НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2019, том 55, № 9, с. 957–961

УДК 546.685.004

СОЗДАНИЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ ZnSe/InP НА ПЛОСКИХ И ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ InP

© 2019 г. М. Г. Васильев[1, *], А. М. Васильев[1], А. Д. Изотов[1], С. Ф. Маренкин[1], О. Н. Пашкова[1], А. А. Шелякин[1]

[1]*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: mgvas@igic.ras.ru*

Поступила в редакцию 08.02.2019 г.
После доработки 19.04.2019 г.
Принята к публикации 22.04.2019 г.

Исследован рост слоев селенида цинка на плоских и профилированных поверхностях фосфида индия. Установлена зависимость скорости роста селенида цинка от ориентации подложки. Показана возможность использования полученных результатов в технологии создания мезаполосковых конструкций для приборов квантовой электроники. На основании проведенных исследований получены мезаполосковые лазерные диоды, работающие в спектральной полосе поглощения метана. Лазерные диоды пригодны для создания систем передачи сигнала по оптическому волокну.

Ключевые слова: полупроводниковые гетероструктуры, селенид цинка, лазерные диоды, метан

DOI: 10.1134/S0002337X19090185

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковым гетероструктурам $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$ и методам их создания [1–5] в настоящее время уделяется большое внимание. Эти структуры широко используются в оптоэлектонных устройствах и квантовой электронике. Основные области их применения – полупроводниковые лазеры, светодиоды, фотоприемные устройства. Полупроводниковое приборостроение требует стабильной работы в широкой области мощностей и температур при малых рабочих токах и высокой надежности изделий. В связи с этим требования к технологии изготовления гетероструктур и приборов на их основе также резко возрастают. Известно, что наиболее надежных и значимых результатов в области квантовой электроники и оптоэлектроники удается достичь на гетероструктурах AlGaAs/GaAs , InP/GaInPAs и InP/AlGaInAs, AlGaInP/GaAs. Эти гетероструктуры позволяют перекрывать широкий спектр излучения: от видимого до ближнего ИК [1, 4]. На базе этих гетероструктур также возможно изготовление приемных устройств в том же спектральном диапазоне [6]. Однако создание реальных структур и приборов на их основе требует тщательной отработки технологических процессов на этапе формирования чипов или элементов. В качестве конкретных чипов и элементов требуется формирование как планарных, так и мезаполосковых структур малых линейных размеров со сложной заданной кристаллографической ориентацией и высокой степенью изоляции [7, 8]. При этом особое значение приобретают материалы, которые позволяют стабильно и надежно изолировать элементы, не внося дефекты в мезаполосковые структуры.

На наш взгляд, одним из лучших изоляционных материалов для перечисленных выше структур является полупроводниковый материал группы $A^{II}B^{VI}$ – селенид цинка [5, 9, 10]. Этот материал при всех известных режимах выращивания и напыления остается изолятором с удельным сопротивлением не менее 1×10^8 Ом см [8], что вполне достаточно для изоляции мезаполосковых структур и чипов на их основе. Кроме того, интерес к созданию гетероструктур с использованием селенида цинка связан с тем, что параметры решеток селенида цинка, арсенида галлия и фосфида индия имеют незначительные расхождения, что позволяет создавать структуры с относительно небольшими напряжениями на границе раздела полупроводника и изолятора [1, 6]. Особо надо отметить, что селенид цинка, несмотря на термообработки при 400–600°C, остается изолятором, что

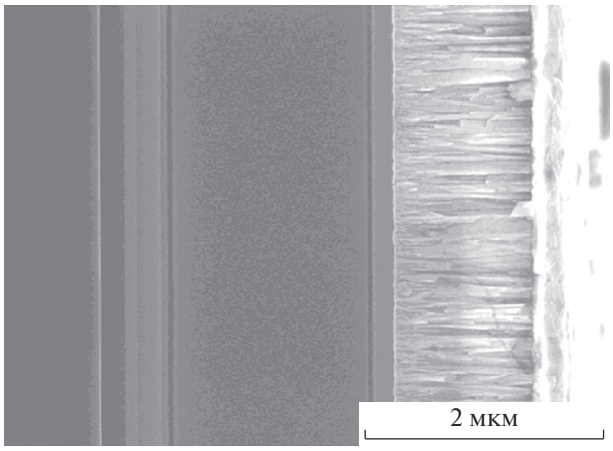

Рис. 1. Слой поликристаллического ZnSe, выращенного на структуре InP–GaInAsP (ориентация подложки (100), температура подложки 350°C).

важно в технологической цепочке создания реальных приборных структур и чипов на их основе.

Ранее нами были рассмотрены условия получения и физико-химические свойства гетеропереходов ZnSe/GaAs. Изучены их растворимости в металлах Sn и Ga, а также состояние на гетерогранице ZnSe/GaAs [2].

В данной работе исследована возможность получения гетеропереходов ZnSe/InP с целью создания изолированных структур как на планарных, так и на профилированных поверхностях зарощенных мезаполосковых структур лазерных диодов, работающих в спектральном диапазоне длин волн 1660–1670 нм. Этот диапазон длин волн лазерного излучения может быть использован для создания приборов и цифровых систем удаленного контроля метана по оптоволоконным линиям связи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования роста селенида цинка на планарной поверхности использовались подложки InP {100}, легированные Sn или S, с концентрацией электронов до 10^{18}–10^{19} см$^{-3}$. Образцы механически полировались до толщины 320 ± 10 мкм. После механической полировки образцы тщательно отмывали в органических растворителях и травили в полирующем травителе Br:CH_3COOH для снятия поверхностного нарушенного слоя материала, приблизительно 10 мкм. Для исследования роста на профилированной поверхности использовали реальные лазерные гетероструктуры InP/GaInAsP, выращенные на планарной поверхности, с использованием подложек InP с ориентацией (100) с последующим травлением мезаполосков вдоль направления ⟨110⟩ (рис. 1).

Эти мезаполосковые структуры заращивали селенидом цинка с целью изоляции активной области и ограничения утечек тока вдоль полоска. Рост селенида цинка проводили вакуумно-термическим способом в вакуумной установке ВУП-5 с использованием ячейки Кнудсена [11]. Остаточное давление в камере роста составляло 6.7×10^{-3} Па. В качестве испаряемого материала использовали крупноблочные монокристаллы селенида цинка с удельным сопротивлением 5×10^{-9} Ом см.

Предполагается, что процесс испарения материала происходит потоком, близким к ламинарному. Известно, что селенид цинка относится к конгруэнтно испаряющимся материалам и испаряется без разложения.

Контроль толщины выращенных слоев проводили на оптическом микроскопе с увеличением ×850 и растровом электронном микроскопе с увеличением от ×3500 до ×10000. Параметры лазерных диодов спектрального диапазона длин волн 1660–1670 нм изучали на оптическом анализаторе спектров ANDO-6330 с использованием одномодового волокна SMF-28. Выходную мощность лазерных диодов измеряли с помощью измерителя мощности FOD-1204 и драйвера PILOT-4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Были исследованы различные режимы роста в зависимости от температуры подложки фосфида индия, от скорости охлаждения подложки и ориентации направления мезаполосков лазерного диода. Температура подложки изменялась от 250 до 600°C. Было отмечено, что при температуре подложки ниже 350°C вырастали поликристаллические слои селенида цинка, в то же время при температурах подложки в диапазоне от 400 до 650°C наблюдался рост крупноблочного или монокристаллического слоя селенида цинка.

Результаты исследования режимов роста слоев ZnSe на подложках InP приведены на рис. 2. Видно, что с увеличением температуры подложки скорость роста возрастает. Также видно, что ориентация подложек достаточно сильно влияет на скорость роста слоев селенида цинка. Однако при температурах свыше 650°C наблюдалось реиспарение селенида цинка и выделение капель индия из подложки фосфида индия, что приводило к полной деструкции выращенных слоев.

Эти исследования позволяют оптимизировать процесс заращивания мезаполосковых структур с учетом направления и геометрии мезаполоска.

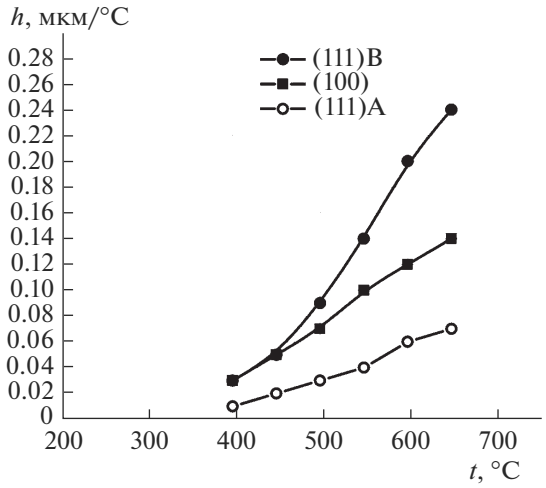

Рис. 2. Зависимости скорости роста слоев ZnSe от температуры и ориентации подложки InP при постоянной температуре источника напыления 800°C (скорость охлаждения подложки 1°C/мин).

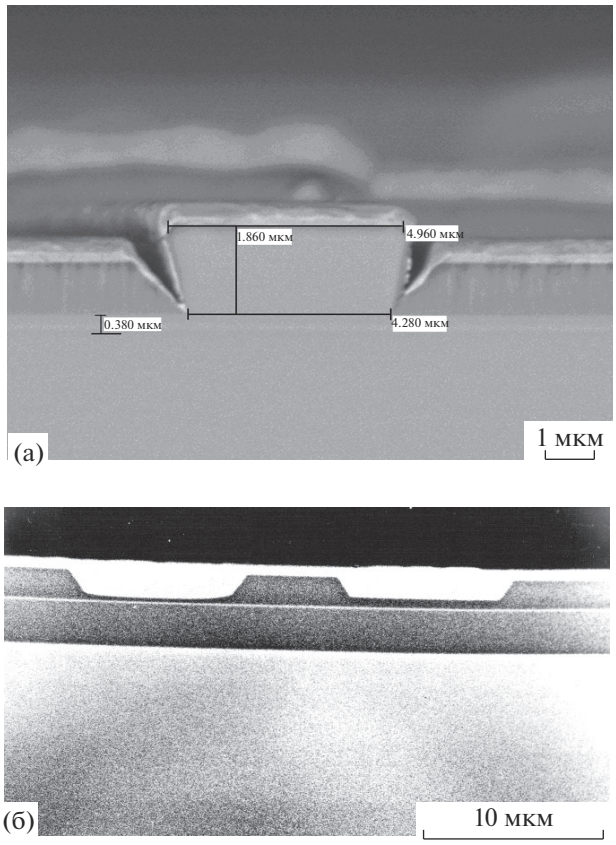

Рис. 3. Мезаполосковая наногетероструктура InP/GaInAsP, зарощенная ZnSe, при температуре подложки 500°C: а – направление мезаполоска [$\bar{1}$10], ориентация подложки (100); б – направление мезаполоска [110], ориентация подложки (100).

На рис. 3 представлены микрофотографии мезаполосков лазерных гетероструктур InP/GaInAsP, выращенных на подложке фосфида индия с ориентацией (100) и зарощенных селенидом цинка, при различных направлениях мезаполосков. Видно, что мезаполоски, вытравленные в направлении [110], практически полностью зарастают как в плоскости (111) – боковые грани, так и в плоскости (100) – плоскость подложки фосфида индия. В то же время, мезаполоски, вытравленные в ортогональном направлении [$\bar{1}$10], не зарастают селенидом цинка, что приводит к утечкам тока накачки вдоль *p*–*n*-перехода лазерного диода, делая его практически не рабочим элементом. Такой эффект заращивания мезаполосков селенидом цинка связан с полярностью свойств монокристаллов $A^{III}B^{V}$ [12, 13]. Этот момент становится важным и определяющим в создании мезаполосковых лазерных зарощенных наногетероструктур.

На основе мезаполосковых зарощенных наногетероструктур InP/GaInAsP с каналом в подложке с последующим заращиванием изолирующим слоем селенидом цинка нами были созданы полупроводниковые лазерные диоды с длиной волны излучения 1650–1660 нм [14].

На рис. 4 приведены спектральные характеристики этих диодов при рабочих температурах 20 и 50°C. Исследование спектров этих диодов показало, что они работают на одной поперечной моде. Длина волны излучения может быть точно подобрана под линию поглощения метана – 1655 нм – путем изменения температуры чипа лазерного диода. Параметры этих диодов позволяют использовать их для работы в сетях с одномодовым оптическим серийным волокном типа SMF-28. Выходная мощность этих диодов составляла до 8 МВт, что вполне достаточно для создания оптических модулей с оптоволоконным выходом и передачи оптического сигнала на расстояния до 20 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован рост слоев селенида цинка на плоских и профилированных поверхностях фосфида индия. Установлена зависимость скорости роста селенида цинка от ориентации подложки. Показано, что наиболее оптимальными параметрами роста являются температура подложки 500–550°C и направление мезаполосков [110]. На основании выбранных технологических режимов заращивания мезаполосковых структур высокоомным селенидом цинка изготовлены полупроводнико-

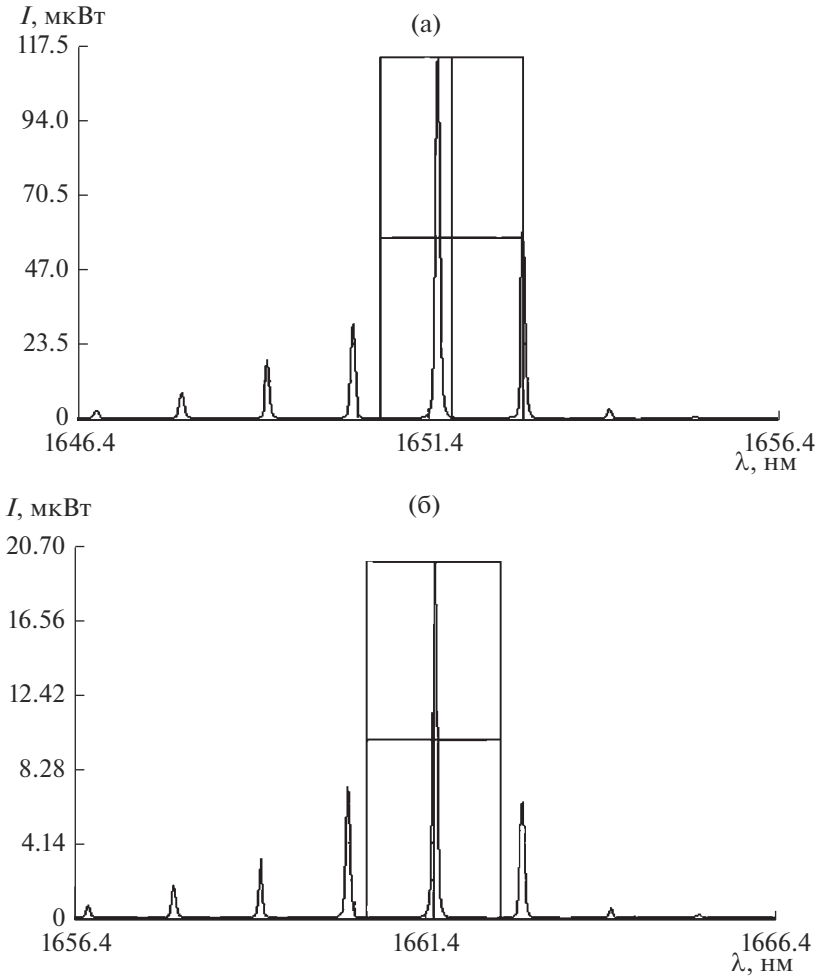

Рис. 4. Спектры мезаполоского лазерного диода, зарощенного ZnSe: а – длина волны излучения 1651 нм, $t = 20°C$; б – длина волны излучения 1661 нм, $t = 50°C$.

вые лазерные диоды, работающие на полосе поглощения метана 1650–1610 нм. Такие лазерные диоды работают в одномодовом режиме и пригодны для систем удаленного контроля метана с использованием оптоволоконных линий связи.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А.* МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники. М.: Техносфера, 2018. 487 с.
2. *Васильев М.Г., Новикова Э.М., Ершова С.А., Крапухин В.В., Соколовский К.А.* Получение жидкостной эпитаксией гетеропереходов ZnSe/GaAs // Электронная техника. Сер. Материалы. 1976. № 6. С. 47–51.
3. *Norman A.G., Seong T.Y., Ferguson I.T., Booker G.R., Joyce B.A.* Structural Studies of Natural Superlattices in Group III-V Alloy Epitaxial Layers // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. № 1S. P. S9–S15. https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/1S/003
4. *Баранов А.В., Воронин Ю.М.* Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009. 51 с.
5. *Максимов А.Д., Эйстрих-Геллер В.Ю., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Багаев Т.А., Горлачук П.В., Яроцкая И.В.* Модель расчета состава твердых растворов $GaAs_xP_{1-x}$ в условиях мос-гидридной эпитаксии // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 4. С. 362–368. https://doi.org/10.7868/S0002337X17040121
6. *Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Ильинская Н.Д., Пивоварова А.А., Коновалов Г.Г., Куницына Е.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* Фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP с диаметрами фоточувствительной площадки 0.1–2.0 мм // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 12. С. 1720–1726.

7. *Мамутин В.В., Ильинская Н.Д., Бедарев Д.А., Левин Р.В., Пушный В.В.* Исследование пострстового процесса изготовления квантовых каскадных лазеров // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 8. С. 1132–1138.
8. *Демидов Д., Леус Р., Свердлов М., Тер-Мартиросян А.* Лазерные диоды для фотодинамической терапии // Фотоника. 2012. Т. 31. № 1. С. 20–23.
9. *Дегода В.Я., Подуст Г.П.* Особенности темновой проводимости селенида цинка // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 3. С. 289–296.
10. *Ильиных Н.И., Ковалёв Л.Е.* Влияние фоновой примеси железа на ИК-поглощение и диэлектрический отклик высокоомных монокристаллов ZnSe // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 8. С. 799–802. https://doi.org/10.1134/S0002337X18080080
11. *Барыбин А.А., Томилин В.И., Шаповалов В.И.* Физико-технологические основы макро-, микро- и наноэлектроники: учебное пособие. М.: Физматлит, 2011. 783 с.
12. *Васильев М.Г., Гвоздев А.А., Кондратьев В.С., Шелякин А.А.* Получение гетероструктур ZnSe/InP методом конгруэнтного испарения в сверхвысоком вакууме // Лазерная техника и оптоэлектроника 1983. Т. 2. № 9. С. 29–33.
13. *Васильев М.Г., Васильев А.М., Изотов А.Д., Маренкин С.Ф., Шелякин А.А.* Исследование процессов локального травления фосфида индия // Хим. технология. 2018. Т. 19. № 14. С. 653–655. https://doi.org/10.31044/1684-5811-2018-19-14-653-655
14. *Васильев М.Г., Васильев А.М., Голованов В.В., Шелякин А.А.* Создание и исследование спектральных характеристик лазерного диода для удаленного контроля метана // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 9. С. 938–941. https://doi.org/10.7868/S0002337X16090165