

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Маричева Артема Евгеньевича** «Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3. 11 – «Физика полупроводников»

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук.

Текст автореферата изложен на 22 страницах, содержит: 16 рисунков, 18 ссылок на публикации автора в изданиях, входящих в международные системы цитирования Web of Science и Scopus, в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в трудах российских и международных конференций, 4 ссылки на патенты, содержит список используемой литературы из 12 наименований.

Актуальность работы определяется необходимостью создания фотоприемников для приема оптических излучений большой мощности при передаче энергии на расстояния (космос и некоторые применения на земле) в спектральном диапазоне 1,24 - 1,3 мкм, который находится в узкой области прозрачности атмосферы ближнего ИК-диапазона. Важно, что доступен мощный (более 12 кВт) твердотельный лазер на длину волны 1,064 мкм. Поскольку твердый раствор InGaAsP необходимого состава находится вблизи области «несмешиваемости» компонент, задача создания стабильных растворов актуальна.

Цель и основные задачи. В автореферате сформулированы 4 основных цели работы, касающиеся технологии изготовления и исследованию полупроводниковых слоев, и гетероструктур InGaAsP/InP, и 5 основных задач диссертации, включая технологию изготовления микрокристаллических элементов (GaP), для замены туннельного p-n перехода в каскадных фотоприемниках.

Научная новизна полученных результатов сформулирована в 6 пунктах в которых зафиксировано, что снятие механических напряжений с образованием рельефа в тонких слоях (150 – 200 нм) увеличивает интенсивность и уменьшает ширину спектра фотолюминесценции на полувысоте. Показано, что при последовательном выращивании слоев InGaAsP толщиной 150 – 200 нм и InP толщиной 20 нм снимаются механические напряжения и обеспечивается возможность создания области поглощения толщиной более 1 мкм. Показано, что фотоприемник обеспечивает коэффициент полезного действия $\sim 34,5\%$ при мощности облучения 10 Вт/см².

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием аттестованных методик измерений на современном оборудовании, воспроизводимостью экспериментальных данных и использованием методов статистического анализа данных.

Личный вклад автора. Основная роль автора состоит в получении, анализе и обобщении экспериментальных данных. Планирование экспериментов, обсуждение полученных результатов и выводов в соавторстве с руководителем работы и другими соавторами статей. Диссертанту принадлежит разработка технологических режимов по МОС-гидридному росту материала и приборных структур.

Практическая значимость работы сформулирована в 5 пунктах, касающихся разработки технологии изготовления твердых растворов InGaAsP, преобразователей на их основе, технологии изготовления микрокристаллических соединительных элементов, электрических контактов к p-InP, конструкции фотоприемника.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы тремя пунктами, которые касаются снятия напряжений в слоях InGaAsP за счет формирования рельефа поверхности твердого раствора с определением оптимальных толщин и условий роста слоев без заметного увеличения рельефа.

В первой главе выполнен обзор литературы по теме диссертации и определен тип твердотельного лазера для длины волны 1,064 мкм. Проанализированы причины выбора твердого раствора InGaAsP и его преимущества перед растворами на основе GaSb (AlGaAsSb, AlGaPSb). Определен тип двойной гетероструктуры с вводом излучения через подложку. На рис.1 показана диаграмма зависимости ширины запрещенной зоны от постоянной решетки полупроводников A_3B_5 .

Во второй главе обоснован метод изготовления гетероструктур и метод газофазной эпитаксии (МОСГФЭ) из металлоорганических соединений, используемые реагенты. Описана установка роста.

В третьей главе проведен анализ существования зоны стабильных твердых растворов с шириной запрещенной зоны 1,05 – 1,15 эВ на подложке InP. Представлена диаграмма фазового распада твердого раствора GaInAsP (рис.2) с указанием стабильной области и области технологических исследований. Проведена оценка критической толщины без распада твердого раствора и предложен метод изготовления толстых слоев.

В четвертой главе представлено описание технологии роста твердого раствора GaInAsP с шириной запрещенной зоны 1,0 – 1,2 эВ методом МОСГФЭ. Определены оптимальные условия роста слоев. Анализ рельефа поверхности проводился с помощью атомно-силового микроскопа, что показано на рис.3 для толщин слоев 50 нм и 200 нм и рис.5 для толщин 500 нм и 1000 нм. С ростом толщины слоев наблюдалось увеличение рельефа. Контроль качества слоев осуществлялся по спектрам фотолюминесценции, как показано на рис.4 и рис.6. Была проведена оценка механических напряжений в слоях. Поскольку наиболее качественными являлись слои толщиной 150 – 200 нм было предложено область поглощения формировать в

виде чередующихся слоев GaInAsP толщиной 200 нм и InP толщиной 20 нм как показано на рис.7.

В пятой главе изложена технология изготовления фотоструктур с вводом излучения через подложку. Вид структуры показан на рис.8. На рис.9 показаны спектральная характеристика фотоструктуры и КПД преобразования ~ 34,5%.

В шестой главе предложена конструкция каскадного фотопреобразователя и методика его изготовления. Описаны преимущества преобразователя в которых отсутствует эффект насыщения, уменьшается ток и электрическая емкость преобразователя, что увеличивает рабочую частоту прибора. Для соединения каскадов преобразователя предложена и обоснована замена p^{++} - n^{++} перехода на каналы проводимости, которые формируются созданием массивов микровключений, состоящих из материала GaP. Исследована зависимость высоты и плотности макрокристаллов GaP от времени роста. Показано, что слой микровключений GaP в структуре p^{++} -GaP - n^{++} приводит к закорачиванию p^{++} - n^{++} перехода и падению величины тока, индуцированного электронным зондом. Для формирования слоя InP с малым количеством дефектов, предложено выращивать его на поверхности микрокристаллического слоя GaP, в виде многослойной структуры толщиной не более 200 нм. Контроль слоев проводился по полуширине спектров фотолюминесценции. Для уменьшения высоты барьера контактного сопротивления к p -InP предложен подконтактный материал $In_{0,79}Ga_{0,21}As$ (защищен патентом).

По результатам проведенных исследований предложена каскадная модель фотоэлектронного преобразователя в виде последовательно соединенных ФЭП. Для двух каскадного ФЭП с двумя p - n переходами, структура которой показана на рис.15. На рис.16 приведены вольтамперная характеристика структуры и спектр ТИЭЗ. Глава содержит 7 рисунков.

Основные результаты работы сформулированы в виде 7 положений, касающихся разработки технологии роста слоев InGaAsP вблизи области спинодального распада, релаксации напряжений за счет формирования рельефа поверхности пленки, определению оптимальной толщины активного слоя поглощения, формирования активной области поглощения за счет последовательного выращивания слоев твердых растворов $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ и InP, разработки технологии изготовления фотоприемников мощного лазерного излучения на длину волны 1,06 мкм с КПД ~ 34,5%, использования подконтактного слоя InGaAs к InP:Zn p -типа, возможности использования микрокристаллических (GaP) соединений ФП-элементами.

Автор проводил рост полупроводниковых слоев на установке газофазной эпитаксии AIXTRON AIX 200 (Германия). Поверхность образцов анализировалась с помощью электронного микроскопа (Series 4-88 DV100 (CAMSCAN, Англия)). Концентрация носителей заряда определялась методом Ван дер Пау.

Замечания касаются автореферата в части оформления. На стр.12 в последней строке не верна ссылка на рисунок, должна быть ссылка на рис.7б. На стр.13 в главе 5 должна быть ссылка на рис.8 (указан 12). Другие мелкие оплошности в тексте не существенны.

Считаю, что цели и задачи, сформулированные автором в автореферате выполнены.

Считаю, что автор является грамотным специалистом в области физики полупроводников, провел большой объем исследований, направленных на создание технологии выращивания полупроводниковых слоев твердых растворов InGaAsP на подложках InP и конструкций фотопреобразователей ближнего ИК-диапазона для приема излучений большой мощности. Автор владеет современными методами выращивания и анализа полупроводниковых слоев A_3B_5 . Работа заслуживает высокой оценки и представляет большой научный и прикладной интерес.

Считаю, что **Маричев Артем Евгеньевич** заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3. 11 – «Физика полупроводников»

Ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, д.ф.-м.н.

Ковчавцев А.П.

2 октября 2023 г.

П СО РАН

 .А. Золотарская