

Тема НИР (СИ 7)

«Проектирование радиационно-стойких
полупроводниковых приборов и мощных
субтерагерцовых источников электромагнитного
излучения с использованием
высокопроизводительных вычислений»

Оболенский Сергей

Владимирович

Заведующий кафедрой электроники,
заместитель декана радиофизического факультета
по НИР

Цель работы

- повышение уровня подготовки студентов и аспирантов в вопросах использования суперкомпьютерных технологий и высокопроизводительных вычислений;
- разработка новых технологий, методов и подходов к проведению моделирования физических процессов и проектирования радиационно-стойкой ЭКБ и РЭА, а также мощных субтерагерцовых источников электромагнитного излучения с использованием высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных технологий.

Ожидаемые результаты НИР в 2014 г.:

- модели физических процессов; результаты анализа методов суперкомпьютерных технологий и высокопроизводительных вычислений - **ВЫПОЛНЕНО**;
- результаты пробных расчетов параметров полупроводниковых приборов и аппаратуры и с использованием указанных технологий - **ВЫПОЛНЕНО**;
- 2 новые образовательные программы для спецкурсов и 8 новых лекций в существующих курсах - **ВЫПОЛНЕНО**;
- чтение разработанных лекций - **ВЫПОЛНЕНО**.

Ожидаемые результаты НИР в 2014 г.:

- к работам привлечено 2 студента, 2 аспиранта и 6 сотрудников ННГУ - **ВЫПОЛНЕНО**;
- 2 статьи – отправлено и 1 статья готовятся к печати в высокорейтинговые журналы - **ВЫПОЛНЕНО**;
- в 2015 г. планируется подготовить к защите кандидатской диссертации не менее 1 сотрудника лаборатории – **ГОТОВИМ – защита будет в срок.**

Статьи

- Nuclear Instruments and Methods (IF – 1.0) – V. B236. 2014. P. 41-44.
- Физика и техника полупроводников (IF – 0.7) – 1 принята к печати в 2014 г. + 1 готовим
- Журнал Радиоэлектроники (IF – 0.2) № 2. 2014. С. 1-31.
- Успехи радиоэлектроники (IF – 0.2) – 2 статьи готовим
- Вопросы атомной науки и техники (IF – 0.1) – 2 статьи готовим

Доклады на конференциях

Международные - 2 Всероссийские – 9 Региональные - 5

Методические разработки

- Учебное пособие – 1;
- Методические разработки (лабораторный практикум) – 4;
- Программы курсов (высокопроизводительные вычисления) – 2;
- Дополнительные лекции в имеющиеся курсы – 8 лекций – уже читаются;

Коллеги и потребители результатов наших исследований

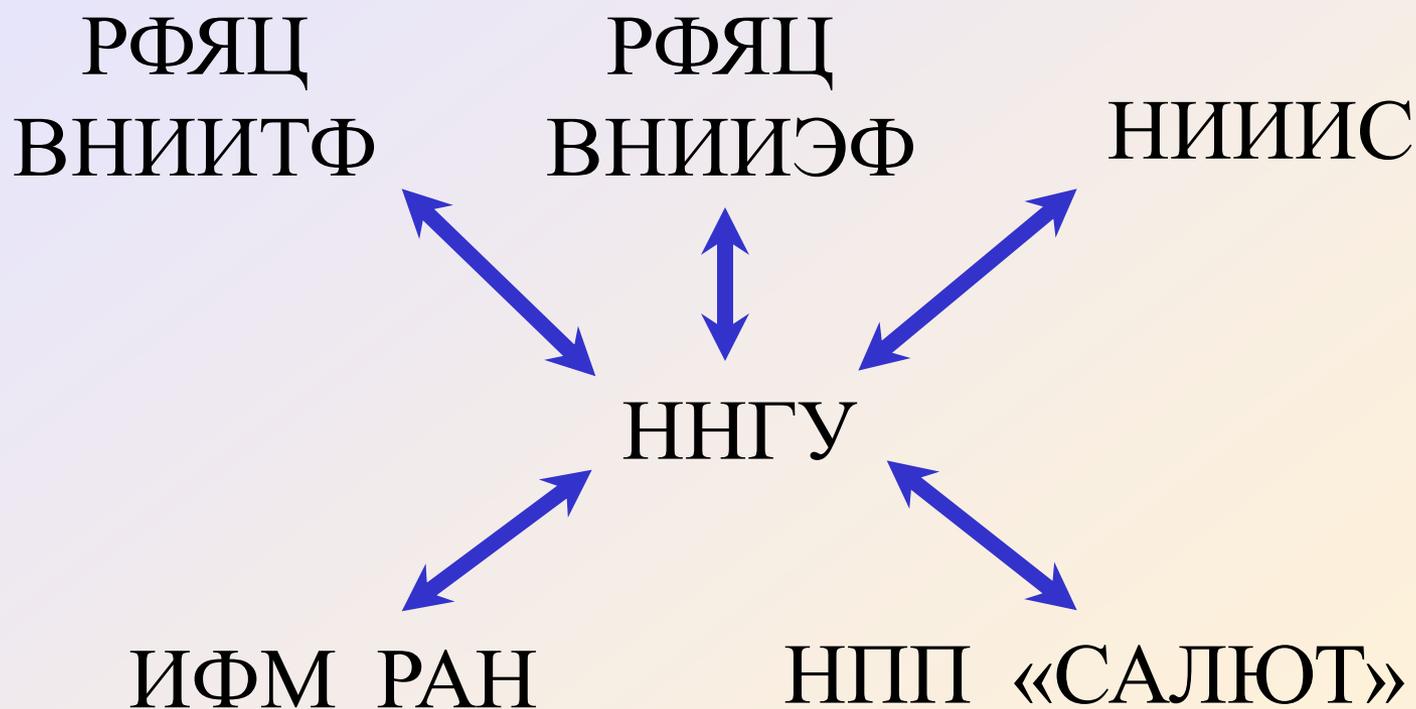
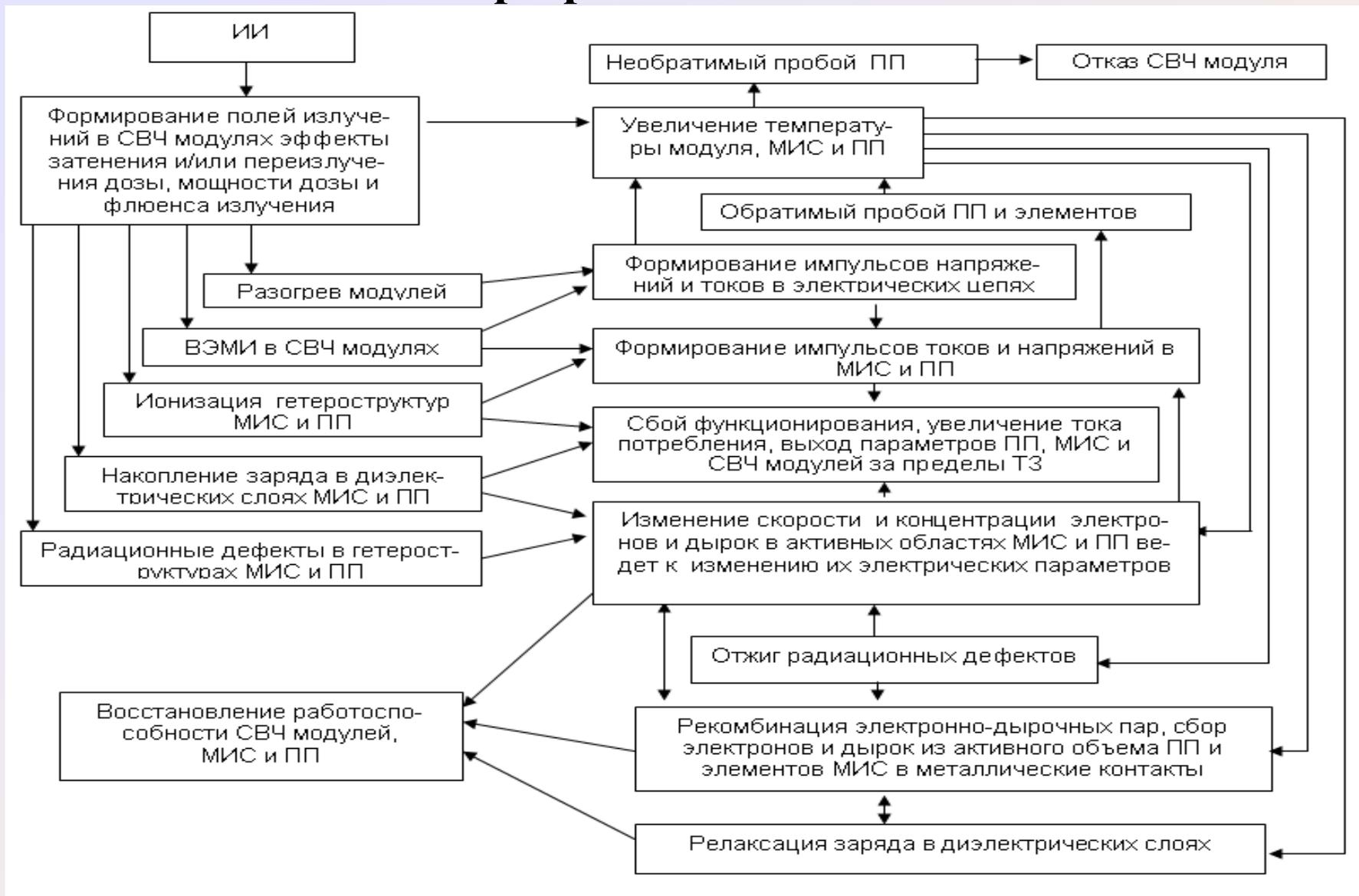


Схема взаимосвязи физических процессов в полупроводниковых приборах и интегральных схемах при радиационном воздействии

7



Состав и возможности пакетов программ, предназначенных для анализа радиационного воздействия на диоды, транзисторы и ИС

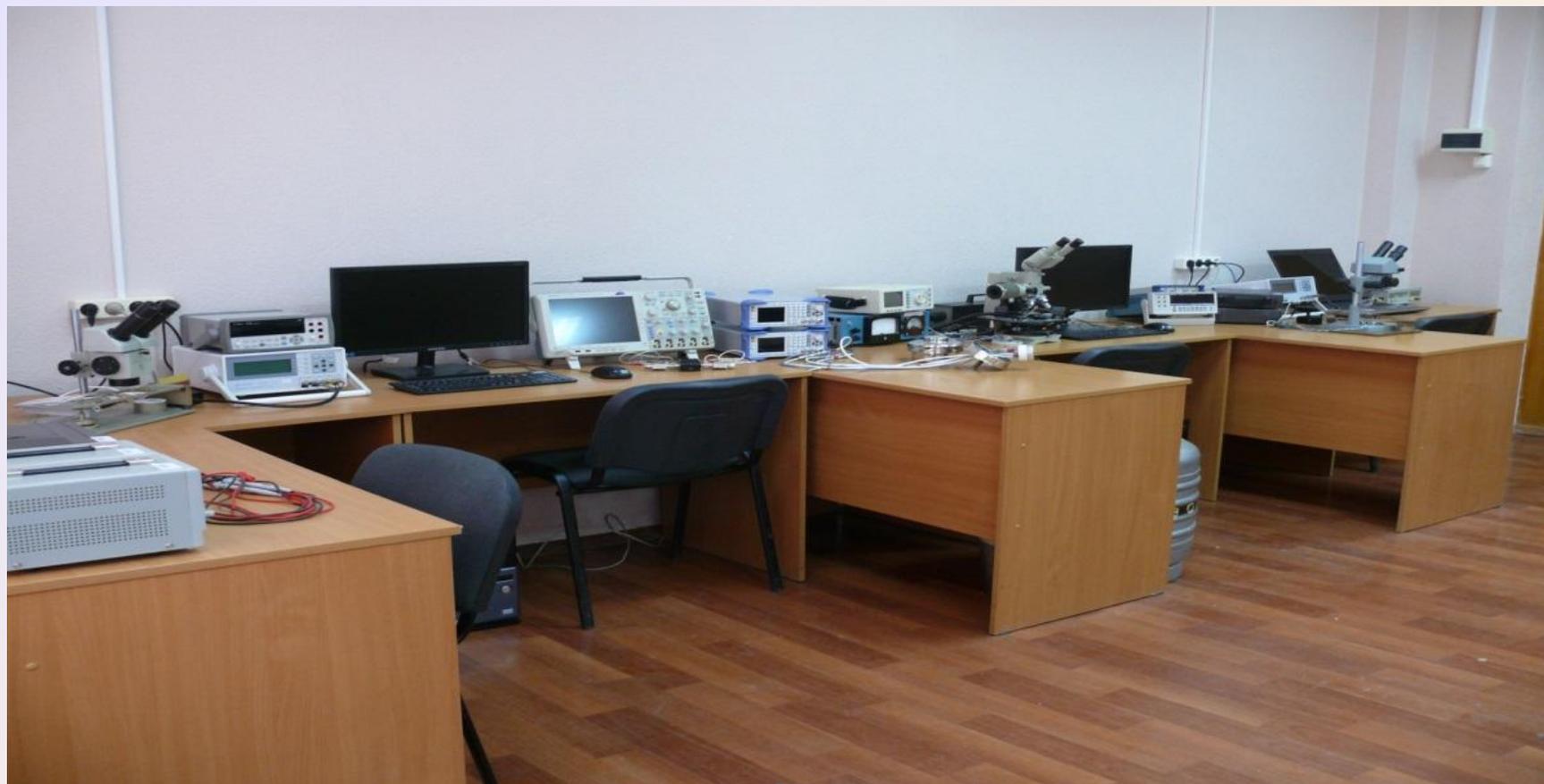
ПРОБЛЕМЫ использования внедренных ранее пакетов программ

МЕДЛЕННО – нужны высокопроизводительные вычисления!
-СЛОЖНО – нужны удаленные консультанты и сервис

ППП	Назначение ППП	Исходные данные	Назначение результатов расчетов
«TRIM»	Моделирование прохождения, нейтронов, электронов и вторичных атомов отдачи через многослойные конструкции МИС и ПП	Данные о конструкции (химическом составе и геометрических размерах) объектов моделирования (ТУ и иная конструкторская документация, информация изготовителей, визуальный осмотр и измерение параметров «вручную», например, под микроскопом)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Информация о поглощении/прохождении излучения 2. Информация об уровне интенсивности падающего на полупроводниковые элементы излучения и степени нагрева этих элементов (исходные данные для «КГМ» и «MicroWave Office»)
MicroWave Office	Моделирование функционирования МИС и СВЧ модулей	Радиотехническая схема, параметры элементов схемы, в том числе их чувствительность к воздействию ИИ (ТУ на элементы, данные изготовителей, результаты оригинальных испытаний/измерений, результаты расчетов «TRIM»)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Информация об уровнях бессбойной работы, времени потери работоспособности, уровнях катастрофического отказа схем (оценка стойкости схем к ИИ) 2. Оценка возможностей использования защитных элементов (применения альтернативных схемотехнических решений) для повышения стойкости схемы
"КГМ" "МК" "ТСАД"	Моделирование функционирования ПП и элементов интегральных схем с помощью квазигидродинамического приближения («КГМ») и методом Монте-Карло («МК») в условиях воздействия ИИ	Конструкция элементов, параметры полупроводниковой структуры (ТУ на элементы, данные изготовителей, результаты оригинальных испытаний/измерений, результаты расчетов по «TRIM»)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка параметров элементов при радиационном воздействии (исходные данные для «MicroWave Office») 2. Информация об уровнях бессбойной работы, времени потери работоспособности, уровнях катастрофического отказа элементов (оценка возможности использования полупроводникового элемента в составе МИС)
«ТЕМПЕРАТУРА»	Моделирование распределения тепла в ПП и МИС	Результаты расчета программ, «MicroWave Office», «КГМ»	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка температурных полей в ПП и МИС при воздействии рентгеновского излучения (в дополнение к возможностям «ПРИЗ»); 2. Расчет распределения температуры в МИС и мощных дискретных элементах при импульсном протекании электрических токов высокой мощности (как при штатном режиме функционирования аппаратуры, так и при воздействии ИИ)

Лаборатория компьютерного моделирования
и управления экспериментом
на кафедре электроники

(в рамках СИ7 - проведена модификация программного обеспечения и измерительных стендов в 2014 г.)



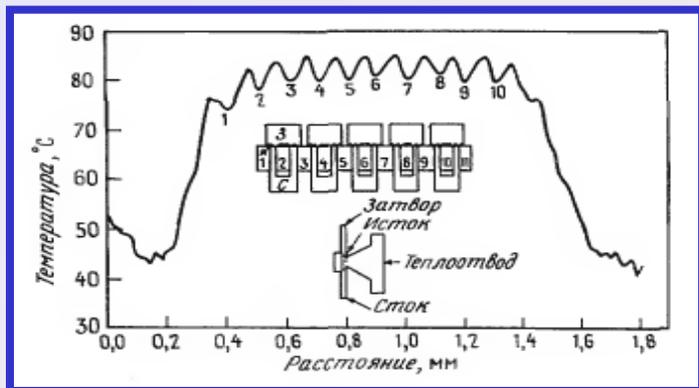
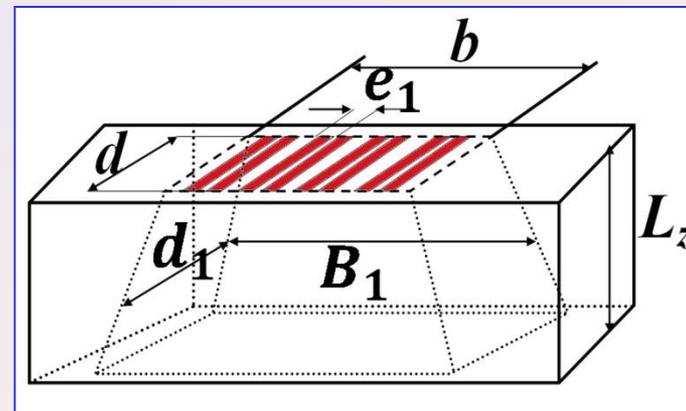
Создание прототипа пакета программ с использованием параллельных вычислений (2014 г. в рамках СИ7)

Исходные данные:

$L_z = 50, 100, 150, 200$ мкм,

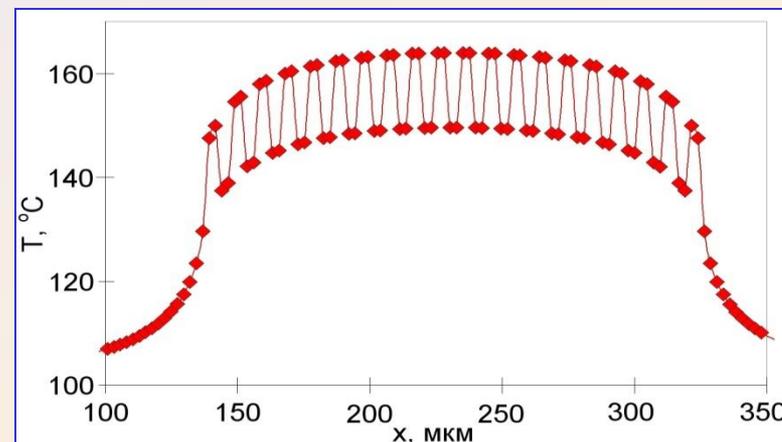
$d = 6.25, 12.5, 25, 37.5$ мкм,

$b = 33, 50, 75, 83, 100, 116, 125, 133, 150, 175, 200, 250, 300, 350, 500, 700, 1000$ мкм



Экспериментальный профиль распределения температуры ПТ из пяти секций с четырьмя затворами в каждой при мощности рассеяния 2.1 Вт.

Шур. М.С. Современные приборы на основе арсенида галлия, М., Мир, 1991, 685 с.



Расчет распределения тепла для двух моделей транзистора

Прототип – модель полупроводникового прибора с характерными длинами 30...100 нм и более (в рамках СИ7 – проведено моделирование радиационных эффектов – статья)

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ В КВАЗИГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

$$\Delta V = \frac{q}{\epsilon_s} (n(F_n) - N_+(F_n) + N_-(F_n))$$

$$\frac{\partial n(F_n)}{\partial t} = \frac{1}{q} (\nabla, \mathbf{j}) + G - R$$

$$\mathbf{j}_n = -qn\mathbf{v}(F_n) + q\nabla(D(F_n)n(F_n))$$

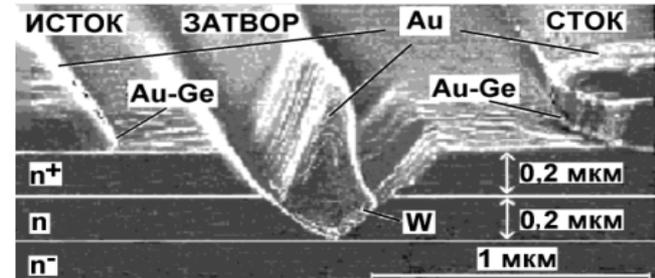
$$\mathbf{j}_t = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} \quad \mathbf{E} = -\nabla V$$

$$\frac{\partial (Wn(F_n))}{\partial t} = (\nabla, \mathbf{j}_w) + (\mathbf{j}_n, \mathbf{E}) + GW_e - \frac{n(F_n)(W - W_0)}{\tau_w(F_n)}$$

$$\mathbf{j}_w = -n(F_n)W\mathbf{v}(F_n) + \nabla(D(F_n)n(F_n)W)$$

$$\frac{dm(W)\mathbf{v}(F_n)}{dt} = -q\mathbf{E} - \frac{m(W)}{\tau_p(F_n)}\mathbf{v}(F_n)$$

где V – потенциал; n – концентрация электронов; N_+ , N_- – концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (доноров, акцепторов, радиационных дефектов); \mathbf{j} , \mathbf{j}_t – плотность электронного и полного тока; \mathbf{j}_w – плотность потока энергии электронов; W , W_0 – неравновесная и равновесная энергия электрона соответственно; τ_w – время релаксации энергии; τ_p – время релаксации импульса; m – эффективная масса электрона; D – коэффициент диффузии электронов; \mathbf{v} – дрейфовая скорость электронов; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость; F_n – флюенс нейтронов; q – абсолютная величина заряда электрона; G – коэффициент генерации носителей заряда при воздействии излучения (учитывается только в момент действия ИИ); R – коэффициент рекомбинации (учитывается только в момент и непосредственно после действия ИИ);



Микрофотография поперечного сечения полевого транзистора с V-канавкой в области затвора (V-ПТТ), полученный на РЭМ JEOL (ИФМ РАН). Уровни легирования слоев GaAs: n-буфер - 10^{14} см $^{-3}$, и канал - $6 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$; n+ - контактный слой - 10^{19} см $^{-3}$. Металлизация затвора - Au с подслоем из W. Радиус закругления острия V-затвора - 15 нм

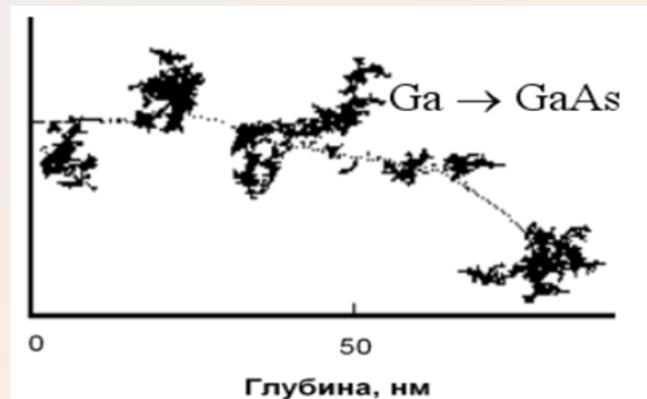
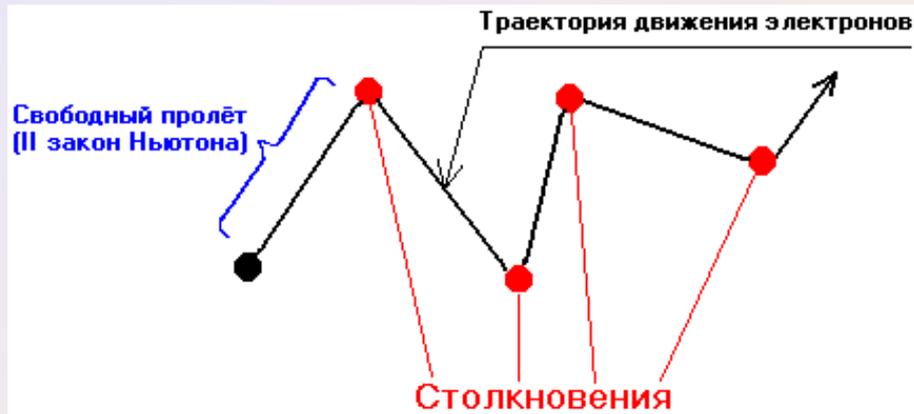
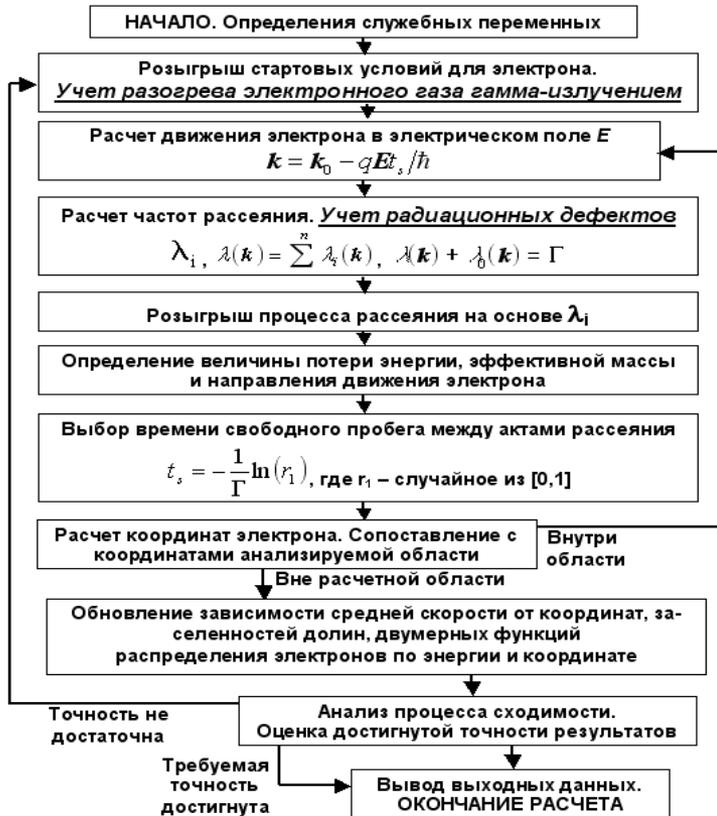
ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ СМЕШАННОГО ТИПА:

- на границах контактов (границах с n⁺-слоями) задавались значения потенциала, концентрации и энергии носителей;
- значение потенциала могло быть как фиксированным, так и изменяться в произвольных пределах для моделирования процессов в условиях «большого» сигнала;
- величина концентрации задавалась равной концентрации на границе раздела канал - контактный слой GaAs;
- температура электронного газа на контактах задавалась равной комнатной;
- на остальных поверхностях расчетной области поддерживались нулевыми градиенты концентрации, потенциала и энергии так, что нулевыми были значения

1. Оболенский С.В., Китаев М.А. Отрицательная дифференциальная проводимость квазибаллистического полевого транзистора // Микроэлектроника. - 2001. – № 6. - С. 459-465.
2. Оболенский С.В., Китаев М.А. Полевой транзистор с 30-нм затвором // Письма в ЖТФ. – 2000. - № 10. - С. 13–16
3. Оболенский С.В., Павлов Г.П. Влияние нейтронного и космического излучения на характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки // ФТП. - 1996. - № 3. - С. 413-420.
4. Оболенский С.В., Китаев М.А. Исследование процессов генерации в баллистическом полевом транзисторе // Микроэлектроника. - 2001. - № 1. - С. 10-15.

Прототип – модель переноса электронов на основе метода Монте-Карло (в планах на 2015 г. по СИ7 – переработка программы)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СУБМИКРОННЫХ GaAs СТРУКТУРАХ ПРИ ПРОТОННОМ, ГАММА И НЕЙТРОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ



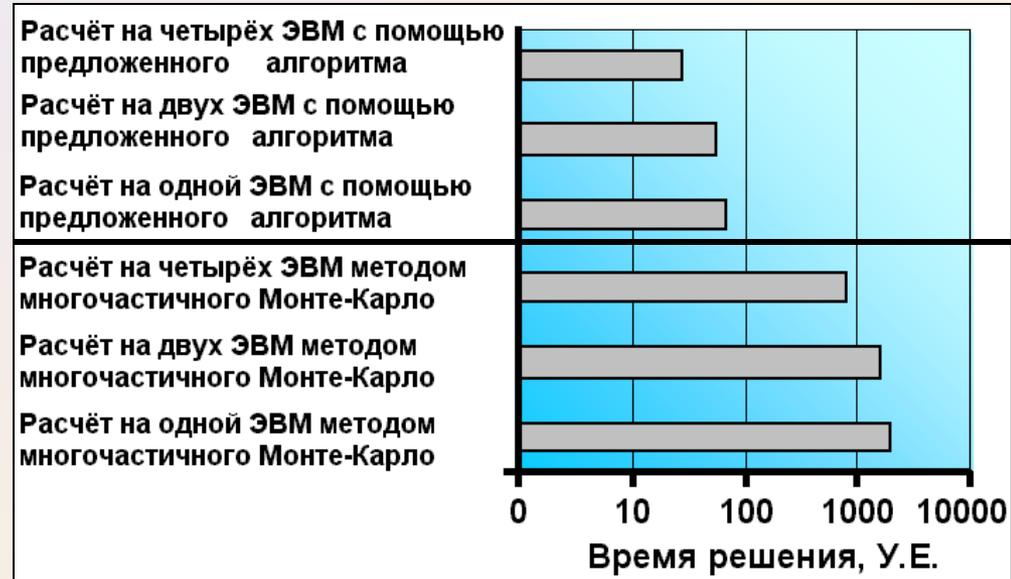
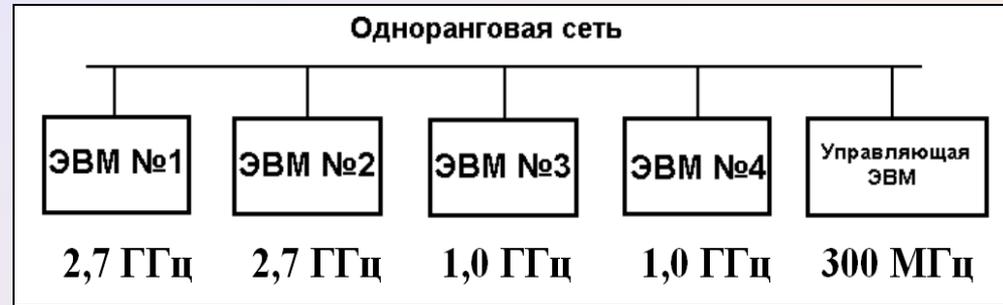
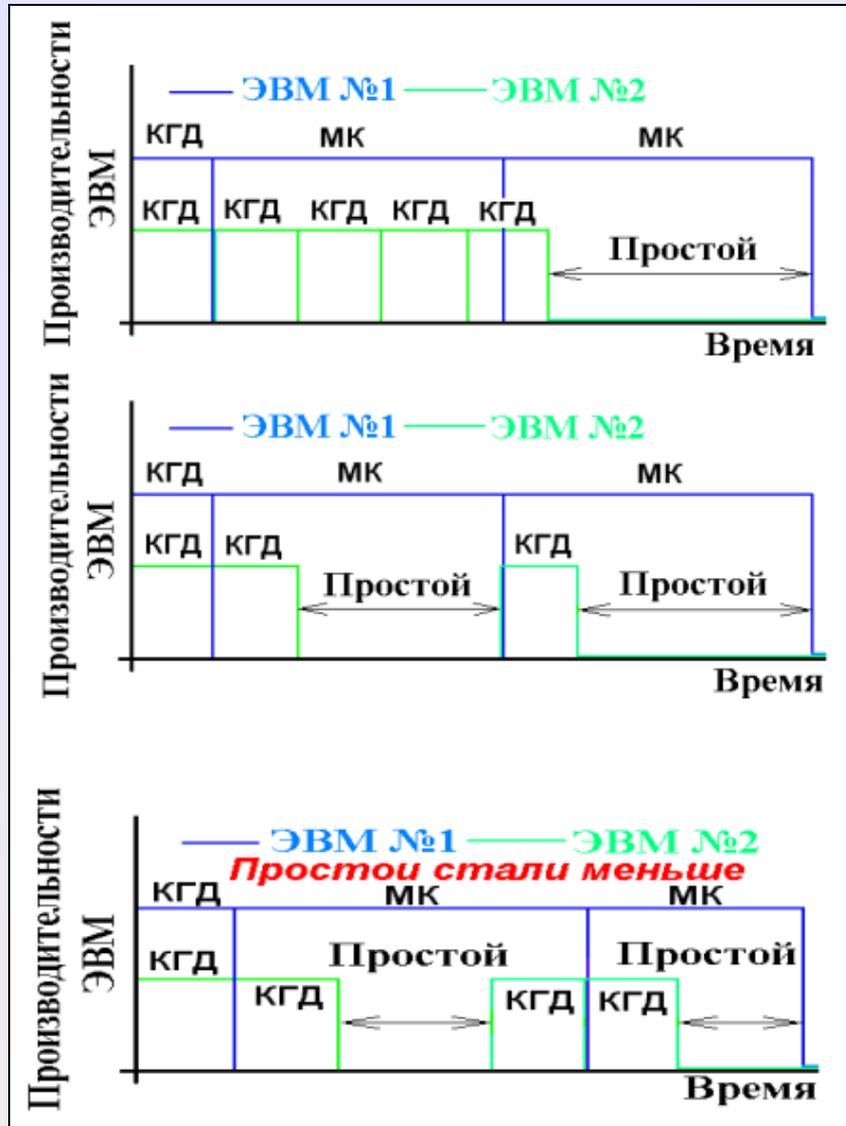
Структура кластера радиационных дефектов

1. Демарина Н.В., Оболенский С.В. Разогрев электронного газа в субмикронных структурах быстрыми электронами, инжектированными из металла // ФизХОМ. 2001. № 1. С. 20-23.

Блок-схема методики расчетов разработано в 2014 г. (СИ7)



Задел - производительность оригинальной 14 многокомпьютерной вычислительной системы



Логунов М.Н., Оболенский С.В. Разработка кластерного алгоритма моделирования процессов в квазибаллистическом полевом транзисторе с гетеробуфером //Седьмая научная конференция по радиофизике, ННГУ, 2003 г., с. 51

Использование программ распараллеливания вычислений и (задел + работы продолжены в рамках СИ7)

Решаемая задача – расчет распределения напряженности электрического поля в полупроводниковом диоде

Таблица Описание сравниваемых программ

Номер версии	Метод решения системы линейных алгебраических уравнений	Используемый для расчетов процессор
1	исключения Гаусса	центральный
2	сопряженных градиентов	центральный
3	сопряженных градиентов из библиотеки CUSP	графический

Таблица Характеристики используемых для тестирования программ ПК

Номер ПК	Характеристики центрального процессора (ЦП) и оперативной памяти (ОЗУ)	Характеристики видеокарты
1	Intel Core 2 Duo, 2.8 ГГц, 2.8 ГГц ОЗУ – 2 Гб	NVidia GeForce 9500 GT
2*	Intel Core i7-2600, 3.4 ГГц, 3.7 ГГц ОЗУ – 8 Гб	NVidia GeForce GTX 560

* Производительность ЦП и графического процессора выше, чем у ПК 1

Результаты сравнения производительности (задел + работы продолжены в рамках СИ7)

Программная среда: CUDA, C++ в среде Microsoft Visual Studio 2008

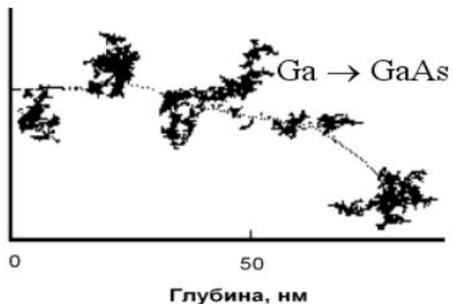
Таблица Время решения задачи (в секундах) в зависимости от варианта программы, характеристик ПК, и числа узлов пространственной сетки

Число узлов (N)	Версия программы 1 (полностью выполняется на центральном процессоре)		Версия программы 2 (полностью выполняется на центральном процессоре)		Версия программы 3 (частично выполняется на графическом процессоре)	
	ПК 1	ПК 2	ПК 1	ПК 2	ПК 1	ПК 2
10	< 1	< 1	1	1	22	25
50	4	2	8	6	35	38
100	13	8	36	28	65	67
200	64	33	180	126	92	92
500	388	206	406	360	219	252
1000	1533	798	2925	2584	543	476

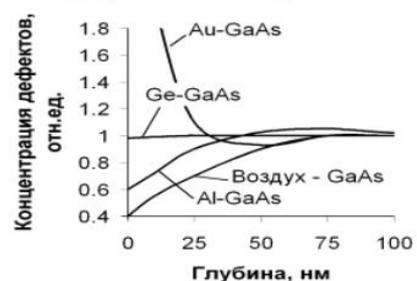
Моделирование структуры радиационных дефектов в полупроводниковых структурах радиационно-стойких транзисторов (пакеты TRIM и КГМ, метод Монте-Карло и квазигидродинамическое приближение)

Расчет структуры кластера методом Монте-Карло

Характерный вид кластеров в GaAs



Распределение структурных дефектов по глубине



Взаимодействие электронов с кластерами

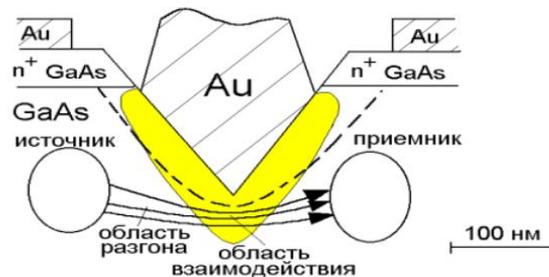
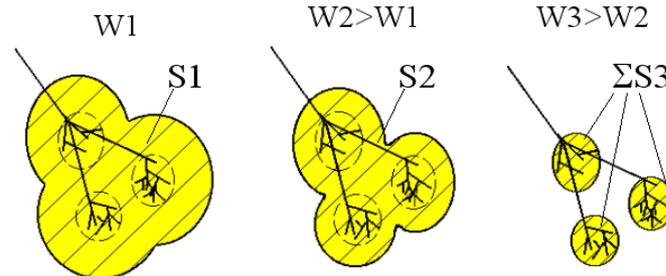


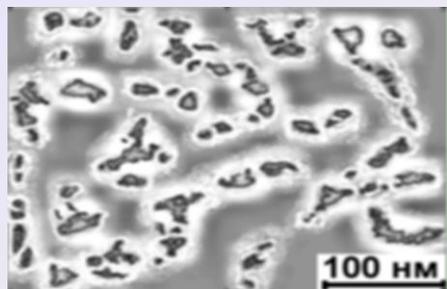
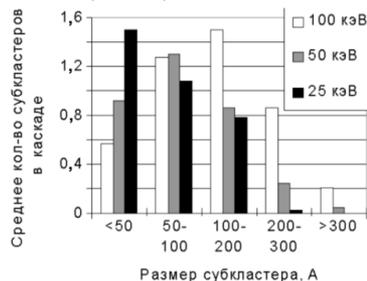
Схема движения электронов в радиационно-стойких диодах и транзисторах



Изменение сечения рассеяния электронов на кластерах радиационных дефектов при увеличении энергии носителей заряда



Распределение субкластеров по размерам в каскаде столкновений для различных начальных энергий первичного атома.



1. Оболенский С.В. Моделирование структуры кластера радиационных дефектов в полупроводниках при нейтронном облучении // Изв. вузов: Электроника. – 2002. - № 6. - С. 67-71.

2. Е.В.Киселева, С.В.Оболенский Экспериментальное исследование структуры кластеров радиационных дефектов в GaAs с помощью квазибаллистических электронов // ФизХОМ, 2005, № 3, с.29-32

3. С.В.Оболенский Е.В.Киселева Структура кластеров радиационных дефектов в полевых транзисторах Шоттки при нейтронном облучении // Микроэлектроника, №5, 2006, т.35, с.371-373

$$I = k \cdot W \cdot (a - dg) \cdot N_d \cdot V$$

$$dg = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(Vg + Vb)}{eN_d}}$$

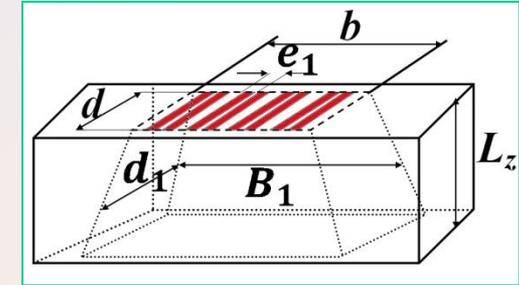
$$V = \frac{\mu E}{1 + \mu E / V_{нас}}$$

$$k = 560 \cdot T^{-1.18}$$

$$T = \frac{P \cdot L_z}{B_1 \cdot d_1 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{B_1}{d_1} \right)^h \cdot \left(\frac{B_1 \cdot d_1}{L_z^2} \right)^n \cdot m + T_{осн}$$

$$B_1 = b \cdot N + e_1 \cdot (N - 1) + L_z \quad d_1 = d + L_z$$

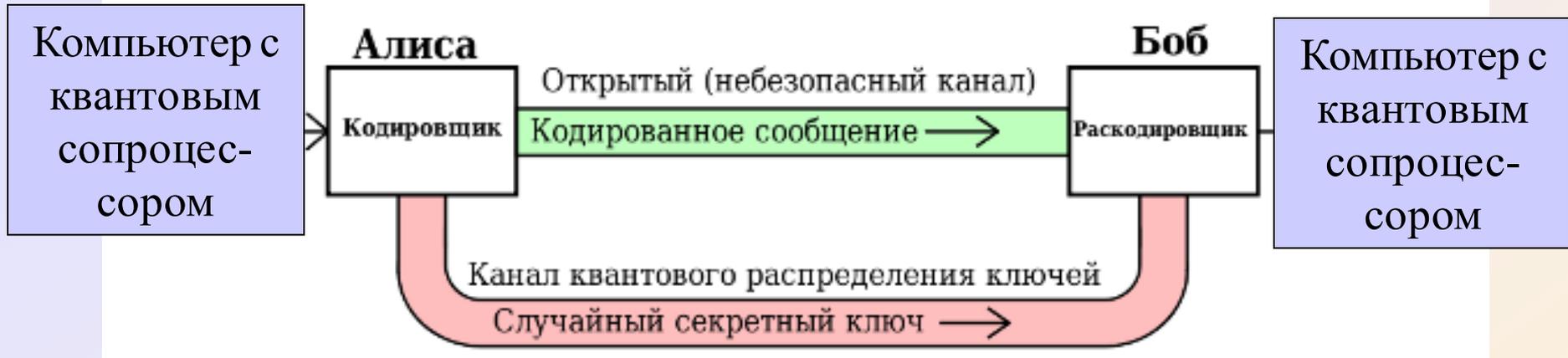
$k=0.6$ для 350 К;
 $k=0.44$ для 400 К;
 $k=0.39$ для 500 К



$h=0.184,$
 $n=-0.2944,$
 $m=3.135$

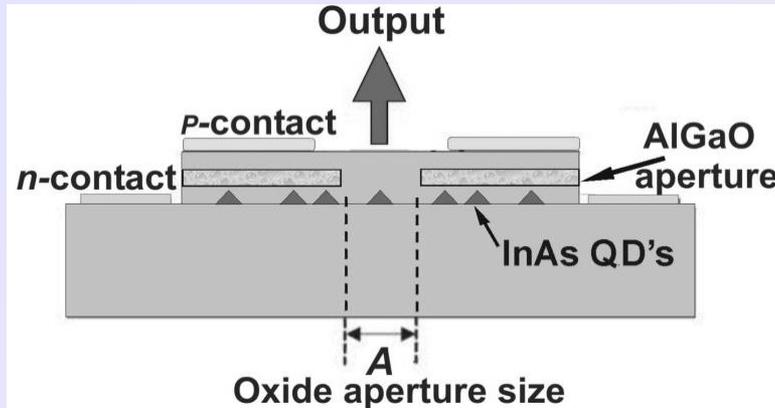
W – ширина затвора, **Nd** – концентрация доноров, **dg** – толщина ОПЗ, **E** – напряженность электрического поля, **T** – температура, **$V_{нас}$** – скорость насыщения, **Vg** – напряжение затвора, **Vb** – контактная разность потенциалов затвора, **P** – мощность, **L_z** – толщина кристалла, **b, d** – геометрические параметры транзистора, **B_1, d_1** – геометрические размеры транзистора на полувысоте теплового сопротивления, **N** – количество секций, **e_1** – расстояние между секциями, **k, l, n, m** – подгоночные коэффициенты, **μ** – подвижность носителей заряда, **ε** – диэлектрическая проницаемость

Стойкость квантовых компьютеров и криптографических каналов

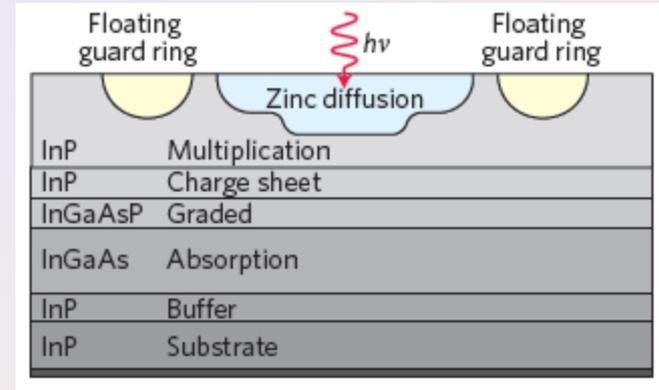


[1] В.А. Гайслер Однофотонные источники света на основе полупроводниковых структур [2] M. B. Ward, T. Farrow Electrically driven telecommunication wavelength single-photon source

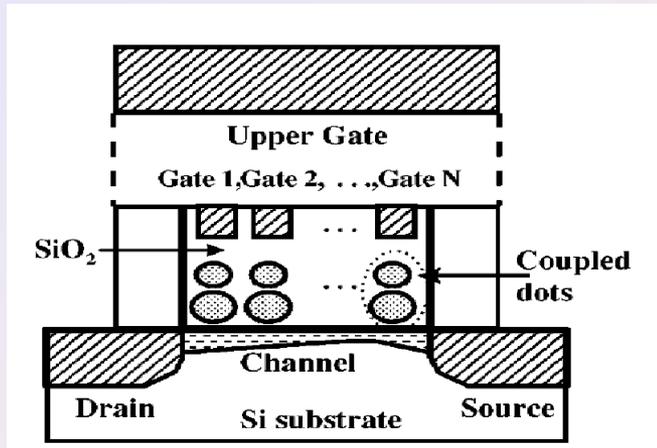
Элементная база квантовых компьютеров и криптографических каналов



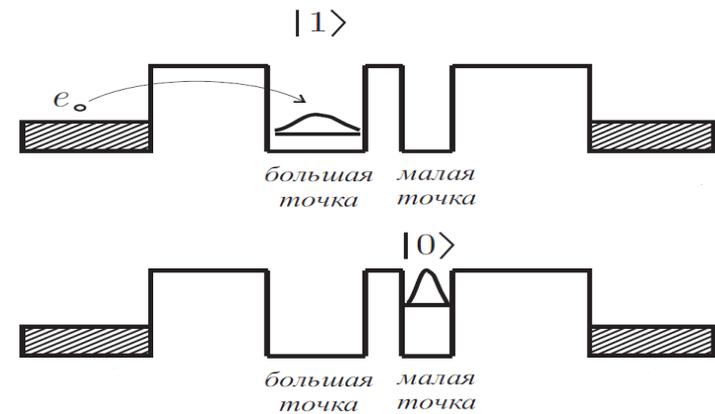
Лазеры на квантовых точках



Лавинные фотодиоды



Базовый элемент квантового компьютера



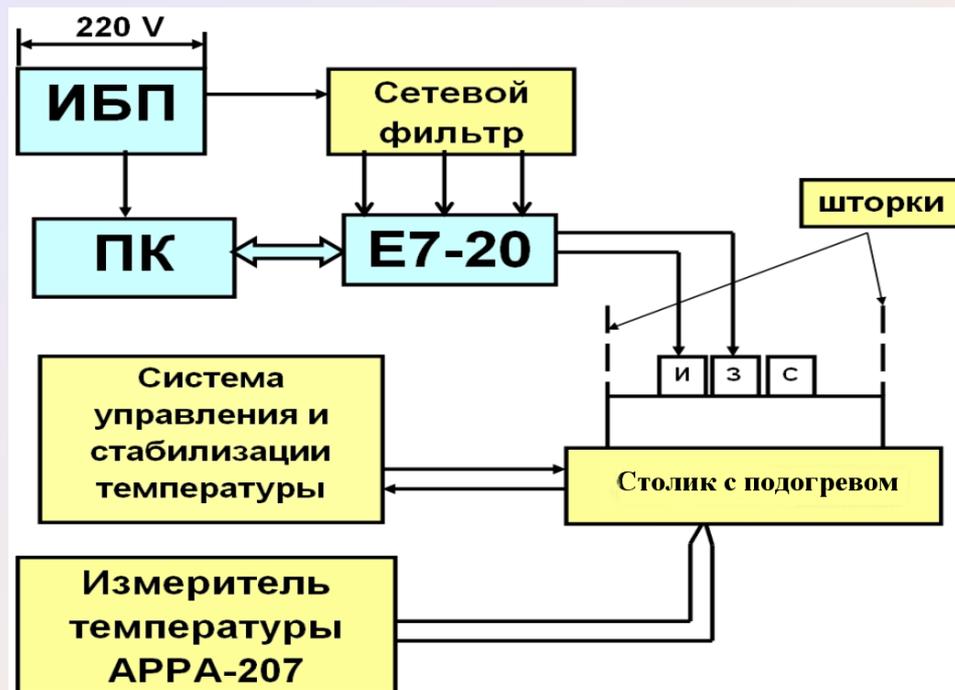
[1] В.А. Гайслер Однофотонные источники света на основе полупроводниковых структур [2] M. B. Ward, T. Farrow Electrically driven telecommunication wavelength single-photon source [3] T. Tanamoto Quantum gates by coupled asymmetric quantum dots and controlled-NOT-gate operation// Phys. Rev. A, 61,022305 (2000) [4]

Экспериментальная установка для измерения параметров полупроводниковых структур

21



**Фотография
измерительного
стенда: внешний вид**



Блок-схема измерительной установки. Объект подключен к измерителю емкости с помощью зондового устройства

✓ Усреднение:

30 отсчетов - разброс измерений емкости $\pm 13\text{ фФ}$ (65%)

50 отсчетов - разброс измерений емкости $\pm 8\text{ фФ}$ (42%)

100 отсчетов - разброс измерений емкости $\pm 4\text{ фФ}$ (3%)

✓ стабилизация температуры:

-150...+150 °C +/- 3 °C

Спасибо за внимание!

Наши публикации по теме доклада
можно найти на сайте нашей кафедры по адресам:

<http://www.rf.unn.ru/eleddep/publication/publications.htm>

http://www.rf.unn.ru/eleddep/publication/favo_obolensk.html