

ОТЗЫВ

**на автореферат диссертации Ивановой Марии Михайловны
«Фотоэлектрические свойства и радиационная стойкость фотодиодов на базе
гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001)»**

**на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников**

1. Актуальность темы исследования

Гетероструктуры (ГС) с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si)/Si(001) в течение последних лет привлекают значительное внимание исследователей в связи с перспективой создания на их основе различных приборов кремниевой оптоэлектроники, в частности фотодетекторов, предназначенных для работы в диапазоне длин волн $\lambda=1,3-1,6$ мкм, соответствующем окну минимальных оптических потерь в кварцевых волоконных световодах. В последнее время усилился интерес к фотодетекторам на базе толстых (~1 мкм) релаксированных эпитаксиальных слоев Ge/Si(001) в связи с высокими значениями квантовой эффективности, достигнутыми в подобных приборах (до 50%) в указанном выше диапазоне длин волн. С другой стороны, в последние годы усилился интерес к специальным применениям оптоэлектронных приборов на базе наноструктур Ge(Si)/Si(001) (космическая техника, ядерная энергетика и т.п.), ввиду их значительной радиационной стойкости (по сравнению с приборами на основе объемного Si).

Цель работы: Комплексное изучение фотоэлектрических свойств и стойкости к импульсному гамма-нейтронному облучению фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), выращенных низкотемпературными эпитаксиальными методами.

2. Научная новизна исследований

Научная новизна исследований состоит в том, что:

- впервые разработана теоретическая модель, связывающая квантовую эффективность фотодиодов на базе кремниевых p-n-структур с самоформирующимися наноструктурами GeSi, с составом материала островков,

напряжением смещения на фотодиоде и его рабочей температурой;

- впервые получены лабораторные макеты фотодетекторов на базе толстых (~1 мкм) эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), выращенных низкотемпературным методом горячей проволоки без дополнительного высокотемпературного циклического отжига;

- впервые экспериментально подтверждена стойкость фотодиодов на базе кремниевых p-n-структур с самоформирующимися наноструктурами GeSi к импульсному гамма-нейтронному излучению.

3. Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- показана принципиальная возможность использования фотодиодов на базе Si p-n-структур с островками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001) в радиационно-стойких оптоэлектронных парах в качестве приемников оптического излучения. Экспериментально установлена радиационная стойкость кремниевых p-n-фотодиодов с наноструктурами GeSi к гамма-нейтронному облучению;

- определены режимы, обеспечивающие получение монокристаллических эпитаксиальных слоев Ge/Si(001) толщиной ~1 мкм с характеристиками, соответствующими мировому уровню достижений.

4. Достоверность и обоснованность результатов исследований

Достоверность результатов в экспериментальной части работы обеспечена воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием метрологически аттестованного измерительного оборудования и поверенных средств измерения.

Экспериментальные результаты, полученные автором, сопоставлялись с результатами, полученными в других российских и зарубежных лабораториях.

5. Апробация работы и публикации по теме диссертации

Результаты исследований достаточно полно отражены в 6 научных работах, опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 14 материалах российских и международных научных конференций.

6. Замечания по работе

В качестве замечаний можно отметить, что в автореферате:

- при аппроксимации экспериментальной зависимости фоточувствительности от температуры выражением (1) (рисунок 2 а) на странице 16) предполагается, что рекомбинационное время жизни носителей заряда не зависит от температуры. Известно, что рекомбинационное время жизни возрастает при уменьшении температуры, поэтому данное предположение справедливо в относительно небольшом диапазоне температур. Наблюдаемое отклонение экспериментальных данных от теоретической кривой при температурах ниже 200 К может быть вызвано увеличением рекомбинационного времени жизни. Вероятно, в тексте диссертации данный вопрос рассмотрен более подробно;

- многократно упоминается импульсный характер гамма-нейтронного воздействия, однако параметры импульса не приводятся (длительность гамма-нейтронного импульса, плотности потока нейтронов и гамма-квантов). Кроме того не ясно, является ли импульсный характер воздействия существенным для проводимых исследований, поскольку все измерения проводятся в пассивном режиме;

- наблюдается противоречие между предложением «Статистическая обработка результатов исследований морфологии поверхности показала значительное снижение средних латеральных размеров островков...» на странице 21 и последним предложением в пятом пункте заключения «Полученные данные подтверждены морфологическими исследованиями (АСМ), показавшими высокую структурную устойчивость самоформирующихся островков при облучении». Кроме того в тексте автореферата отмечена высокая радиационная стойкость исследованных структур в области межзонных оптических переходов наноостровков за счет низкой вероятности образования радиационных дефектов в островках (3 %), но в то же время показано существенное влияние облучения на морфологию островков и возможность управлять морфологией при помощи облучения. Вероятно, в тексте диссертации данные вопросы рассмотрены в более полном объеме.

- на рисунках 8 а) и 8 б) приведены спектры фоточувствительности, при этом для фотодиодов с однослойными массивами наноостровков приведены

графики при последовательном воздействии двух импульсов излучения, а для фотодиодов с 5-слойными массивами только при воздействии одного импульса суммарного уровня. В данном случае напрашивается сравнение откликов двух структур, а также обсуждение наличия или отсутствия влияния набора флюенса за один или два импульса (т.е. проявление эффектов восстановления характеристик). Вероятно, в тексте диссертации данный вопрос рассмотрен более подробно.

Так же в тексте автореферата присутствуют описки и неточности:

- страница 13, единица измерений экспозиционной дозы указана как кГр (Гр – единица поглощенной дозы);

- страница 16, в описании рисунка 2 вместо $U_b = 4$ В, вероятно, должно быть $U_b = -4$ В, опечатка в склонении слова «приводимые». В первом предложении 3-го пункта раздела научная новизна работы перед словом «стойкость» пропущено слово «высокая»;

- странице 15, «... энергия размерного квантования основного состояния тяжёлых дырок < 10 МэВ». Вероятно, автор имел в виду < 10 мэВ;

- страница 21, указано, что за каждый этап облучения набирался флюенс нейтронов 10^{15} н/см², вероятно вместо этого должен быть указан флюенс 10^{14} н/см², в соответствии со страницей 13.


Указанные замечания не снижают научной и практической ценности работы, о которых в полной мере свидетельствует представленный на отзыв автореферат.

7. Заключение по работе

В целом, диссертационная работа Ивановой М.М. имеет существенное прикладное значение и посвящена актуальной проблеме развития физики полупроводников. Полученные в работе результаты являются оригинальными и обладают научной новизной. Результаты диссертации достаточно полно представлены в российских публикациях (журналах, рекомендованных ВАХ РФ) и на конференциях по тематике исследования.

Считаю, что диссертационная работа Ивановой Марии Михайловны «Фотоэлектрические свойства и радиационная стойкость фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001)» является завершённой научно-квалификационной работой, соответствует паспорту заявленной научной

специальности и требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции от 16 октября 2024 г.), а ее автор, Иванова Мария Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. «Физика полупроводников».

«30» 04 2026г. Ткачев ОВ / 

Информация о подписавшем отзыв:

Ткачев Олег Валерьевич, кандидат физико-математических наук

(специальность 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики)

Должность: заместитель начальника отделения экспериментальной физики

Организация: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

Адрес: ул. Васильева, 13, г. Снежинск, Челябинская область, 456770

Тел. 8 

e-mail 

Я, О.В. Ткачев, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись  заверяю:



учёный секретарь НТС института

кандидат физико-математических наук

В.Н. Ногин