

Создание гетероструктур зарощенного типа для СВЧ лазерных диодов

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

Проведены комплексные физико-технологические исследования по созданию мезаполосковых структур с каналом в подложке, и последующим зарощиванием структуры слоем селенида цинка. Проведены электронно-микроскопические исследования планарности гетерограниц между подложкой и эпитаксиальными слоями. Изучена атомная структура эпитаксиальных слоев GaInAsP/InP методом трансмиссионной электронной микроскопии. проанализированы профили эпитаксиальных слоев гетероструктуры методом вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС). Получены слои заданного состава $\text{In}_{0,78}\text{Ga}_{0,22}\text{As}_{0,68}\text{P}_{0,32}$, соответствующего длине волны лазерного излучения 1,3 мкм. Впервые разработана методика создания лазерных диодов с каналом в подложке, с травлением мезаполосковой структуры и зарощиванием слоем селенида цинка. Данная методика позволяет создавать лазерные диоды как с оптическим ограничением лазерного излучения, так и с ограничением протекания тока вдоль лазерного полоска. Впервые разработан процесс травления слоев $p-n$ -перехода между лазерными полосками и зарощивания селенидом цинка на поверхности травленной структуры. Это позволило методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) создать гетероструктуры для лазерных диодов, работающих в СВЧ диапазоне до 10 ГГц. Показана возможность создания и работы лазерных диодов данной конструкции и технологии. Исследованы вольт-амперные, ватт-амперные и спектральные характеристики лазерных диодов. Предложена отечественная технология создания СВЧ лазерного диода на гетероструктуре с каналом в подложке и повторным зарощиванием селенидом цинка. Показана перспективность использования лазерных диодов, мезаполосковой конструкции с каналом в подложке и зарощенной слоем селенида цинка для создания быстродействующих приборов.

Ключевые слова: гетероструктуры, лазерные диоды, СВЧ-диоды, селенид цинка, канал в подложке, амплитудно-частотная характеристика.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-4-24-33

Введение

Современный этап развития техники связи характеризуется проведением интенсивных разработок и внедрением волоконно-оптических систем передачи информации. Интерес к ним объясняется большими возможностями этой развивающейся области техники. Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) представляет собой систему, состоящую из пассивных и активных элементов, предназначенную для передачи информации в оптическом диапазоне. В настоящее время вырабатываются принципы построения таких систем и реализации их компонентов, строятся и вводятся в эксплуата-

цию линии связи, создаются условия для широкого их внедрения на действующих сетях связи.

Актуальность применения ВОЛС обусловлена рядом преимуществ [1 – 3] по сравнению с системами с электронной проводимостью линий. Наиболее важными из них являются широкая полоса пропускания, малое затухание светового сигнала в волокне, низкий уровень шумов, высокая помехозащищенность, малый вес и объем.

Одним из вариантов создания лазерных диодов, работающих в спектральном диапазоне длин волн 1280 – 1320 нм в СВЧ диапазоне, является конструкция мезаполосковых гетероструктур полупроводниковых твердых растворов InP/GaInAsP

с каналом в подложке [4, 5]. Однако, прежде чем создавать подобную конструкцию, необходимо провести отработку технологии получения гетероструктур как на планарной, так и на мезаполосковой поверхности гетероструктуры.

Практически все существующие лазерные диоды для телекоммуникационных применений имеют полосковую или мезаполосковую конструкцию, которая имеет ряд неоспоримых преимуществ: создание малого тела свечения диода; резкое снижение пороговых и рабочих токов диода; создание заданного модового состава излучения; повышение внешней квантовой эффективности диода; создание высокочастотных лазерных диодов; согласование лазерного диода с оптическим волокном; увеличение ресурса работы лазерного диода.

В связи с этим, получению мезаполосковых структур уделяется большое внимание. В настоящее время существует ряд технологий, таких как: химическое травление, ионно-лучевое травление, ионная имплантация. Одним из наиболее распространенных и надежных методов, который позволяет получать полосковые мезаструктуры с различной формой полоска при наименьшем введении дефектов в процессе его формирования, является метод химического травления. В настоящее время для телекоммуникационных сетей нового поколения с использованием передачи информации в формате 5G (диоды должны работать со скоростями более 5 ГГц), большой интерес представляют лазерные диоды с высоким быстродействием

Для создания подобных лазерных диодов требуются технологии и приемы, позволяющие уменьшать емкости на $p-n$ -переходе гетероструктуры при малом теле свечения лазерного диода не более 1,5 – 3 мкм. Существует ряд способов снижения этой емкости. Это создание изолированных полосковых мезаструктур [6 – 8], создание зарощенных мезаполосковых структур на профилированных поверхностях [9, 10], создание зарощенных полужолирующим фосфидом индия мезаполосковых структур [11].

Процесс повторного зарощивания представляет повторный рост изолирующего материала на профилированной (травленной) поверхности лазерной гетероструктуры с предварительно выращенными слоями и вытравленными мезаполосками. Такая техника имеет ряд преимуществ перед обычными методами создания лазерных диодов: это создание активной области свечения без высокотемпературной термообработки, что позволяет выдерживать заданные уровни легирования эпитаксиальных слоев, возможность создания узкой области тела

свечения за счет роста активной области свечения в канале, геометрия которого ограничивается фотолитографией и кристаллографическими особенностями полупроводников A^3B^5 и твердых растворов на их основе, создание планарной поверхности структур после выращивания лазерной гетероструктуры, что значительно облегчает создание лазерных диодов. Кроме того, выращивание селенида цинка позволяет доступным и технологичным методом создавать изолирующие слои [12].

Под зарощиванием подразумевается рост слоев полупроводниковых соединений на поверхности мезаполосковых структур [1]. Такие структуры позволяют создать электрическое и оптическое ограничения прохождения тока вдоль полосковой структуры.

Цель данной работы — создание и исследование мезаполосковых гетероструктур полупроводниковых твердых растворов $InP/GaInAsP$ с каналом в подложке, зарощенным слоем селенида цинка, для лазерных диодов, работающих в сверхвысокочастотном диапазоне (СВЧ) в диапазоне длин волн 1280 – 1320 нм.

Экспериментальная часть

В работе был использован метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), позволяющий проводить эпитаксиальный рост при пониженных температурах, что дает технологическую возможность создавать эпитаксиальные слои в широком диапазоне составов толщин эпитаксиальных слоев [5, 13].

Специфика условий роста выдвинула ряд конкретных требований к ростовому оборудованию ЖФЭ. В [7] показано, что для получения воспроизводимых результатов при выращивании гетероструктур и мезаполосковых структур, наи-

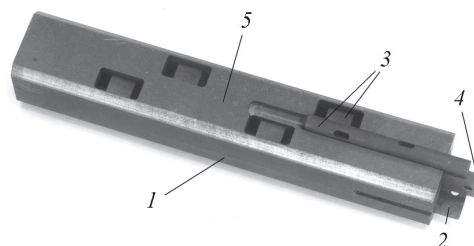


Рис. 1. Контейнер для ЖФЭ гетероструктур $InP/GaInAsP$: 1 — основание, 2 — слайдер с ячейкой для подложки, 3 — поршни, 4 — толкатель поршней, 5 — крышка.

Fig. 1. Container for LPE $InP/GaInAsP$ heterostructures: 1 — base, 2 — slider with a cell for the substrate, 3 — pistons, 4 — piston pusher, 5 — cover.

более предпочтительными оказываются ростовые установки с горизонтальным расположением термоблоков, ростовых реакторов и контейнеров. Конструкция ростового контейнера (рис. 1) является одной из важных составляющих технологии создания наноструктур. Такая конструкция позволяет: резко снизить дефекты роста эпитаксиальных слоев, выращивать слои в широком диапазоне толщин и концентраций легирующей примеси, вводить легирующую примесь в любой момент роста структур, легко менять составы твердых растворов, выращивать многослойные структуры за один технологический цикл.

Контейнер для роста выполнен из особо чистого графита со специальной обработкой и состоит из: неподвижного основания с узкой щелью для фильтрации раствора-расплава; подвижного слайдера с ячейкой для подложки; поршней для перемещения раствора-расплава и легирования во время роста; толкателя поршней; крышки, закрывающей растворы-расплавы по заданному циклу роста.

В данной работе использован метод химического травления. Проведены исследования по созданию мезаполосковых структур с каналом в подложке с последующим травлением мезаполоска и повторным наращиванием изолирующим селенидом цинка.

Для создания одномоновых лазерных диодов с пороговыми токами менее 10 мА в диапазоне длин волн 1280 – 1320 нм и мощностью излучения в оптическом волокне не менее 5 мВт, необходимо иметь слои высокого качества с телом свечения не более 1 – 3 мкм. В данной работе в активной области твердого раствора GaInAsP подбирали состав $\text{In}_{0,78}\text{Ga}_{0,22}\text{As}_{0,68}\text{P}_{0,32}$, что соответствовало длине волны излучения 1310 нм.

В качестве легирующей примеси *n*-типа проводимости использовали олово, в качестве легирующей примеси *p*-типа — цинк, который доставляли из холодной зоны в ростовую ячейку в момент начала роста *p*-эмиттерного слоя.

На первой стадии ЖФЭ формируется подложка-заготовка с блокирующими слоями и технологическим слоем InGaAsP. На подложке *p*-InP (100) выращивали следующие слои: буферный слой *p*-InP, легированный Zn, толщиной 7 – 9 мкм; блокирующий слой *n*-InP, легированный Sn, толщиной 2 мкм; блокирующий слой *p*-InP легированный Zn, толщиной 2 мкм; технологический слой InGaAsP нелегированный, толщиной 0,5 мкм.

После этого заготовка поступала на травление канала и выращивания лазерной гетероструктуры *p*-InP-GaInAsP-*n*-InP. На подложке-заготовке

формировали канал с последующим выращиванием планарной гетероструктуры InP/GaInAsP, этот процесс описан в [5]. При этом *p*-эмиттерный слой InP был легирован Zn. Толщина слоя составляла 4 мкм; *n*-эмиттерный слой InP, был легирован Sn. Толщина слоя составляла 2 мкм. Активную область твердого раствора InGaAsP специальным образом не легировали. Состав активной области твердого раствора подбирали согласно составу $\text{In}_{0,78}\text{Ga}_{0,22}\text{As}_{0,68}\text{P}_{0,32}$, что соответствовало длине волны излучения 1310 нм. Толщина активного слоя составляла 0,09 – 0,15 мкм. Ширина активного слоя в канавке не превышала 1,5 – 2,5 мкм.

Были исследованы следующие режимы роста: 1 — режим равновесного роста с постоянной скоростью охлаждения; 2 — режим принудительного охлаждения с исходным пересыщением растворов — расплавов; 3 — режим принудительного охлаждения с исходным пересыщением и изотермической выдержкой.

Исходная температура роста находилась в диапазоне от 600 до 650 °С. После выхода на режим и выдержки в течение 30 минут проводили подтравливание подложки индием, а затем начинали эпитаксиальный рост.

Активная область в виде полупроводника InGaAsP с узкой запрещенной зоной со всех сторон окружена широкозонным соединением InP, что приводит к оптическому ограничению этой области. Структура *p* – *n* – *p* – *n*-перехода находится по обе стороны от активной области и ограничивает токи утечки вдоль полоска в канале. Активная область располагается напротив *p*-InP блокирующего слоя с тем, чтобы увеличить последовательное сопротивление каналов токов утечки. Структура выращена на подложке *p*-типа проводимости.

После выращивания гетероструктуры в канале, поверхность структуры имеет практически планарную поверхность. Ширина заросшего мезаполоска составляет 1,5 – 2,0 мкм. Результат роста представлен на рис. 2.

После роста гетероструктуры, создавали мезаполосковую конструкцию путем травления *p* – *n*-переходов окружающих канал лазерного излучения. Мезаструктуру формировали путем химического травления структуры в HBr + 10 % $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Такой прием позволил ограничить протекание тока через область лазерного излучения, а также минимизировать емкость *p* – *n*-переходов, которые потенциально будут влиять на частотные характеристики лазерного диода.

Далее мезаполосковую структуру наращивали слоем изолирующего селенида цинка. Процесс

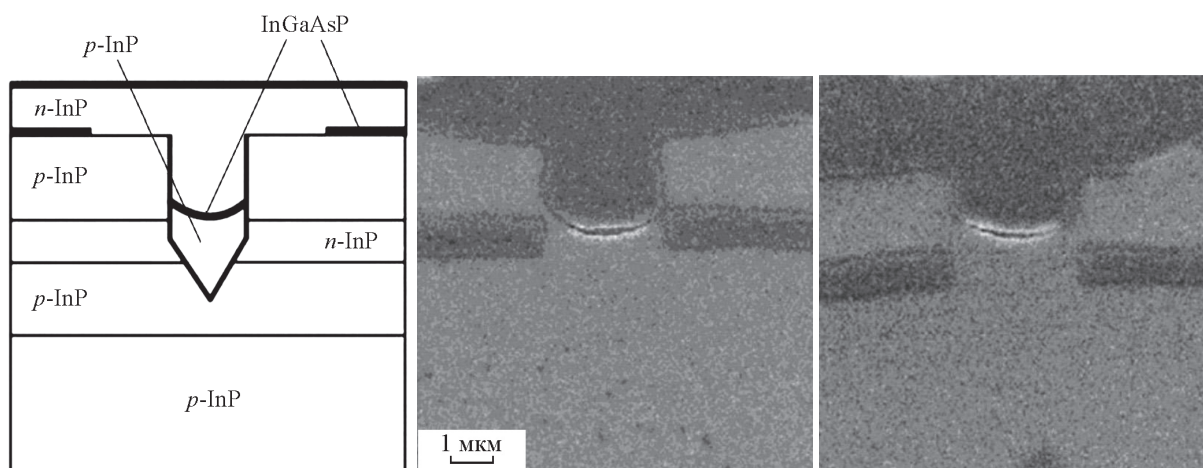


Рис. 2. Планарная гетероструктура InP/GaInAsP/InP с каналом в подложке.

Fig. 2. Planar InP/GaInAsP/InP heterostructure with a channel in the substrate.

проводили вакуумно-термическим способом при температуре источника 800 °С, при температуре подложки 550 °С. В качестве источника был использован крупноблочный селенид цинка. Рост

осуществляли из ячейки Кнудсена. Схема полученной полосковой лазерной гетероструктуры показана на рис. 3.

Результаты исследований

Полученные эпитаксиальные гетероструктуры подвергали комплексным физическим исследованиям [14]. Были изготовлены экспериментальные образцы лазерных диодов и замерены некоторые характеристики этих диодов.

В работе были использованы различные методы анализа тонких слоев, такие как: рентгеновская дифрактометрия; трансмиссионная электронная микроскопия; электронная микроскопия высокого разрешения; масс-спектропия вторичных ионов (ВИМС); спектральные и амплитудно-частотные характеристики лазерного излучения.

Методом рентгеновской дифрактометрии были изучены относительные рассогласования параметров решетки эпитаксиальных слоев «подложка – эпитаксиальный слой» твердого раствора InGaAsP. Контроль рассогласования параметров решетки в слоях гетероструктур контролировали по кривым качания на рентгеновском дифрактометре Philips PW3710. Использовали отражение от рефлекса (400) $\text{CuK}_{\alpha 1}$ и $\text{CuK}_{\alpha 2}$ линии излучения с апертурой детектора 0,1 мм. Контроль косвенно позволяет судить о возможности возникновения дислокаций несоответствия между подложкой InP и слоями твердых растворов InGaAsP. Исследования показали, что при использовании режима принудительного охлаждения с исходным переохлаждением от 1 до 10 °С и изотермической

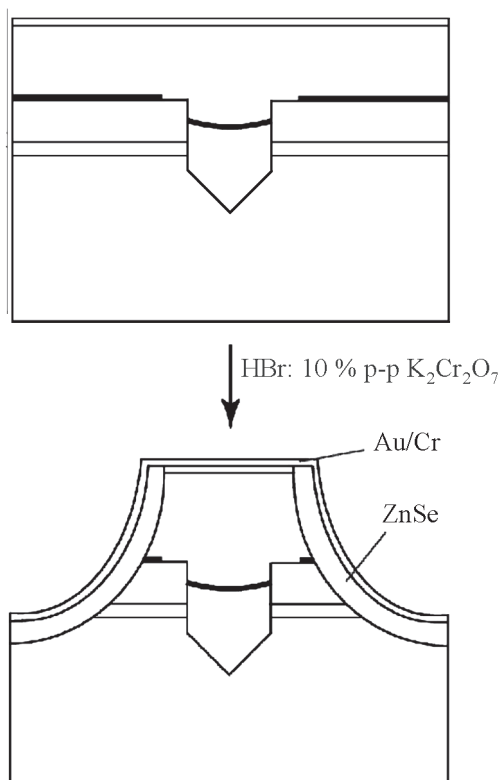


Рис. 3. Мезаполосковая гетероструктура InP/GaInAsP/InP с каналом в подложке, зарощенная селенидом цинка.

Fig. 3. Messtrip InP/GaInAsP/InP heterostructure with a channel in the substrate, overgrown with zinc selenide.

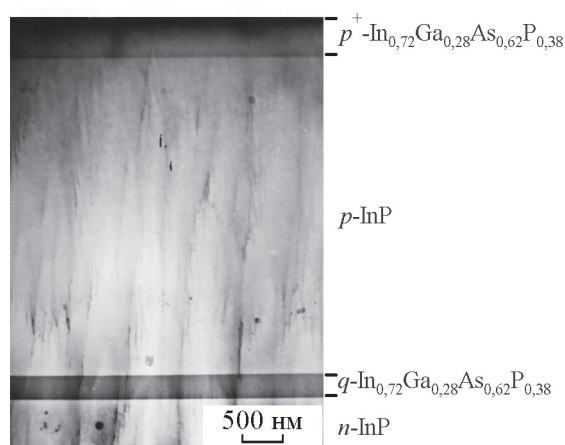


Рис. 4. Поперечный скол лазерной гетероструктуры InP/GaInAsP.

Fig. 4. Transverse cleavage of the InP/GaInAsP laser heterostructure.

выдержкой растворов – расплавов, удается получить относительное рассогласование параметров решетки не более 0,12 %. Такое рассогласование для выбранного состава твердого раствора является удовлетворительным и не вносит в гетеропереход дислокаций несоответствия.

Трансмиссионная электронная микроскопия была использована для изучения планарности гетеропереходов и наличия дислокаций несоответствия между подложкой и твердым раствором состава InGaAsP, который является оптимальным для получения лазерного излучения с длиной волны 1310 нм. Исследования проводили на электронном микроскопе CM-20 (Philips) с рабочим напряжением 200 кВ. Как видно из рис. 2, в исследованных интервалах начальных температур и переохлаждений получали зеркально гладкие слои с планарными границами перехода «подложка – слой». При этом дислокаций несоответствия не было обнаружено (рис. 4)

С целью углубленного изучения качества выращенных слоев и определения наличия дислокаций в эпитаксиальных слоях и на границе переходов «подложка-слой», была изучена «тонкая» структура гетеропереходов слоев InP/GaInAsP, а также слоев активной области с составом $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.68}\text{P}_{0.32}$. В работе был использован электронный микроскоп высокого разрешения JOEL 4000EX. Методом ионного травления готовили специальные образцы. Исследования проводили при напряжении 400 кВ. Изображение электронной дифракции получали от рефлексов {400}.

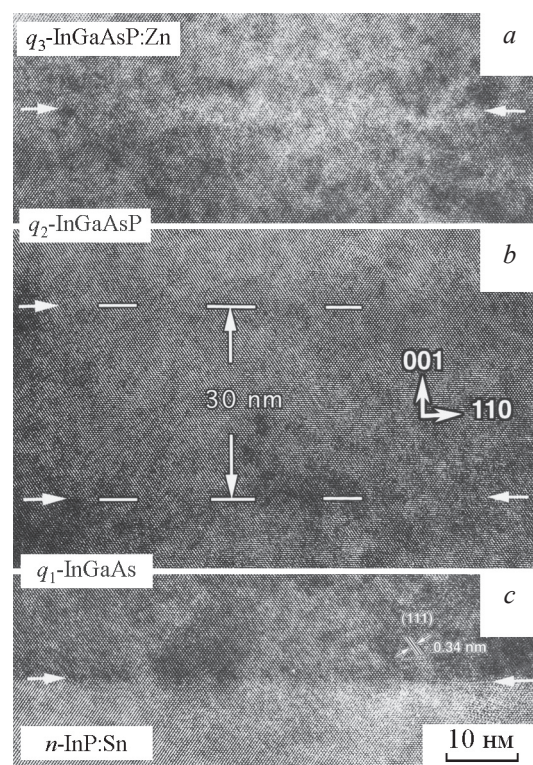


Рис. 5. Атомная структура гетеропереходов InP/GaInAsP: *a* — InGaAsP, легированный цинком, *b* — нелегированный твердый раствор InGaAsP, *c* — твердый раствор InGaAsP + InP, легированный оловом.

Fig. 5. Atomic structure of InP/GaInAsP heterojunctions: *a* — zinc doped InGaAsP, *b* — InGaAsP undoped solid solution, *c* — tin doped InGaAsP + InP solid solution.

Результаты «тонкой» структуры гетеропереходов и фрагментов слоев InP/GaInAsP, представлены на рис. 5. Как видно из приведенных данных, дислокации несоответствия также не были обнаружены. Однако на атомном разрешении видны флуктуации контраста изображения, что, предположительно, связано с некоторыми напряжениями в эпитаксиальных слоях гетероструктуры.

Профили составов выращенных слоев контролировали с помощью масс-спектропии вторичных ионов (ВИМС) на микроанализаторе «CAMECA ISM 3F». Снимали профили по элементам: Ga, In, As, P, по глубине эпитаксиальных слоев. Травление проводили ионами Cs^+ с энергией 10 кэВ (ионный ток около 200 нА). Разрешение ионного пучка около 1 мкм, глубина разрешения от 10 до 50 нм. Результаты анализа приведены на рис. 6. Из рис. 6 видно четкое распределение компонентов по эмиттерным слоям и активной области твердого раствора. Также хорошо видна геометрия данной структуры.

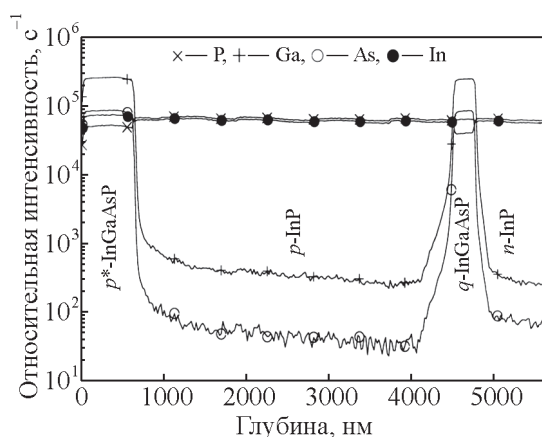


Рис. 6. ВИМС-профиль гетероструктуры InP/GaInAsP с распределением компонентов по толщине слоев.

Fig. 6. SIMS of InP/GaInAsP heterostructure profile with component distribution over the layer thickness.

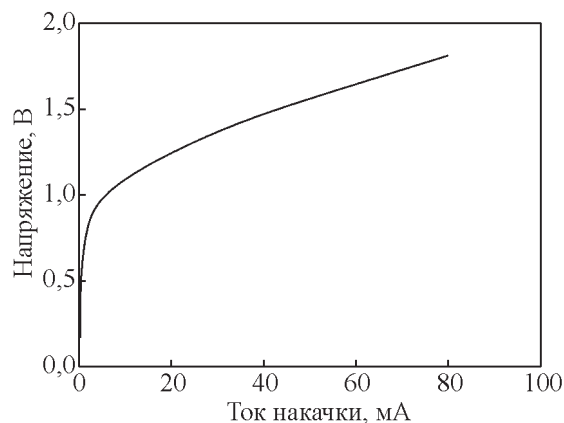


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика лазерного диода с каналом в подложке, зарощенным селенидом цинка.

Fig. 8. Current-voltage characteristic of laser diode with channel in the substrate, overgrown with zinc selenide.

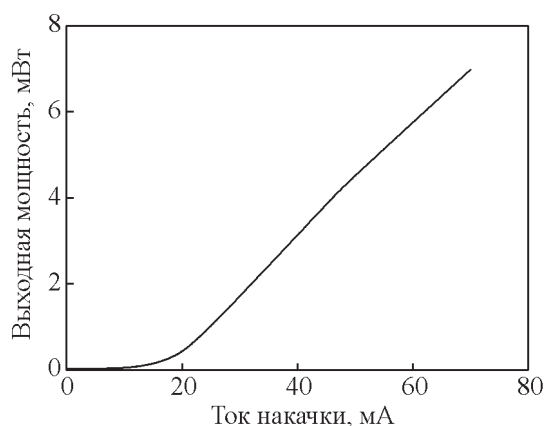


Рис. 7. Ватт-амперная характеристика лазерного диода с каналом в подложке, зарощенным селенидом цинка.

Fig. 7. Watt-ampere characteristic of laser diode with channel in the substrate, overgrown with zinc selenide.

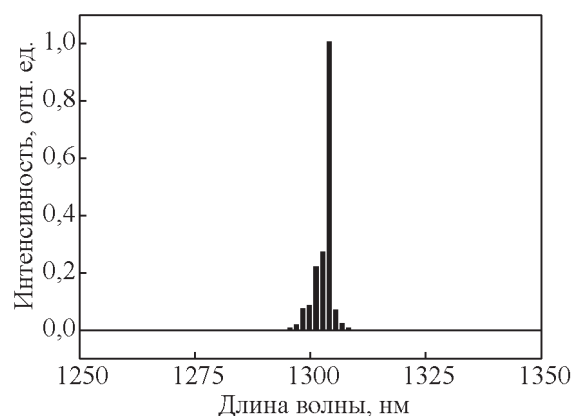


Рис. 9. Спектр оптического излучения лазерного диода с каналом в подложке, зарощенным селенидом цинка.

Fig. 9. The optical spectrum of laser diode with channel in the substrate, overgrown with zinc selenide.

Проведенные физические исследования мезополосковых гетероструктур с каналом в подложке зарощенных селенидом цинка, показали хорошее качество и геометрию слоев. В связи с этим были изготовлены лазерные диоды и исследованы их характеристики.

Структуры методом химического травления доводили до 100 – 120 мкм, наносили омические контакты на *n*- и *p*-стороны, раскалывали на элементы с длиной резонатора Фабри-Перо 300 мкм, монтировали на медные контактные пластины и проводили изучение характеристик.

Были изучены ватт-амперные (рис. 7) и вольт-амперные (рис. 8) характеристики. Видно, что лазерные диоды имеют линейные характеристики, позволяющие проводить частотную модуляцию лазерного излучения.

Спектральные характеристики лазерного диода получали на оптическом анализаторе спектров “Ando” модель AQ-6330, мощностные характеристики контролировали при помощи оптического тестера FOD-1204. В качестве источника питания лазерного диода, использовали контроллер тока и температуры “Пилот-2” фирмы “Superlum”, ко-

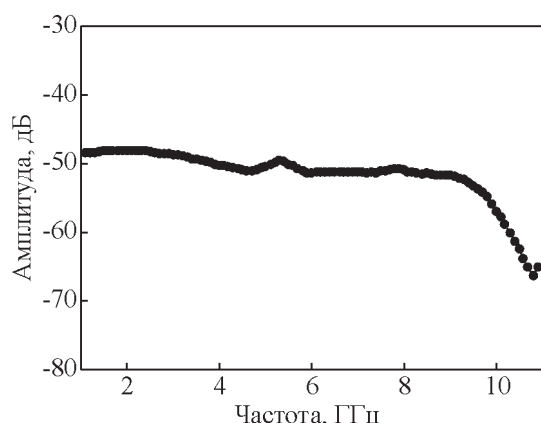


Рис. 10. АЧХ излучения лазерного диода с каналом в подложке, зарощенным селенидом цинка.

Fig. 10. The frequency response of the laser diode with a channel in the substrate, overgrown with zinc selenide.

торый позволял поддерживать, контролировать и задавать ток и температуру в диапазоне токов от 10 до 400 мА, а также поддерживать температуру лазерного диода от в диапазоне от -50 до $+70$ °С.

Типичная спектральная характеристика оптического излучения лазерного диода представлена на рис. 9. Из характеристики видно, что диод работает на одной продольной моде излучения, что позволяет использовать его в широкополосных одномодовых волоконных линиях передачи информации. Длина волны излучения 1310 нм соответствует заданному составу твердого раствора InGaAsP.

С целью определения скоростных характеристик лазерных диодов, были изучены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Диоды монтировали в СВЧ- тракт полосковой линии с нагрузкой 50 Ом. Исследования проводили на анализаторе цепей Agilent E8363B. В качестве драйвера лазерного диода, использовали контроллер тока и температуры “Пилот-2”. Мощность лазерного диода на выходе одномодового волокна составляла 4 мВт, рабочий ток — 50 мА. Данные АЧХ представлены на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что полученные диоды работают в СВЧ-диапазоне, вплоть до частот 10 ГГц, и могут быть использованы для создания сетей со скоростями передачи информации 5 Г.

Выводы

1. Разработан процесс изготовления методом ЖФЭ мезаполосковых гетероструктур InP/InGaAsP с каналом в подложке зарощенным селенидом цин-

ка, позволяющий создавать одночастотные лазерные диоды без повторной высокотемпературной обработки излучающей области лазерных диодов.

2. Комплексными физико-технологическими исследованиями мезаполосковых структур, состава, планарности гетерограниц и структурного совершенства эпитаксиальных слоев показано, что относительное рассогласование параметров решетки подложка InP – слой InGaAsP не превышает 0,12 %.

3. Получены лазерные диоды и исследованы их характеристики. Анализ оптического спектра лазерного излучения указывает работу диода на одной продольной моде излучения. Изучена возможность работы диодов в диапазоне до 10 ГГц, что позволяет использовать их в сетях передачи информации 5G.

Авторы выражают благодарность проф. М.Е. Белкину за проведение измерений АЧХ характеристик лазерных диодов, а также за полезную дискуссию по полученным результатам.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОИХ РАН в области фундаментальных научных исследований при поддержке программы Президиума РАН I.15 “Научные основы создания новых функциональных материалов”.

Литература

1. Boroditsky M.L., Garbuzov D.Z., Livshits D.A., Rafailov E.U. Mode composition control in high power buried InGaAsP/GaAs lasers. SPIE's OE/LASE '94, 22 – 29 January 1994, iss. 1, pp. 64 – 70.
2. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах. Все материалы: энциклопед. справочник. 2010, № 3, с. 10 – 15.
3. Серьезнов А.Н., Кузнецов А.Б., Лукьянов А.В., Брагин А.А. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций. Научный вестник НГТУ, 2016, т. 64, № 3, с. 95 – 105.
4. Белкин М.Е., Засовин Э.А. Критерии выбора лазерного излучателя для комбинированных систем радиолокации и связи СВЧ-диапазона. Радиотехника, 2008, № 1, с. 71 – 77.
5. Васильев М.Г., Васильев А.М., Шелякин А.А. Планарно-зарощенная гетероструктура InP/GaInAsP с серповидной активной областью на р-InP. Неорганические материалы, 2008, т. 44, № 9, с. 1031 – 1035.

6. Прохазкова О., Новотный И., Шробар Ф. Двух-этапная жидкофазная эпитаксия для изготовления зарощенных гетероструктур InGaAsP/InP. Квантовая электроника, 1988, т. 15, № 1, с. 2270 – 2272.
7. Gustavsson M., Hedekvist P.O., Andrekson P.A. Uni-Travelling - Carrier Photodiode Performance with X-band Modulation at High Optical Power. IEEE Microwave and Wireless Components Lett., 2005, v. 15, no. 5, pp. 297 – 299. DOI: 10.1109/LMWC.2005.847656.
8. Мамутин В.В., Ильинская Н.Д., Усикова А.А., Лютецкий А.В. Полосковая структура для изорешеточных квантовых каскадных лазеров. Физика и техника полупроводников, 2018, т. 52, № 12, с. 1499 – 1502.
9. Chih-Wei Hu, Feng-Ming Lee, Te-Chin Peng, Tzu-Min Ou, Meng-Chyi Wu, Yin-Hsun Huang. High-speed and uncooled operation of 1.3- μ m InGaAsP strain-compensated MQW BH lasers fabricated on patterned InP substrates. Journal of Lightwave Technology, 2006, v. 24, iss. 7, pp. 2906 – 2911.
10. Васильев М.Г., Васильев А.М., Изотов А.Д., Шелякин А.А. Создание и исследование высокотемпературного лазерного диода с длиной волны излучения 1310 нм на основе зарощенных гетероструктур. Неорганические материалы. 2014, т. 50, № 9, с. 963 – 967.
11. Васильев М.Г., Васильев А.М., Костин Ю.О., Изотов А.Д., Шелякин А.А. Гетероструктура InP/InGaAsP/InP с серповидной активной областью на P-InP для линейных торцевых светодиодов. Неорганические материалы, 2017, т. 53, № 11, с. 1189 – 1193.
12. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. Физика и техника полупроводников, 1998, т. 32, №1, с. 3 – 18.
13. Дюраев В.П. Источники оптического излучения. В кн.: Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. С.А. Дмитриева, Н.Н. Слепова. М.: Изд. Connect, 2000, с. 73 – 92.
14. Luyton W., Volkov V.V., Amelincks S., Ferauge C., Gibbels R., Vasilev M.G., Shelyakin A.A. Electron microscopy and mass-spectrometry study of InP/InGaAsP lasers grown by LPE. Phys. Stat. Sol. (a), 1993, v. 140, pp. 453 – 462.
- Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik — Polymer Science. Series D, 2010, iss. 3, pp. 10 – 15.
3. Ser'eznov A.N., Kuznetsov A.B., Luk'yanov A.V., Bragin A.A. Primenenie optovoloknykh tekhnologii pri sozdanii vstroennykh system samodiagnostiki aviatsionnykh konstruktsiy [The use of fiber-optic technologies in the creation of built-in self-diagnosis systems for aircraft structures]. Nauchnyi vestnik NGTU — Scientific Bulletin of NSTU, 2016, vol. 64, no. 3, pp. 95 – 105. ISSN 1814-1196.
4. Belkin M.E., Zasov E.A. Kriterii vybora lazernogo izluchatelya dlya kombinirovannykh system radiolokatsii i svyazi SVCH-diapazona [Criteria for choosing a laser emitter for combined microwave radar and communications systems]. Radiotekhnika — Radio engineering, 2008, no. 1, pp. 71 – 77.
5. Vasil'ev M.G., Vasil'ev A.M., Shelyakin A.A. Planar buried crescent InP/InGaAsP/InP heterostructure on p-InP. Inorganic Materials, 2008, vol. 44, no. 9, pp. 913 – 917. DOI: 10.1134/S002016850809001X.
6. Procházková O., Novotný I., Šrobar F. Two-stage liquid phase epitaxy for fabrication of buried InGaAsP/InP heterostructures. Sov. J. of Quantum Electronics, 1988, vol. 18, no. 11, pp. 1420 – 1422. <http://dx.doi.org/10.1070/QE1988v018n11ABEH012632>.
7. Gustavsson M., Hedekvist P.O., Andrekson P.A. Uni-travelling – carrier photodiode performance with X-band modulation at high optical power. IEEE Microwave and Wireless Components Lett., 2005, vol. 15, no. 5, pp. 297 – 299. DOI: 10.1109/LMWC.2005.847656.
8. Mamutin V.V., Ilyinskaya N.D., Usikova A.A., Lyutetskiy A.V. Ridge waveguide structure for lattice-matched quantum cascade lasers. Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Semiconductors, 2018, vol. 52, iss. 12, pp. 1603 – 1606.
9. Chih-Wei Hu, Feng-Ming Lee, Te-Chin Peng, Tzu-Min Ou, Meng-Chyi Wu, Yin-Hsun Huang. High-speed and uncooled operation of 1.3- μ m InGaAsP strain-compensated MQW BH lasers fabricated on patterned InP substrates. Journal of Lightwave Technology, 2006, vol. 24, iss. 7, pp. 2906 – 2911.
10. Vasil'ev M.G., Vasil'ev A.M., Izotov A.D., Shelyakin A.A. High-temperature buried InP/GaInAsP heterostructure laser diode emitting at 1310 nm. Inorganic Materials, 2014, vol. 50, no. 9, pp. 888 – 891. DOI: 10.1134/S0020168514090167.
11. Vasil'ev M.G., Vasil'ev A.M., Kostin Yu.O., Izotov A.D., Shelyakin A.A. Buried crescent InP/InGaAsP/InP heterostructure on p-InP for linear edge-emitting diodes. Inorganic Materials, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 1170 – 1173. DOI: 10.1134/S0020168517110164.
12. Alferov Zh.I. The history and future of semiconductor heterostructures. Semiconductors, 1998, vol. 32, iss. 1, pp. 1 – 14.
13. Duraev V.P. Istochniki opticheskogo izlucheniya [Optical radiation sources], pp. 73–92, in book: Volokonno-opticheskaya tekhnika: Istoriya, razvitie, perspektivy [Fiber optic technology: History, achievements,

References

1. Boroditsky M.L., Garbuzov D.Z., Livshits D.A., Rafailov E.U. Mode composition control in high power buried InGaAsP/GaAs lasers. SPIE's OE/LASE '94, 22 – 29 January 1994, iss. 1, p. 64 – 70.
2. Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Yu., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I. Primenenie opticheskogo volokna v kachestve datchikov deformatsii v polimernykh kompozitsionnykh materialakh [The use of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials]. Vse

- prospects]. Ed. by Dmitriev S.A. and Slepov N.N. Moscow, Connect Publ., 2000, 376 p.
14. Luyton W., Volkov V.V., Amelincks S., Ferauge C., Gibbels R., Vasilev M.G., Shelyakin A.A. Electron microscopy and mass-spectrometry study of InP/InGaAsP lasers grown by LPE. Phys. Stat. Sol. A, 1993, vol. 140, pp. 453 – 462.

Статья поступила в редакцию — 17.09.2019 г.

после доработки — 19.11.2019 г.

принята к публикации — 20.11.2019 г.

Васильев Михаил Григорьевич — Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (Москва, 119991, Ленинский проспект, 31), доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области материалов квантовой электроники и технологии полупроводниковых материалов. E-mail: mgvas@igic.ras.ru.

Васильев Антон Михайлович — Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (Москва, 119991, Ленинский проспект, 31), ведущий инженер, специалист в области электронного приборостроения и материаловедения электронных материалов. E-mail: mgvas@igic.ru.

Изотов Александр Дмитриевич — Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (Москва, 119991, Ленинский проспект, 31), доктор химических наук, член-корр. РАН, главный научный сотрудник, специалист в области полупроводникового материаловедения, физикохимии и химии твердого тела. E-mail: izotov@igic.ras.ru.

Костин Юрий Олегович — Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (Москва, 119991, Ленинский проспект, 31), кандидат технических наук, научный сотрудник, специалист в области физики твердого тела и электронного приборостроения. E-mail: mgvas@igic.ras.ru.

Шелякин Алексей Алексеевич — Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (Москва, 119991, Ленинский проспект, 31), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области материаловедения и технологии полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: mgvas@igic.ras.ru.

Creation of buried type heterostructures for microwave laser diodes

M. G. Vasil'ev, A. M. Vasil'ev, Yu. O. Kostin, A. D. Izotov, A. A. Shelyakin

Complex physicochemical studies of overgrown messtrip structures with a channel in the substrate, etching of the mesa, and repeated overgrowing of the zinc selenide with an insulating layer were carried out. Electron microscopic studies of the planarity of heterointerfaces between the substrate and epitaxial layers were carried out. The atomic structure of GaInAsP/InP epitaxial layers was studied by transmission electron microscopy. Using secondary ion mass spectroscopy (SIMS), we analyzed the profiles of the epitaxial layers of the heterostructure. Layers of a given composition $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.68}\text{P}_{0.32}$, corresponding to a laser wavelength of 1.3 μm , were obtained. For the first time, a technique has been developed for creating laser diodes with a channel in the substrate, with etching of the messtrip structure and overgrowing with a layer of zinc selenide. This technique makes it possible to create laser diodes both with optical limitation of laser radiation and with limitation of the current flow along the laser strip. The process of etching the layers of the pn junction between laser strips, and overgrowing by zinc selenide on the surface of the etched structure, was first developed. This allowed using the LPE method to create heterostructures for laser diodes operating in the microwave range up to 10 GHz. The possibility of creating and operating laser diodes of this design and technology is shown. The volt-ampere, watt-ampere and spectral characteristics of laser diodes are investigated. A domestic technology is proposed for creating a microwave laser diode on a heterostructure with a channel in the substrate and repeated overgrowing of zinc selenide. The prospects of using laser diodes overgrown with an insulating layer of zinc selenide to create high-speed devices are shown.

Keywords: heterostructures, laser diodes, microwave diodes, zinc selenide, channel in the substrate, amplitude-frequency characteristic.

Vasil'ev Mihail — Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of sciences (Moscow, 119991, Leninsky prosp., 31), Dr Sci (Eng), professor, head of the laboratory of semiconductor and dielectric materials, specialist in the field of quantum electronics materials and semiconductor materials technology. E-mail: mgvas@igic.ras.ru.

Vasil'ev Anton — Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of sciences (Moscow, 119991, Leninsky prosp., 31), leading engineer, specialist in the field of the electronic instrumentation and materials. E-mail: mgvas@igic.ras.ru.

Izotov Alexandr — Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of sciences (Moscow, 119991, Leninsky prosp., 31), Dr Sci (Chem), corresponding member of RAS, chief researcher, specialist in the field of semiconductor materials, physical and solid state chemistry. E-mail izotov@igic.ras.ru.

Kostin Yury — Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of sciences (Moscow, 119991, Leninsky prosp., 31), PhD (Eng), researcher, specialist in the field of solid state physics and electronic instrumentation.

Shelyakin Alexey — Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of sciences (Moscow, 119991, Leninsky prosp., 31), PhD (Eng), senior researcher, specialist in the field of semiconductor and dielectric materials technology. E-mail: mgvas@igic.ras.ru.