

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Сушкова Артема Александровича «Создание платформы на основе подложки класса «кремний-на-изоляторе» для эпитаксии слоев $A^{III}B^V$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. – «Физика полупроводников»

Создание кремниевых оптических межсоединений в интегральной микросхеме (ИМС) позволит увеличить быстродействие, улучшить энергоэффективность и усилить помехоустойчивость ИМС. Для организации оптических межсоединений в ИМС, в частности, требуется формирование источника излучения, например полупроводникового лазера, непосредственно на подложке. В настоящее время в качестве подложек для интегральных микросхем активно используются гетероструктуры «кремний-на-изоляторе» (КНИ). Диэлектрическая основа в подложке КНИ способствует улучшению характеристик интегральной микросхемы по сравнению с характеристиками ИМС, созданной на подложке кремния. Однако наличие диэлектрической основы затрудняет эпитаксию на поверхности подложки КНИ высокого кристаллического качества светоизлучающих гетероструктур из полупроводников $A^{III}B^V$, которые обладают превосходными оптическими свойствами.

При изучении выдающихся результатов, достигнутых в направлении интеграции полупроводникового лазера $A^{III}B^V$ с подложкой кремния методами эпитаксиального осаждения, А.А. Сушковым отмечено, что на сегодняшний день есть две задачи, решение которых приблизит имеющиеся технологии к приборному применению. К ним относятся уменьшение плотности прорастающих дислокаций в эпитаксиально-выращенных слоях $A^{III}B^V$ и уменьшение толщины буферных слоев, которые предназначены для концентрации в них основной плотности дефектов. Проведенный А.А. Сушковым обзор литературы указывает на то, что использование буферного слоя Ge между GaAs и Si является целесообразным для решения обеих задач. Однако помимо описанных выше трудностей при гетероэпитаксии слоев $A^{III}B^V$ на подложке КНИ через буферные

слои Ge/Si, необходимо решить вопросы подавления антифазных дефектов и взаимной диффузии атомов.

В связи с вышеизложенным тема диссертации А.А. Сушкива, целью которой является выявление закономерностей формирования эпитаксиальных слоев в гетероструктурах на основе полупроводниковых материалов, выращенных на подложках класса «кремний-на-изоляторе», для создания светоизлучающих гетероструктур $A^{III}B^V$, безусловно, актуальна.

Наиболее важным результатом диссертации, представляющим собой научную новизну, является следующий.

Впервые продемонстрирована фотолюминесценция при комнатной температуре гетероструктуры $A^{III}B^V$, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке КНИ, через буферные слои Ge/Si. Созданные светоизлучающие p-i-n диоды на основе данной гетероструктуры и на основе контрольного образца на подложке GaAs демонстрируют электролюминесценцию при температуре 77 К одного порядка интенсивности.

Теоретическая значимость результатов диссертации сводится к описанию новых знаний о физических процессах, которые происходят при МОС-гидридной эпитаксии гетероструктур $A^{III}B^V$ на платформе Ge/Si/КНИ. **Практическая значимость** результатов диссертации заключается в возможности их использования для интеграции светоизлучающих гетероструктур $A^{III}B^V$ с подложкой КНИ методом МОС-гидридной эпитаксии через буферные слои Ge/Si.

В диссертации продемонстрирована платформа Ge/Si/КНИ (001), которая может быть использована для МОС-гидридной эпитаксии слоев $A^{III}B^V$ со структурными и с оптическими свойствами, не уступающими слоям $A^{III}B^V$, сформированным на платформе Ge/Si (001). Что касается подавления антифазных дефектов, то, во-первых, установлены благоприятные параметры роста в рамках метода МОС-гидридной эпитаксии для заращивания основной плотности антифазных доменов в пределах толщины буферных слоев $A^{III}B^V$, а, во-вторых, продемонстрированы параметры отжига буферных слоев $A^{III}B^V$, которые уменьшают плотность антифазных границ и способствуют выравниванию поверхности при дальнейшем росте слоев $A^{III}B^V$. Кроме этого,

продемонстрировано, что твердый раствор $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$, выступая в качестве зародышевого слоя, способствует подавлению взаимной диффузии атомов на гетерогранице с Ge.

Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации не вызывает сомнений, так как обеспечивается применением прямых измерений рядом различных методов.

По диссертации следует сделать следующие **замечания**.

1. В начале раздела 1.2 в обзоре литературы описан метод, позволяющий вытеснить дислокации несоответствия из светоизлучающих наноструктур, таких как квантовые ямы или квантовые точки, и заключающийся в использовании вставок $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ до и после активной области, которые служат ловушками для дислокаций несоответствия. Казалось бы, твердый раствор $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с близкими параметрами (доля In, толщина) использовался в качестве квантовой ямы в выращенных в диссертации гетероструктурах, следовательно, описанный метод мог бы легко применяться во время роста. Однако он не упоминается при описании образцов. Видимо данный метод либо не использовался, либо был упущен при описании.

2. Термические трещины, которые образуются в гетероструктурах $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}/\text{Ge}$, выращенных на подложках Si или КНИ, оказывают деструктивное воздействие на образец в целом. Поэтому в диссертации не хватает исследований критической толщины слоев $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, выращиваемых на созданной платформе Ge/Si/КНИ, при которой начинается образование трещин.

3. Объем диссертации слишком большой: 251 страница с приложениями.

4. В диссертации встречаются опечатки и пунктуационные ошибки. Например, на рисунке 20 раздела 3.2.1.1, а также в начале формулы 4 раздела 3.2.2 в качестве десятичного разделителя используется точка.

Сделанные замечания не уменьшают научной ценности диссертации.

Заключение

Диссертация А.А. Сушкова «Создание платформы на основе подложки класса «кремний-на-изоляторе» для эпитаксии слоев $A^{III}B^V$ », представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Диссертация соответствует специальности и отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК при Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Результаты исследований в достаточной мере опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Сушков Артем Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

01.09.2023 года.

С обработкой персональных данных согласен

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», кафедра физики твердого тела и наноструктур физического факультета, заведующий кафедрой

Середин Павел Владимирович

Адрес: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1

Тел.: +7 [REDACTED]

E-mail: [REDACTED]

