $In_{0.01}Ga_{0.99}As$, depending on the type and degree of doping]. *71-ya Mezhdunarodnaya, mezhvuzovskaya i institutskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya: Dni nauki studentov NITU "MISiS". Tezisy dokladov* [71st International, interuniversity and institute scientific and technical conference: Days of Science of RTU "MISiS" Students]. Moscow, NUST "MISiS" Publ., 2016, pp. 439–440.
- [14] Tosaporn C. *Impurity Doping Effect in Compound Semiconductors*. Shinjuku, Kagami Memorial Research Institute for Materials Science and Technology, Waseda University Publ., 2007, 131 p.
- [15] Huang Y. *InAlGaAs/InP Light Emitting Transistors and Transistor Lasers Operating Near 1.55 μm* . Atlanta, Georgia Institute of Technology Publ., 2010, 125 p.

Lebedev A.A., Deputy Head of the Department, Joint-stock company "Scientific and production enterprise "Kvant". e-mail: otdel_17@kvant.ru

Smirnov A.A., Engineer of the 2nd category, Joint-stock company "Scientific and production enterprise "Kvant", postgraduate NITU "MISIS". e-mail: umc@npp-kvant.ru

Naumova A.A., Deputy Head of the Department, Joint-stock company "Scientific and production enterprise "Kvant", postgraduate NITU "MISIS".
e-mail: naumova_aa@msk.npp-kvant.ru

Vagapova N.T., Cand. Sc. (Chem.), Deputy Head of the Center, Joint-stock company "Scientific and production enterprise "Kvant", senior lecturer NITU "MISIS", associate professor RTU MIREA. e-mail: vagapova_nt@msk.npp-kvant.ru

Zhalnin B.V., Cand. Sc. (Phys. & Math.), Head of the Research and Technology Department, Joint-stock company "Scientific and production enterprise "Kvant".
e-mail: otdel_17@kvant.ru