

Полевые транзисторы с
двумерным электронным газом

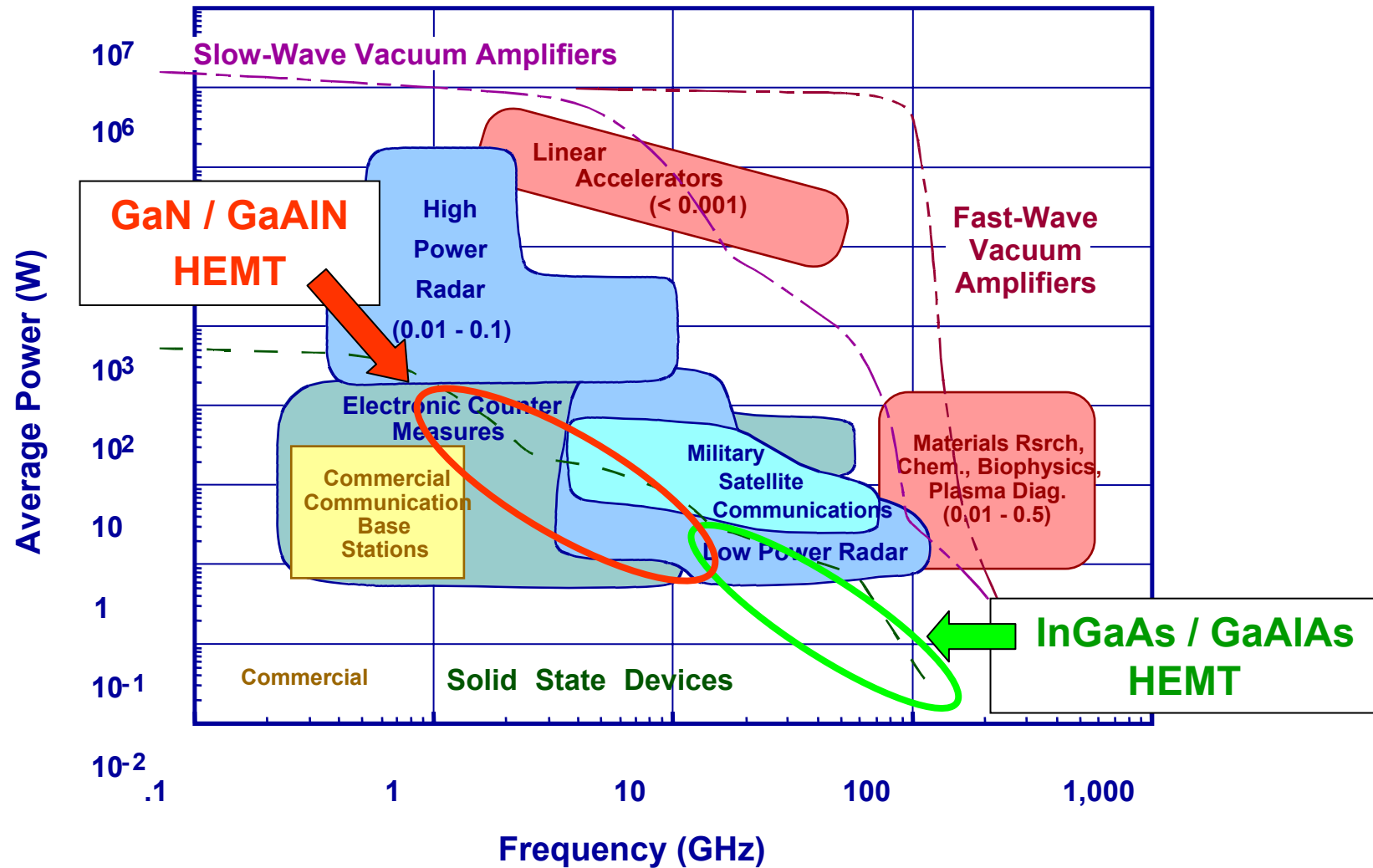
High electron mobility transistor
(HEMT)

Сергей Владимирович Оболенский

obolensk@rf.unn.ru

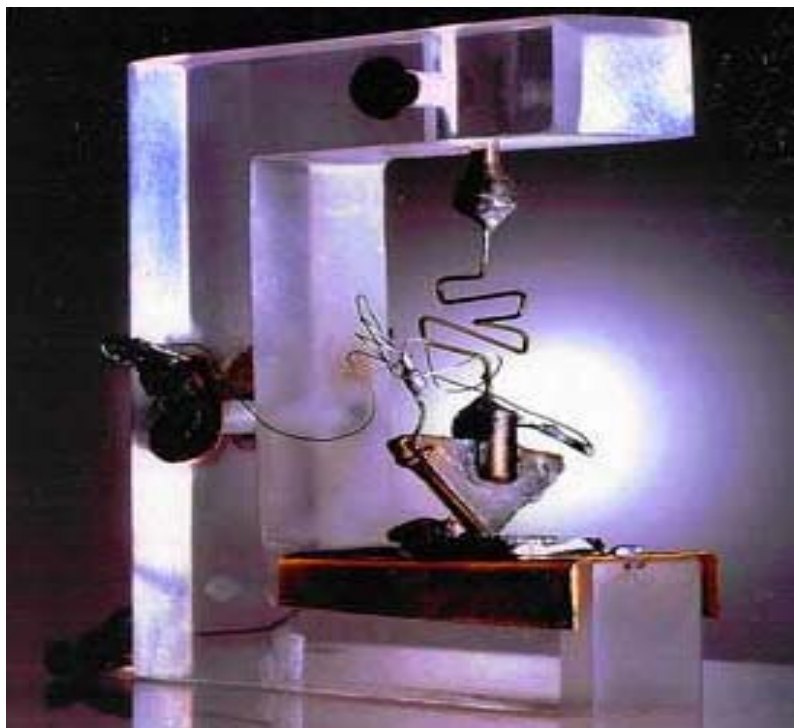
Область применения GaN и GaAs HEMT

2



Эксперимент – это «просто»!

3



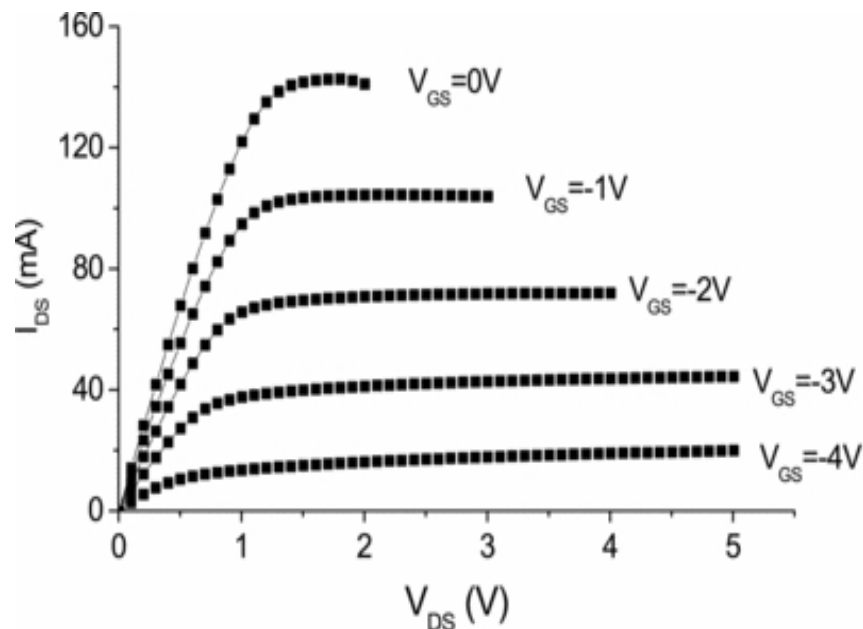
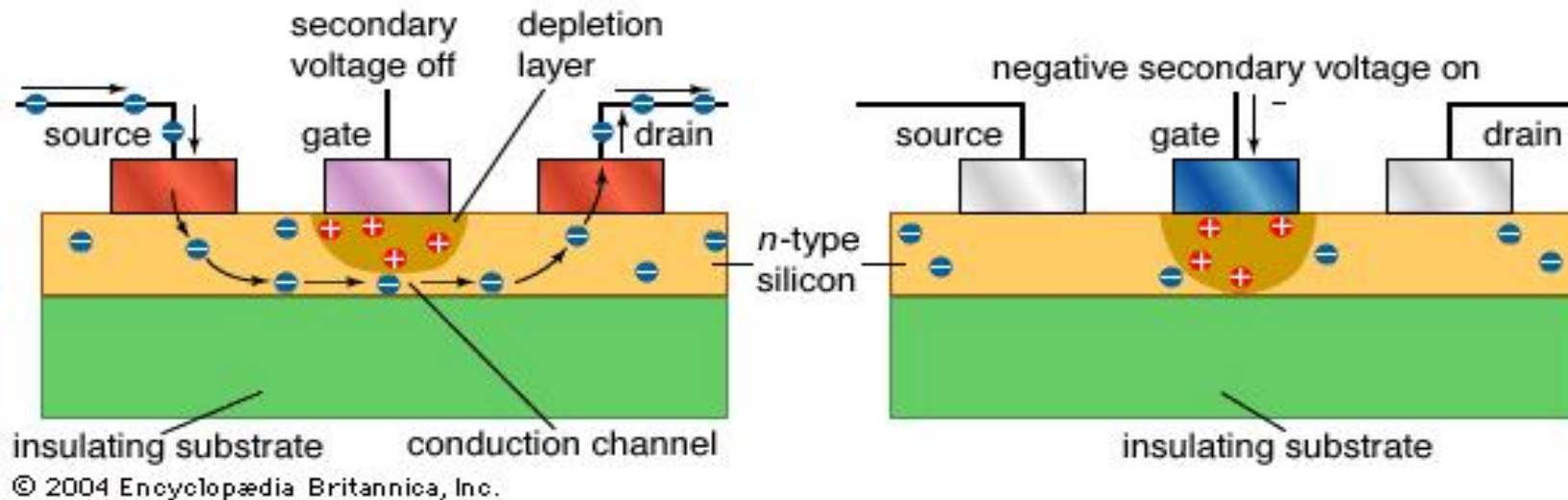
Первый транзистор



Уильям Шокли, Джон Бардин и
Уолтер Браттейн (1947 год)

НЕМТ изобретен в 1978...1980 гг.

Принцип работы полевого транзистора с затвором Шотки (MESFET)



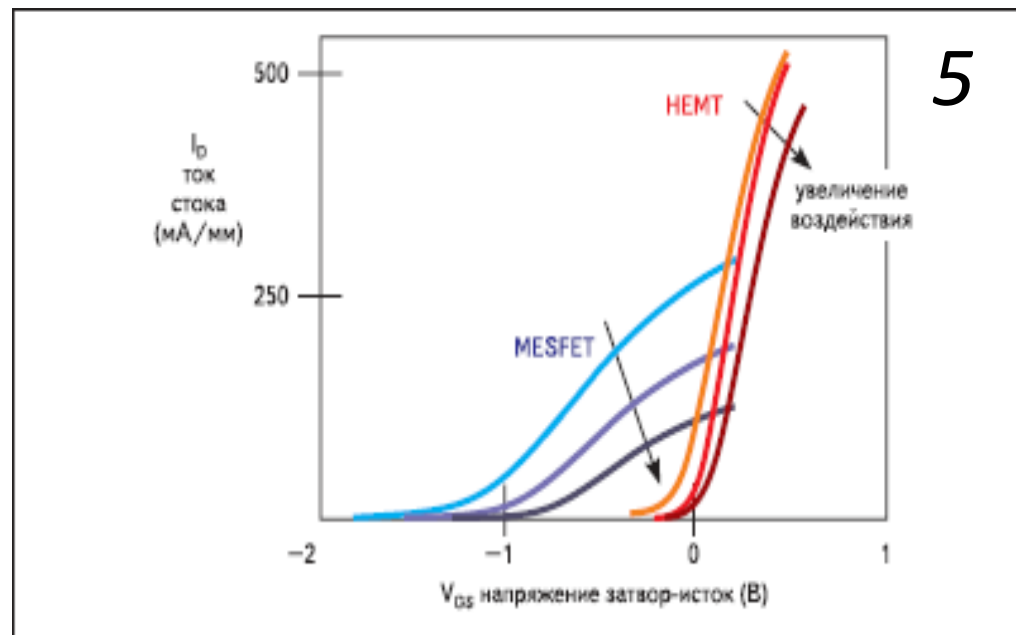
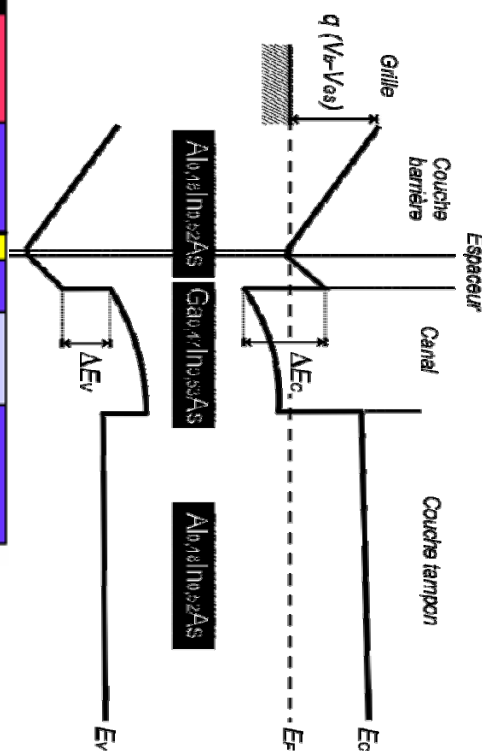
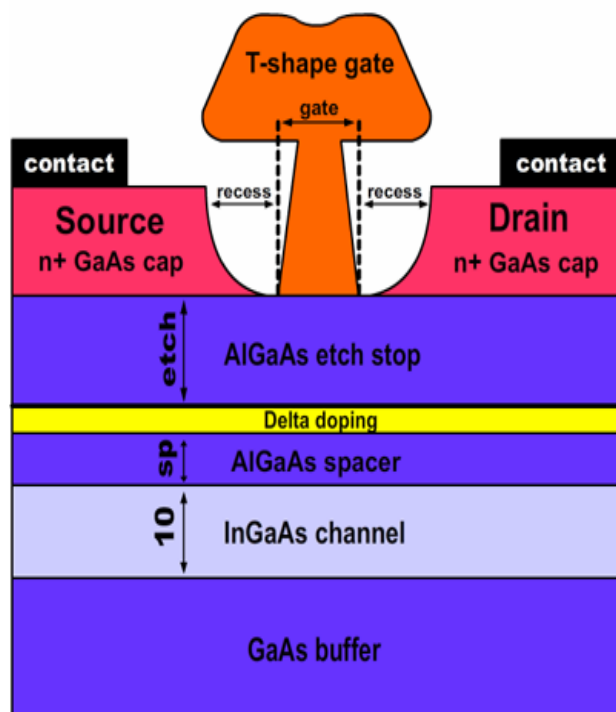
Крутизна ВАХ:

$$S = dI_s / dU_g$$

Коэффициент усиления
по мощности:

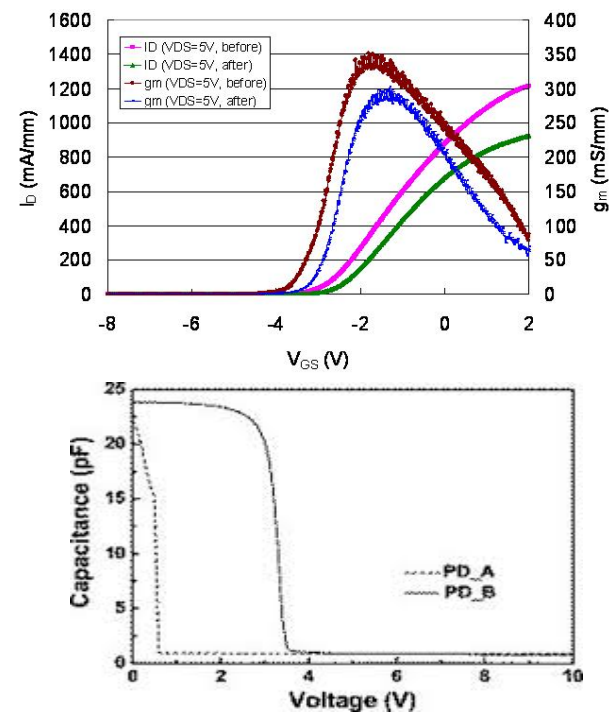
$$K_p \sim S / C_{gs}$$

Принцип работы HEMT



5

Transconductance Change



Путь от идеи до реализации

6

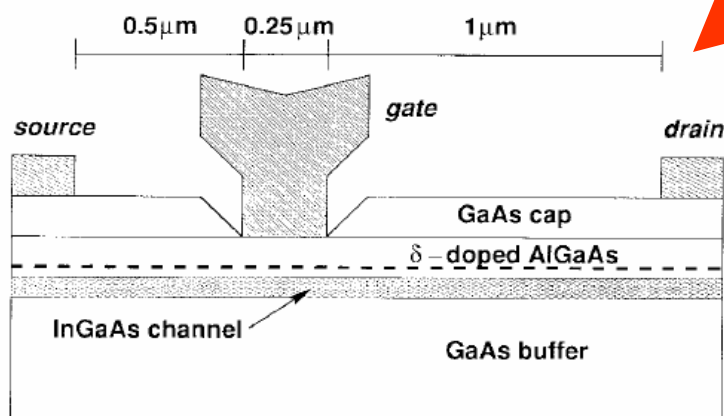
Принцип работы



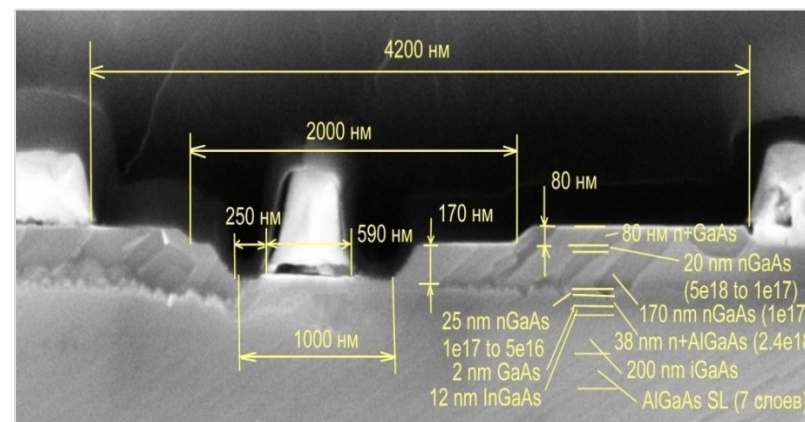
Проектирование



Рост + Литография



Результат



Длина затвора определяет параметры структуры!!!

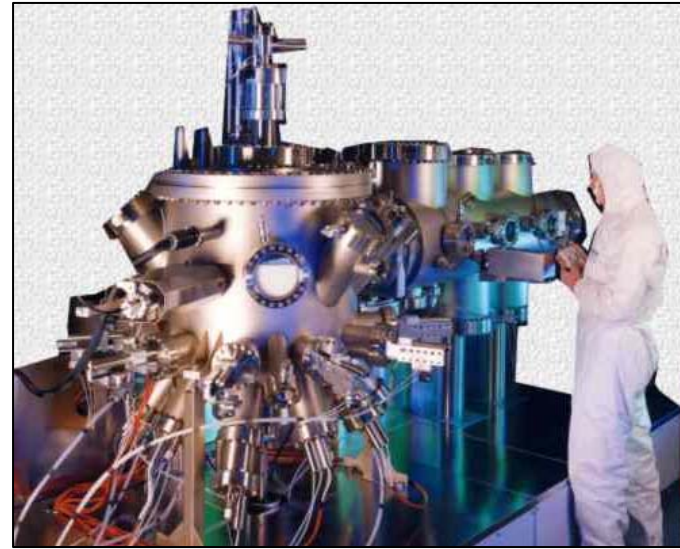
Технология «выпечки» НЕМТ структур ⁷

Полевой транзистор Шоттки
(MESFET)



Толщины слоев $\sim 100 \pm 10$ нм
Концентрация доноров $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Подвижность $\sim 3500 \text{ см}^2/\text{Вс}$ (300 К)
Скорость электронов в канале
 $\sim 10^7 \text{ см/с}$

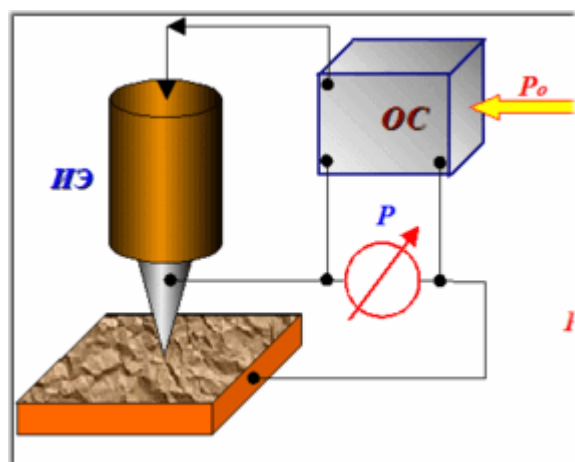
Полевой транзистор с двумерным
электронным газом (HEMT)



Толщины слоев $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$
Концентрация доноров $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$
Подвижность $\sim 6000 \text{ см}^2/\text{Вс}$ (300 К)
Скорость электронов в канале
 $\sim 10^8 \text{ см/с}$

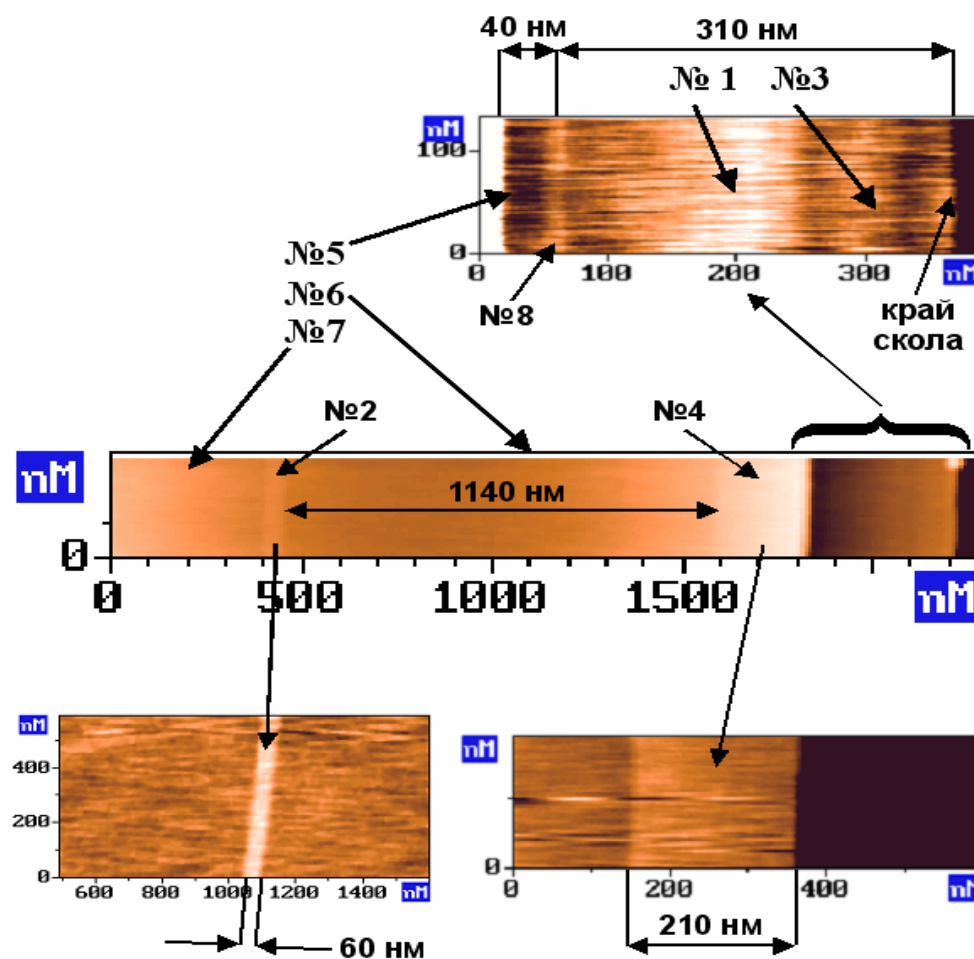
Экспериментальные методы анализа гетероструктур НЕМТ

8



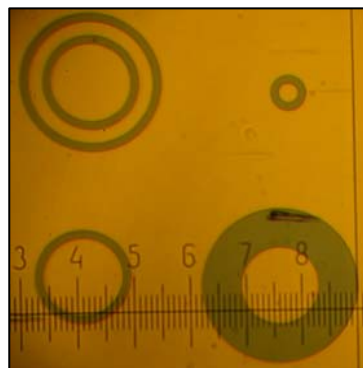
Зондовая микроскопия

Микрорельеф скола полупроводниковой гетероструктуры ПТШ со встроенной сверхрешеткой полученный с помощью зондового микроскопа (ИФМ РАН, г. Нижний Новгород)

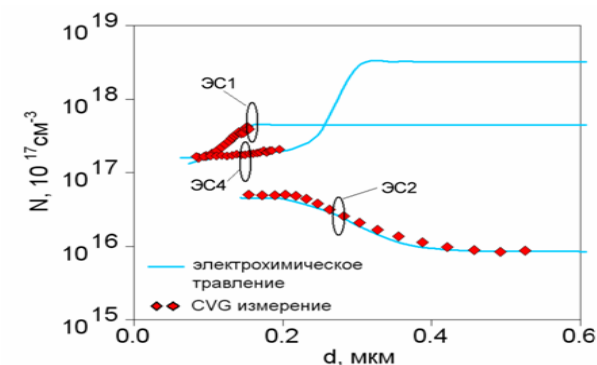


Экспериментальная установка для измерения параметров полупроводниковых структур

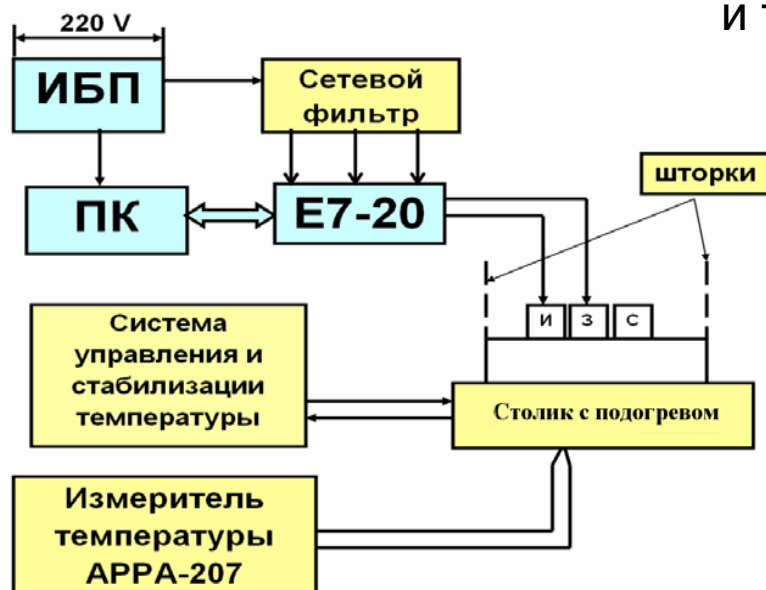
9



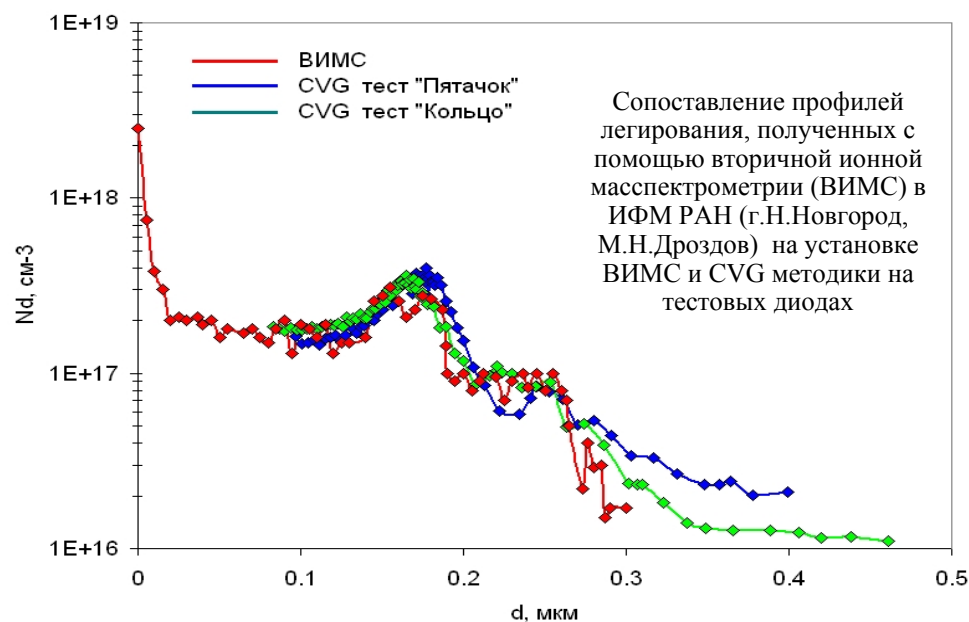
«Тестовые» диоды и транзистор



Сопоставление профилей легирования, полученных с помощью электрохимического профилирования (ООО "СигмПлюс", г. Москва, оператор Волков Н.А., установка ECVPro, Nanometrics и CVG методики на тестовых диодах



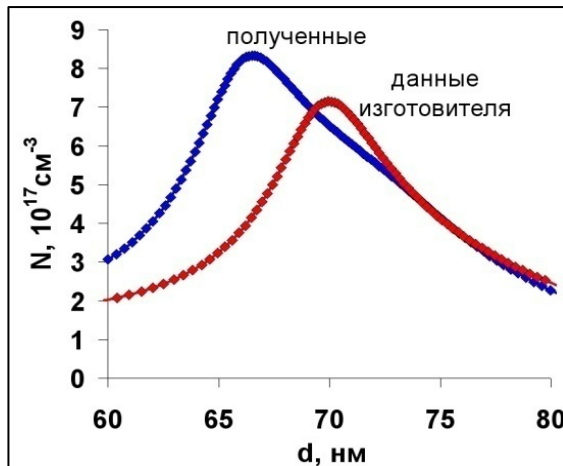
Блок-схема измерительной установки



Сопоставление профилей легирования, полученных с помощью вторичной ионной масспектрометрии (ВИМС) в ИФМ РАН (г.Н.Новгород, М.Н.Дроздов) на установке ВИМС и CVG методики на тестовых диодах

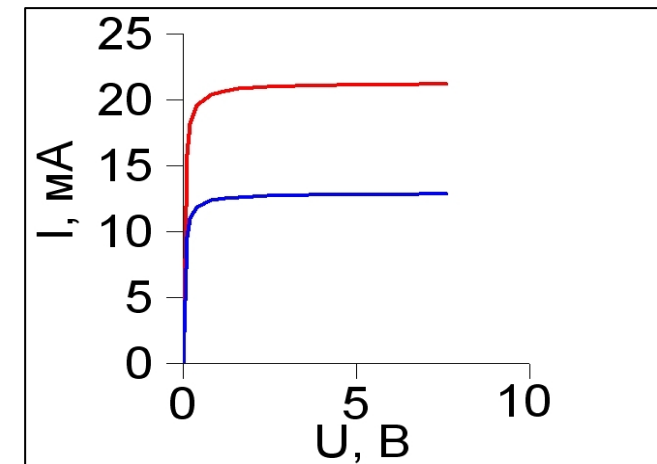
Результаты анализа структур

10



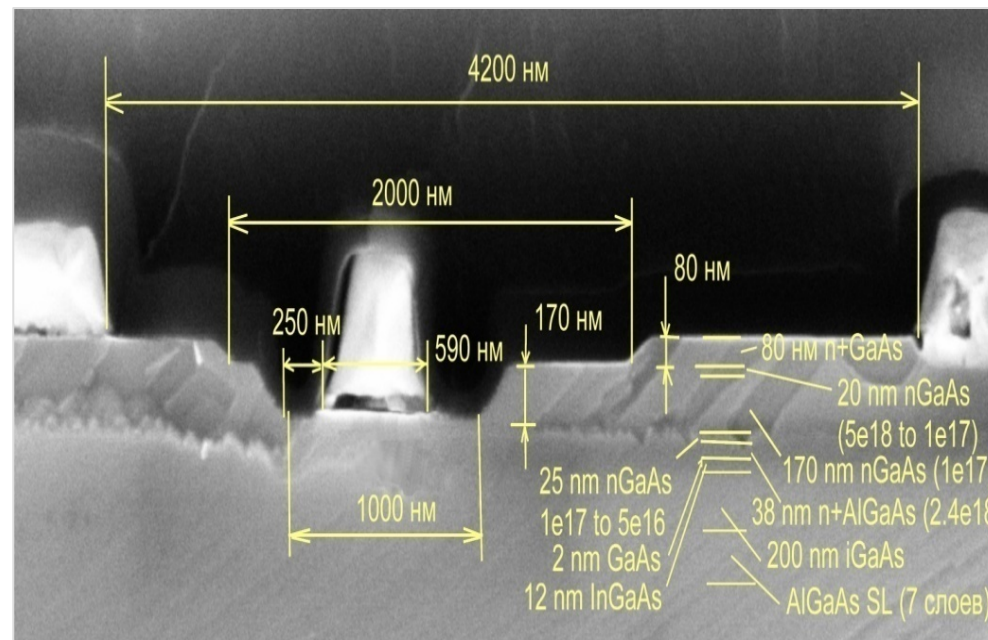
Профиль концентрации полупроводниковой структуры

1. Смещение профиля
2. Максимальное значение
3. Ширина пика на полувысоте



Расчетные ВАХ HEMT

Микрофотография GaAlAs/GaInAs транзистора, изготовленного НПП «Салют». Структура выращена в ФТИ РАН им. Иоффе. Фотография сделана в ИФМ РАН, электронным микроскопом Jeol



Математическая модель НЕМТ в квазигидродинамическом приближении

11

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi_i}{dz^2} + (W_i - V(z)) \psi_i = 0$$

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

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

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

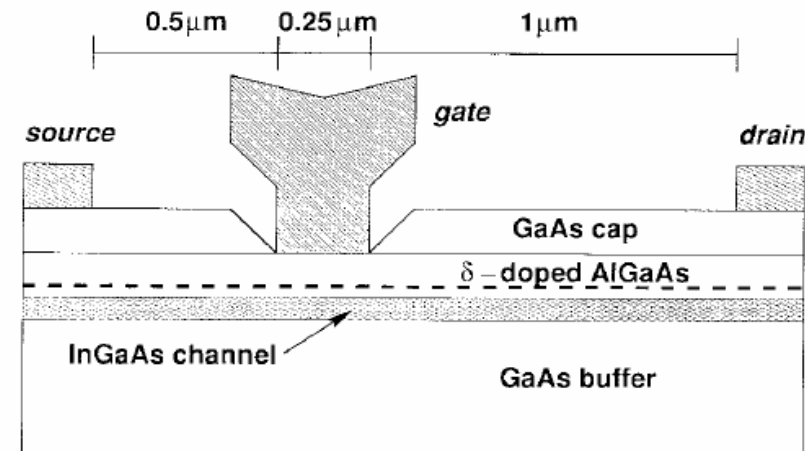
$$\mathbf{j}_t = \mathbf{j} + \frac{\mathcal{E}}{a} \quad E = -\nabla V$$

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

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

$$\frac{dn(W)\mathbf{v}(F_n)}{dt} = -qE - \frac{m(W)}{\tau_p(F_n)} \mathbf{v}(F_n)$$

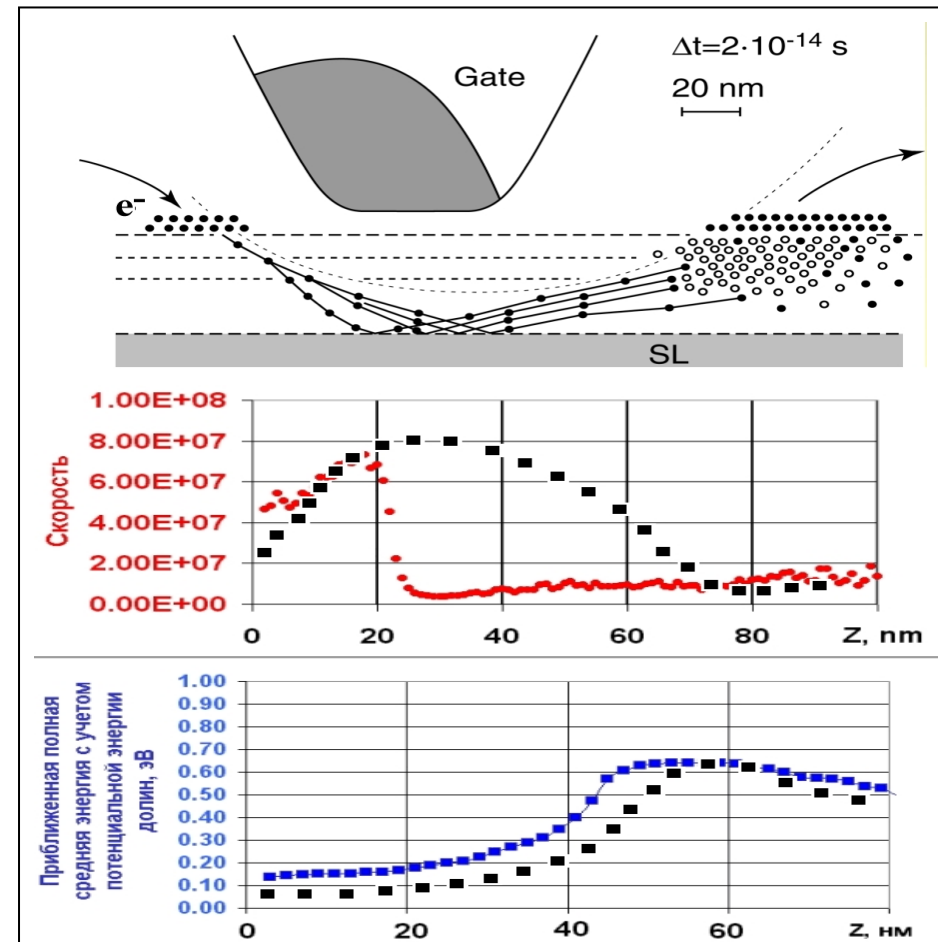
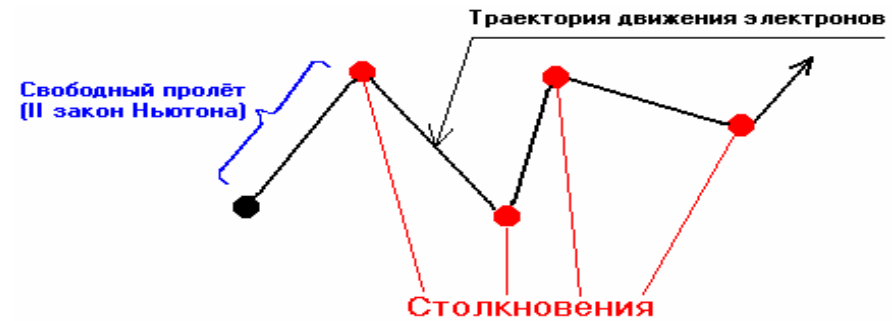
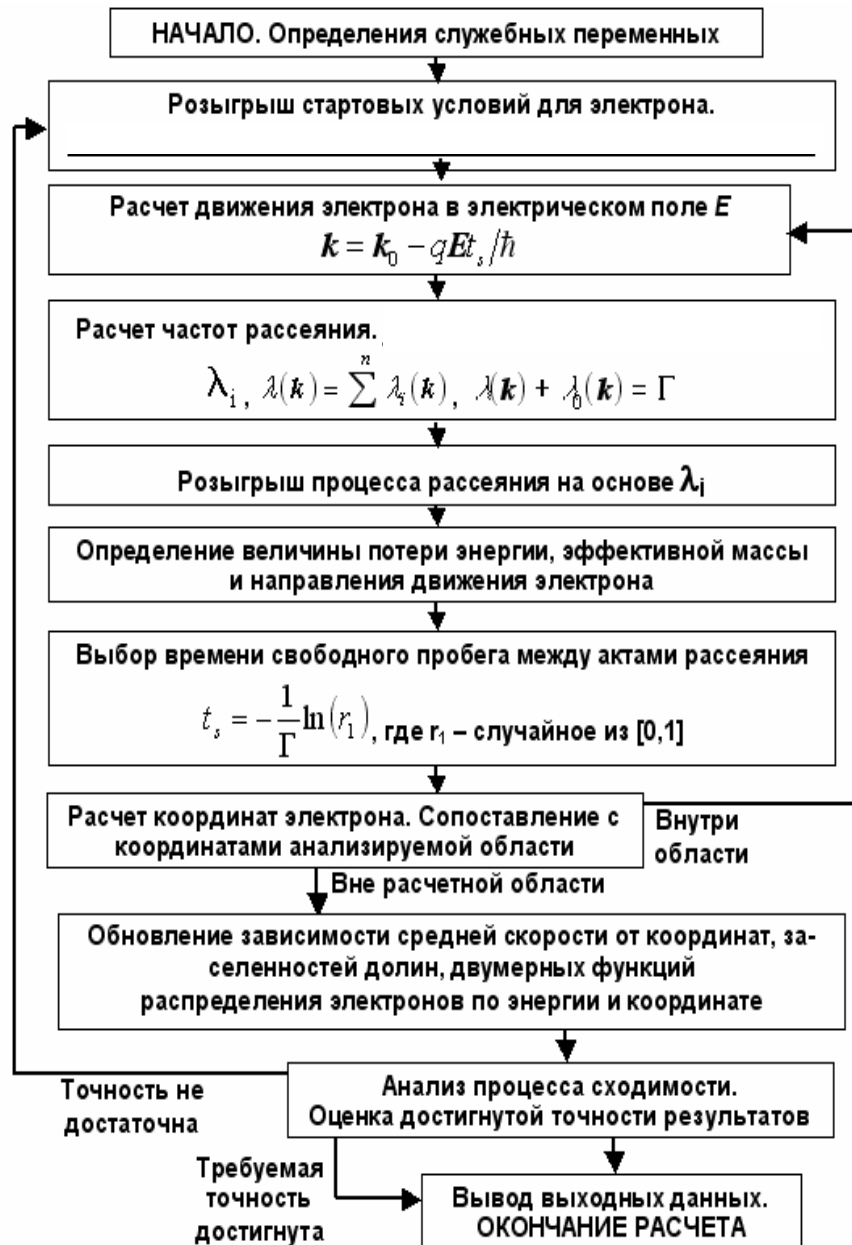
где V – потенциал; n – концентрация электронов; N_+ , N_- – концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (доноров, акцепторов, радиационных дефектов); \mathbf{j} , \mathbf{j}_t – плотность электронного и полного тока; \mathbf{j}_w – плотность потока энергии электронов; W , W_0 – неравновесная 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);



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.



Какой вычислительный метод лучше?

13

Затраты исследователя на выполнение работы
(расхожее, но абсолютное **не** правильное мнение)

Квазигидродинамика
(TCAD)

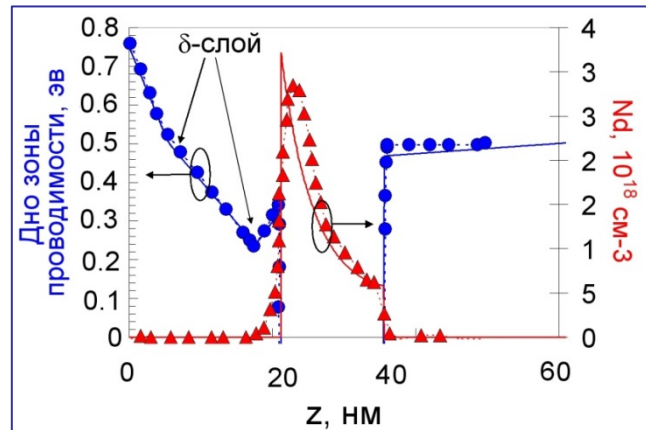


Метод Монте-Карло

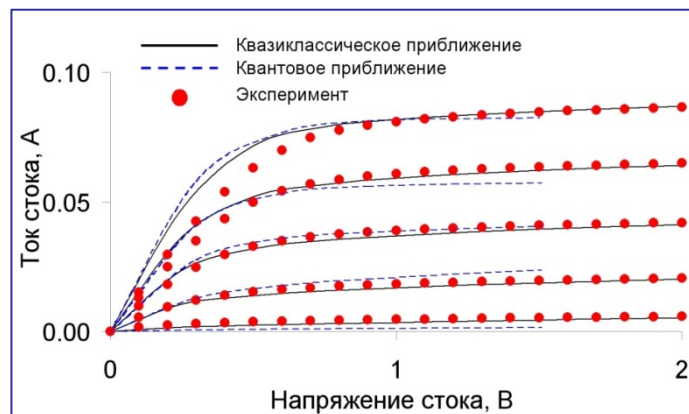


Результаты численных расчетов электрофизических параметров НЕМТ

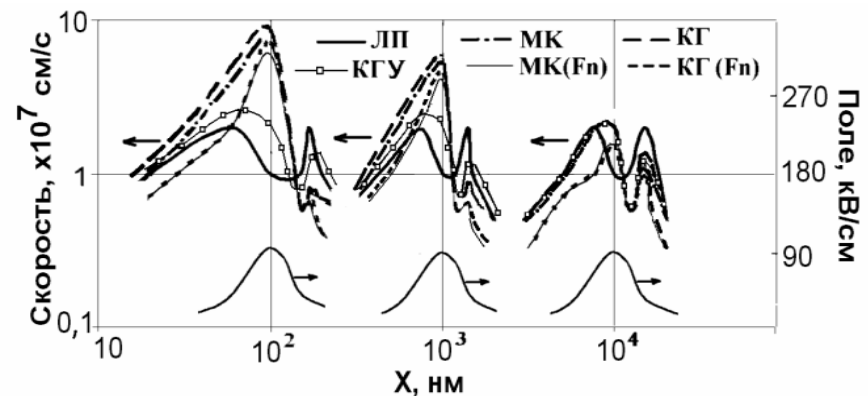
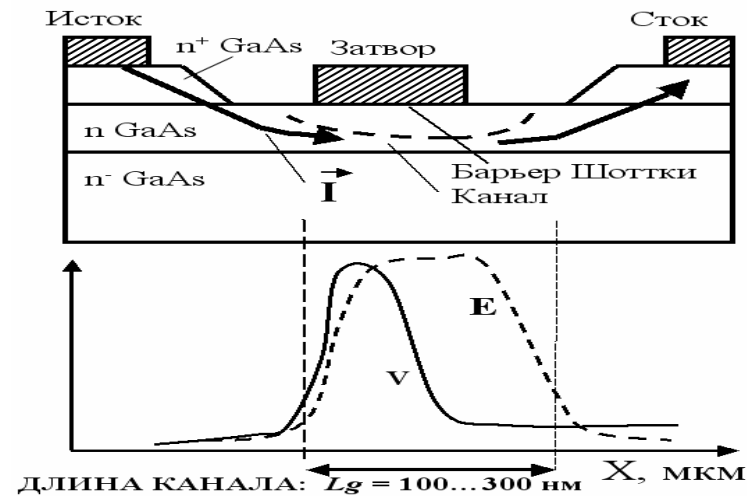
14



Зонная диаграмма и распределение концентрации электронов под затвором InAlAs/GaInAs транзистора: — - квазигидродинамика, -o- и -Δ- метод Монте-Карло



Вольт-амперные характеристики транзистора рассчитанные с помощью программы TCad
— - оригинальный расчет, -o- данные из Moran, Kalna

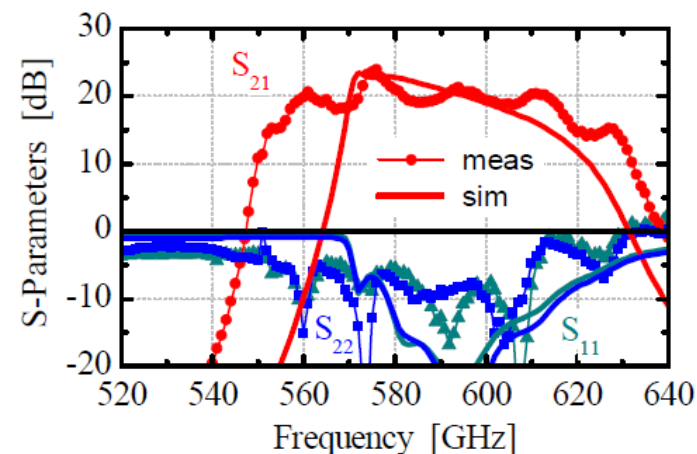
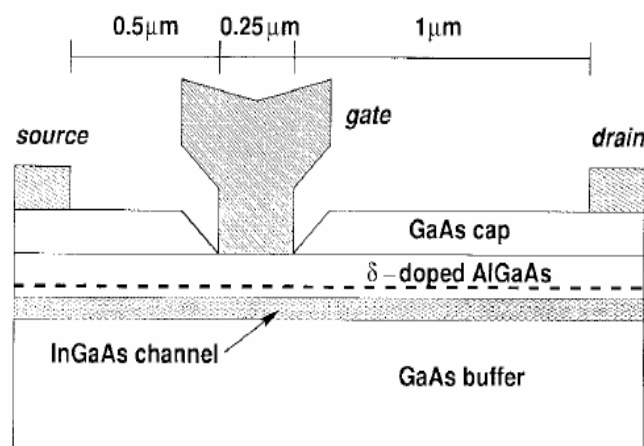


Оболенский С.В. Предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближения при расчетно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов // Изв. вузов: Электроника. - 2002. - № 6. - С. 31-38.

Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В., Дюков Д.И., Фефелов А.Г., Моделирование мощных НЕМТ при облучении квантами высоких энергий / Физика и техника полупроводников, № 12, 2012, т. 46. № 12. 2012. С. 1587-1593.

Перспективные нанотранзисторы

15



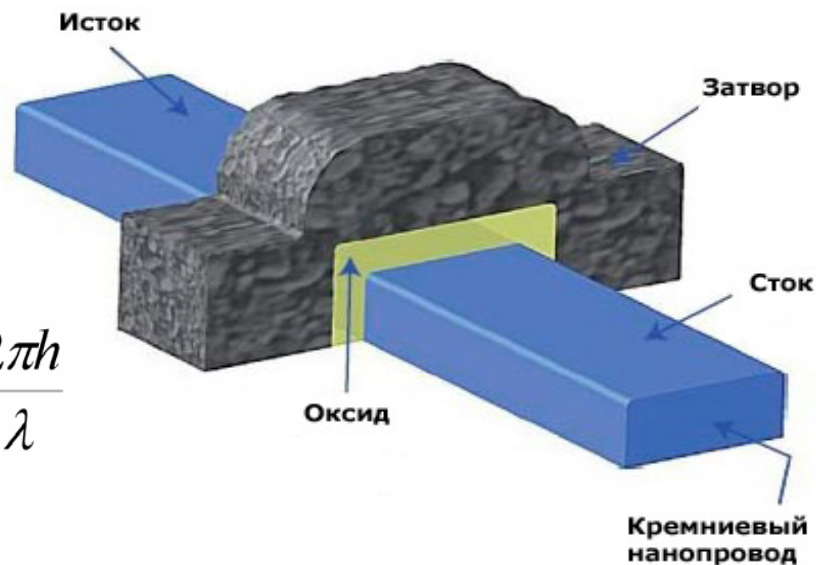
Michael Schlechtweg, Axel Tessmann, Arnulf Leuther, Hermann Massler, Sandrine Wagner, Rolf Aidam, Josef Rosenzweig, Oliver Ambacher Millimeter- and Submillimeter-Wave Monolithic Integrated Circuits Based on Metamorphic HEMT Technology for Sensors and Communication



**Сечение
нанопровода
10x10 нм !!!**

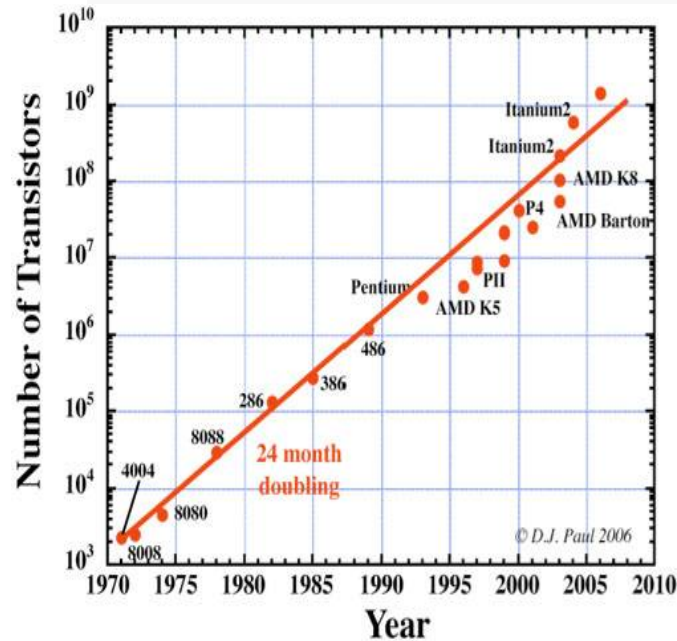
$$\frac{m v^2}{2} = \frac{3}{2} k T ; \quad m v = \frac{2 \pi \hbar}{\lambda}$$

$$\lambda = 10 \dots 20 \text{ нм}$$



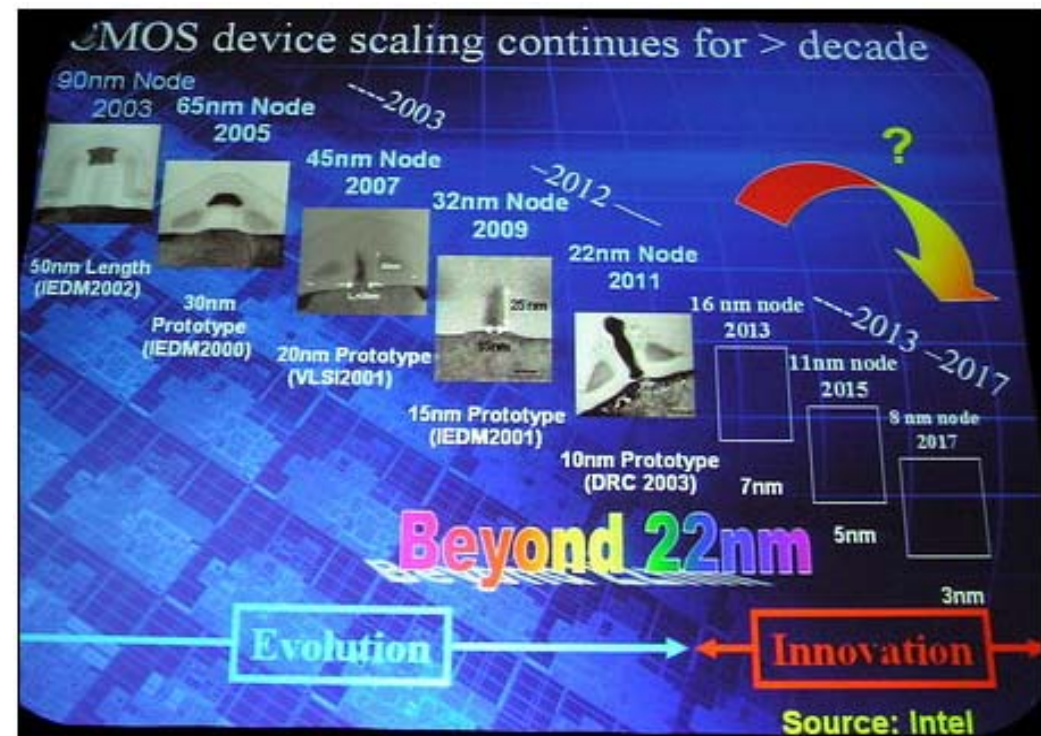
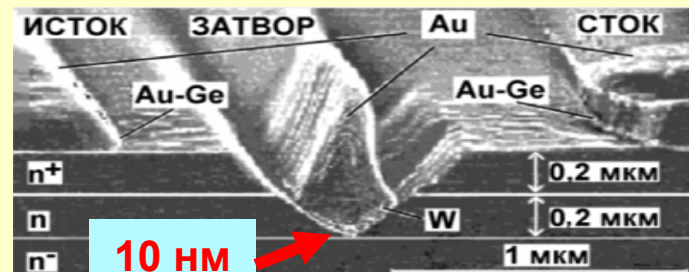
Закон Мура и кризис технологии «обычных» транзисторов

16

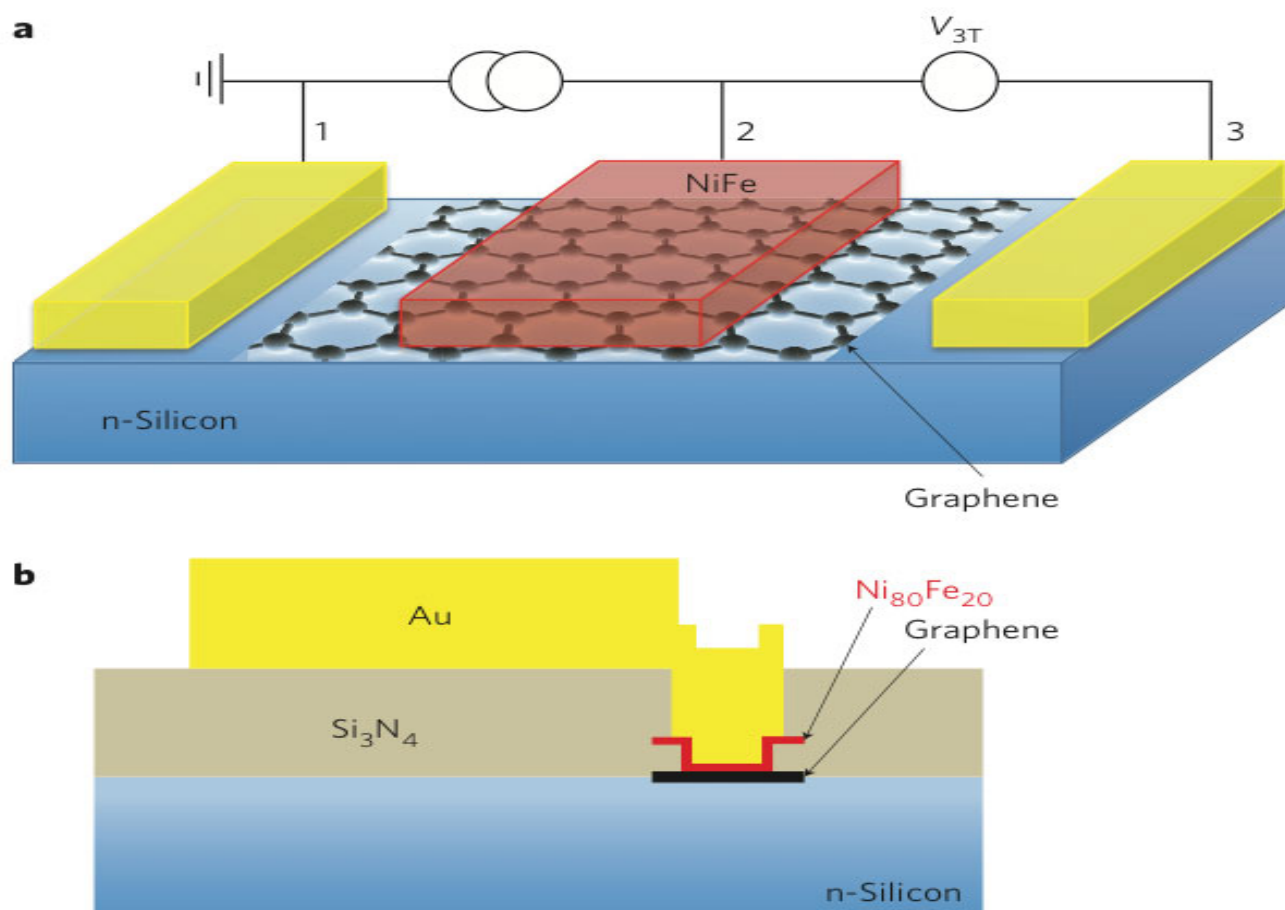


На счет котов Шредингер был не прав...

НПП «САЛЮТ», М.А.Китаев
г.Н.Новгород, 1995 г.



Кандидат на решение проблемы – графеновый транзистор



Моделирование радиационной стойкости GaAs полевых транзисторов с гетеробуфером (пакет КГМ) 18

Рис. 1. Микрофотография (JEOL, ИФМ РАН) полевого транзистора с V-образным затвором

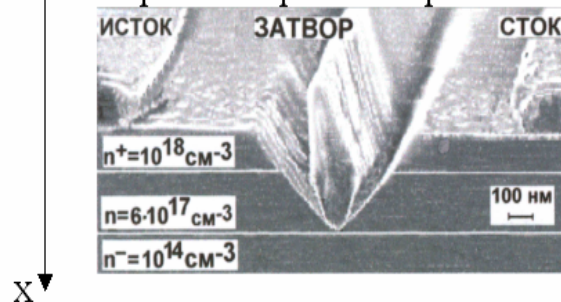
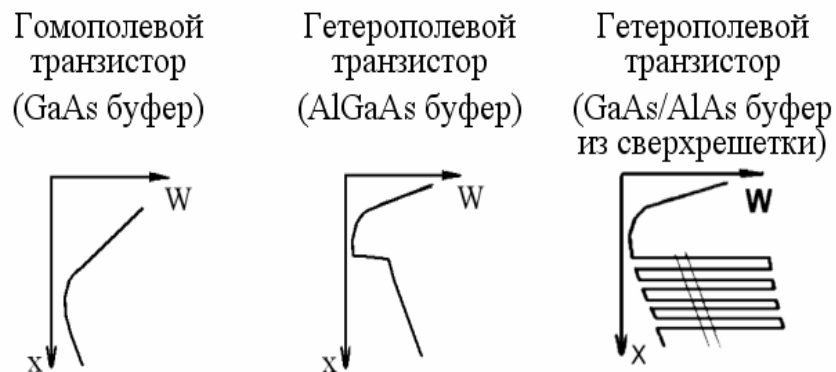
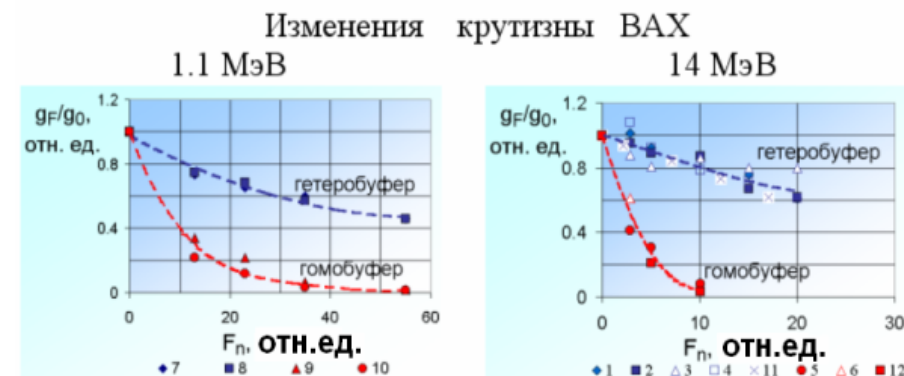
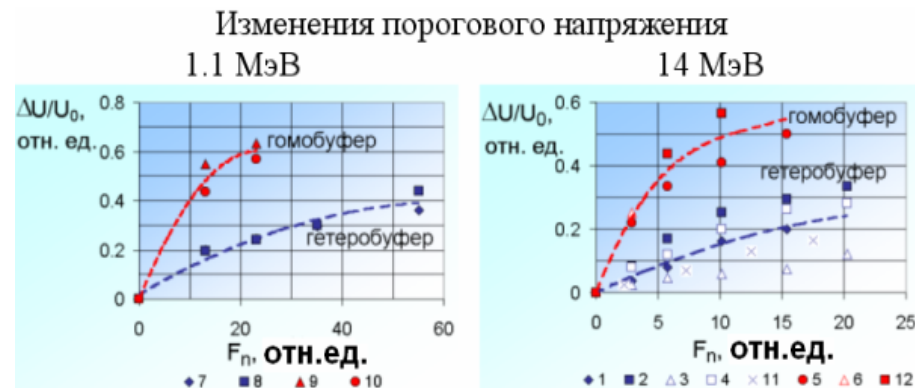


Рис. 2. Профиль дна зоны проводимости



[4] Оболенский С. В., Китаев М. А. Полевой транзистор с 30-nm затвором // Письма в ЖТФ. – 2000. - № 10. - С. 13–16;

[5] Волчков Н. А., Журавлев К. С., Китаев М. А., Козлов В. А., Оболенский С. В., Торопов А. И., Трофимов В. Т. Детектирование оптического излучения полевым транзистором со встроенной сверхрешеткой / Известия академии наук. Серия физическая, 2004, т. 68, № 1.

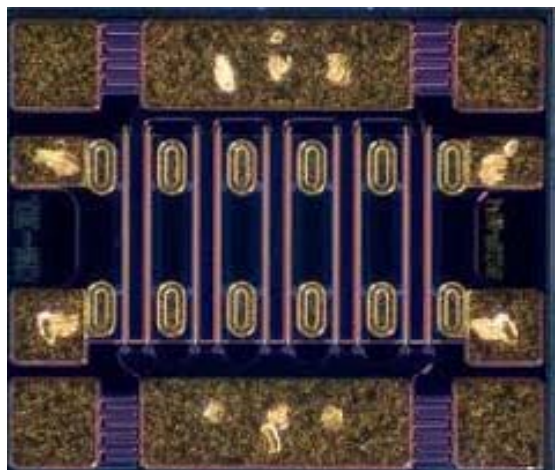


Киселева Е.В., Оболенский С.В., Китаев М.А., В.Т.Трофимов Радиационная стойкость квазибаллистических полевых транзисторов Шоттки с различными конструкциями буферного слоя при воздействии нейтронного облучения разных спектров // ПЖТФ, 2005. №20. С. 58 – 64

Чувствительность GaN НЕМТ к радиационному воздействию

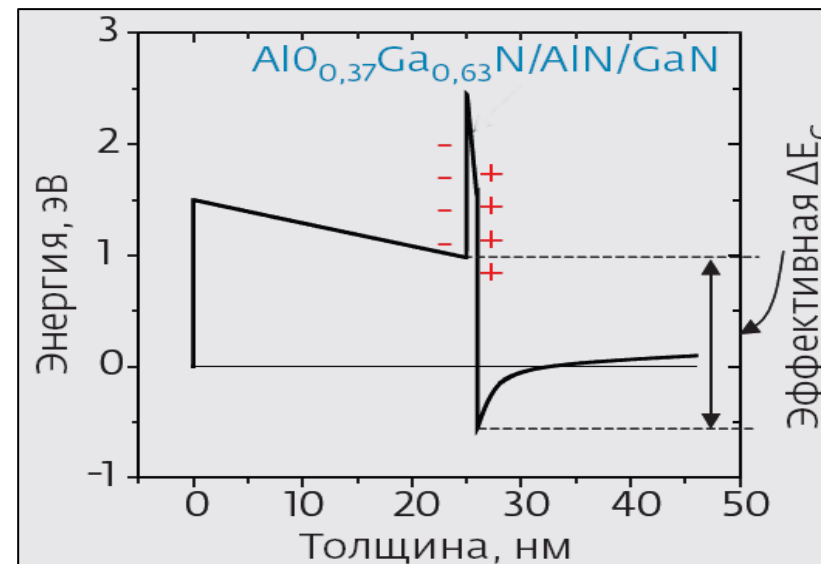
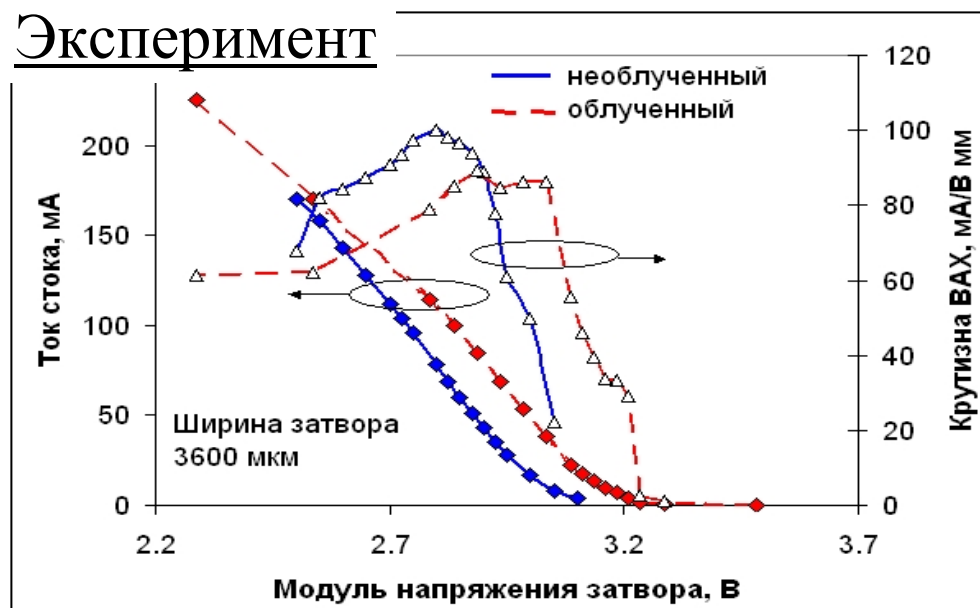
19

(исследования проводятся совместно с РФЯЦ ВНИИТФ, г. Снежинск)



Фирма Cree,
США

Эксперимент



Н.В. Басаргина, И.В. Ворожцова, С.М. Дубровских, О.В. Ткачёв, В.П. Шукайло, Е.А. Тарасова, А.Ю. Чуринов, С.В. Оболенский
Влияние гамма-нейтронного излучения на GaN транзисторы с двумерным электронным газом // Вестник ННГУ № 3(1), 2013 г. с.61-65



Неизвестный художник
«Вид студента в сессию»

Спасибо
за
внимание!

**Наши публикации по теме доклада
можно найти на сайте кафедры электроники ННГУ**

www.rf.unn.ru/eleddep/publications/publications.html

www.rf.unn.ru/eleddep/publications/favo_obolensk.html

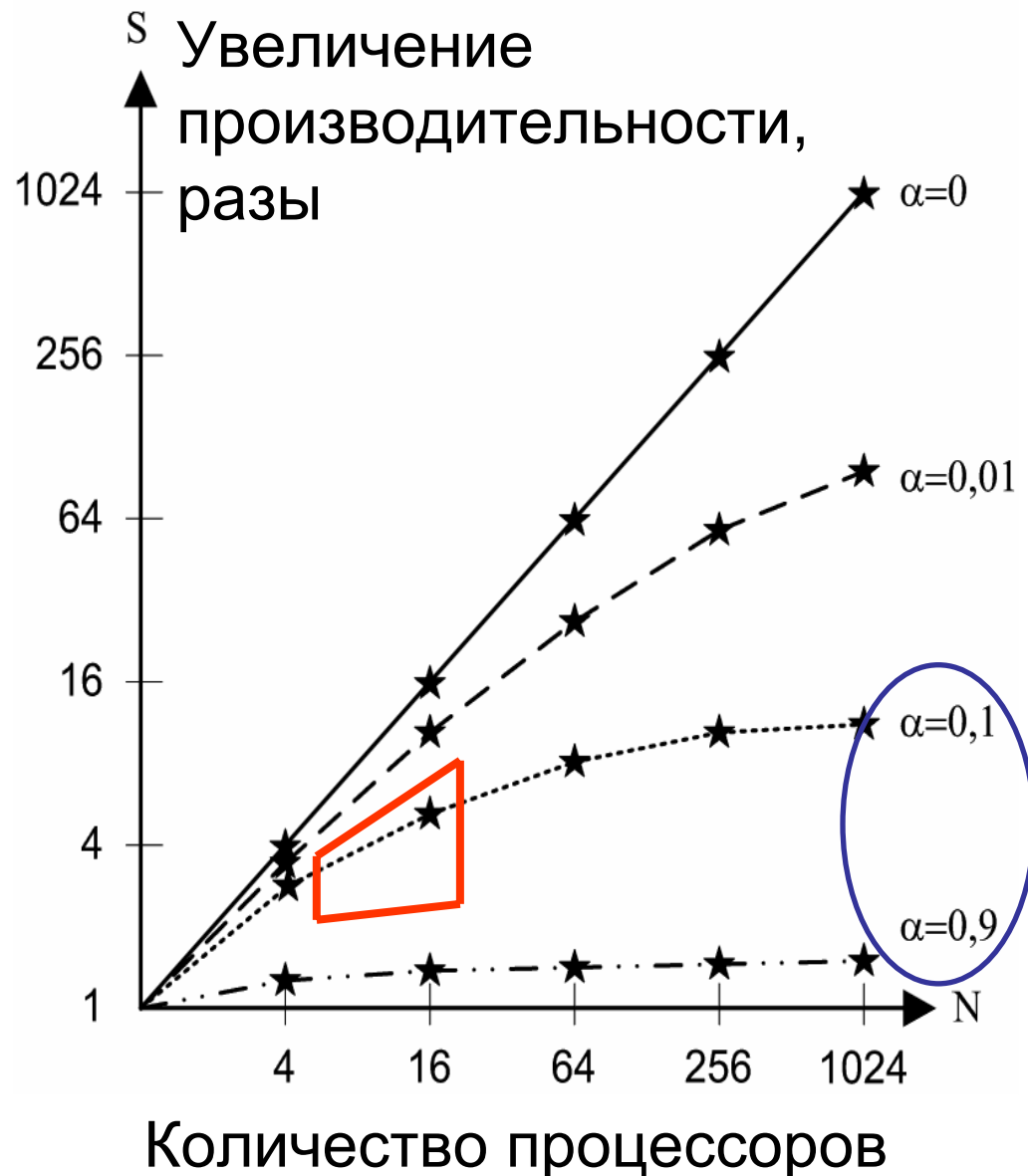
Проблемы вычислительных систем

21



Следствие закона Амдала

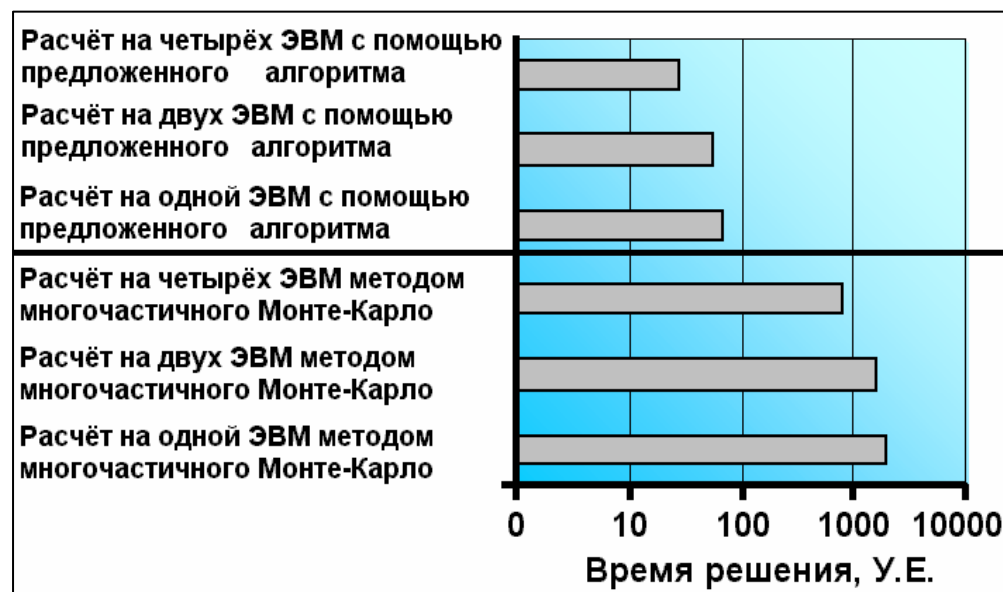
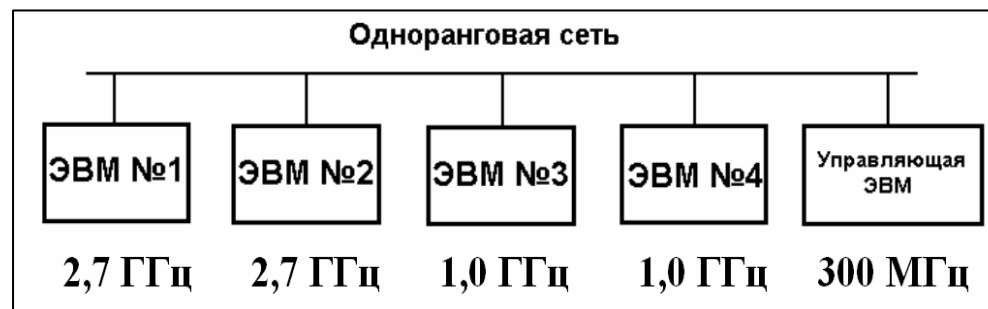
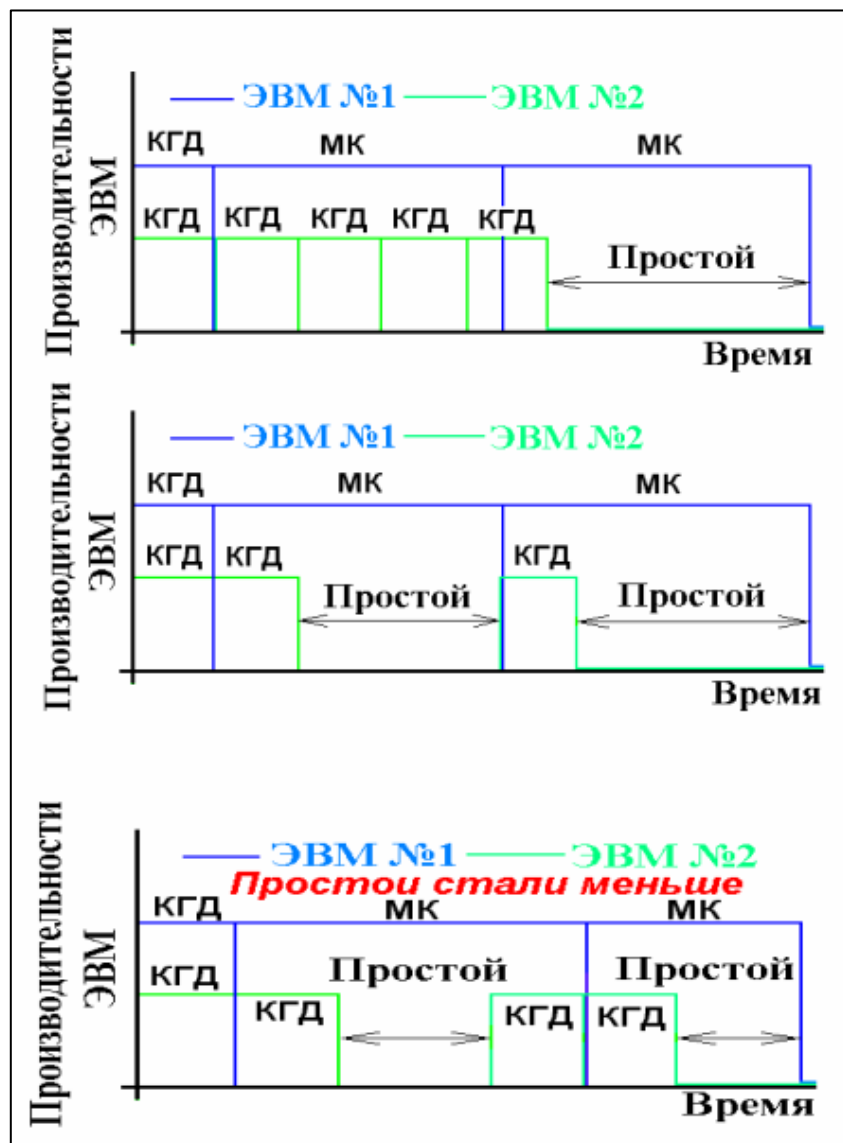
22



Если параллельная программа содержит 10% последовательного кода (альфа = 0.1), то максимальное ускорение на 16 процессорах будет равно 5 раз, а на 1024 процессорах — только 12 раз.

Производительность оригинальной многокомпьютерной вычислительной системы

23



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 многопроцессорных систем

24

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

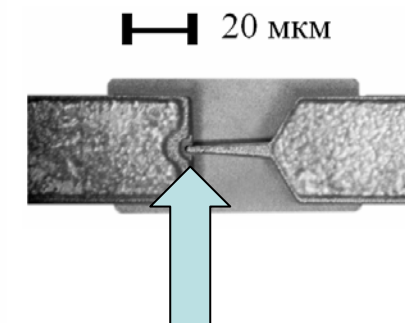
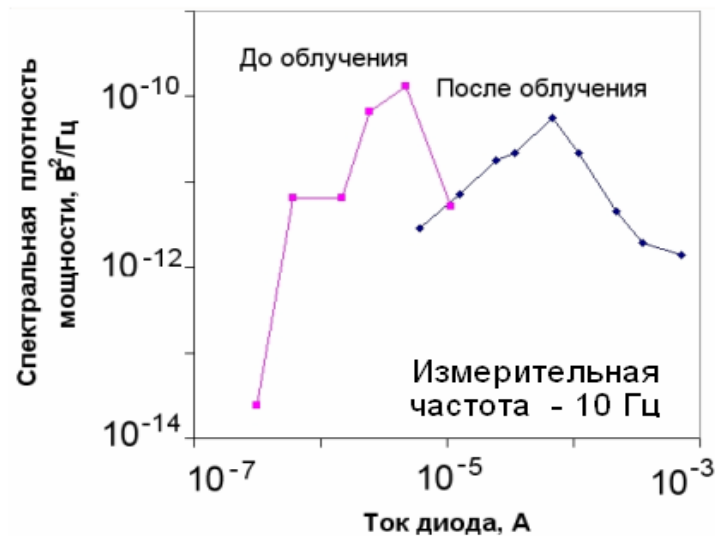
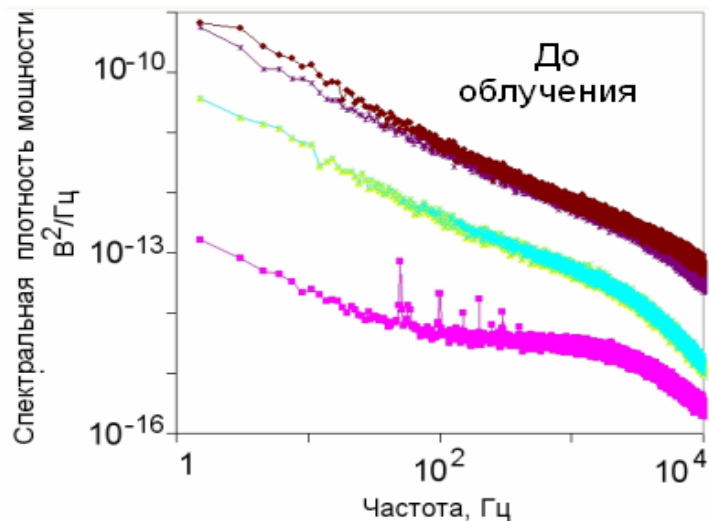
Программная среда: CUDA , C++ в среде Microsoft Visual Studio 2008

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

1/f шумы в терагерцовом диоде Шоттки

26



50x500x1000 нм

При облучении
сформировано
~ 5 кластеров
дефектов

