

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 546.47; 544.164

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3430>

Выращивание эпитаксиальных слоев гетероструктур InP/InGaAsP на профилированных поверхностях InP методом жидкофазной эпитаксии

М. Г. Васильев[✉], А. М. Васильев, А. Д. Изотов[✉], Ю. О. Костин, А. А. Шелякин

*Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук,
Ленинский проспект, 31, Москва 119991, Российская федерация*

Аннотация

Проведено изучение влияния различных плоскостей при выращивании эпитаксиальных слоев методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на профилированных подложках InP. Исследования позволяют получать зарощенные гетероструктуры в системе InP/InGaAsP и создавать высокоэффективные лазерные диоды и фотоприемники.

Было установлено, что выступающие меза-полоски или углубленные меза-полоски в виде каналов, образованные семейством плоскостей {111}А, {111}В, {110}, {112}А или {221}А, могут быть получены при соответствующем подборе травителя, ориентации полоска и способа получения маскирующего покрытия. Отмечено, что в случае полярности осей в направлении <111> огранка меза-полосков осуществлялась наиболее плотно упакованными плоскостями. Такая огранка приводила к различию скоростей как химического травления, так и эпитаксиального наращивания профилированных поверхностей.

Огранка осуществлялась плоскостями с малой скоростью растворения – {111}А для решетки сфалерита, к которой относится исследуемый материал – фосфид индия. Анализ плоскостей {110} и $\bar{1}\bar{1}0$ показал, что расположение наиболее плотно упакованных плоскостей {111}А и {111}В относительно них различно.

Ключевые слова: гетероструктуры, лазерные диоды, фосфид индия, зарощенные гетероструктуры, канал в подложке

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН.

Для цитирования: Васильев М. Г., Васильев А. М., Изотов А. Д., Костин Ю. О., Шелякин А. А. Выращивание эпитаксиальных слоев гетероструктур InP/InGaAsP на профилированных поверхностях InP методом жидкофазной эпитаксии. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(2): 204–211. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3430>

For citation: Vasil'ev M. G., Vasil'ev A. M., Izotov A. D., Kostin Yu. O., Shelyakin A. A. Growing epitaxial layers of InP/InGaAsP heterostructures on the profiled InP surfaces by liquid-phase epitaxy. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(2): 204–211. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3430>

✉ Васильев Михаил Григорьевич, e-mail: mgvas@igic.ras.ru

✉ Изотов Александр Дмитриевич, e-mail: izotov@igic.ras.ru

© Васильев М. Г., Васильев А. М., Изотов А. Д., Костин Ю. О., Шелякин А. А., 2021



1. Введение

Гетероструктуры InP/InGaAsP являются основным видом структур для получения приборов квантовой электроники, таких как: полупроводниковые лазеры, суперлюминесцентные источники излучения и фотодиоды в диапазоне длин волн от 1.20 до 1.65 мкм, наиболее важном для систем волоконно-оптических линий связи и оптоволоконных сенсоров [1–6]. Уникальность этих структур заключается в том, что твердые растворы InGaAsP являются изопериодными к фосфиду индия, что позволяет создавать «идеальные» гетеропереходы, пригодные в широком применении в приборостроении [7–9].

Известен ряд методов получения подобных гетероструктур: метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [10, 11], метод молекулярно лучевой эпитаксии (МБЕ) [12, 13], метод выращивания из металлоорганических соединений (МОСVD) [14–16]. Все эти методы направлены на создание гетероструктур, являющихся основой для чипов приборов квантовой электроники. Создание чипов из структур, выращенных методами МБЕ и МОСVD, требует импортного оборудования и уникальной пост-ростовой технологии обработки структуры, что усложняет и удорожает технологический цикл изготовления приборов, требует высокоточного и дорогого технологического оборудования, и, кроме того, происходит в условиях неравновесного роста, что усложняет их создание на профилированных поверхностях.

В тоже время известны способы получения эпитаксиальных гетероструктур на профилированных поверхностях [17, 18], позволяющие упростить технологический цикл и создавать чипы приборов квантовой электроники относительно простым и дешевым методом ЖФЭ с использованием отечественного оборудования из растворов-расплавов в режимах роста, близких к равновесному. При таких режимах роста удастся создавать приборные структуры с высокой степенью совершенства слоев простым легированием различных слоев структуры в широком диапазоне концентрации легирующей примеси. Формируя исходную профилированную поверхность подложек, можно проводить селективный режим роста на различных гранях, тем самым создавая заданное электрическое и оптическое ограничение для прохождения света в лазерных диодах. Целью данной работы является изучение режимов формирования профилированных поверхностей фосфида индия, а также роста гетероструктур InP/InGaAsP на про-

филированных поверхностях и получение лазерных диодов спектрального диапазона длин волн 1300–1650 нм.

2. Экспериментальная часть

2.1. Создание и заращивание лазерной полосковой структуры типа «ласточкин хвост»

Для определения режимов формирования профилированной поверхности фосфида индия и скоростей эпитаксиального роста слоев InP и твердых растворов InGaAsP, использовались образцы подложек InP с ориентацией плоскостей {100}. Точность ориентации составляла ± 0.5 град.

Подложки с проводимостью *n*-типа были легированы Sn или S до концентрации 10^{18} – 10^{19} см⁻³, *p*-типа – легированы Zn до концентрации $(4-5) \cdot 10^{18}$ см⁻³. Подложки механически полировались до толщины 320 ± 10 мкм. Затем, после механической полировки, образцы трехкратно отмывались в органических растворителях и травились в полирующем травителе Br : CH₃COOH для снятия поверхностного нарушенного слоя ~ 10 мкм. Маскирующим покрытием для последующего формирования мезы «ласточкин хвост» была пленка SiO₂, нанесенная методом пиролитической реакции SiH₄ и O₂ при температуре подложки InP 450 °С. Толщина оксидной пленки составляла 0.15 мкм. Процессы жидкофазной эпитаксии проводились в атмосфере водорода, с точкой росы –80 °С, в кассете из высокочистого графита марки МПГ-7 с ограниченным объемом ростовой ячейки [19].

Профиль полоска формировали по сколу в направлениях [110] или $\bar{1}10$. Направление по-

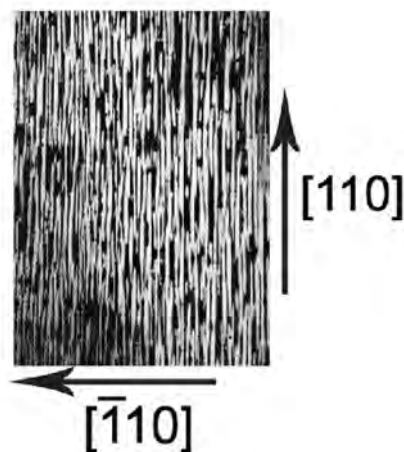


Рис. 1. Фигуры травления на плоскости (100)

лоска относительно плоскости подложки определялось с помощью травления фрагмента подложки InP шириной ~ 1 мм с последующим травлением в концентрированной HCl в течение 2 минут. На поверхности фрагмента подложки InP образовывалась характерная «соломка», вытянутая часть которой и указывала на направление [110]. Перпендикулярно вытянутой части «соломки» было направление $\bar{1}\bar{1}0$.

Меза-полоски формировались с использованием стандартной техники фотолитографии. Ширина полоска составляла 10 мкм с интервалом между полосками 400 мкм. Последующее травление для создания меза-полосковой структуры осуществлялось при комнатной температуре с нормальными условиями освещенности и легким перемешиванием раствора. Известны различные химические травители для фосфида индия [20]. В данной работе был использован состав травителя Br : CH₃COOH как предпочтительный для InP [21]. Геометрические размеры профиля определяли путем измерения в оптическом микроскопе «Эпивал» при увеличении ×450. Скалывание для определения геометрических размеров осуществлялось параллельно плоскостям {110}. Скорость травления вычислялась по глубине травления, определяемой по сколу с помощью оптического микроскопа. Травленая поверхность между полосками после их формирования выглядела зеркально-гладкой без видимых дефектов. Были использованы различные объемные соотношения этого травителя (1:160; 1:80; 1:25; 1:9). При заданном направлении полоска форма меза-полосковой конструкции при различных соотношениях травителя не менялась. Наиболее удобным на наш взгляд оказалось соотношение Br : CH₃COOH равным 1:9. Скорость травления данного травителя состав-

ляла 2 мкм в минуту на образцах без маскирующего покрытия. Дальнейшие эксперименты по формированию мезаполосков проводили путем химического травления в смеси Br : CH₃COOH в соотношении 1:9. В зависимости от ориентации маскирующих полосок получали два типа мезаструктур, рис. 2.

Для тестовых многослойных гетероструктур InP/GaInAsP/InP/GaInAsP также использовался данный травитель без каких-либо отклонений от выбранных режимов.

Анализ плоскостей (110) и $\bar{1}\bar{1}0$ показал [22], что расположение наиболее плотноупакованных плоскостей {111}A относительно них различно, рис. 3.

При травлении слоя InP с ориентацией полоски вдоль направления [110] меза-полосок имеет форму «ласточкин хвост», ограниченный плоскостями $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ A и $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ A, расположенными под углом 125°16' к (001), и плоскостями (1 $\bar{1}$ 2) и $\bar{1}\bar{1}$ 2 (угол 35°16'). Когда же травление проводилось вдоль направления $\bar{1}\bar{1}0$, то меза-полосок имел форму типа «холм», ограниченный плоскостями (111)A и (1 $\bar{1}\bar{1}$)A, расположенными под углом 54°44' к (001). Были изучены скорости травления подложек фосфида индия с различной кристаллографической ориентацией (111)A; (111)B; (100); (001). Изменения скорости травления подложек с разной ориентацией приведено на рис. 4.

Видно, что $V_{(111)B} > V_{(100)} > V_{(111)A}$. Следует отметить, что медленно травящаяся плоскость (111)A остается всегда матовой, в то время как плоскости (111)B, (100) и (001) – зеркальные. Столь значительные различия в скоростях травления по различным кристаллографическим направлениям, по-видимому, связаны с полярными свойствами решетки сфалерита в направлении $\langle 111 \rangle$.

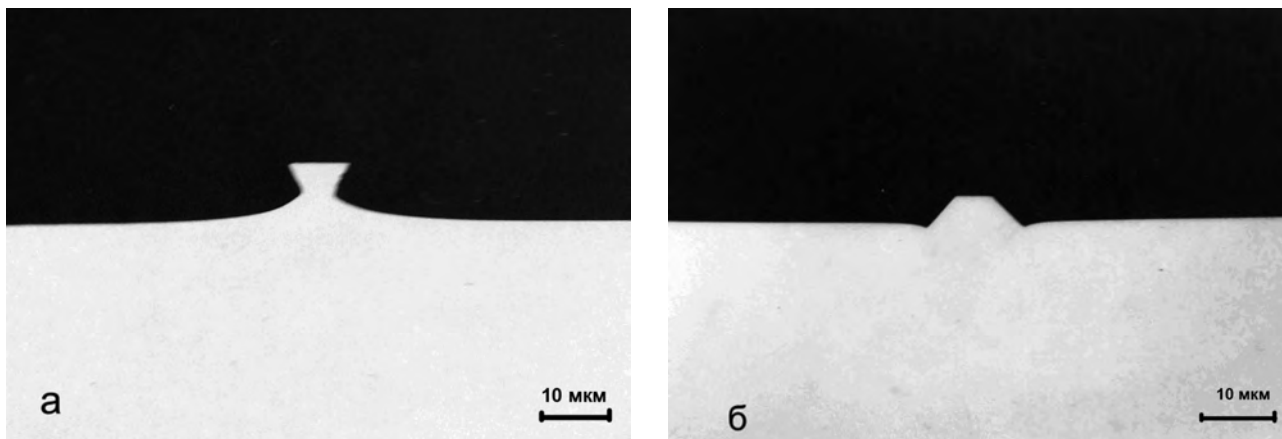


Рис. 2. Типы меза-полосков в зависимости от ориентации маскирующих полосок: а – [110], б – $\bar{1}\bar{1}0$

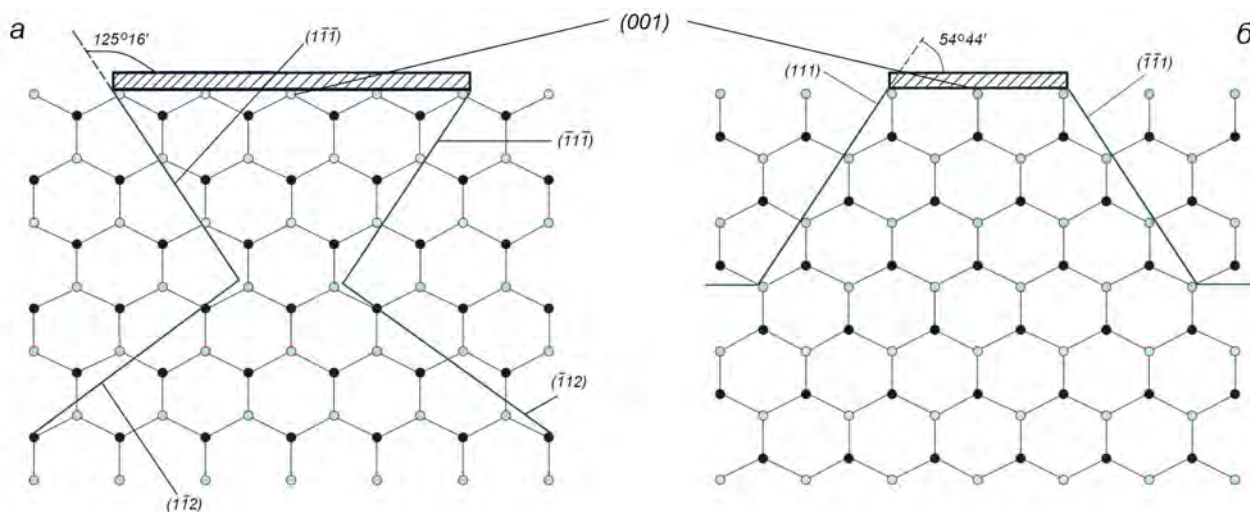


Рис. 3. Проекция кристаллической структуры InP на плоскости (110) – а и (1-10) – б

На рис. 5 приведены скорости травления мезаполосковой структуры в направлении полоска <110>. Видно, что скорость травления мезаполосков в травителе Br : CH₃COOH, в значительной степени зависит от взаимной комбинации плоскостей, ограничивающих мезаполосок. Кроме того, было отмечено, что абсолютные значения скоростей травления мезаполосков меняют свои значения при перемешивании травителя, в то же время относительное значение скоростей остается постоянным.

Диффузия играет важную роль в определении скорости травления и может завуалировать разницу абсолютных скоростей некоторых низкоиндексных плоскостей, но не может скрыть недостаточной реакционной способности плоскостей {111}А. Кроме того, можно предположить, что маскирующие покрытия играют важную роль как в диффузионных процессах при формировании меза-полосок так и при их заравнивании методом жидкофазной эпитаксии.

Выращивание лазерной гетероструктуры проводили на подложках фосфида индия р-типа проводимости. Изначально выращивали исходную гетероструктуру; слой InP р-типа проводимости, затем нелегированный слой твердого раствора GaInAsP и слой InP n-типа проводимости, легированный до концентрации 1×10¹⁹ см⁻³. Далее формировали меза-полосок типа «ласточкин хвост». Выступающий мезаполосок заравнивался двумя слоями InP n-типа проводимости и р-типа проводимости соответственно. Эти слои являлись «блокирующими слоями», которые ограничивают протекание

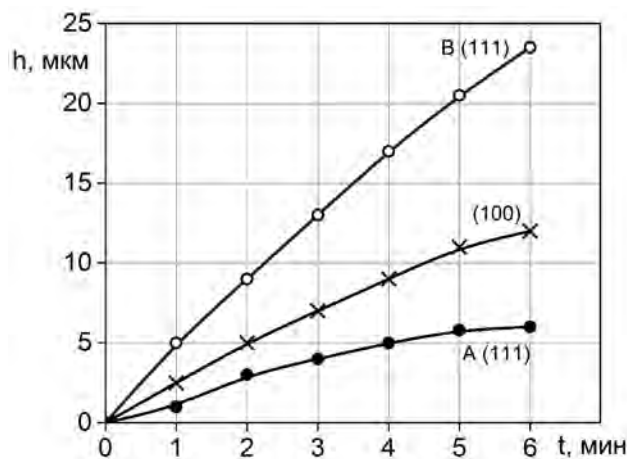


Рис. 4. Изменение скорости травления InP в зависимости от ориентации подложки

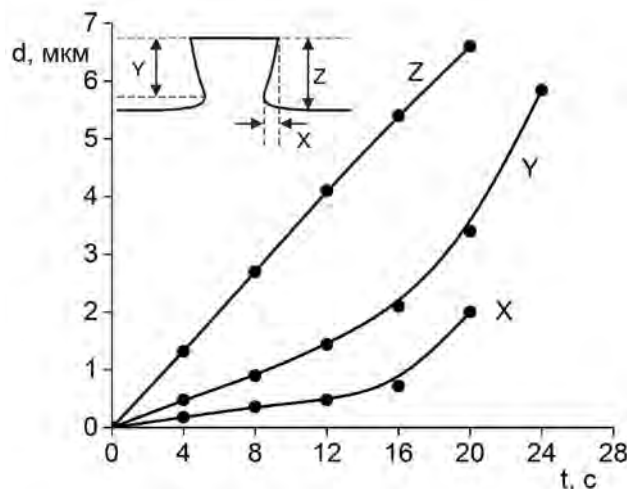


Рис. 5. Скорость травления для меза-полосков вдоль направления [110] в травителе Br : CH₃COOH

ние тока вне меза-полоска, т. е. ток накачки лазерного диода протекает только вдоль меза-полоска при минимальном его значении вне полоска. Такое ограничение тока позволяет получить лазерный диод с малым рабочим током и хорошим оптическим ограничением света, излучаемого диодом. Использование подложек InP р-типа проводимости позволило снизить токи утечки вне мезаполоска, а также избежать дополнительного контактного слоя твердого раствора GaInAsP, необходимого для создания омического контакта лазерного диода [21]. Заращивание происходило в температурном интервале 620–600 °С при различной степени переохлаждения раствора-расплава. Недостатком данной конструкции является низкая воспроизводимость получения узкой части «ласточкиного хвоста» (активной области лазерного диода) из-за адсорбции на поверхности маскирующего покрытия травителя $\text{Br} : \text{CH}_3\text{COOH}$ и его последующей диффузии в зону травления свободной от маскирующего покрытия. Такая же адсорбция только уже при выращивании из раствора-расплава наблюдается в виде «наростов» кристаллов вдоль мезаполоска. Эти наросты негативно сказывались при дальнейшем формировании чипов лазерных диодов.

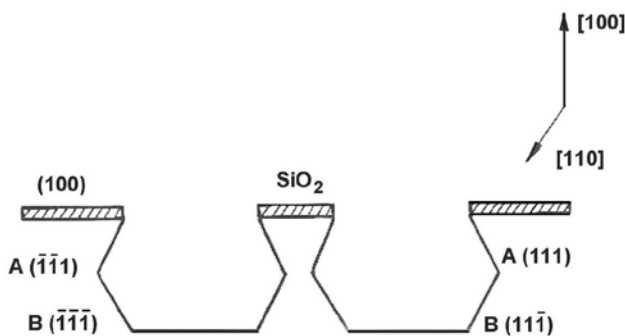
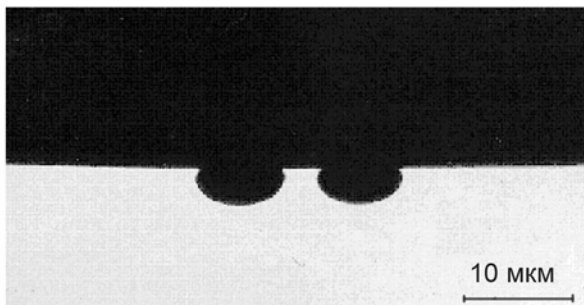


Рис. 6а. Двухканальный меза-полосок

3. Результаты и обсуждение

В ходе экспериментов было показано, что для исключения явления адсорбции необходимо удалить маскирующее покрытие с поверхности меза-полоска и эпитаксиальное заращивание проводить без маскирующего покрытия.

Эксперимент проводился на подложках InP р-типа. Выращивались последовательно два запорных слоя $n\text{-InP}$ и $p\text{-InP}$. Было отмечено, что при ширине меза-полоска без маскирующего покрытия менее 6 мкм, рост на его поверхности отсутствует. Можно предположить, что этот эффект связан с тем, что для роста более плотноупакованной плоскости (111)В требуется большее количество InP, чем для плоскости (100). Поэтому InP в растворе-расплаве активно перемещается к плоскости (111)В и полностью обедняется над поверхностью меза-полоска при заданных режимах роста.

3.1. Создание и заращивание лазерной полосковой структуры двухканального типа

С практической точки зрения особый интерес представляют меза-полоски с минимальными размерами области излучения будущего прибора. В связи с этим был рассмотрен вариант мезаполоска, ограниченного двумя протравленными каналами, рис. 6 (а, б). Такая конструкция меза-полоска позволяет сделать «вершину» полоска размерами до 1–2 мкм, что крайне важно для будущей лазерной структуры, т. к. этот размер отвечает за размер активной области лазерного диода, и для лазеров спектрального диапазона длин волн 1210–1650 нм оптимальным является 1.5–2.5 мкм.

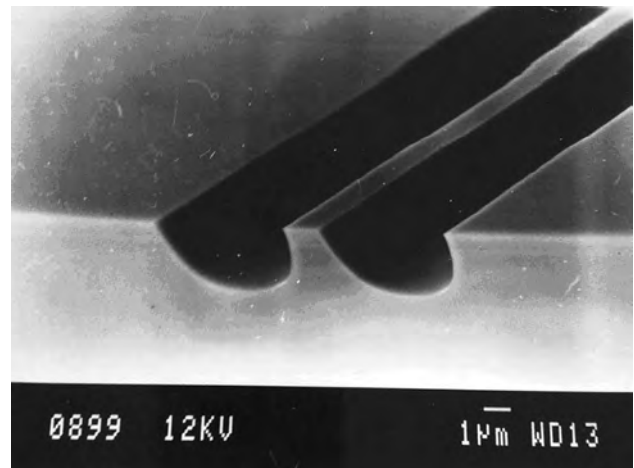


Рис. 6б. Двухканальная меза-полосковая структура после травления в смеси $\text{Br} : \text{CH}_3\text{COOH} = 1:9$

Для создания двухканальной меза-полосковой структуры был использован фоторезист, что значительно упростило процесс формирования двухканальной структуры. Фоторезист, нанесенный стандартной техникой фотолитографии, оставляли на поверхности после формирования рисунка. Формирование меза-полосковой структуры двух канального типа на подложке InP (100) и направлении полосок вдоль [110] проводили путем химического травления в смеси Br : CH₃COOH = 1:9. После формирования двухканального мезаполоска фоторезист снимали с профилированной поверхности (рис. 6б).

В данном случае, классическая огранка плоскостями (111)A; (11̄1)A; (1̄11)B; (11̄1)B и (100) отсутствует, и профиль травления двухканальной структуры имеет плавный переход между плоскостями (1̄11)B; (11̄1)B и (100). Такой «сглаженный переход» позволил выровнять скорости роста фосфида индия и твердых растворов GaInAsP между плоскостями с высоким индексом огранки каналов.

Зарощенную двухканальную лазерную структуру на гетеропереходе InP/InGaAsP создавали в три этапа: первый этап – выращивание исходной лазерной гетероструктуры InP/GaInAsP; второй этап – травление мезаполосков с удалением защитного покрытия из фоторезиста; третий этап – выращивание блокирующих слоев на мезаполосковой структуре.

На первом этапе ЖФЭ на подложке n-InP (001) выращивались следующие слои:

- эмиттерный слой n-InP, легированный Sn, $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщиной 7 мкм;
- активный слой InGaAsP, нелегированный, толщиной 0.15 мкм;

- эмиттерный слой p-InP, легированный Zn, $p = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0.5 мкм;
- технологический слой InGaAsP, нелегированный, толщиной 0.5 мкм.

На втором этапе формировался меза-полосок методом фотолитографии под маской фоторезиста вдоль направления <110>. Геометрия полоска перед зарощиванием имела размеры: 2.0–2.5 мкм – ширина, 3 мкм – высота и ширина боковых каналов по 7 мкм каждый. Далее фоторезист убрали, и профилированная структура поступала на зарощивание (рис. 7б).

На третьем этапе ЖФЭ мезаполосков без покрытия зарощивали блокирующими слоями p-InP и слоем n-InP. При этом, благодаря заданной ориентации, выбранной геометрии мезаполосков и контролируемому технологическому режиму роста из жидкой фазы в квазиравновесном режиме рост блокирующих слоев осуществлялся только в каналах и на планарной части поверхности между каналами, а на самом меза-полоске отсутствовал. Далее выращивали следующий блокирующий слой p-InP и контактный слой p+ InGaAsP, что делало поверхность двухканальной зарощенной гетероструктуры практически планарной. Зарощенная двухканальная лазерная гетероструктура InP/GaInAsP представлена на рис. 7а и б.

В дальнейшем часть подложки удалялась методом химико-динамической полировки [22] и наносились омические контакты на Au + Sn n-сторону, Au + Zn на p- сторону. Планарную структуру раскалывали на отдельные чипы шириной 400 мкм и длиной 350 мкм. Чипы монтировали на медный хладопровод с помощью индиевого припоя и проводили измерения параметров лазерных диодов.

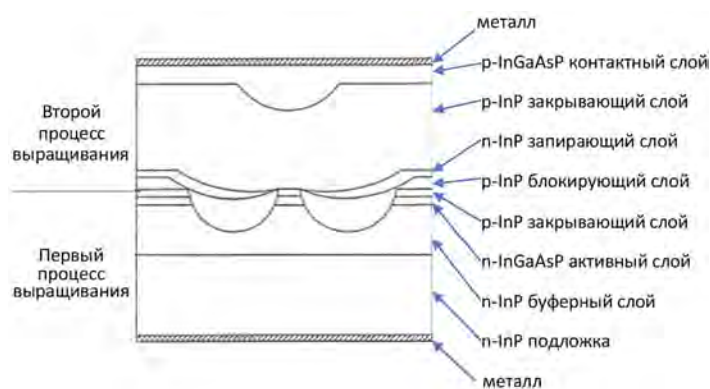


Рис. 7а. Схематическое изображение зарощенной двухканальной лазерной гетероструктуры InP/GaInAsP

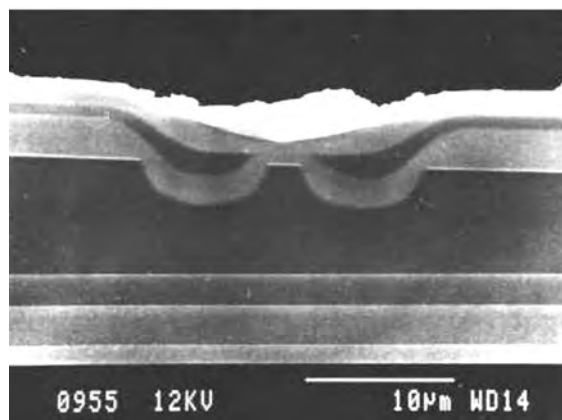


Рис. 7б. Микрофотография зарощенной двухканальной лазерной гетероструктуры InP/GaInAsP

Лазерные диоды, изготовленные из чипов двухканальной зарощенной структуры, имели следующие параметры:

- пороговый ток при 25 °С ~ 10÷15 мА;
- дифференциальная квантовая эффективность ~ 50 %;
- линейность ватт-амперных характеристик наблюдалась до мощности ~ 20 мВт;
- длина волны излучения 1320 нм;
- выход годных ~ 30 %.

4. Заключение

Рассмотрены механизмы формирования профилированной поверхности фосфида индия при различных ориентациях подложки и мезаполосков. Определены режимы создания профилированных поверхностей для создания лазерных диодов в диапазоне длин волн 1210–1650 нм. Исследованы способы выращивания лазерных гетероструктур на профилированных поверхностях InP. Предложена отечественная технология создания чипов лазерных диодов на отечественном оборудовании. Показано, что использование условий равновесного роста тонких слоев из жидкой фазы на профилированной поверхности позволяет проводить уникальные процессы локального роста.

На основе зарощенных двухканальных лазерных гетероструктур получены высокоэффективные отечественные чипы лазерных диодов, работающие в непрерывном режиме генерации. Предложенная технология позволяет получать лазерные диоды в диапазоне длин волн от 1210 до 1650 нм. Чипы этих диодов могут быть использованы в оптоволоконных линиях связи, системах мониторинга окружающей среды и в других приборах квантовой электроники.

Рассмотрены процессы создания лазерных мезаструктур InP/GaInAsP зарощенного типа на профилированных поверхностях фосфида индия.

Показано, что для создания подобных структур определяющим моментом является заданная ориентация мезаполосков вдоль направлений $\langle 110 \rangle$ при ориентации подложек по плоскости (001). Определены оптимальные травители и режимы травления для создания профилированной поверхности фосфида индия. Выявлены маскирующие покрытия для создания сложного профилированного рельефа поверхности фосфида индия. Описана оригинальная технология создания двухканальной лазерной гетероструктуры InP/GaInAsP на профилированной поверх-

ности без защитного ростового покрытия с шириной активной области 1.5–2.5 мкм, что позволяет получать одномодовые лазерные диоды с высокой квантовой эффективностью.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Andreev D. S., Boltar K. O., Vlasov P. V., Irodov N. A., Lopuhin A. A. Investigation of planar photodiodes of a focal plane array based on a heteroepitaxial InGaAs/InP structure. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016;61(10): 1220–1225. <https://doi.org/10.1134/S1064226916100028>
2. Kong J., Ouyang X. W., Zhou A., Yuan L. B. Highly sensitive directional bending sensor based on eccentric core fiber Mach-Zehnder modal interferometer. *IEEE Sensors Journal*. 2016;16 (18): 6899–6902. <https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2589262>
3. Khan M. Z. M., Ng T. K., Ooi B. S. High-Performance 1.55- μm superluminescent diode based on broad gain InAs/InGaAlAs/InP quantum dash active region. *IEEE Photonics Journal*. 2014;6(4): 1–8. <https://doi.org/10.1109/jphot.2014.2337892>
4. Eichler H. J., Eichler J., Lux O. Semiconductor lasers. In: *Lasers. Springer Series in Optical Sciences. Vol 220*. Springer, Cham.; 2018. p. 165–203. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99895-4_10
5. Guin S., Das N. R. Modeling power and linewidth of quantum dot superluminescent light emitting diode. *Journal of Applied Physics*. 2020;128(8): 083102. <https://doi.org/10.1063/1.5131550>
6. Сычикова Я. А. Наноразмерные структуры на поверхности фосфида индия. LAP Lambert Academic Publishing; 2014. 132 с.
7. Lei P. H., Yang C. D., Wu M. ., et al. Optimization of active region for 1.3- μm GaInAsP compressive strain multiple-quantum-well ridge waveguide laser diodes. *Journal of Electronic Materials*. 2006;35(2): 243–249. <https://doi.org/10.1007/BF02692442>
8. Emelyanov V. M., Sorokina S. V., Khvostikov V. P., Shvarts M. Z. Simulation of the characteristics of InGaAs/InP-based photovoltaic laser-power converters. *Semiconductors*. 2016;50(1): 132–137. <https://doi.org/10.1134/S1063782616010097>
9. Andreeva E. V., Ilchenko S. N., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A., Pankratov K. M., Shidlovskii V. R.,

Yakubovich S. D. Superluminescent diodes based on asymmetric double-quantum-well heterostructures. *Quantum Electron.* 2019;49(10): 931–935. <https://doi.org/10.1070/qel17071>

10. Саидов А. С., Усмонов Ш. Н., Саидов М. С. Жидкофазная эпитаксия твердого раствора замещения $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ ($0 \leq x \leq 0.91$, $0 \leq y \leq 0.94$) и некоторые электрофизические свойства. *Физика и техника полупроводников.* 2015;49(4): 557–560. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/41641>

11. Воротынец В. М., Скупов В. Д. *Базовые технологии микро- и нанoeлектроники*. Изд. Проспект; 2017. 520 с.

12. Преображенский В. В., Путято М. А., Семягин Б. Р. Контроль параметров процесса молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs при низких температурах роста. *Физика и техника полупроводников.* 2002;36(8): 897–901. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/39919>

13. Абрамкин Д. С., Бакаров А. К., Путято М. А., Емельянов Е. А., Колотовкина Д. А., Гутаковски А. К., Шамирзаев Т. С. Формирование низко-размерных структур в гетеросистеме InSb/AlAs. *Физика и техника полупроводников*, 2017;51(9): 1282–1288. <https://doi.org/10.21883/ftp.2017.09.44896.8488>

14. Акчурун Р. Х., Мармалюк А. А. *МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники*. Технофери; 2018. 487 с.

15. Гагис Г. С., Васильев В. И., Левин Р. В., Маричев А. Е., Пушный Б. В., Кучинский В. И., Казанцев Д. Ю., Бер Б. Я. Исследование влияния легирования на переходные слои анизотипных гетероструктур на основе GaInAsP и InP, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии. *Письма в ЖТФ.* 2020;46(19): 22–24. <https://doi.org/10.21883/pjtf.2020.19.50039.18419>

16. Hasan S., Richard O., Merckling C., Vanderorst W. Encapsulation study of MOVPE grown InAs QDs by InP towards 1550 nm emission. *Journal of Crystal Growth.* 2021;557: 126010. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.126010>

17. Vasil'ev M. G., Izotov A. D., Marenkin S. F., Shelyakin A. A. Preparation of shaped indium phosphide surfaces for edge-emitting devices. *Inorganic Materials.* 2019;55(1): 105–108. <https://doi.org/10.1134/s0020168519010175>

18. Mamutin V. V., Ilyinskaya N. D., Bedarev D. A., Levin R. V., Pushnyi B. V. Study of postgrowth processing in the fabrication of quantum-cascade lasers. *Semiconductors.* 2014;48(8): 1103–1108. <https://doi.org/10.1134/s1063782614080181>

19. Васильев М. Г., Васильев А. М., Костин Ю. О., Шелякин А. А., Изотов А. Д. Исследование линейных торцевых светодиодов на основе гетероструктуры

InP/InGaAsP/InP с серповидной активной областью. *Перспективные материалы.* 2018;(5): 17–22. <https://doi.org/10.30791/1028-978x-2018-5-17-22>

20. Васильев М. Г., Васильев А. М., Вилк Д. М., Шелякин А. А. Получение гетероструктур InP/InGaAsP/InP методом жидкофазной эпитаксии и раздельное приготовление растворов-расплавов. *Неорганические материалы.* 2007;43(7): 775–780. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9550658>

21. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник. *Физика и техника полупроводников.* 2007;41(11): 1281–1308. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/6443>

22. Васильев М. Г., Васильев А. М., Изотов А. Д., Шелякин А. А. Подготовка подложек фосфида индия для выращивания эпитаксиальных слоев. *Неорганические материалы.* 2018;54(11): 1174–1177. <https://doi.org/10.1134/s0002337x18110155>

Информация об авторах

Васильев Михаил Григорьевич, д. т. н., профессор, заведующий лабораторией полупроводниковых и диэлектрических материалов, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Российская Федерация, e-mail: mgvas@igic.ras.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4279-1707>.

Васильев Антон Михайлович, н. с., Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Российская Федерация e-mail: toto71@bk.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9901-5856>.

Изотов Александр Дмитриевич, д. х. н., член-корреспондент РАН, гл. н. с. лаборатории полупроводниковых и диэлектрических материалов, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Российская Федерация, e-mail: izotov@igic.ras.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4639-3415>.

Костин Юрий Олегович, к. т. н., с. н. с., Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Российская Федерация, e-mail: mgvas@igic.ras.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8172-3988>.

Шелякин Алексей Алексеевич, к. т. н., с. н. с. лаборатории полупроводниковых и диэлектрических материалов, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Российская Федерация, e-mail: mgvas@igic.ras.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0028-005X>.

Поступила в редакцию 31.03.2021; одобрена после рецензирования 15.04.2021; принята к публикации 15.05.2021; опубликована онлайн 25.06.2021.