

**Проект SfP-973799 Полупроводники Программы НАТО
“Наука для Мира”. Цели и задачи**

L.K.J.Vandamme^{NPD)}

*Eindhoven University of Technology, Department of Electrical Engineering,
EH 5.15, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands*

А.В.Якимов^{PPD)}

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

Приводятся сведения о целях и задачах Проекта SfP-973799 Semiconductors: “Разработка радиационно стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа”, – выполняемого в рамках Программы “Наука для Мира” Отделения Науки НАТО. Дается краткая сводка результатов, полученных с момента начала работы над Проектом. Формулируются ближайшие задачи.

Использованные сокращения

AFM	–атомно-силовая микроскопия
LD	–лазерный диод
LED	–светодиод
MOVPE	–металло–органическая эпитаксия из паровой фазы
NPD	– руководитель Проекта со стороны натовской Страны–Партнера
PPD	– руководитель Проекта со стороны не–натовской Страны–Партнера
QD	–квантовая точка
QSS	–квантово–размерная структура
QW	–квантовая яма
RTP	–радиационный технологический процесс
TUE	–Эйндховенский технологический университет
ННГУ	–Нижегородский государственный университет
ПТШ	–полевой транзистор с затвором Шотки

1. Решаемая Проблема и планируемые результаты

Целью Проекта является снижение шумов, повышение надежности и радиационной стойкости микроволновых и оптических приборов на основе полупроводниковых гомо– и гетеро–структур, в том числе с квантово–размерными слоями (диодов, транзисторов и других).

Решение указанной задачи необходимо для создания полупроводниковых приборов, предназначенных для использования в системах связи, прецизионных измерений и мониторинга окружающей среды.

^{NPD)} Phone: +31.40.247 3242; Fax: +31.40.243 0712; E-mail: L.K.J.Vandamme@ele.tue.nl

^{PPD)} Тел.: +7-8312-656153; Fax: +7-8312-656416; E-mail: yakimov@rf.unn.ru

Одной из важнейших областей использования таких приборов являются системы, работающие при воздействии вредных внешних факторов: на атомных электростанциях и системах спутниковой связи.

Радиация может изменять структуру полупроводниковых материалов. Важный подход, предназначенный для создания надежных маломощных радиационно стойких приборов, заключается в адаптации существующих неразрушающих методов для контроля внутренних дефектов.

В связи с этим особую роль играет разработка полупроводниковых приборов на основе сложных полупроводниковых соединений A^3B^5 (*GaAs*, *InGaAs*, *InP* и др.), характеризующихся малыми временами жизни неосновных носителей тока и, следовательно, более высокой радиационной стойкостью по сравнению с элементарными полупроводниками (*Si* и *Ge*).

В последние годы активно развивается технология производства полупроводниковых лазерных диодов (LD) на структурах типа *InGaP/GaAs/InGaAs* в которых в качестве активной области используются квантовые ямы (QW) *InGaAs/GaAs*, что позволило значительно улучшить параметры этих полупроводниковых приборов (например, уменьшить пороговый ток). Сравнительно большая выходная мощность излучения LD при небольших размерах делает их перспективными для применения в системах связи.

В настоящее время предпринимаются попытки изготовления лазерных диодов с использованием в качестве активной области одного или нескольких слоев самоорганизованных квантовых точек (QD). Предсказана высокая температурная стабильность и более высокая радиационная стойкость полупроводниковых приборов с квантовыми точками по сравнению с приборами на основе квантовых ям. Последнее связано с тем, что в случае структуры с QW рекомбинационные центры сильно влияют на время жизни, так как экситон локализован только в направлении роста, перпендикулярном плоскости квантово-размерного слоя, он может диффундировать в плоскости и рекомбинировать на дефектах. В то же время экситон, сформированный в QD, локализован во всех направлениях и стабилен относительно рекомбинационных процессов вне QD. Предположение о более высокой радиационной стойкости приборов на квантовых точках частично подтверждается экспериментами по влиянию экспонирования полупроводниковых структур в газовой плазме.

Однако до сих пор мало изучены процессы образования дефектов в этих структурах и приборах под действием радиационных и других воздействий, а также влияние дефектов на технические и эксплуатационные характеристики этих приборов, что не позволяет прогнозировать поведение приборов в условиях повышенной радиации и выработать рекомендации по повышению их радиационной стойкости.

Для модификации полупроводниковых приборов, с целью повышения их надежности и радиационной стойкости, предполагается использовать радиационные технологические процессы (RTP) – ионное легирование, облучение различными видами излучений (оптическими, ИК, рентгеном, гамма-излучением). Это может привести к направленной, положительной целевой модификации свойств материала.

Одним из основных RTP является облучение протонами и последующее геттерирование – процесс релаксации дефектно–примесных комплексов путем диффузии и/или рекомбинации при внешнем (обычно радиационном) воздействии.

На всех этапах проектирования, исследования характеристик материалов и отработки технологии предполагается использовать оригинальные программные продукты.

2. Цели Проекта

Снижение электрических шумов, повышение надежности и радиационной стойкости микроволновых и оптических приборов на полупроводниковых гомо– и гетеро–структурах (диодов, транзисторов и других), предназначенных для использования в системах связи, прецизионных измерений и мониторинга окружающей среды.

– Прогнозирование надежности и радиационной стойкости прибора путем адаптации существующих неразрушающих методов для контроля внутренних дефектов.

– Выработка рекомендаций по модификации структуры приборов, работающих при воздействии вредных внешних факторов (например, на атомных электростанциях, в системах спутниковой связи), с целью улучшения эксплуатационных параметров приборов и, особенно, надежности и радиационной стойкости.

3. Этапы. Отчеты и График

Согласно требованиям Руководства программы НАТО “Наука для Мира” [1], отчеты по финансируемым проектам должны издаваться по истечении каждых полных шести месяцев. Отчетные полугодия определены следующим образом:

1 ноября – 30 апреля; 1 мая – 31 октября.

Финансирование проектов осуществляется каждые шесть месяцев (с учетом полученных результатов) путем издания Наградных Писем. Первое Наградное Письмо по настоящему проекту было издано 3 ноября 1999 года. Соответственно, первое полное полугодие работы над Проектом завершилось 31 октября 2000 года. К настоящему времени завершено четвертое полугодие; соответствующий Промежуточный Отчет был подготовлен 1 мая 2002 года. Это привело к следующей конкретизации календарного плана работ по проекту.

Этап 1 (1-й год. Месяцы 1–3. Завершен 31 июля 2000 года)

- 1.1. Теоретические исследования: Подготовка обзора на тему “Образование дефектов в полупроводниках при различных радиационных воздействиях. Связь дефектной структуры, электрических шумов, электрофизических, фотоэлектрических и люминесцентных свойств квантово-размерных структур”.
- 1.2. Адаптация существующих экспериментальных установок в Н.Новгороде и Эйнховене, и программного обеспечения, для неразрушающего контроля дефектов в микро, нано– и квантово–размерных структурах.
- 1.3. Обучение молодых ученых в Н.Новгороде.

Этап 2 (1-й год. Месяцы 4–6. Завершен 31 октября 2000 года)

- 2.1. Теоретические исследования: Анализ влияния газовой плазмы на фотоэлектрические и люминесцентные свойства квантово-размерных структур.
- 2.2. Модификация установок **NPD** и **PPD** для улучшения чувствительности, разрешающей способности и динамического диапазона электрических и оптических измерений.
- 2.3. Предварительные эксперименты. Исследование фотоэлектрических и люминесцентных свойств квантово-размерных структур, обработанных в газовой плазме.
- 2.4. Теоретический и экспериментальный анализ влияния нейтронного и протонного воздействия на фоточувствительные и высокочастотные свойства диодов Шоттки.
- 2.5. Обучение молодых ученых в Н.Новгороде.
- 2.6. 1-й Промежуточный Отчет.

Этап 3 (1-й год. Месяцы 7–9. Завершен 31 января 2001 года)

- 3.1. Теоретические исследования: Анализ влияния дефектов, образующихся при ионной имплантации, на фотоэлектрические и люминесцентные свойства структур с квантовыми ямами и квантовыми точками.
- 3.2. Теоретический и экспериментальный анализ влияния нейтронного и протонного воздействия на фоточувствительные и высокочастотные свойства ПТШ.
- 3.3. Модификация установок **NPD** и **PPD** для обеспечения неразрушающего контроля дефектов, вызванных различными воздействиями на исследуемые структуры.
- 3.4. Предварительные эксперименты. Исследование фотоэлектрических и люминесцентных свойств квантово-размерных структур, подвергнутых ионной имплантации.
- 3.5. 1-й Рабочий Семинар группы **PPD** с представителями Конечных Пользователей.

Этап 4 (1-й год. Месяцы 10–12. Планировался к завершению 30 апреля 2001 года)

- 4.1. Теоретические исследования: Анализ люминесцентных свойств LEDs с квантовыми точками *InAs/GaAs*.
- 4.2. Теоретический и экспериментальный анализ влияния нейтронного и протонного воздействия на фоточувствительные и высокочастотные свойства полевого транзистора с доменом Ганна.
- 4.3. Совместные эксперименты (с обучением молодых российских ученых) в группе **NPD**. Проверка методов неразрушающего контроля дефектов, вызванных различными воздействиями на исследуемые структуры. – **Отложено**.
- 4.4. Издание материалов 1-го Рабочего Семинара группы **PPD** с представителями Конечных Пользователей и их распространение среди родственных групп.
- 4.5. 2-й Промежуточный Отчет.

Этап 5 (2-й год. Месяцы 1–3. Завершен 31 июля 2001 года)

- 5.1. Теоретические исследования: Анализ люминесцентных свойств LEDs с квантовыми точками *InAs/GaAs*.
- 5.2. Изготовление полевого транзистора с баллистическим режимом движения носителей заряда Конечным Пользователем 3. Изготовление светоизлучающих диодов с квантовыми точками *InAs/GaAs* в Группе **PPD**.
– Конечный Пользователь 3 (“Салют”) произвел полевой транзистор с баллистическим пролетом носителей заряда. Коэффициент шума 1,2 dB (на 12 ГГц), и 6 dB (на 60 ГГц). Эти транзисторы начали производиться Конечным Пользователем для продажи.
- 5.3. Обучение молодых ученых в Н.Новгороде. Исследование люминесцентных свойств светоизлучающих диодов с квантовыми точками *InAs/GaAs*.

Этап 6 (2-й год. Месяцы 4–6. Планировался к завершению 31 октября 2001 года)

- 6.1. Теоретические исследования влияния нейтронного и протонного облучения на баллистический режим движения носителей заряда в *GaAs*.
- 6.2. Совместные эксперименты в группе **NPD**. Исследование метода измерения электрических шумов для выявления дефектов в полупроводниковых структурах. – **Отложено.**
- 6.3. Изготовление модифицированных структур–прототипов Конечным Пользователем 3.
– Конечный Пользователь 3 (“Салют”) произвел новый тип полевого транзистора. В измененных структурах достигнуто уменьшение шума в 1.5 раза: коэффициент шума 0.8 dB на 12 ГГц, и 4 dB на 60 ГГц.
- 6.4. Исследование физических характеристик и стабильности прототипов твердотельных приборов. Разработка, изготовление и исследование свойств лазерных диодов на основе гетероструктур с квантовыми точками *InAs/GaAs*.
- 6.5. Обучение молодых российских ученых в Эйндховене и в Н.Новгороде.
– **Обучение в Эйндховене отложено.**
- 6.6. 3-й Промежуточный Отчет.

Этап 7 (2-й год. Месяцы 7–9. Планировался к завершению 31 января 2002 года)

- 7.1. Теоретические исследования и обработка экспериментальных данных Этапа 6.
- 7.2. Исследование физических характеристик и стабильности прототипов твердотельных приборов в группе **PPD**.
- 7.3. Эксперименты группы **PPD** совместно с Конечными Пользователями. Экспериментальные исследования влияния нейтронного и протонного облучения на баллистический режим движения носителей заряда в *GaAs*.
– **Выполнено только для нейтронов.**
- 7.4. 2-й Рабочий Семинар группы **PPD** с представителями Конечных Пользователей. – **Выполнено в апреле.**

- 7.5. Издание материалов 2-го Рабочего Семинара группы **PPD** с представителями Конечных Пользователей и их распространение среди родственных групп.
– **Отложено до августа.**

Этап 8 (2-й год. Месяцы 10–12. Планировался к завершению 30 апреля 2002 года)

- 8.1. Теоретические исследования: Моделирование функционирования интегральной схемы (фотодиод + усилитель на основе полевого транзистора) и разработка технологии ее создания с использованием RTP.
- 8.2. Исследование физических характеристик и стабильности прототипов твердотельных приборов в группе **PPD**.
- 8.3. Изготовление модифицированных структур–прототипов Конечным Пользователем 3 и исследование их характеристик.
- 8.4. Эксперименты группы **PPD** совместно с Конечными Пользователями. Определение характеристик модифицированных структур–прототипов.
- 8.5. Совместные эксперименты в группе **NPD**. Исследование метода измерения электрических шумов для выявления дефектов в полупроводниковых структурах. – **Отложено до сентября.**
- 8.6. Обучение молодых ученых в Эйндховене и в Н.Новгороде.
– **Обучение в Эйндховене отложено до сентября.**
- 8.7. 4-й Промежуточный Отчет.

Этап 9 (3-й год. Месяцы 1–3. Срок завершения – 31 июля 2002 года)

- 9.1. Теоретические исследования и обработка экспериментальных данных Этапа 8.
- 9.2. Модификация установок **NPD** и **PPD** с целью прогнозирования радиационной стойкости и стабильности полупроводниковых структур.
- 9.3. Изготовление модифицированных структур–прототипов Конечным пользователем 3 и исследование их характеристик. Изготовление интегральной схемы (фотодиод + усилитель на основе полевого транзистора) и экспериментальная апробация RTP Конечным Пользователем.
- 9.4. Обучение молодых ученых в Н.Новгороде.

Этап 10 (3-й год. Месяцы 4–6. Срок завершения – 31 октября 2002 года)

- 10.1. Теоретические исследования: Анализ влияния дефектов, вызванных облучением квантово-размерных структур квантами высоких энергий, на эффективность фотолюминесценции и фотоэлектрическую чувствительность.
- 10.2. Совместные эксперименты в Эйндховене. Выявление и идентификация дефектов в полупроводниковых структурах методом анализа электрических шумов.
- 10.3. Анализ работы структур–прототипов в составе контрольно-измерительных систем.
- 10.4. Измерение характеристик интегральной схемы (фотодиод + усилитель на основе полевого транзистора).

- 10.5. Обучение молодых российских ученых в Эйндховене и в Н.Новгороде. Изучение образования дефектов в квантово-размерных структурах при облучении квантами высоких энергий методами фотолюминесценции и фотоэлектрической чувствительности.
- 10.6. 5-й Промежуточный Отчет.

Этап 11 (3-й год. Месяцы 7–9. Срок завершения – 31 января 2003 года)

- 11.1. Теоретические исследования и обработка экспериментальных данных Этапа 10.
- 11.2. Компьютерный анализ результатов измерений характеристик интегральной схемы (фотодиод + усилитель на основе полевого транзистора).
- 11.3. Анализ работы структур-прототипов в составе контрольно-измерительных систем.
- 11.4. Эксперименты группы **PPD** совместно с Конечными Пользователями. Изучение влияния радиационных воздействий на свойства полупроводниковых лазерных диодов.
- 11.5. 3-й Рабочий Семинар группы **PPD** с представителями Конечных Пользователей.
- 11.6. Выработка научно-технических рекомендаций по изготовлению и применению модифицированных твердотельных приборов; использование модифицированных приборов в аппаратуре, разрабатываемой и изготавливаемой Конечными Пользователями; публикация научных результатов и их внедрение в учебный процесс в Нижегородском государственном университете.

Этап 12 (3-й год. Месяцы 10–12. Срок завершения – 30 апреля 2003 года)

- 12.1. Критический анализ полученных результатов всеми участниками и Конечными Пользователями.
- 12.2. Издание материалов 3-го Рабочего Семинара группы **PPD** с представителями Конечных Пользователей и их распространение среди родственных групп.
- 12.3. Выработка научно-технических рекомендаций по изготовлению и применению модифицированных твердотельных приборов; использование модифицированных приборов в аппаратуре, разрабатываемой и изготавливаемой Конечными Пользователями; публикация научных результатов и их внедрение в учебный процесс в Нижегородском государственном университете.
- 12.4. Итоговый Отчет.

Основные действия, этапы и отчеты иллюстрируются диаграммой (см. Таблицу 1).

Таблица 1

Этапы. Отчеты и График: **SfP-973799**Дата Отчета: **30.04.2002**

Начало работы: 24.11.1999		1-й год				2-й год				3-й год			
Месяц (действ. Проекта): Этапы / Задания		1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
1	Теоретические исследования												
2	Экспериментальные исследования												
	2.1 Модификация установок												
	2.2 Предварит. эксперименты												
	2.3 Совместные эксперименты												
3	Работа с прототипами												
	3.1 Изготовление прототипов												
	3.2 Анализ прототипов												
	3.3 Модификация прототипов												
	3.4 Анализ работы в системах												
4	Обучение молодых ученых												
5	Работа с Пользователями												
	5.1 Совместные эксперименты												
	5.2 Совещания, семинары												
	5.3 Применение результатов												
Результаты					< Труды 1-го Совещания	< FETs и LEDs	< Модифиц. структуры	< Труды 2-го Совещания	< Рекон. по структурам	< Модифиц. структуры	< Использование в системах	< Труды 3-го Совещания	< Использование приборов
Отчеты			1-й		2-й		3-й		4-й		5-й		Итог.

План: Выполнено: 

4. Организация и управление

Принципиальные задания со-руководителей Проекта и других ключевых членов, включая Конечных Пользователей, показаны в Таблице 2.

Таблица 2

	Имя участника, месторасположение (город, страна)	Место работы (организация, компания)	Задание в проекте
1	Prof. L.K.J.Vandamme, Eindhoven, The Netherlands	Эйндховенский технологический университет	NPD ; Координация исследований; разработка методов шумовой диагностики; обеспечение обучения в Группе NPD .
2	Проф. А.В.Якимов, Н.Новгород, Россия	ННГУ	PPD ; координация исследований; разработка методов шумовой диагностики; организация совещаний и участие в них; поездки в группу NPD .
3	Проф. Г.А.Максимов, Н.Новгород, Россия	ННГУ	Координация исследований и разработок LDs и QSS и участие в них, организация рабочих совещаний и участие в них.
4	Проф. И.А.Карпович, Н.Новгород, Россия	ННГУ	Исследование радиационной стойкости QSS's методом фотоэлектрической спектроскопии.
5	Проф. В.К.Киселев, Н.Новгород, Россия	ННГУ	Исследование процессов старения фотодиодов при радиационном воздействии.
6	Д-р Н.В.Байдусь, Н.Новгород, Россия	ННГУ	Фотолюминесцентная спектроскопия QSS's.
7	Д-р С.В.Оболенский, Н.Новгород, Россия	ННГУ	Исследование процессов деградации в <i>n</i> -GaAs при радиационном воздействии.
8	Д-р А.А.Беляев, Н.Новгород, Россия	ЗАО "Время-Ч", Конечный Пользователь 1	Регулярные обсуждения с Группой PPD , и использование произведенных устройств в собственных изделиях.
9	Д-р Б.А.Сахаров, Н.Новгород, Россия	ЗАО "Время-Ч", Конечный Пользователь 1	Регулярные обсуждения с Группой PPD , и использование произведенных устройств в собственных изделиях.
10	Г-н А.Н.Качемцев, Н.Новгород, Россия	НИИИС, Конечный Пользователь 2	Радиационная обработка и тестирование приборов, регулярные обсуждения с Группой PPD , использование приборов в собственных изделиях.
11	Д-р В.Д.Скупов, Н.Новгород, Россия	НИИИС, Конечный Пользователь 2	Разработка RTP (геттерирование, обработка протонами и гамма - квантами).
12	Г-н А.Г.Фефелов, Н.Новгород, Россия	Салют, Конечный Пользователь 3	Производство приборов - прототипов и предоставление их (бесплатно) Группе PPD , измерение DC/AC характеристик и высокочастотных шумов, регулярные обсуждения с Группой PPD , использование приборов в собственных изделиях.
13	Д-р М.А.Китаев, Н.Новгород, Россия	Салют, Конечный Пользователь 3	Производство приборов - прототипов и предоставление их (бесплатно) Группе PPD , измерение DC/AC характеристик и высокочастотных шумов, регулярные обсуждения с Группой PPD , использование приборов в собственных изделиях.

5. Видимость Проекта SfP

В Нижегородском государственном университете создан WWW сайт [2]: “Радиационно стойкие полупроводниковые приборы для систем связи и прецизионных измерений. Разработка с использованием шумового анализа. NATO, Project SfP-973799 Semiconductors” для оперативного отражения решаемых задач и получаемых результатов. Сайт создан на двух языках: русском и английском. Выбор языковой версии осуществляется через главную страницу.

Адрес главной страницы сайта:

<http://www.rf.unn.ru/NATO/index.html>

Основная работа по созданию сайта выполнена молодым ученым А.Ю.Виценко.

6. Критерии Успеха

6.1. Таблица Критериев Успеха

Данная Таблица является исключительно важным отчетным документом, поскольку в ней содержатся Критерии, понятные для каждого Эксперта, не являющегося специалистом в рассматриваемой узкой научной области (см. Таблицу 3).

Ниже приводятся пояснения к разделам Таблицы Критериев успеха.

6.2. Авторские свидетельства (патенты) на изобретения

Список патентов, полученных в рамках Проекта, со ссылкой на поддержку НАТО, Проект SfP-973799 Полупроводники.

1. В.К.Киселев, С.В.Оболенский, В.Д.Скупов. “Способ контроля структурного совершенства монокристаллических полупроводниковых пластин”. Патент Российской Федерации №2156520.

Формула изобретения: Способ контроля структурного совершенства монокристаллических полупроводниковых пластин, включающий механическое шлифование, полирование и химическое полирование поверхности контролируемой стороны пластин, измерение структурно-чувствительного параметра материала и облучение пластин легкими частицами с энергией 0.5–5МэВ до изменения измеряемого параметра, отличающийся тем, что облучение пластин проводят с противоположной контролируемой стороны, которую до облучения механически шлифуют и / или полируют и формируют структурно нарушенный слой толщиной не менее пробега внедряемых частиц.

Таблица 3

Номер Проекта: SfP-973799

Краткое название Проекта: SfP-Semiconductors

Дата Отчета: 30 апреля 2002

Длительность Проекта: 11/1999 – 04/2003

Год исполнения Проекта: 2

Критерии Успеха, одобренные заседанием Группы Управления SfP: 23 сентября 1999	%	Критерии Успеха: Достижения на 30.04.2001	%
<i>В терминах научного воздействия развиваемых методов</i>			
1. Если к окончанию Проекта Конечные Пользователи улучшат собственные разработки и технологические процессы для 3 типов приборов при помощи результатов Проекта. Улучшение означает здесь уменьшение коэффициента шума в 2 раза и увеличение оценки срока службы прибора на 50%.	3×15=45	1. См. раздел 3. Этап 6. Пункт 6.3.	10
2. Если в течение двух лет после окончания Проекта Конечные пользователи начнут производство и продажу модифицированных полупроводниковых приборов 2 типов.	15	2. См. раздел 3. Этап 5. Пункт 5.2.	3
3. Если к окончанию Проекта будет получено 2 авторских свидетельства (патента) на изобретения по разработкам, выполненным в рамках Проекта.	10	3. Получен 1 патент на изобретение по разработкам, выполненным в рамках Проекта	5
4. Если к окончанию Проекта будет опубликовано в международных журналах или доложено на международных конференциях 12 статей или докладов по проблемам, решенным в Проекте.	10	4. В рецензируемых журналах опубликовано 8 статей. Сделано 12 докладов на международных конференциях.	10
<i>В терминах подготовки молодых ученых</i>			
5. Если в течение двух лет после завершения Проекта не менее трех молодых ученых, вовлеченных в выполнение Проекта, защитят кандидатские диссертации.	10	5. Успешно защищены две кандидатские диссертации	7
6. Если в течение года после завершения Проекта не менее шести молодых ученых, вовлеченных в выполнение Проекта, получат работу в вузе или промышленности по похожей тематике.	10	6. Десять российских молодых ученых, вовлеченные в выполнение Проекта, получили работу в вузе или промышленности по похожей тематике	10
ВСЕГО:	100%	ВСЕГО:	45%

6.3. Научные публикации

Список научных публикаций, выполненных в рамках Проекта, со ссылкой на поддержку НАТО, Проект SfP-973799 Полупроводники.

6.3.1. Статьи в рецензируемых журналах

- [1] **Макаров С.В.**^{у)}, **Медведев С.Ю.**, **Якимов А.В.** “Корреляция между интенсивностями спектральных компонент 1/f шума”. Известия ВУЗов. Радиофизика. 2000. Т.43, №11. С.1016–1023.
- [2] **B.N.Zvonkov, I.A.Karpovich, N.V.Baidus, D.O.Filatov, S.V.Morozov**^{у)}, and **Yu.Yu.Gushina**^{у)}. “Surfactant effect of bismuth in the MOVPE growth of the InAs quantum dots on GaAs”. *Nanotechnology* 2000, 11, P.221–226.
- [3] **I.A.Karpovich, N.V.Baidus, B.N.Zvonkov, D.O.Filatov, S.B.Levichev**^{у)}, **A.V.Zdoroveishev**^{у)}, **V.A.Perevoshikov**. “Investigation of the buried InAs/GaAs Quantum Dots by Atomic Force Microscopy combined with selective chemical etching”. *Phys. Low-Dim. Struct.* 3/4 (2001) 3412–348.
- [4] **I.A.Karpovich, N.V.Baidus, B.N.Zvonkov, S.V.Morozov**^{у)}, **D.O.Filatov**, and **A.V.Zdoroveishev**^{у)}. “Morphology and photoelectronic properties of InAs/GaAs surface quantum dots grown by metal-organic vapor-phase epitaxy”. *Nanotechnology* 2001, 12, P.425–429.
- [5] **Оболенский С.В., Китаев М.А.**³⁾ “Исследование процессов генерации в баллистическом полевом транзисторе”. *Микроэлектроника*, 2001, Т.30, №1, С.7–12.
- [6] **Оболенский С.В., Китаев М.А.**³⁾ “Отрицательная дифференциальная подвижность в квазибаллистическом полевом транзисторе”. *Микроэлектроника*, 2001, №3, С.23–29.
- [7] **Козлов В.А., Оболенский С.В., Китаев М.А.**³⁾ “Нанометровая модификация материала методом электродинамической локализации оптического излучения” Письма в ЖТФ. 2001. Т.27, №19. С.32–38.
- [8] **Демарина Н.В., Оболенский С.В.** “Электронный транспорт в нанометровых GaAs структурах при радиационном воздействии”. ЖТФ. 2002. №1. С.66–71.

6.3.2. Доклады на международных конференциях

- [1] **I.A.Karpovich, S.B.Levichev**^{у)}, **A.V.Zdoroveishev**^{у)}, **N.V.Baidus, B.N.Zvonkov, V.A.Perevoshikov, D.O.Filatov**. “Investigation of the buried InAs/GaAs quantum dots by SPM combined with selective chemical etching”. Proc. International Workshop “*Scanning Probe Microscopy – 2001*”. Nizhni Novgorod, Institute for Physics of Microstructures. February 25– March 01, 2001, p. 14–16.
- [2] **Козлов А.К.**^{у)}, **Якимов А.В.** “Влияние флуктуационных процессов на стабильность частоты водородного стандарта”. 31-й Международный семинар

^{у)} Молодой ученый

³⁾ Конечный Пользователь 3.

- “Шумовые и деградиционные процессы в полупроводниковых приборах” 20–24 ноября 2000 года. –М.: МНТОРЭиС им. А.С.Попова, МЭИ, 2001, с.38–42.
- [3] **Перов М.Ю.**¹⁾, **Медведев С.Ю.**, **Якимов А.В.** “Влияние БПФ на оценку спектра сигнала. Эффективная разрядность гармонического сигнала”. (Там же), с.43–48.
- [4] **I.A.Karpovich, N.V.Baidus, B.N.Zvonkov, S.V.Morosov, D.O.Filatov, and A.V.Zdoroveishev**¹⁾. “Morphology and photoelectronic properties of *InAs/GaAs* surface quantum dots grown by vapor phase epitaxy”. Proc. 9-th Int. Symposium “*Nanostructures: Physics and Technology*”. St.-Petersburg, Ioffe Institute, 2001, June 18–22, p.51–54.
- [5] **A.A.Belyaev**¹⁾, **B.A.Sakharov**¹⁾, **A.K.Kozlov**¹⁾, and **A.V.Yakimov**. “The influence of the main noise sources on frequency stability of the quantum frequency standard”. Proc. 16th Int. Conference “*Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations. ICNF-2001*”, Gainesville, Florida, USA, October 22–25, 2001. Ed. by G.Bosman. Word Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. P.479–482.
- [6] **A.V.Belyakov**¹⁾, and **A.V.Yakimov**. “The ADC–transformation of probability characteristics of Gaussian noise”. (Ibid.) P.537–540.
- [7] **S.V.Makarov**¹⁾, **S.Yu.Medvedev**, and **A.V.Yakimov**. “The comparative analysis of methods of the 1/f noise non-Gaussianity test”. (Ibid.) P.717–720.
- [8] **S.Yu.Medvedev, M.Yu.Perov**¹⁾, and **A.V.Yakimov**. “The influence of ADC and FFT on the spectrum estimation”. (Ibid.) P.729–732.
- [9] **Перов М.Ю.**¹⁾, **Якимов А.В.** “Функция бикогерентности 1/f шума”, 32-й Международный семинар “Шумовые и деградиционные процессы в полупроводниковых приборах” 4–7 декабря 2001 года. –М.: МНТОРЭиС им. А.С.Попова, МЭИ, 2002, с.74–79.
- [10] **Моряшин А.В.**¹⁾, **Якимов А.В.** “1/F шум GaAs эпитаксиальных пленок в модели двухуровневых систем”, (Там же), с. 80–84.
- [11] **Беляков А.В.**¹⁾ “Негауссовость, обусловленная аналого-цифровым преобразованием”, (Там же), с. 95–99.
- [12] **Байдусь Н.В., Звонков Б.Н., Здравейщев А.В.**¹⁾, **Моисеева П.Б., Филатов Д.О.** “Самоорганизованный рост многослойных массивов квантовых точек *InAs/GaAs* методом МОС-гидридной эпитаксии” // Тезисы докладов XIV Уральской международной зимней школы по физике полупроводников “Электронные свойства низкоразмерных полу- и сверхпроводниковых структур”, 18–22 февраля 2002 года, С.10–13.

В этом списке отражено участие молодых ученых.

К отчетному моменту в группе **PPD** к работе над Проектом было привлечено 33 молодых ученых из Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского и ЗАО “Время-Ч” (Конечный Пользователь 1).

¹⁾ Конечный Пользователь 1.

6.4. Список защищенных диссертаций

Список защищенных диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, выполненных в рамках Проекта, со ссылкой на поддержку НАТО, Проект SfP-973799 Полупроводники.

1. **Демарина Н.В.** “Электронный транспорт в *GaAs* структурах при радиационном воздействии”. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Руководитель С.В.Оболенский. –Нижний Новгород, Нижегородский государственный университет, 20 июня 2000 г.
2. **Макаров С.В.** “Развитие методов выявления негауссовости 1/F шума для исследования его природы”. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Руководитель проф. А.В.Якимов. –Нижний Новгород, Нижегородский госуниверситет, 19 сентября 2001 г.

6.5. Молодые российские ученые, получившие работу по теме

1. **Чучмай (Казанцева) И.Г.** после окончания Физического факультета ННГУ (2001) работает на том же факультете.
2. **Громский М.Ю.** после окончания Радиофизического факультета ННГУ (2001) получил работу у Конечного Пользователя 2 (НИИИС).
3. **Демарина Н.В.** стала преподавателем Радиофизического факультета ННГУ (2000).
4. **Звонков Н.Б.** получил работу в НИИ ПМК (2000).
5. **Круглов А.И.** после аспирантуры получил работу в Исследовательском – образовательном центре Сканирующей зондовой микроскопии (ННГУ, 2001).
6. **Морозов С.В.** после аспирантуры получил работу в ИФМ РАН, 2001.
7. **Николаев Д.С.** после окончания Физического факультета ННГУ (2001) получил работу в НИИИС (Конечный Пользователь 2).
8. **Сушилкина Ю.Н.** после окончания Радиофизического факультета ННГУ (2001) получила работу у Конечного Пользователя 3 (“Салют”).
9. **Тресков С.А.** после окончания Радиофизического факультета ННГУ (2001) получил работу в ИФМ РАН.
10. **Шоболов Е.В.** после аспирантуры ННГУ получил работу в НИИИС (Конечный Пользователь 2, 2001).

7. Сводка результатов

В течение двух лет работы по Проекту (к 30 апреля 2002 года) получены следующие основные результаты.

- Модифицированы методы неразрушающего контроля дефектов в полупроводниковых структурах. Создана установка для исследования дефектов в структуре ПТ. Впервые измерен биспектр низкочастотного шума *GaAs* эпитаксиальных пленок, изготовленных в TUE. Определены и исследованы различные типы ошибок численного анализа шума.
- Развита методика легирования полупроводниковых слоев висмутом для улуч-

шения однородности матриц *InAs/GaAs* QD, оптического и структурного качества слоев *InGaP*.

- Развита метод фотоэлектрической спектроскопии QDN в системе “полупроводник/электролит”. Это увеличивает чувствительность метода и расширяет область спектральных длин волн.
- Развита новый метод морфологического исследования утопленных (под *GaAs* покровным слоем) *InAs/GaAs* квантовых точек селективным химическим травлением, объединенным с AFM.
- Исследованы фотоэлектрические и фотолюминесцентные свойства поверхностных QDs. Результаты позволяют прояснить эффекты упругой деформации, формы потенциального барьера и химического состава материала QD по электронной структуре квантовых точек.
- Исследовано влияние CCl_4 в течение формирования *InAs/GaAs* квантовых точек, выращиваемых по MOVPE при атмосферном давлении. Это позволяет устранить кластеры *InAs*, создающие дефекты структуры. QDs после легирования углеродом наиболее термостойкости, что позволяет увеличивать защитное покрытие или слои эмиттера в высоких температурах без ухудшения параметров QDs.
- Развита технология изготовления светодиодов для длин волн 1,2–1,4 мкм, содержащих *InAs/GaAs* слой QDs, встроенный внутри p-n перехода.
- Впервые методом Монте-Карло выполнено моделирование процессов переноса в полупроводниковых структурах, основанных на *GaAs* с радиационными дефектами. Вместе с Конечным Пользователем 2 выполнены экспериментальные исследования влияния нейтронной радиации на баллистическое движение носителей заряда в *GaAs* ПТШ.
- Теоретически и экспериментально исследован электроперенос в нанометровых p-*GaAs* структурах. Показано, что производство приборов, основанных на высокоэнергетических электронах, дает возможность улучшения радиационной стойкости. Выполнено моделирование интегральной схемы (фотодиод + FET усилитель). Развита технология создания интегральной схемы по RTP. Конечный Пользователь 3 произвел прототипы интегральных схем. Физические свойства и стабильность измененных прототипов определены вместе с Конечными Пользователями 2 и 3.
- Исследованы основные особенности возникновения нанокластеров радиационных дефектов в канале баллистического *GaAs* ПТШ с V-образным затвором (рабочая длина затвора 30 нм), подвергнутого нейтронной бомбардировке. Экспериментальные данные показывают, что характеристики V-ПТШ устойчивы в высоком нейтронном потоке ($3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$). Моделированием на ЭВМ развита специальный RTP. Это позволяет производить ПТШ с более высокой радиационной стойкостью.

Бюджет НАТО: 237,978 EUR

Национальный вклад: 198,315 EUR

Платежи из фондов НАТО (к 30 апреля 2002 года): 148,736 EUR

8. Ближайшие задачи

В целом, работа над Проектом идет в соответствии с одобренным планом. В этой связи можно сформулировать следующим ближайшие задачи, стоящие перед группами **NPD** и **PPD**.

- 1) Модификация установок **NPD** и **PPD** для предсказания радиационной стойкости и стабильности полупроводниковых структур.
- 2) Экспериментальное исследование влияния протонного облучения на баллистический перенос носителей заряда в *GaAs*.
- 3) Анализ влияния дефектов, вызванных облучением высокоэнергетическими квантами квантово-размерных структур, на фотоэлектрическую чувствительность и эффективность фотолюминесценции.
- 4) Обучение молодых российских ученых в Эйндховене и Нижнем Новгороде с целью написания диссертации и подготовки для работы в вузе или промышленности по похожей тематике.
- 5) Совместные эксперименты в Группе **NPD** и с Конечными Пользователями. Обнаружение и идентификация дефектов в полупроводниковых структурах.
- 6) Расширение “Видимости Проекта” за счет научных публикаций и докладов на научных конференциях (со ссылкой на поддержку НАТО), использования других средств массовой информации.

Литература

- [1] NATO Science for Peace Sub-Programme Project Management Handbook. March 2002.
<http://www.nato.int/science/sfp/management/main.html>
- [2] WWW сайт “Радиационно стойкие полупроводниковые приборы для систем связи и прецизионных измерений. Разработка с использованием шумового анализа. NATO, Project SFP-973799 Semiconductors”.
<http://www.rf.unn.ru/NATO/index.html>