

Оптический журнал

Физика полупроводников и элементы оптоэлектроники
Semiconductor physics and optoelectronics elements

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-40-49

УДК 621.315.592.3

Легирование Zn эпитаксиальных слоёв InAlAs и InP из планарного источника Zn₃P₂

Михаил Олегович Петрушков¹, Максим Сергеевич Аксенов^{2✉},
Дмитрий Борисович Богомолов³, Евгений Александрович Емельянов⁴,
Дмитрий Юрьевич Протасов⁵, Михаил Альбертович Путято⁶,
Игорь Борисович Чистохин⁷, Валерий Владимирович Преображенский⁸,
Александр Михайлович Гилинский⁹, Кирилл Олегович Воропаев¹⁰

1, 2 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

10 АО «ОКБ — Планета», Великий Новгород, Россия

¹maikdi@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5713-1277>

²aksenov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5660-6904>

³d.bogomolow@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2365-4842>

⁴e2a@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3700-506X>

⁵protasov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7859-1590>

⁶puma@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9974-7144>

⁷igor@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9935-8509>

⁸pvv@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7937-0113>

⁹gilinsky@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3694-7725>

¹⁰voropaevko@okbplaneta.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>

Аннотация

Предмет исследования. Эпитаксиальные слои InAlAs и InP после диффузии Zn. Цель работы. Разработка методики контролируемого легирования Zn эпитаксиальных слоев InAlAs и InP. **Метод.** Легирование проводилось через узкий зазор с использованием твердотельного источника Zn₃P₂ и установки быстрого термического отжига. Профили распределения концентрации Zn в InAlAs и InP по глубине определялись методом электрохимического вольт-фарадного профилирования. Глубина диффузии легирующей примеси дополнительно определялась на торцевом сколе методом сканирующей электронной микроскопии. **Основные результаты.** Установлено, что при $T = 500$ °C зависимость глубины легирования Zn в слоях InP и InAlAs от времени хорошо согласуется с диффузионной (корневой) зависимостью. При этом из полученных расчётов следует, что эффективный коэффициент диффузии в InP в 2,5 раза выше, чем в InAlAs. Максимальные достижимые концентрации электрически активной легирующей примеси в слоях InP и InAlAs составляют $(6\text{--}7)\times 10^{17}$ см⁻³ и $(3\text{--}4)\times 10^{18}$ см⁻³ соответственно. Показано, что присутствие тонкого (100 нм) слоя InAlAs в эпитаксиальном слое InP позволяет существенно замедлить диффузию Zn. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты по диффузии Zn в InAlAs и InP послужат основой для разработки и изготовления прототипов планарных устройств лавинных фотодиодов с пониженным значением избыточного шума и широким динамическим диапазоном по чувствительности.

Ключевые слова: диффузия, Zn, InAlAs, InP, лавинный фотодиод

Благодарность: авторы благодарят РЖД за финансовую поддержку в рамках данной работы. Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ИФП СО РАН «Наноструктуры». Авторы выражают благодарность Гавриловой Т.А. и Живодкову Ю.А. за проведение измерений методом СЭМ.

Ссылка для цитирования: Петрушков М.О., Аксенов М.С., Богомолов Д.Б., Емельянов Е.А., Протасов Д.Ю., Путято М.А., Чистохин И.Б., Преображенский В.В., Гилинский А.М., Воропаев К.О. Легирование Zn эпитаксиальных слоёв InAlAs и InP из планарного источника Zn₃P₂ // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 40–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-40-49>

Коды OCIS: 250.1345, 040.1345.

Zn doping of InAlAs and InP epitaxial layers from a planar Zn₃P₂ source

MIKHAIL O. PETRUSHKOV¹, MAXIM S. AKSENOV²✉, DMITRY B. BOGOMOLOV³,
EUGENIY A. EMELYANOV⁴, DMITRY Y. PROTASOV⁵, MIKHAIL A. PUTYATO⁶, IGOR B. CHISTOKHIN⁷,
VALERII V. PREOBRAZHENSKI⁸, ALEXANDER M. GILINSKY⁹, KIRILL O. VOROPAEV¹⁰

^{1, 2 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

¹⁰JSC OKB-Planeta, Velikiy Novgorod, Russia

¹maikdi@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5713-1277>

²aksenov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5660-6904>

³d.bogomolow@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2365-4842>

⁴e2a@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3700-506X>

⁵protasov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7859-1590>

⁶puma@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9974-7144>

⁷igor@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9935-8509>

⁸pvv@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7937-0113>

⁹gilinsky@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3694-7725>

¹⁰voropaevo@okbplaneta.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>

Abstract

The subject of study is epitaxial layers of InAlAs and InP after Zn diffusion. The aim of study is the development of method of the controlled Zn doping of InAlAs and InP epitaxial layers. Method. The doping was carried out through a narrow gap using a solid-state source based on Zn₃P₂ and rapid thermal annealing. The depth profiles of Zn concentration distribution in InAlAs and InP were determined using electrochemical C-V profiling. Also the dopant diffusion depth was determined by scanning electron microscopy image analysis. Main results. It has been established that at $T = 500^\circ\text{C}$ the time dependence of the Zn doping depth in InP and InAlAs layers is in good agreement with the diffusion (square root) dependence. Moreover, from the calculations obtained it follows that the effective diffusion coefficient in InP is 2.5 times higher than in InAlAs. The maximum achievable concentrations of electrically active dopant in the InP and InAlAs layers are $(6\text{--}7)\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ and $(3\text{--}4)\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, respectively. It has been shown that the presence of a thin (100 nm) InAlAs layer in the InP epitaxial layer can significantly slow down the diffusion of Zn. Practical significance. The results on the diffusion of Zn in InAlAs and InP obtained in this work will serve as the basis for the development and manufacture of prototypes of planar avalanche photodiode devices with reduced excess noise and a wide dynamic range of sensitivity.

Keywords: Zn, diffusion, InAlAs, InP, avalanche photodiode

Acknowledgment: the authors thank Russian Railways for the financial support within the framework of this work. The studies were carried out using the equipment of the Center for Shared Use of the ISP SB RAS “Nanostructures”. The authors express their gratitude to T.A. Gavrilova and Yu.A. Zhivodkov for carrying out measurements using the SEM method.

For citation: Petrushkov M.O., Aksenov M.S., Bogomolov D.B., Emelyanov E.A., Protasov D.Y., Putyato M.A., Chistokhin I.B., Preobrazhenskii V.V., Gilinsky A.M., Voropaev K.O. Zn doping of InAlAs and InP epitaxial layers from a planar Zn_3P_2 source [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 40–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-40-49>

OCIS codes: 250.1345, 040.1345.

ВВЕДЕНИЕ

Диффузионные процессы Zn в InP широко применяются для создания локальных p^+ -областей при изготовлении планарных конструкций лавинных фотодиодов (ЛФД) для телекоммуникационных длин волн 1310 и 1550 нм на основе гетероструктур InP/InGaAs [1–3]. Для сохранения исходной морфологии поверхности InP в качестве источника диффузии используют различные металлоганические соединения — диметилцинк [1, 4, 5], диэтилцинк [6, 7], а также твердотельный Zn_3P_2 [2, 8–10].

Альтернативным материалом для создания ЛФД являются гетероструктуры на основе InAlAs/InGaAs. Использование таких гетероструктур позволяет получить пониженный уровень избыточного шума ЛФД, меньшие величины туннельного тока и слабую температурную зависимость напряжения пробоя по сравнению с традиционным InP/InGaAs ЛФД [11, 12].

Большинство ЛФД на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs имеют эпитаксиально выращенную контактную p^+ -область, легированную бериллием. Для изоляции активной области детектора в этом случае необходимо использовать конструкцию в виде мезаструктур [13–15]. Основным недостатком этой конструкции является высокий уровень темнового тока, возникающий, в частности, из-за поверхностного тока утечки, что приводит к уменьшению динамического диапазона чувствительности ЛФД.

Для создания планарной конструкции ЛФД на основе гетероструктуры InAlAs/InGaAs необходима локальная диффузия Zn через окна в диэлектрике. Однако в литературе к настоящему времени отсутствуют данные о параметрах легирования и диффузии Zn в слоях InAlAs.

Целью настоящей работы является разработка методики контролируемого легирования Zn эпитаксиальных слоёв InAlAs и InP. Для достижения данной цели про-

водилось изучение диффузионных процессов Zn в эпитаксиальные слои InAlAs, InP и InP/InAlAs/InP. Работа является логическим развитием предложенной ранее методики диффузии Zn в InP через узкий зазор с использованием твердотельного источника на основе Zn_3P_2 и быстрого термического отжига [8]. С помощью метода электрохимического вольт-фарадного (ЭВФ) профилирования были получены профили диффузионного распределения концентрации Zn по глубине в исследуемых структурах. Используя сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), определены характерные глубины диффузии легирующей примеси.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве планарного источника Zn использовались тонкие (около 100 нм) плёнки Zn_3P_2 , выращенные на подложке Si размером 27×27 мм из молекулярных источников Zn и P. Диффузия Zn с использованием Zn_3P_2/Si осуществлялась в слоях InP и InAlAs толщиной 1–2,5 мкм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Эпитаксиальные плёнки выращивались на полуизолирующих (s.i.) подложках InP(001) диаметром 2 дюйма, которые после роста разделялись на четыре равные части. Эпитаксиальные слои InP и InAlAs имели n -тип проводимости с уровнем фоновой примеси $(4\text{--}6) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Перед легированием образцы InP и InAlAs обезжиривались в диметилформамиде и обрабатывались в растворе HCl:H₂O = 1:10 в течении 60 с.

Диффузия Zn проводилась в установке быстрого термического отжига в кварцевой трубе в потоке Ar с использованием циклического нагрева до температуры 500 °C. Один цикл включал в себя нагрев от 300 до 500 °C в течение 20 с, выдержку при 500 °C в течении 25 с и естественное охлаждение до 300 °C в течении 75 с. Контроль температуры образцов осуществлялся с помощью термопары хромель–алюмель.

Выбор температурного диапазона проведения процесса диффузии обусловлен стремлением к снижению температурного бюджета при изготовлении полупроводниковых приборов на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Отжиг приборных гетероструктур при температурах выше температуры их получения может привести к негативным изменениям свойств отдельных слоёв и гетеропереходов. Детали методики описаны в работе [8], в которой было показано, что снижение/повышение температуры проведения процесса диффузии может быть компенсировано увеличением/уменьшением количества циклов нагрева (временем процесса диффузии) соответственно.

Глубина диффузии определялась по контрасту изображения слоёв на поперечных сколах образцов методом СЭМ с помощью микроскопа Hitachi SU8220. Для получения профилей распределения легирующей примеси по глубине образцов использовался метод ЭВФ-профилирования на установке Wafer Profiler CVP21. Травление осуществлялось электролитом $\text{EDTA}_{0,1\text{m}}\text{--ED}10\%$ (раствор динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты в 10% водном растворе этилендиамина).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлено характерное СЭМ-изображение поперечного скола эпитаксиальных структур InP (1 мкм)/s.i.-InP и ЭВФ-профиль распределения концентрации легирующей примеси *p*-типа (N_A) после диффузии Zn с 3 циклами нагрева. Видно, что глубина диффузии d хорошо определяется по контрасту СЭМ-изображения и составляет около 770 нм. Кроме того, на СЭМ-изображении отчётливо видна граница раздела плёнка–подложка.

Полученные значения глубины диффузии хорошо коррелируют с соответствующим ЭВФ-профилем, представленным на рис. 1б. Профиль демонстрирует плато концентрации N_A со значениями $(5\text{--}6)\times10^{17}$ см $^{-3}$ вплоть до глубин около 700 нм. Затем на глубине с 700 до 800 нм наблюдается спад концентрации N_A на порядок. Важно отметить, что при данных параметрах легирования не наблюдается существенного обеднения концентрации Zn вблизи поверхности образца.

Принципиально схожие данные, представленные на рис. 2, были получены при анало-

гичных условиях легирования для структур i-InAlAs/s.i.-InP. Для InAlAs глубина диффузии Zn с 3 циклами нагрева составила около 550 нм. Согласно ЭВФ-данным, плато концентрации N_A со значениями $(3\text{--}4)\times10^{18}$ см $^{-3}$ наблюдается до 400 нм в глубину. Далее при изменении глубины на 150 нм концентрация N_A уменьшается на 2 порядка, что отлично коррелирует с СЭМ-изображением.

Анализ СЭМ-изображений для InP и InAlAs слоёв при диффузии Zn показывает, что фронт диффузии во всех случаях близок к плоско-параллельному. Латеральное отклонение по площади исследуемых образцов от среднего значения глубины диффузии не превышает 10%. Также можно отметить, что для InP, как правило, наблюдается в 5–7 раз меньшая максимальная концентрация электрически активного Zn.

Зависимость глубины диффузии цинка d в эпитаксиальные слои InP и InAlAs от квадратного корня количества циклов нагрева ($N^{1/2}$) приведена на рис. 3. Экспериментальные данные глубины диффузии, полученные методом СЭМ на сколах образцов, для InP и InAlAs представлены кривой 1 и 2, соответственно. Экспериментальные данные аппроксимированы прямыми линиями вида $d = a + b\sqrt{N}$. Следует отметить, что линии аппроксимации не сходятся в нулевой точке системы координат (\sqrt{N}, d) , то есть $a \neq 0$. Это обусловлено тем, что в ходе первого цикла нагрева реализуются необратимые переходные процессы, формирующие стационарный состав и структуру приповерхностных слоёв InP и InAlAs. Отметим, что в экспериментах по диффузионному легированию Zn в InP и InAlAs наблюдается статистический разброс $\pm 15\%$ по глубине легирования для аналогичных процессов диффузии, который связан с неоднородностью параметров (толщина, химический состав) приповерхностного слоя, формируемого при первом цикле диффузии. Вероятно, параметры этого слоя зависят от предварительной химической подготовки и морфологии поверхности.

Процесс диффузии может быть описан с применением феноменологического подхода в приближении прямоугольной формы температурного импульса $d = d_1 + (D_e \tau_C (N - 1))^{1/2}$ (при $N \geq 1$), где d_1 — глубина диффузии, достигаемая за время первого цикла, τ_C — длитель-

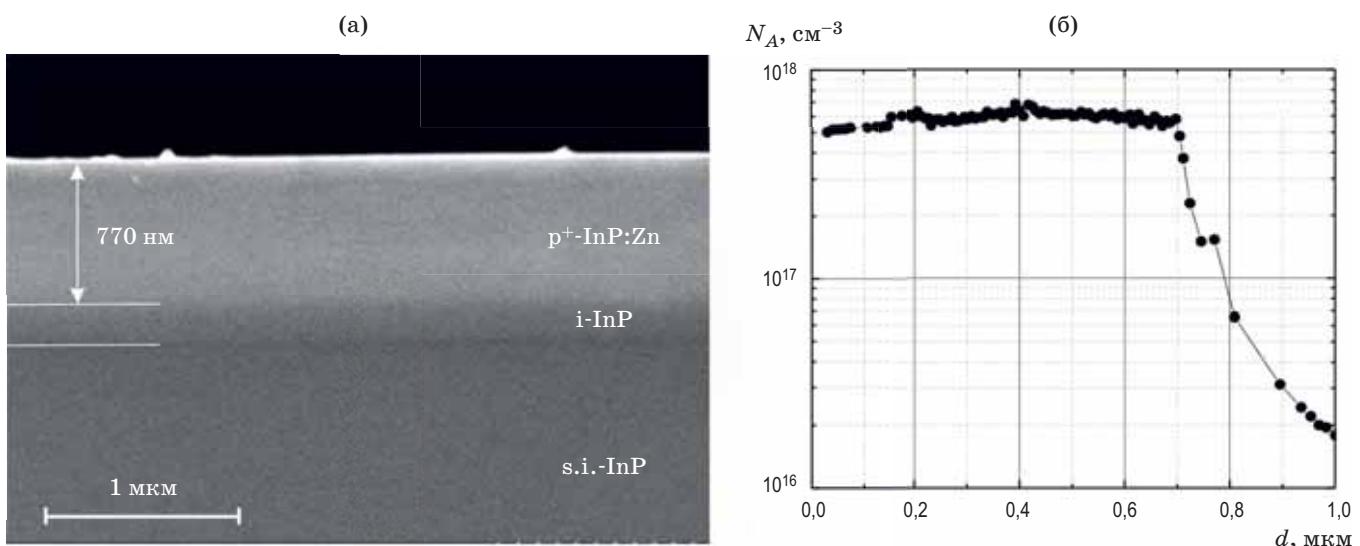


Рис. 1. СЭМ-изображение поперечного среза гомоэпитаксиальной структуры i-InP (1 мкм)/s.i.-InP после диффузии Zn с 3 циклами нагрева (а) и ЭВФ-профиль концентрации электрически активного Zn (б)

Fig. 1. The cross section SEM image of an i-InP (1 μm)/s.i.-InP homoepitaxial structure after Zn diffusion with 3 heating cycles (a) and the ECV profile of the electrically active Zn concentration (b)

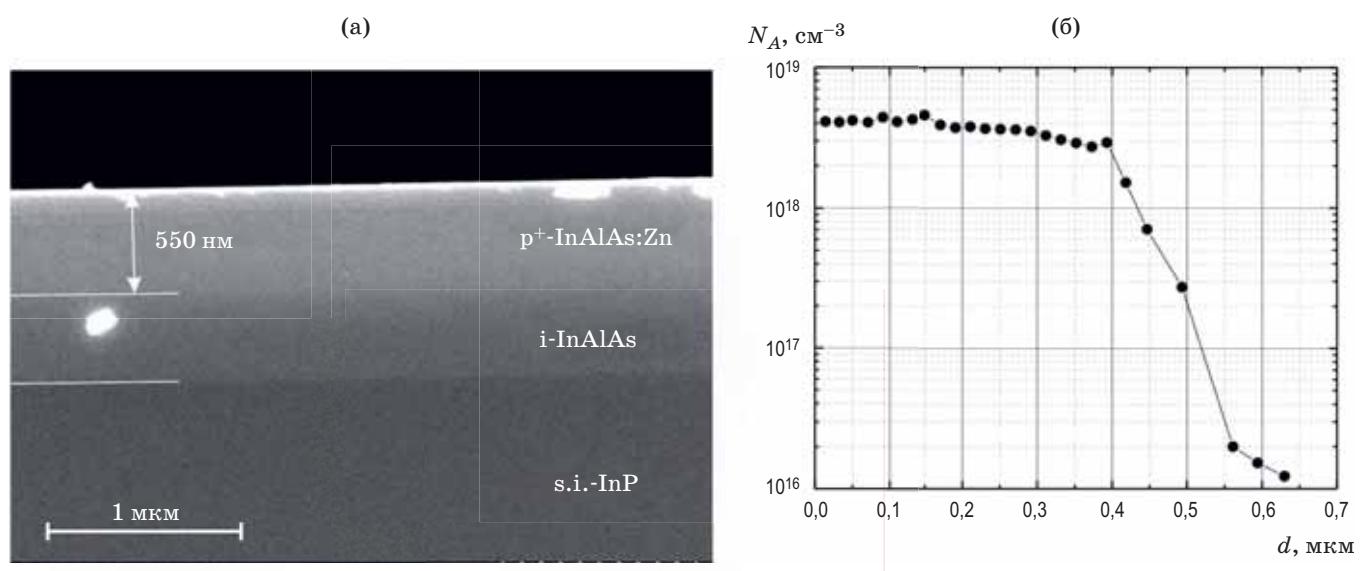


Рис. 2. СЭМ-изображение поперечного среза гетероструктуры i-InAlAs (1 мкм)/s.i.-InP после диффузии Zn с 3 циклами нагрева (а) и ЭВФ-профиль концентрации электрически активного Zn (б)

Fig. 2. The cross section SEM image of an i-InAlAs (1 μm)/s.i.-InP heterostructure after Zn diffusion with 3 heating cycles (a) and the ECV profile of electrically active Zn concentration (b)

ность цикла, D_e — эффективный коэффициент диффузии. Значение D_e выбирается таким, чтобы в системе координат (τ_C , D_e) площадь под прямоугольной диаграммой была равна площади под реальной диаграммой, которая включает в себя области нагрева, выдержки и охлаждения. В областях нагрева и охлаждения

коэффициент диффузии меняется во времени с изменением температуры объекта легирования. В случае InP $D_e \tau_C \approx 0,102$, а для InAlAs — 0,04. Величина τ_C имеет одинаковое значение для обоих материалов, следовательно, эффективный коэффициент диффузии в InP приблизительно в 2,5 раза больше, чем в InAlAs.

Для выявления влияния промежуточного тонкого InAlAs слоя на диффузию Zn в InP был проведён сравнительный эксперимент с использованием i-InP и i-InP/i-InAlAs (100 нм)/i-InP эпитаксиальных структур. Глубина залегания InAlAs слоя составляла 1 мкм. В процессе диффузии для обоих структур производилось 15 циклов нагрева. На рис. 4. представлены

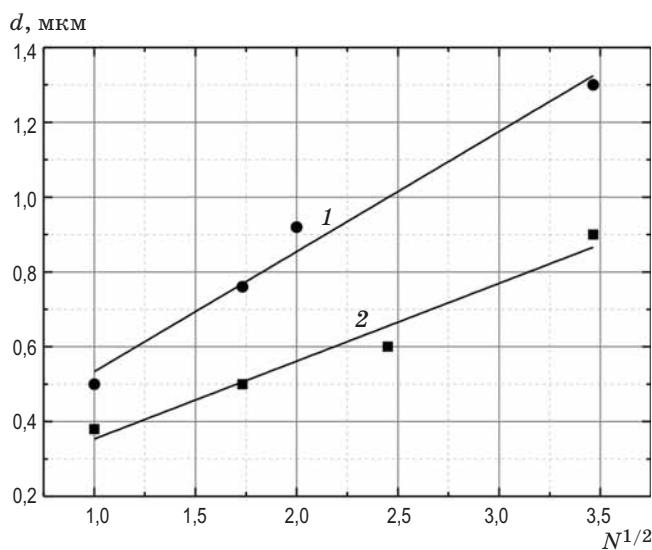


Рис. 3. Зависимость глубины диффузии Zn в эпитаксиальные слои InP (прямая 1) и InAlAs (прямая 2) от $N^{1/2}$

Fig. 3. Dependence of the Zn diffusion depth into epitaxial layers of InP (curve 1) and InAlAs (curve 2) on $N^{1/2}$

СЭМ-изображения поперечных сколов данных структур после диффузии. Согласно данным СЭМ, глубина диффузии составила 1,83 мкм в структуре без InAlAs (рис. 4а) и 1,28 мкм в структуре со слоем InAlAs (рис. 4б).

На рис. 5 представлены ЭВФ-профили распределения концентрации электрически активного Zn в i-InP без (кривая 1) и с захороненным слоем i-InAlAs (кривая 2) при одинаковых условиях диффузии, описанных выше.

В первом случае наблюдается куполообразный профиль распределения легирующей примеси *p*-типа с областью обеднения вблизи поверхности, что хорошо согласуется с литературными данными [5, 16]. Максимальные значения концентрации примеси N_A наблюдаются вблизи середины легированного слоя и составляют $(6\text{--}7)\times 10^{17}$ см $^{-3}$. Глубина спада N_A достаточно хорошо соотносится с СЭМ-данными (рис. 4а).

Во втором случае вид профиля распределения N_A принципиально не изменяется вплоть до глубины 1 мкм (глубина залегания InAlAs слоя). При этом далее через 300 нм наблюдается резкий спад концентрации N_A примерно на 1,5 порядка, что хорошо коррелирует с данными СЭМ (рис. 4б).

Во втором случае вид профиля распределения N_A принципиально не изменяется вплоть до глубины 1 мкм (глубина залегания слоя InAlAs). При этом далее через 300 нм наблюдается резкий спад концентрации N_A

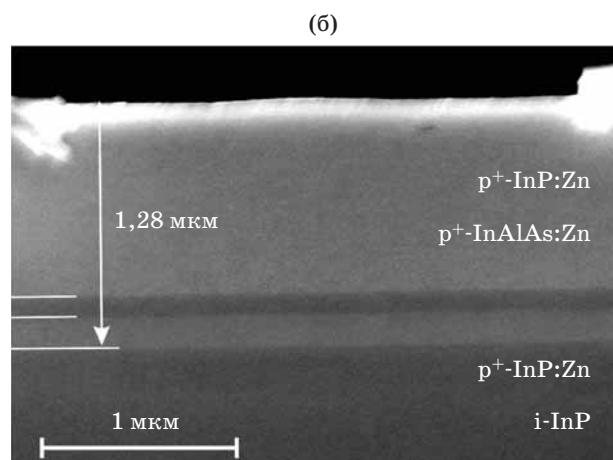
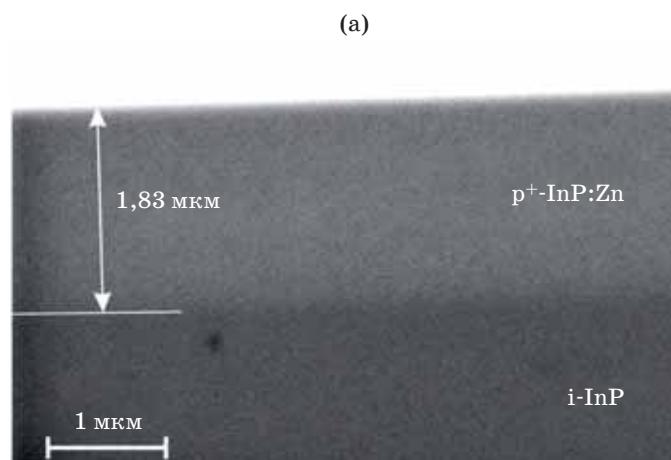


Рис. 4. СЭМ-изображения поперечного скола i-InP слоя без (а) и с захороненным слоем InAlAs (б) после диффузии Zn с 15 циклами нагрева

Fig. 4. The cross section SEM image of an i-InP layer without (a) and with a buried InAlAs layer (б) after Zn diffusion with 15 heating cycles

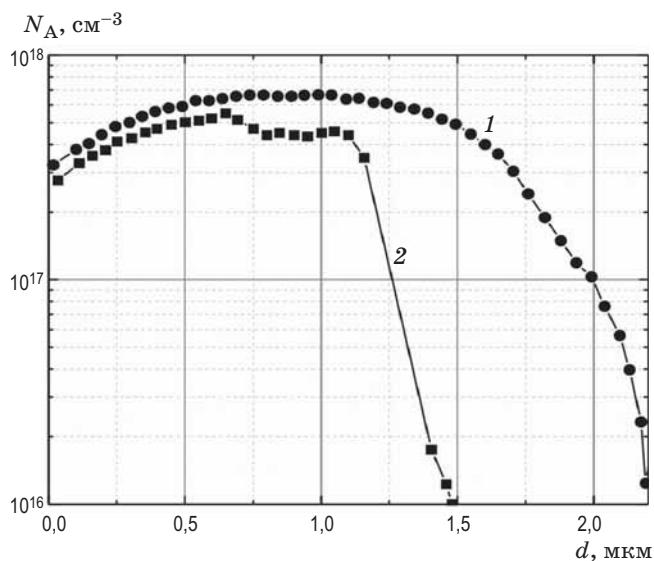


Рис. 5. ЭВФ-профили распределения концентрации электрически активного Zn в гомоэпитаксиальной структуре i-InP (кривая 1) и в структуре i-InP с захороненным слоем i-InAlAs (кривая 2) после диффузии Zn с 15 циклами нагрева

Fig. 5. ECV profiles of the concentration distribution of electrically active Zn in the homoepitaxial i-InP structure (curve 1) and in the structure of i-InP with a buried layer of i-InAlAs (curve 2) after diffusion of Zn with 15 heating cycles

примерно на 1,5 порядка, что хорошо коррелирует с данными СЭМ (рис. 4б).

Отметим, что условия проведения процесса диффузии Zn в гомоэпитаксиальной структуре i-InP и в структуре i-InP с захороненным слоем i-InAlAs были близки. Об этом свидетельствует хорошее совпадение (разница меньше 10%) профилей легирования до глубины 0,6 мкм. Разница в профиле легирования для глубины более 0,6 мкм может быть связана с наличием на глубине от 1,0 до 1,1 мкм захороненного слоя i-InAlAs. Поскольку диффузия Zn в слое InAlAs затруднена по сравнению со слоем InP, то происходит повышение концентрации Zn в слое InP у гетерограницы InP/InAlAs и встраивание атомов Zn в позиции междуузлия, где они проявляют себя как доноры, компенсирующие акцепторы [17], и/или как нейтральные комплексы, включающие в себя атомы Zn и вакансии P [18]. Такой процесс приводит к снижению концентрации электрически активного Zn p -типа в примыкающем слое InP. Из-за разницы в коэффициентах диффузии Zn в слоях InP и InAlAs концентрация атомов Zn

в захороненном слое InAlAs будет значительно меньше, чем в примыкающем со стороны поверхности структуры слое InP. Однако, согласно полученным экспериментальным данным, доля электрически активного Zn в слое InAlAs должна быть в 5–7 раз выше, чем в слое InP. Таким образом, можно объяснить близость величин концентрации Zn, полученных методом ЭВФ профилирования, в слое InAlAs и в прилегающем к нему слое InP.

Таким образом, 100 нм слоя InAlAs, захороненного в InP, приводят к существенному замедлению диффузии Zn, что позволяет использовать InAlAs в качестве стоп-слоя для процесса диффузии и применять его при формировании p^+ -областей с прецизионным контролем глубины залегания фронта легирования.

Анализ данных атомно-силовой микроскопии показал, что морфология поверхностей исследуемых образцов существенным образом не изменилась после проведения процесса диффузии при температуре 500 °C с количеством циклов вплоть до 15. Это связано с тем, что в узком зазоре между легируемой структурой и источником Zn создается избыточное давление молекул P_2 и P_4 , которое подавляет процесс диссоциации InP на поверхности, и тем самым препятствует развитию её рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено легирование эпитаксиальных слоёв InAlAs, InP и InP/InAlAs/InP через узкий зазор с использованием твердотельного источника Zn_3P_2 и установки быстрого термического отжига. Методами электрохимического вольт-фарадного профилирования и сканирующей электронной микроскопии изучены профили распределения и глубины залегания Zn в данных слоях, соответственно.

Установлено, что при $T = 500$ °C зависимость глубины легирования Zn в слоях InP и InAlAs от времени хорошо согласуется с диффузионной (корневой) зависимостью. При этом из полученных оценочных расчётов следует, что эффективный коэффициент диффузии в InP в 2,5 раза выше, чем в InAlAs. Максимальные достигаемые концентрации электрически активной легирующей примеси в слоях InP и InAlAs составляют $(6\text{--}7)\times 10^{17}$ cm^{-3} и $(3\text{--}4)\times 10^{18}$ cm^{-3} соответственно. Показано,

что присутствие тонкого (100 нм) слоя InAlAs в эпитаксиальном слое InP позволяет существенно замедлить диффузию Zn.

Полученные результаты по диффузии Zn в слои InAlAs и созданию легированной

р-области в этом материале позволяют разрабатывать планарные конструкции ЛФД с низкими темновыми токами с использованием данных слоёв в качестве широкозонного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Acerbi F., Tosi A., Zappa F. Growths and diffusions for InGaAs/InP single-photon avalanche diodes // Sens. Actuator A Phys. 2013. V. 201. P. 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.07.009>
2. Yun I., Hyun K. Zinc diffusion process investigation of InP-based test structures for high-speed avalanche photodiode fabrication // Microelectronics J. 2000. V. 31. P. 635–639. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(00)00066-5)
3. Преображенский В.В., Чистохин И.Б., Путято М. и др. Детекторы одиночных фотонов на основе лавинных фотодиодов InP/InGaAs/InP // Автометрия. 2021. Т. 57. № 5. С. 1–10. <https://doi.org/10.15372/AUT20210500>
4. Wada M., Sakakibara K., Higuchi M., Sekiguchi Y. Investigation of Zn diffusion in InP using dimethylzinc as Zn source // J. Cryst. Growth. 1991. V. 114. P. 321–326. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(91\)90048-A](https://doi.org/10.1016/0022-0248(91)90048-A)
5. Vanhollebeke K., D'hondt M., Moerman I. et al. Zn doping of InP, InAsP/InP, and InAsP/InGaAs heterostructures through metalorganic vapor phase diffusion (MOVPD) // J. Electron. Mater. 2001. V. 30. P. 951–959. <https://doi.org/10.1007/BF02657716>
6. Wisser J., Glade M., Schmidt H. J., Heime K. Zinc diffusion in InP using diethylzinc and phosphine // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. P. 3234–3237. <https://doi.org/10.1063/1.350969>
7. Andryushkin V.V., Gladyshev A.G., Babichev A.V. et al. Zn diffusion technology for InP-InGaAs avalanche photodiodes // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2103. P. 012184. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012184>
8. Петрушков М.О., Путято М.А., Чистохин И.Б. и др. Метод диффузии цинка в InP через узкий зазор с использованием планарного источника на основе Zn₃P₂ // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 14. С. 19–25. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.14.46340.17146>
9. Kim M.D., Baek J.M., Woo Y.D. Double floating guard-ring-type InP/InGaAs avalanche photodiodes with low-resistance ohmic contacts // J. Korean Phys. Soc. 2007. V. 50. P. 1925–1928. <https://doi.org/10.3938/jkps.50.1925>
10. May-Arrioja D.A., LiKamWa P., Shubin I. et al. Integration of InP-based photonic devices by zinc in-diffusion // Proc. SPIE 6422. Sixth Symposium Optics in Industry. 64221S (19 May 2007). <https://doi.org/10.1117/12.742558>
11. David J.P., Tan C.H. Material considerations for avalanche photodiodes // IEEE J. Selected Top. Quant. Electron. 2008. V. 14. P. 998–1009. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2008.918313>
12. Tan L., Ong D., Ng J. et al. Temperature dependence of avalanche breakdown in InP and InAlAs // IEEE J. Quant. Electron. 2010. V. 46. P. 1153–1157. <https://doi.org/10.1109/JQE.2010.2044370>
13. Liu J., Ho W., Chen J. et al. The fabrication and characterization of InAlAs/InGaAs APDs based on a mesa-structure with polyimide passivation //
1. Acerbi F., Tosi A., Zappa F. Growths and diffusions for InGaAs/InP single-photon avalanche diodes // Sens. Actuator A Phys. 2013. V. 201. P. 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.07.009>
2. Yun I., Hyun K. Zinc diffusion process investigation of InP-based test structures for high-speed avalanche photodiode fabrication // Microelectronics J. 2000. V. 31. P. 635–639. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(00)00066-5)
3. Preobrazhenskii V.V., Chistokhin I.B., Putyato M.A. et al. Single photon detectors based on InP/InGaAs/InP avalanche photodiodes // Optoelectron. Instrum. Data Process. 2021. V. 57. P. 485–493. <https://doi.org/10.3103/S8756699021050125>
4. Wada M., Sakakibara K., Higuchi M., Sekiguchi Y. Investigation of Zn diffusion in InP using dimethylzinc as Zn source // J. Cryst. Growth. 1991. V. 114. P. 321–326. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(91\)90048-A](https://doi.org/10.1016/0022-0248(91)90048-A)
5. Vanhollebeke K., D'hondt M., Moerman I. et al. Zn doping of InP, InAsP/InP, and InAsP/InGaAs heterostructures through metalorganic vapor phase diffusion (MOVPD) // J. Electron. Mater. 2001. V. 30. P. 951–959. <https://doi.org/10.1007/BF02657716>
6. Wisser J., Glade M., Schmidt H.J., Heime K. Zinc diffusion in InP using diethylzinc and phosphine // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. P. 3234–3237. <https://doi.org/10.1063/1.350969>
7. Andryushkin V.V., Gladyshev A.G., Babichev A.V. et al. Zn diffusion technology for InP-InGaAs avalanche photodiodes // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2103. P. 012184. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012184>
8. Petrushkov M.O., Putyato M.A., Chistokhin I.B. et al. Zinc diffusion into InP via a narrow gap from a planar Zn₃P₂-based source // Tech. Phy. Lett. 2018. V. 44. P. 612–614. <https://doi.org/10.1134/S1063785018070258>
9. Kim M.D., Baek J.M., Woo Y.D. Double floating guard-ring-type InP/InGaAs avalanche photodiodes with low-resistance ohmic contacts // J. Korean Phys. Soc. 2007. V. 50. P. 1925–1928. <https://doi.org/10.3938/jkps.50.1925>
10. May-Arrioja D.A., LiKamWa P., Shubin I. et al. Integration of InP-based photonic devices by zinc in-diffusion // Proc. SPIE 6422. Sixth Symposium Optics in Industry. 64221S (19 May 2007). <https://doi.org/10.1117/12.742558>
11. David J.P., Tan C.H. Material considerations for avalanche photodiodes // IEEE J. Selected Top. Quant. Electron. 2008. V. 14. P. 998–1009. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2008.918313>
12. Tan L., Ong D., Ng J. et al. Temperature dependence of avalanche breakdown in InP and InAlAs // IEEE J. Quant. Electron. 2010. V. 46. P. 1153–1157. <https://doi.org/10.1109/JQE.2010.2044370>
13. Liu J., Ho W., Chen J. et al. The fabrication and characterization of InAlAs/InGaAs APDs based on a mesa-structure with polyimide passivation //

- Sensors. 2019. V. 19. P. 3399. <https://doi.org/10.3390/s19153399>
14. Sim J., Kim K., Song M. et al. Optimization of charge and multiplication layers of 20-Gbps InGaAs/InAlAs avalanche photodiode // ETRI Journal. 2020. V. 44. P. 169. <https://doi.org/10.4218/etrij.2020-0427>
15. Zhang J., Wang H., Zhang G. et al. High-performance InGaAs/InAlAs single-photon avalanche diode with a triple-mesa structure for near-infrared photon detection // Opt. Lett. 2021. V. 46. P. 2670–2673. <https://doi.org/10.1364/ol.424606>
16. Yang S., Yoo J. Characteristics of Zn diffusion in planar and patterned InP substrate using Zn_3P_2 film and rapid thermal annealing process // Surf. Coat. Technol. 2000. V. 131. P. 66–69. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00761-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00761-1)
17. Gurn G.J., Dongen T., Fontijn G.M. et al. Interstitial and substitutional Zn in InP and InGaAsP // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P. 553–560. <https://doi.org/10.1063/1.343140>
18. Андриевский В.Ф., Гущинская Е.В., Малышев С.А. Диффузия цинка в незащищенную поверхность InP // Ф.Т.П. 2004. Т. 38. № 1. С. 68–71.
- Sensors. 2019. V. 19. P. 3399. <https://doi.org/10.3390/s19153399>
14. Sim J., Kim K., Song M. et al. Optimization of charge and multiplication layers of 20-Gbps InGaAs/InAlAs avalanche photodiode // ETRI Journal. 2020. V. 44. P. 169. <https://doi.org/10.4218/etrij.2020-0427>
15. Zhang J., Wang H., Zhang G. et al. High-performance InGaAs/InAlAs single-photon avalanche diode with a triple-mesa structure for near-infrared photon detection // Opt. Lett. 2021. V. 46. P. 2670–2673. <https://doi.org/10.1364/ol.424606>
16. Yang S., Yoo J. Characteristics of Zn diffusion in planar and patterned InP substrate using Zn_3P_2 film and rapid thermal annealing process // Surf. Coat. Technol. 2000. V. 131. P. 66–69. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00761-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00761-1)
17. Gurn G.J., Dongen T., Fontijn G.M. et al. Interstitial and substitutional Zn in InP and InGaAsP // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P. 553–560. <https://doi.org/10.1063/1.343140>
18. Andrievskii V.F., Gushchinskaya E.V., Malyshev S.A. Diffusion of zinc into InP with an unprotected surface // Semiconductors. 2004. V. 38. P. 68–71.

АВТОРЫ

Михаил Олегович Петрушков — младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4470-2779>, maikdi@isp.nsc.ru

Максим Сергеевич Аксенов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 55965556500, <https://orcid.org/0000-0001-9699-8335>, aksenov@isp.nsc.ru

Дмитрий Борисович Богомолов — инженер-исследователь, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0009-0006-2365-4842>, d.bogomolow@isp.nsc.ru

Евгений Александрович Емельянов — младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3700-506X>, e2a@isp.nsc.ru

Дмитрий Юрьевич Протасов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-7859-1590>, protasov@isp.nsc.ru

Михаил Альбертович Путято — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-9974-7144>, puma@isp.nsc.ru

Игорь Борисович Чистохин — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-9935-8509>, igor@isp.nsc.ru

Валерий Владимирович Преображенский — канд. физ.-мат. наук, заведующий лаборатории, Институт физики полупро-

AUTHORS

Mikhail O. Petrushkov — Junior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4470-2779>, maikdi@isp.nsc.ru

Maksim S. Aksenov — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 55965556500, <https://orcid.org/0000-0001-9699-8335>, aksenov@isp.nsc.ru

Dmitry B. Bogomolov — Research Engineer, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0009-0006-2365-4842>, d.bogomolow@isp.nsc.ru

Evgeny A. Emelyanov — Junior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3700-506X>, e2a@isp.nsc.ru

Dmitry Yu. Protasov — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-7859-1590>, protasov@isp.nsc.ru

Mikhail A. Putyato — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-9974-7144>, puma@isp.nsc.ru

Igor B. Chistokhin — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-9935-8509>, igor@isp.nsc.ru

Valeri V. Preobrazhenskii — PhD in Physics and Mathematics, Laboratory Head, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics

водников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-7937-0113>, pvv@isp.nsc.ru

Александр Михайлович Гилинский — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3694-7725>, gilinsky@isp.nsc.ru

Кирилл Олегович Воропаев — начальник группы, АО «ОКБ-Планета», 173004, Великий Новгород, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>, voropaevk@okbplanet.ru

Статья поступила в редакцию 05.10.2023
Одобрена после рецензирования 20.11.2023
Принята к печати 29.12.2023

SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-7937-0113>, pvv@isp.nsc.ru

Alexander M. Gilinsky — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3694-7725>, gilinsky@isp.nsc.ru

Kirill O. Voropaev — Head of the IET development group, JSC «OKB-Planeta», 173004, Velikiy Novgorod, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>, voropaevk@okbplanet.ru

*The article was submitted to the editorial office 05.10.2023
Approved after review 20.11.2023
Accepted for publication 29.12.2023*