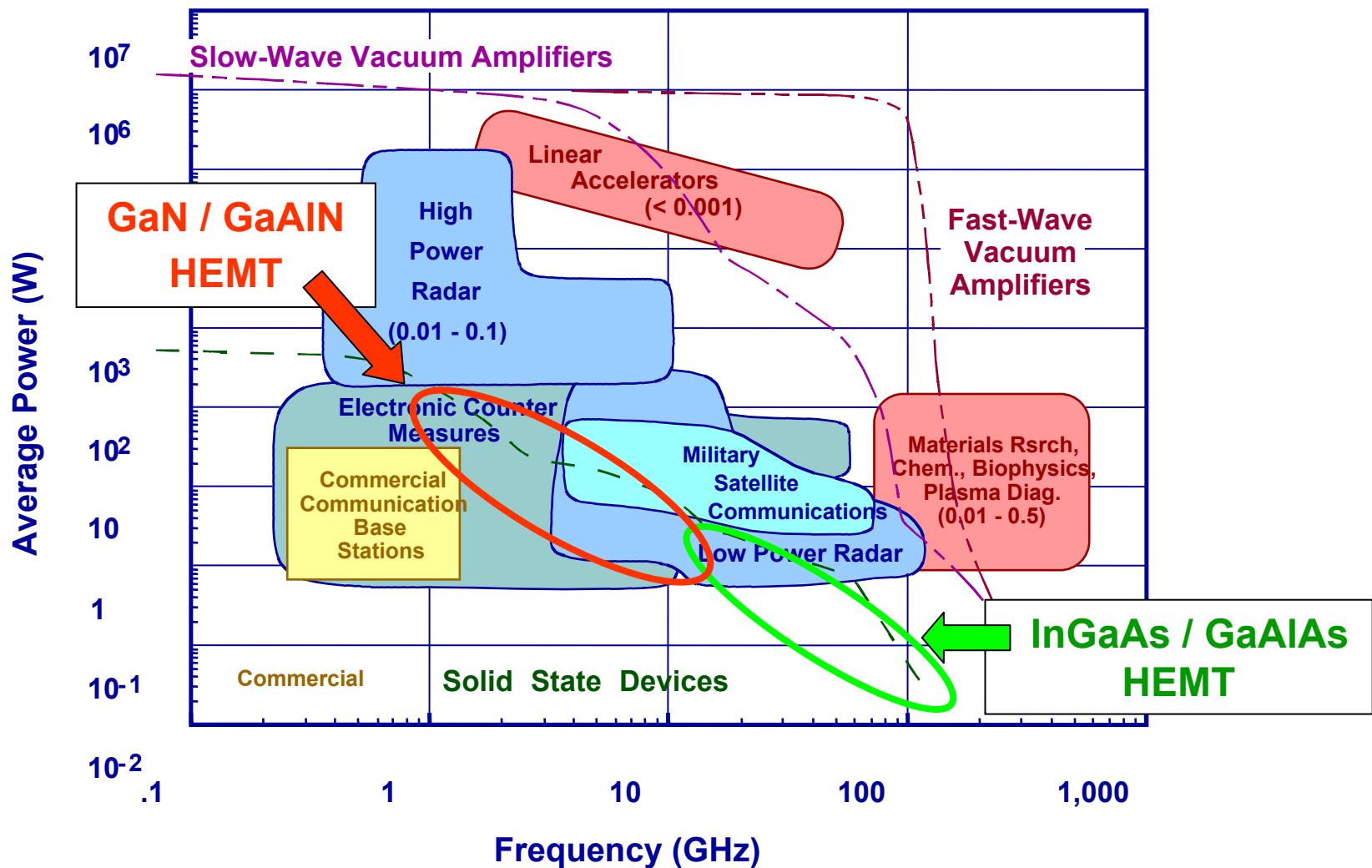


Полевые транзисторы с двумерным электронным газом

High electron mobility transistor
(HEMT)

Сергей Владимирович Оболенский
obolensk@rf.unn.ru

Область применения GaN и GaAs HEMT



Эксперимент – это «просто»!



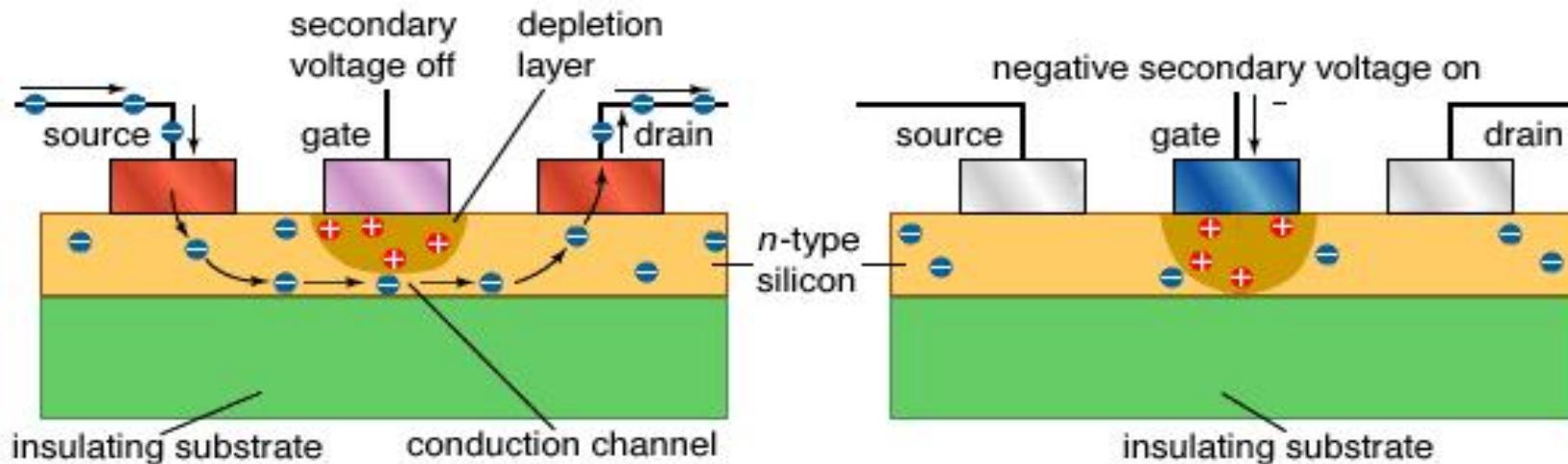
Первый транзистор



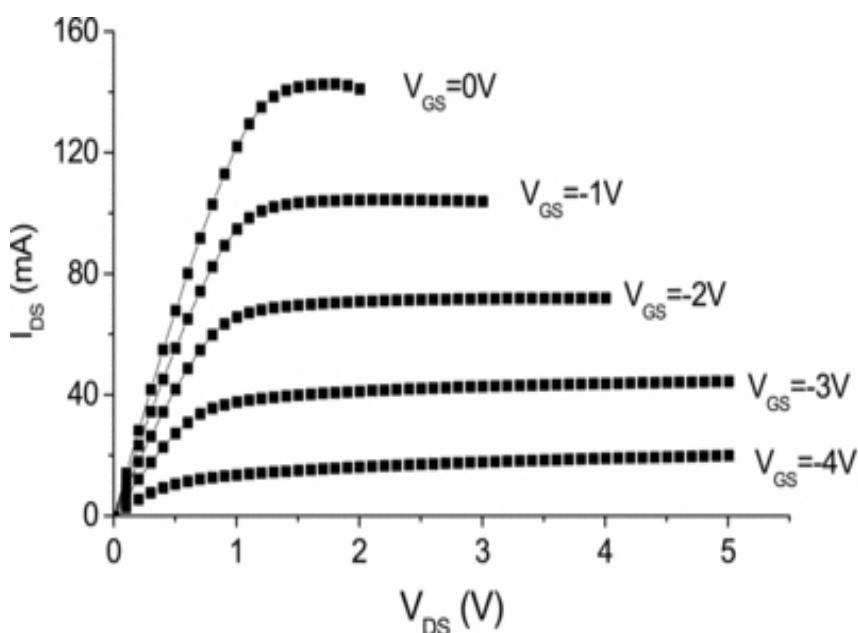
Уильям Шокли, Джон Бардин и
Уолтер Браттейн (1947 год)

НЕМТ изобретен в 1978...1980 гг.

Принцип работы полевого транзистора с затвором Шотки (MESFET)



© 2004 Encyclopædia Britannica, Inc.



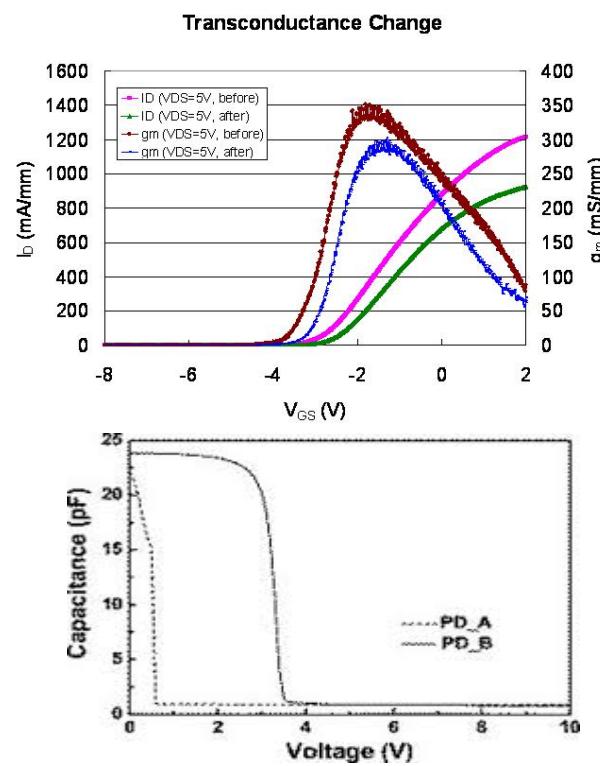
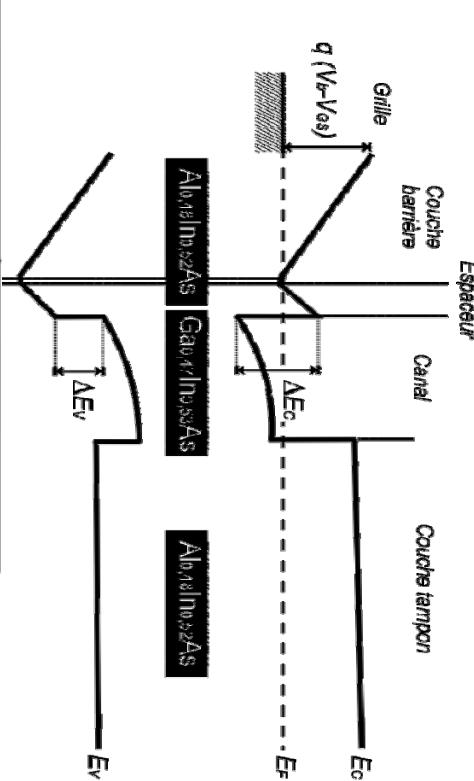
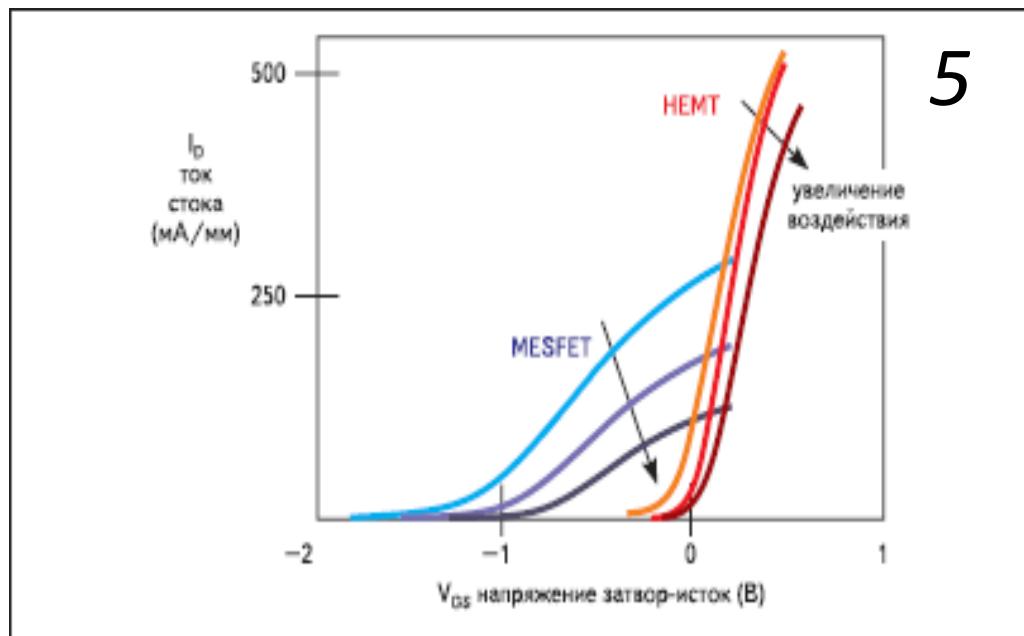
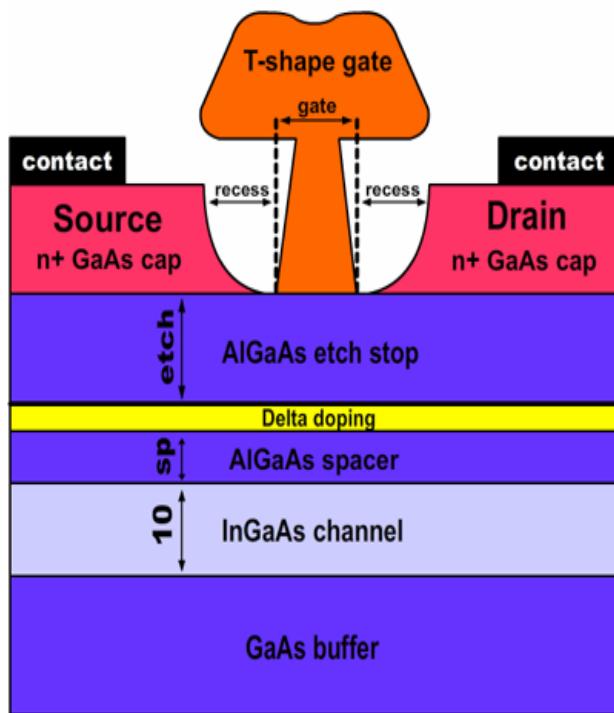
Крутизна ВАХ:

$$S = dI_s / dU_g$$

Коэффициент усиления по мощности:

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

Принцип работы НЕМТ



5

Путь от идеи до реализации

6

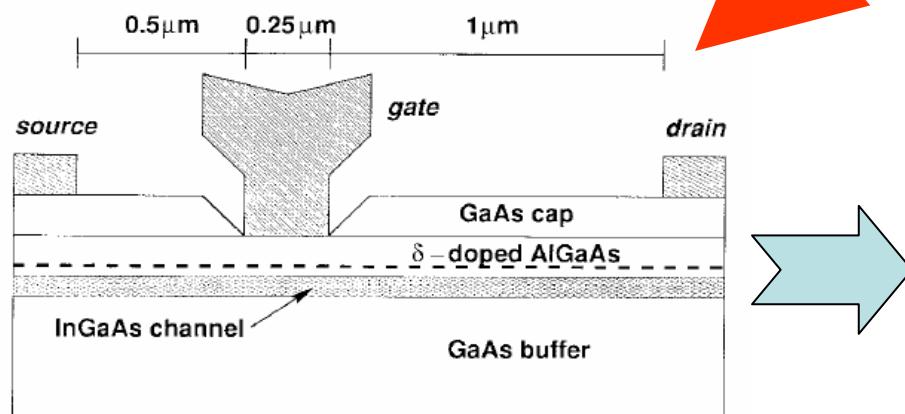
Принцип работы



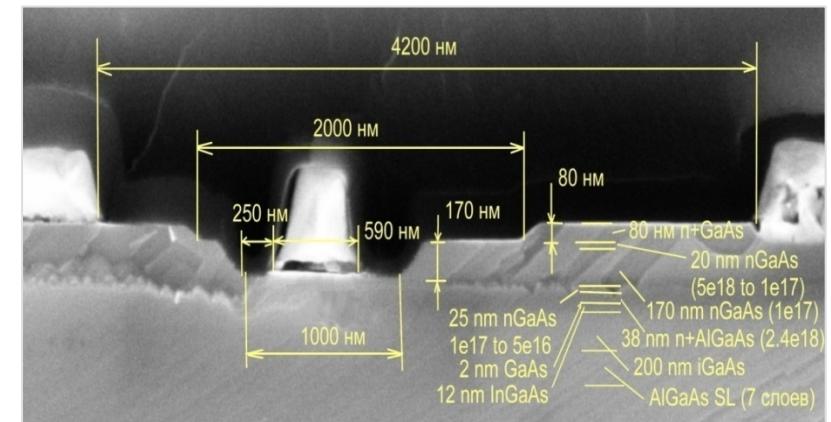
Проектирование



Рост + Литография



Результат



Длина затвора определяет параметры структуры!!!

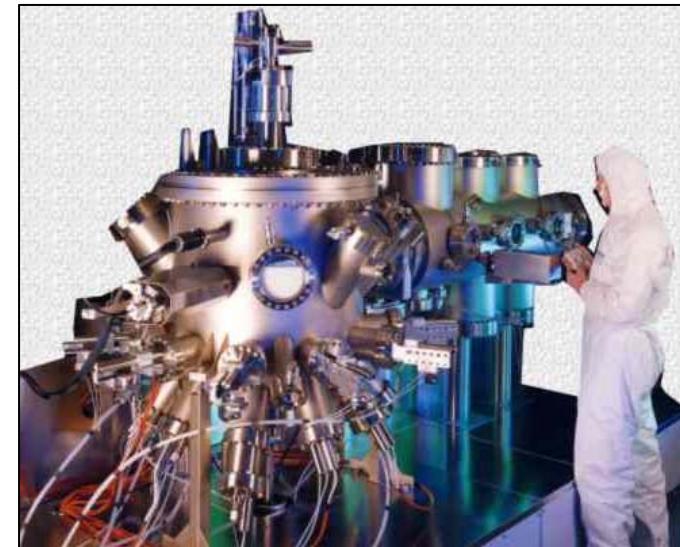
Технология «выпечки» НЕМТ структур

Полевой транзистор Шоттки
(MESFET)



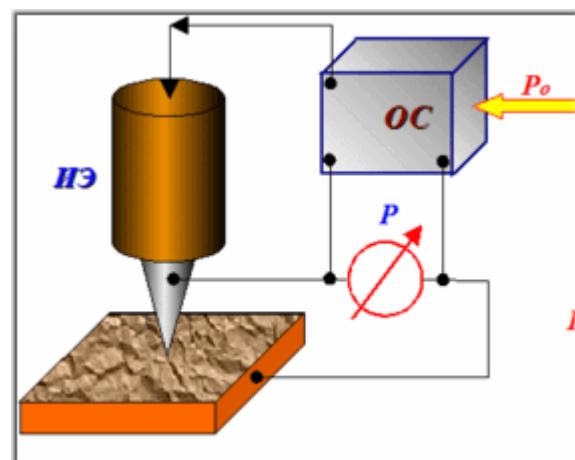
Толщины слоев $\sim 100 \pm 10$ нм
Концентрация доноров $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$
Подвижность ~ 3500 см 2 /Вс (300 К)
Скорость электронов в канале
 $\sim 10^7$ см/с

Полевой транзистор с двумерным
электронным газом (НЕМТ)



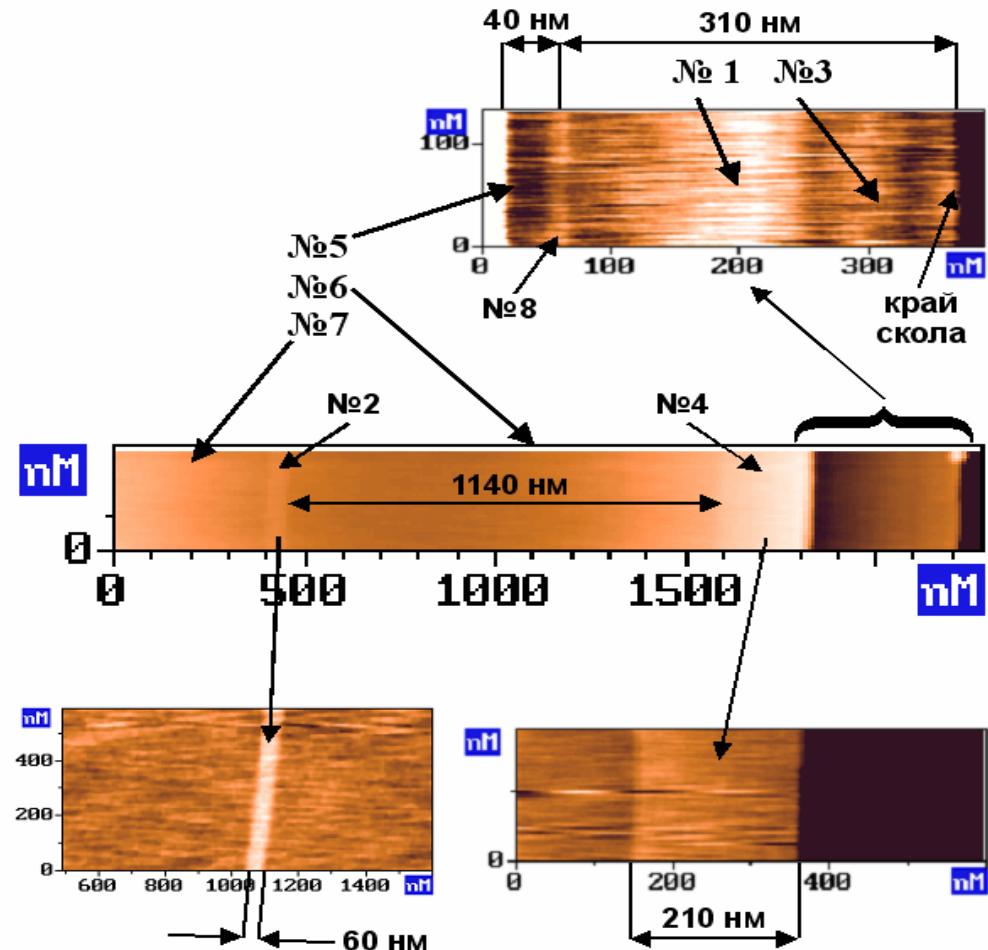
Толщины слоев ~ 10 нм ± 1 нм
Концентрация доноров $\sim 10^{18}$ см $^{-3}$
Подвижность ~ 6000 см 2 /Вс (300 К)
Скорость электронов в канале
 $\sim 10^8$ см/с

Экспериментальные методы анализа гетероструктур НЕМТ

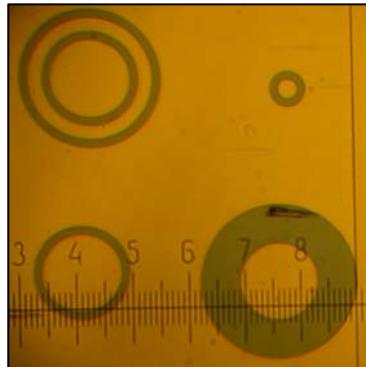


Зондовая микроскопия

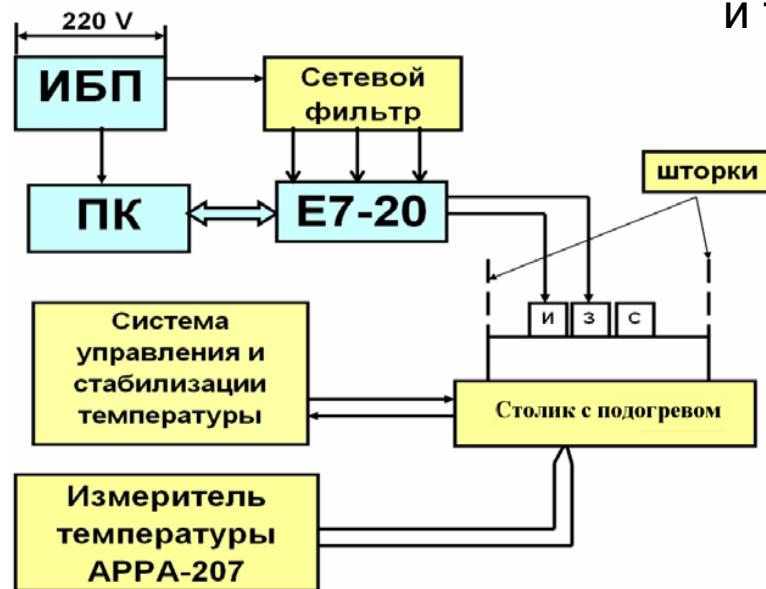
Микрорельеф скола полупроводниковой гетероструктуры ПТШ со встроенной сверхрешеткой полученный с помощью зондового микроскопа
(ИФМ РАН, г. Нижний Новгород)



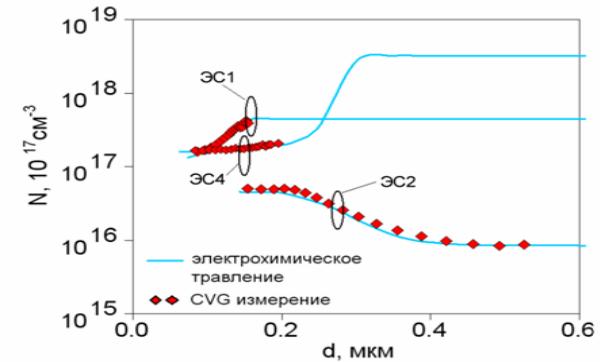
Экспериментальная установка для измерения параметров полупроводниковых структур



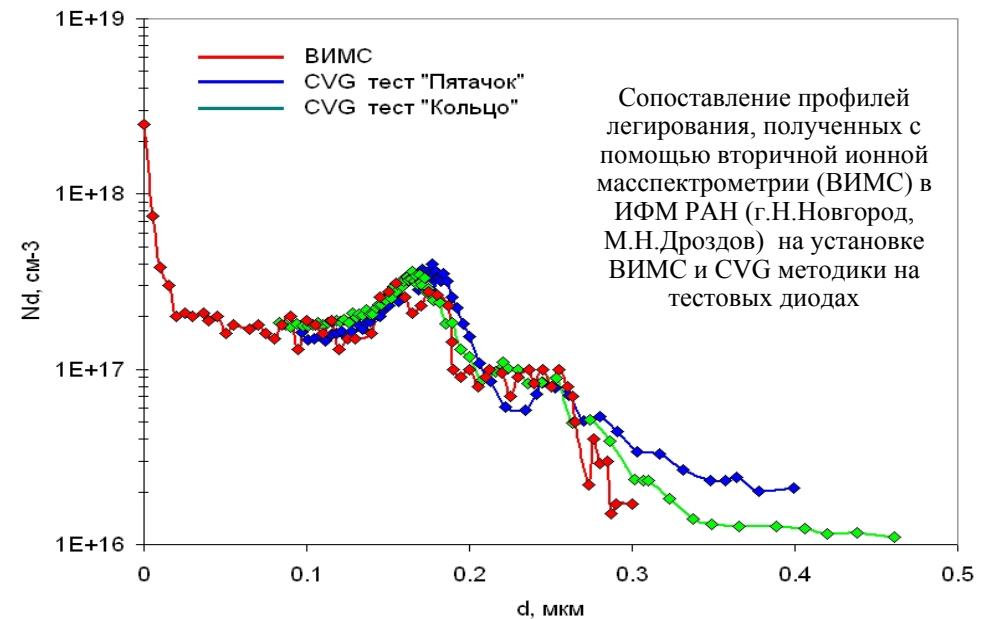
«Тестовые» диоды
и транзистор



Блок-схема измерительной
установки



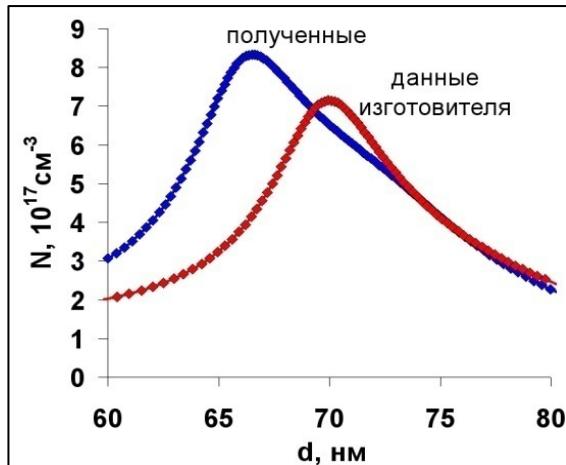
Сопоставление профилей легирования,
полученных с помощью
электрохимического профилирования
(ООО "СигмПлюс", г. Москва, оператор
Волков Н.А., установка ECVPro,
Nanometrics и CVG методики на тестовых
диодах



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

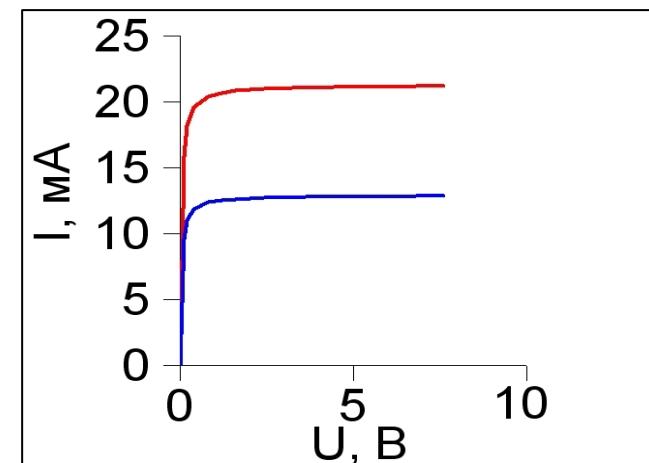
Результаты анализа структур

10



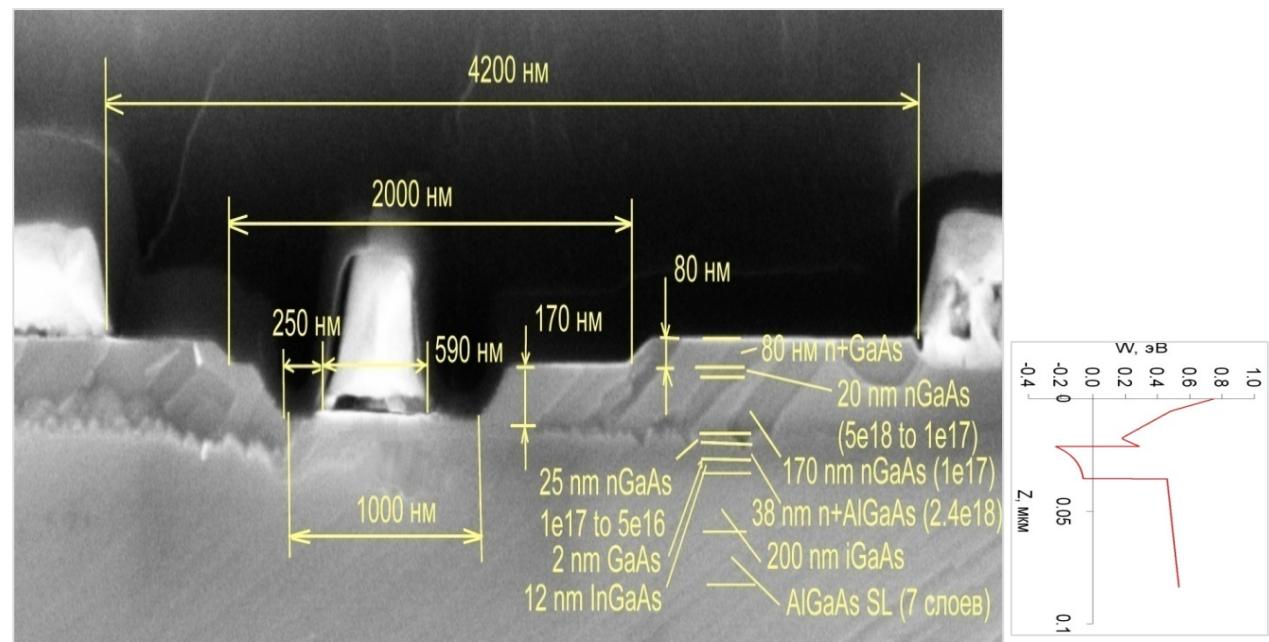
Профиль концентрации полупроводниковой структуры

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



Расчетные ВАХ НЕМТ

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

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

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

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

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

$$\mathbf{j}_t = \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{E}}{dt} \quad E = -\nabla V$$

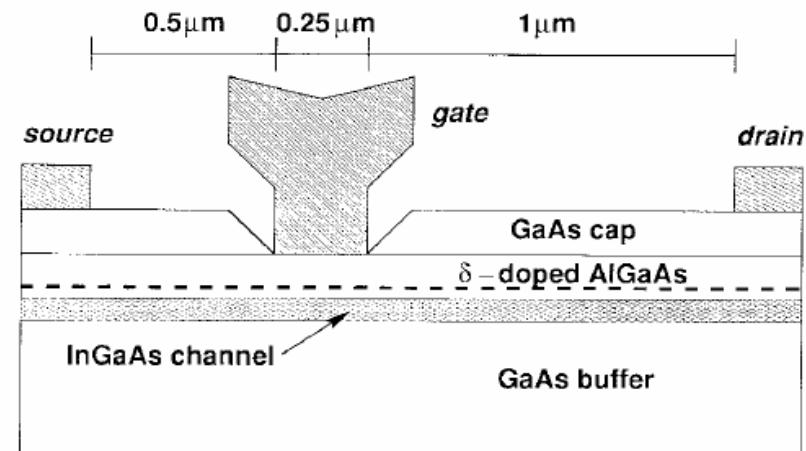
$$\frac{\partial(Wn(F_n))}{\partial t} = (\nabla, \mathbf{j}_w) + (\mathbf{j}_n, \mathbf{E}) + GW_e - \frac{n(F_n)(W - W_0)}{\tau_w(F_n)}$$

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

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

где V – потенциал; n - концентрация электронов; N_+ , N_- - концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (доноров, акцепторов, радиационных дефектов); \mathbf{j}_n , \mathbf{j}_w - 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; 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);

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

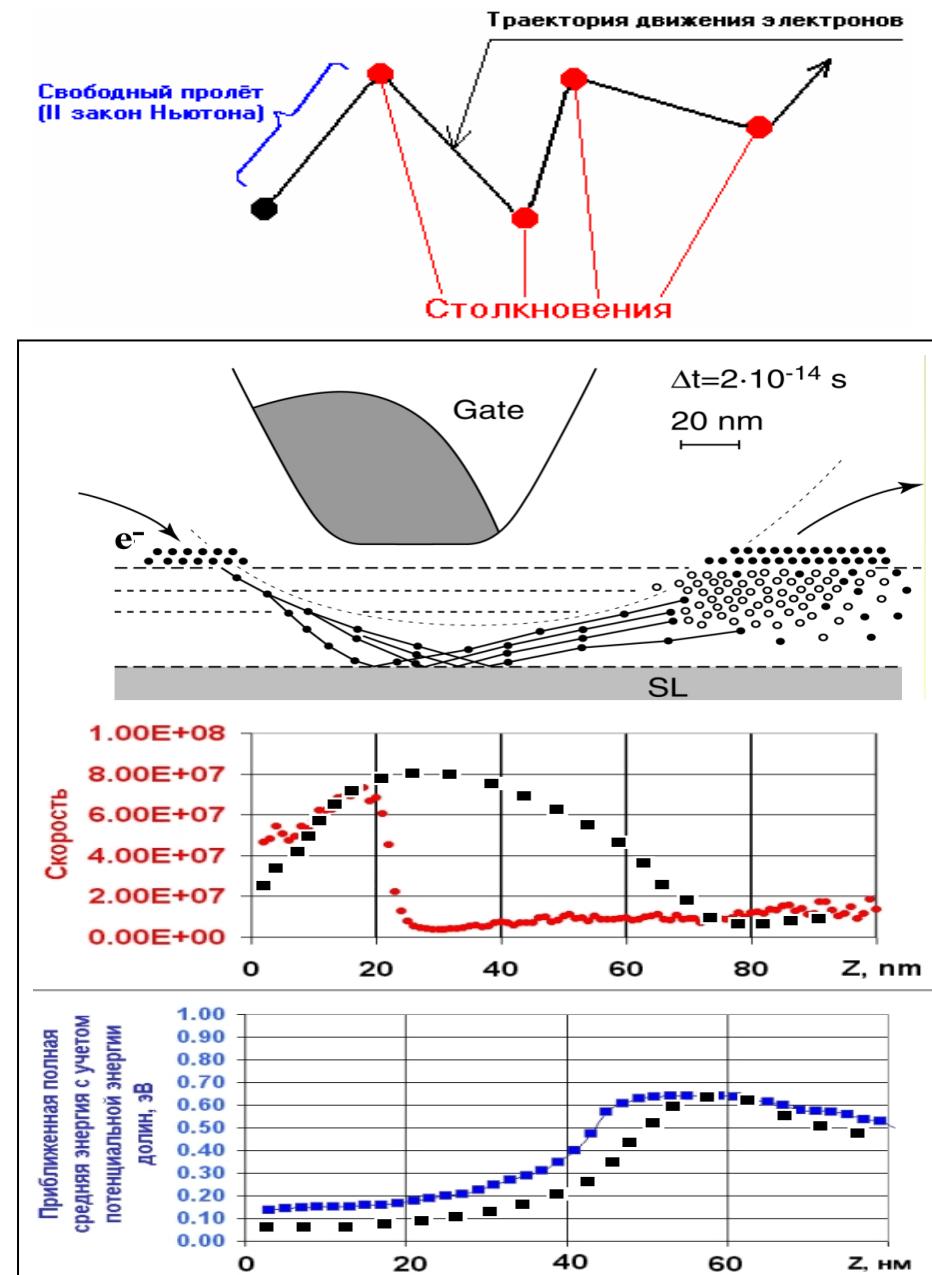


ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ СМЕШАННОГО ТИПА:

- 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

Моделирование полевого транзистора методом Монте-Карло

12

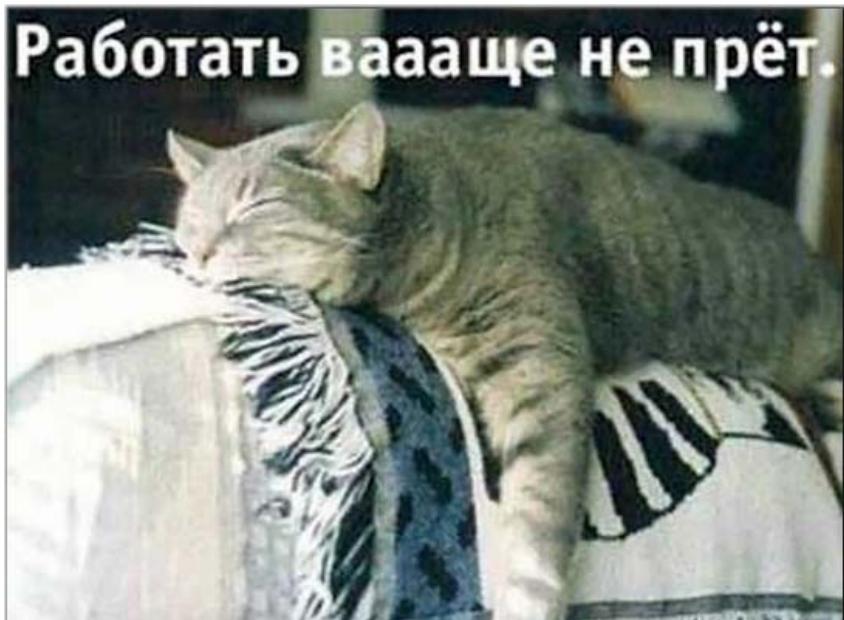


Какой вычислительный метод лучше?

13

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

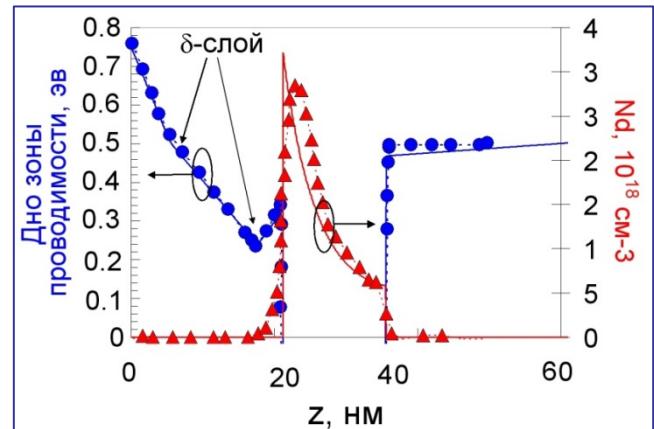
Квазигидродинамика
(TCAD)



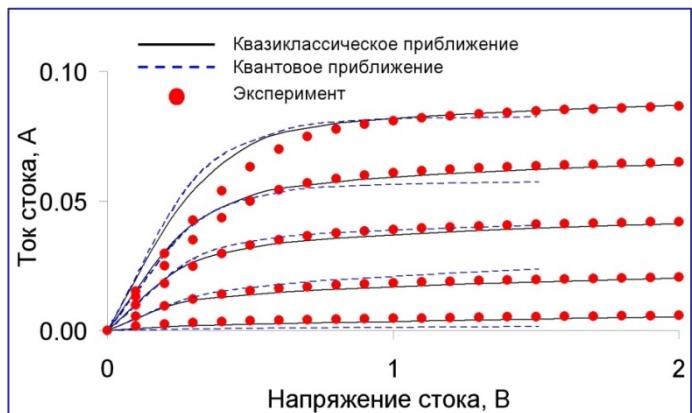
Метод Монте-Карло



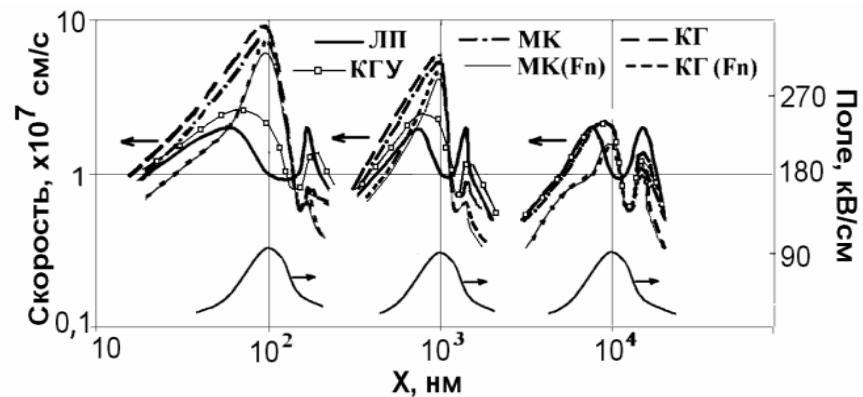
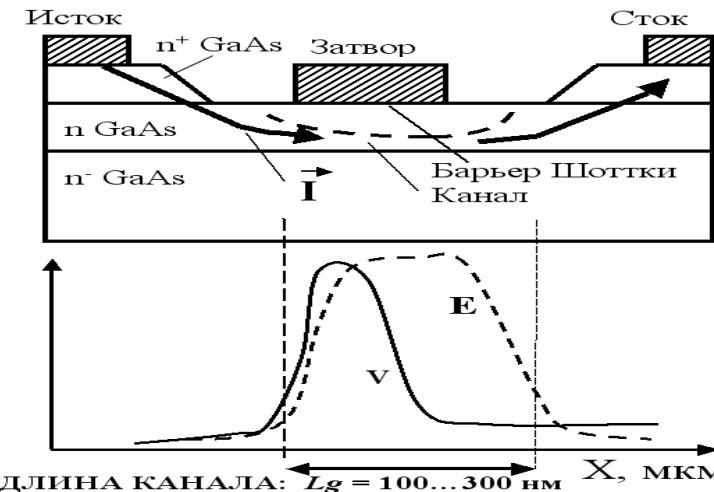
Результаты численных расчетов электрофизических параметров НЕМТ



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



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

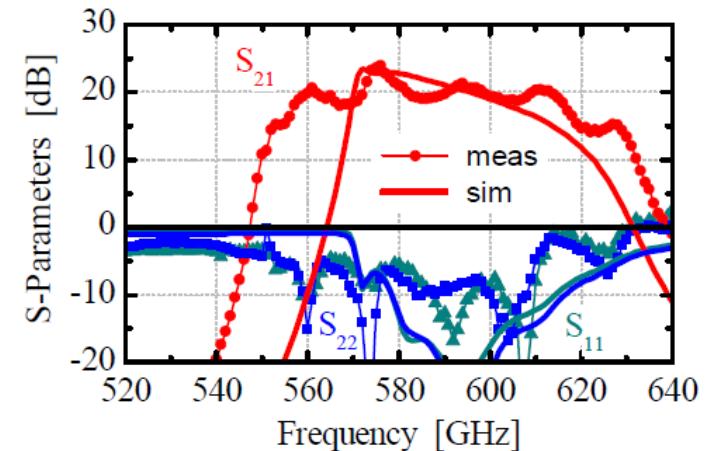
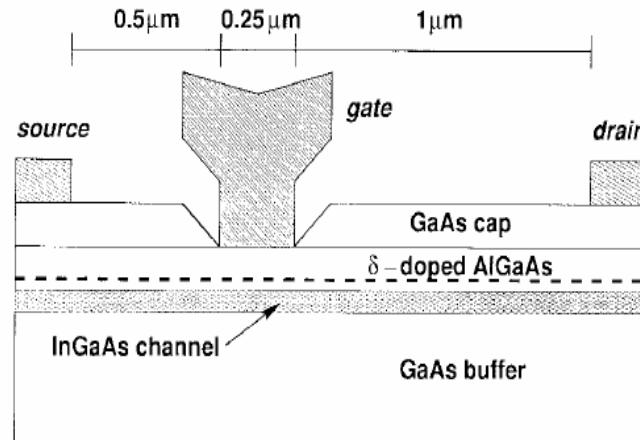


Оболенский С.В. Предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближения при расчетно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов // Изв. вузов: Электроника. - 2002. - № 6. - С. 31-38.

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



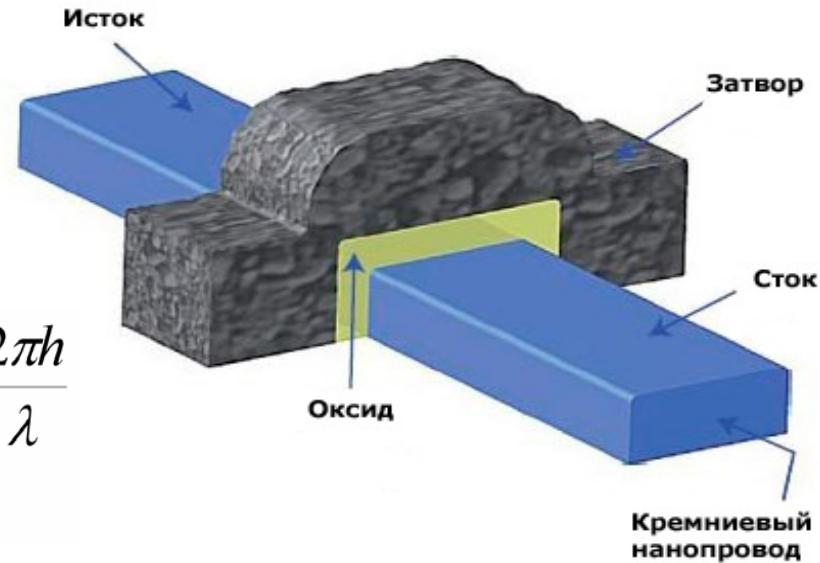
Michael Schlechtweg, Axel Tessmann, Arnulf Leuther, Hermann Massler, Sandrine Wagner, Rolf Aidam, Josef Rosenzweig, Oliver Ambacher Millimeter- and Submillimeter-Wave Monolithic Integrated Circuits Based on Metamorphic HEMT Technology for Sensors and Communication



**Сечение
нанопровода
10x10 нм !!!**

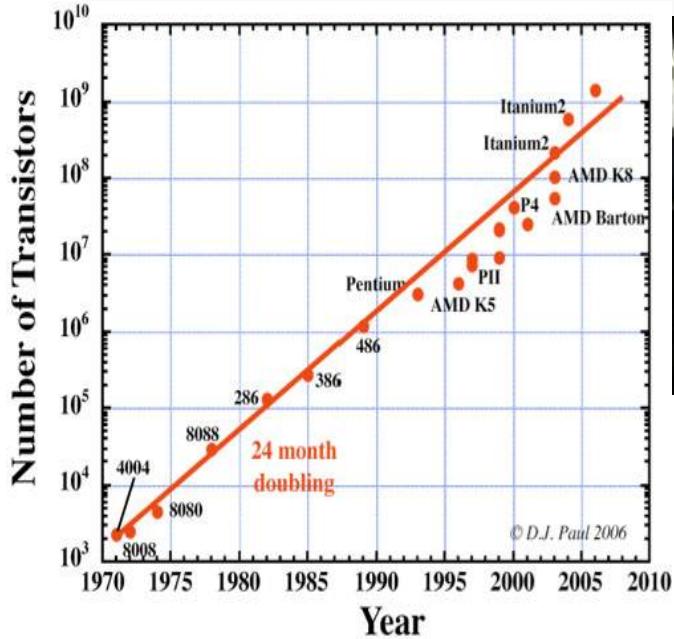
$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT; \quad mv = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$$

$$\lambda = 10 \dots 20 \text{ нм}$$



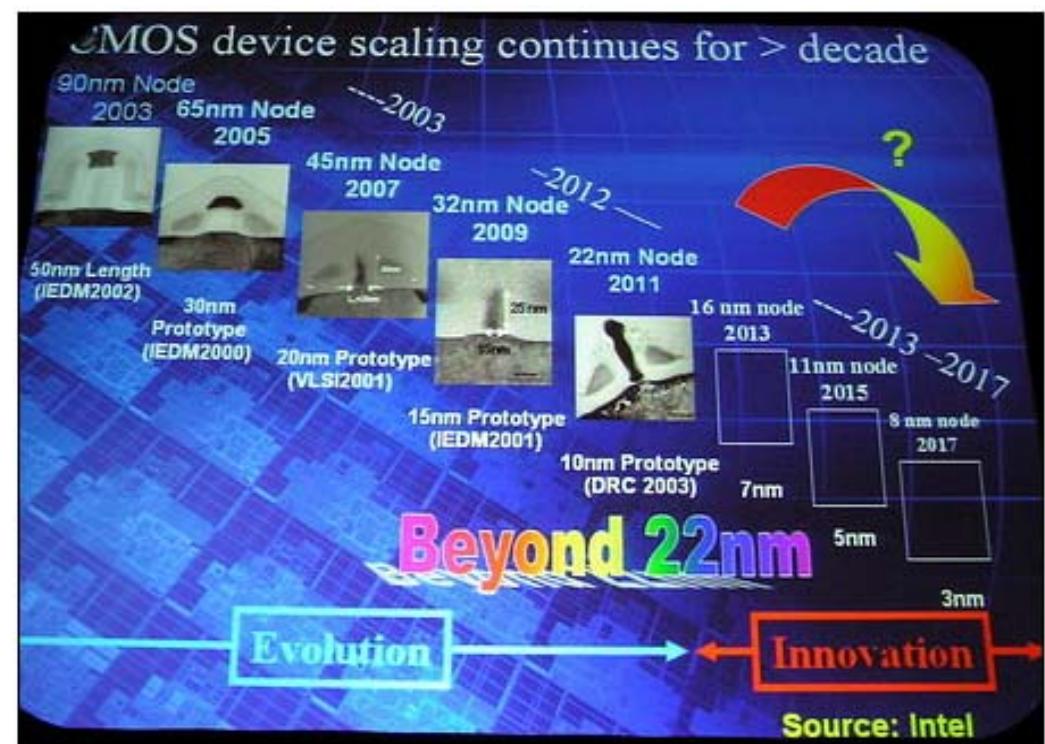
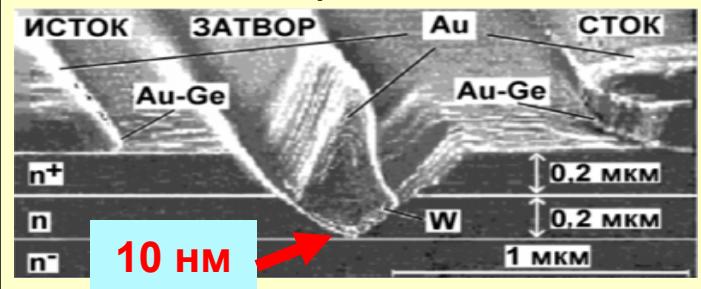
Закон Мура и кризис технологии «обычных» транзисторов

16

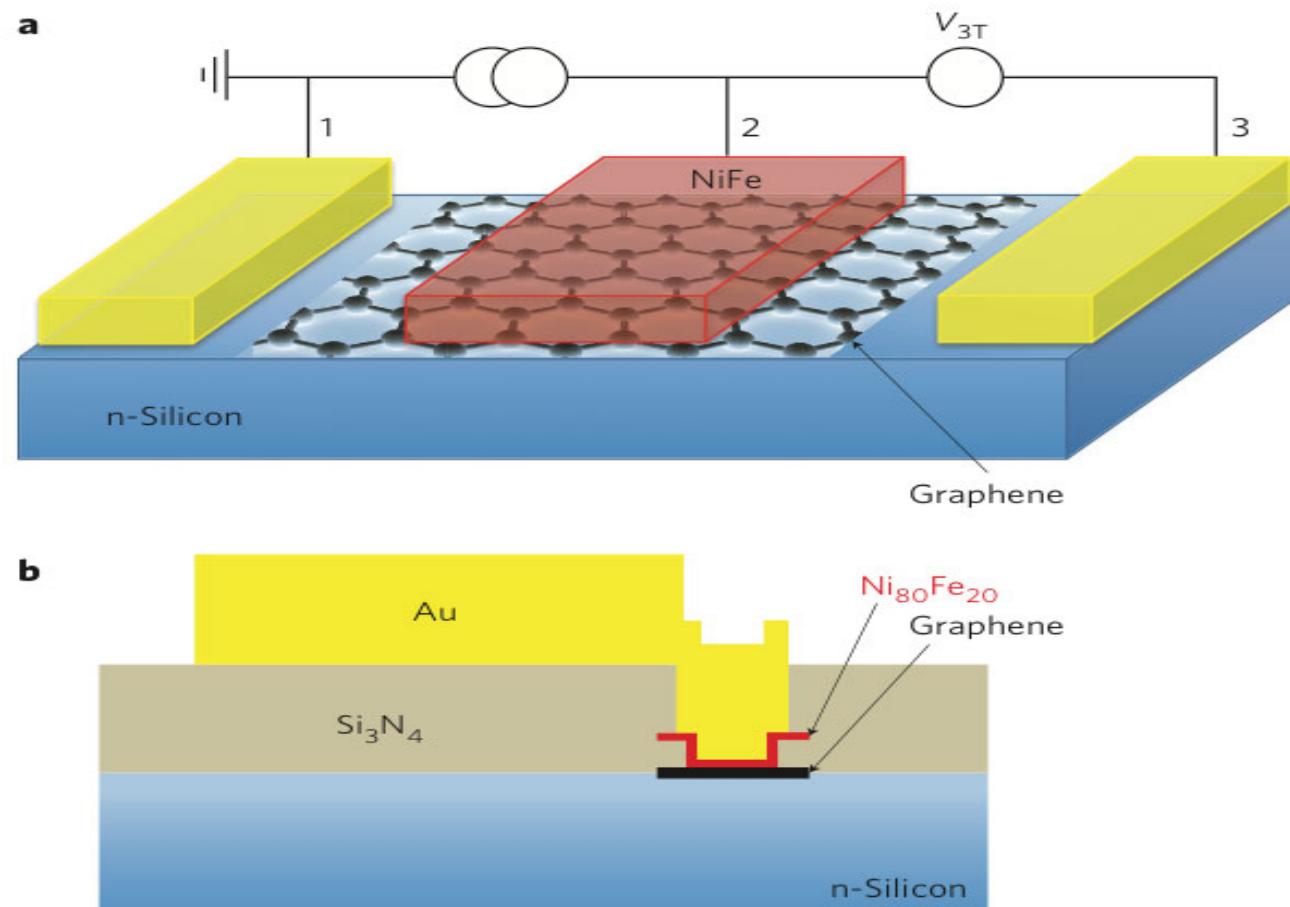


На счет котов Шредингер
был не прав...

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

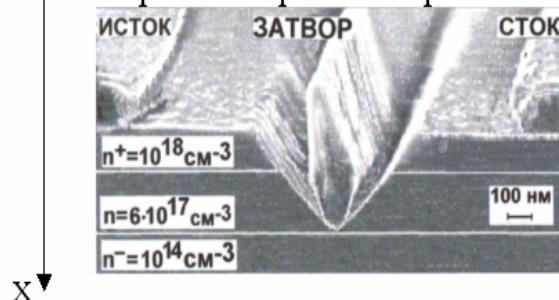
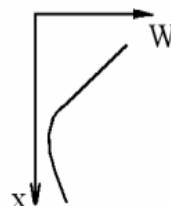


Рис. 2. Профиль дна зоны проводимости

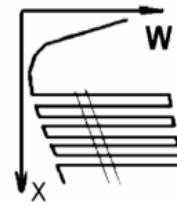
Гомополевой транзистор (GaAs буфер)



Гетерополевой транзистор (AlGaAs буфер)

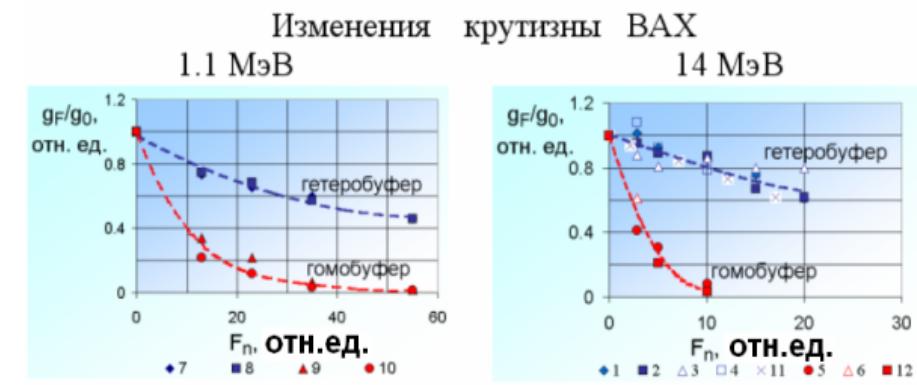
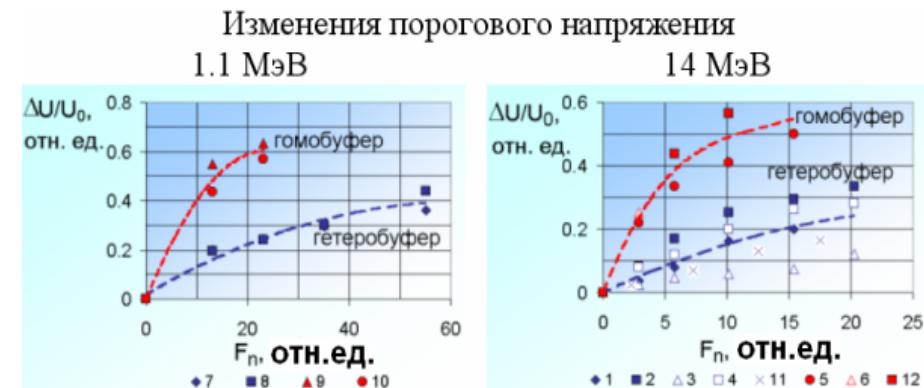


Гетерополевой транзистор (GaAs/AlAs буфер из сверхрешетки)



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

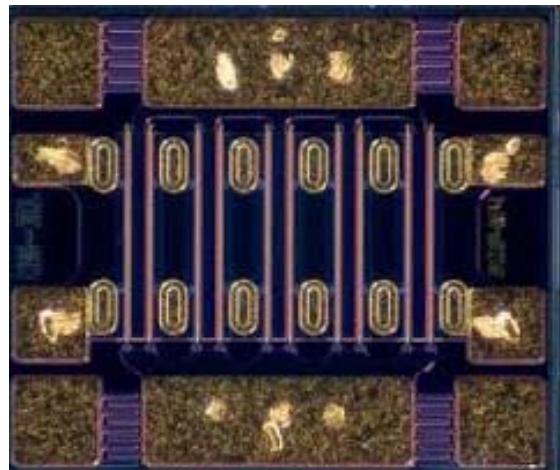
[5] Волчков Н. А., Журавлев К. С., Китаев М. А., Козлов В. А., Оболенский С. В., Торопов А. И., Трофимов В. Т. Детектирование оптического излучения полевым транзистором со встроенной сверхрешеткой / Известия академии наук. Серия физическая, 2004, т. 68, № 1.



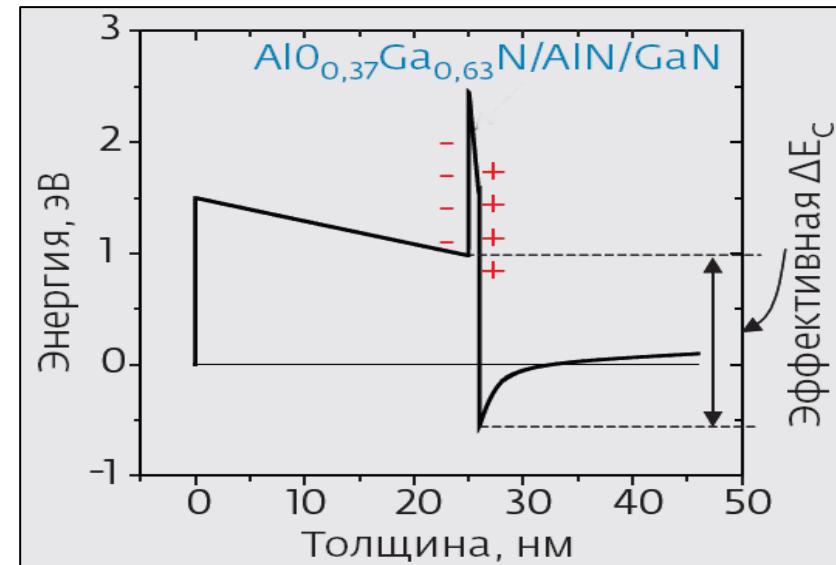
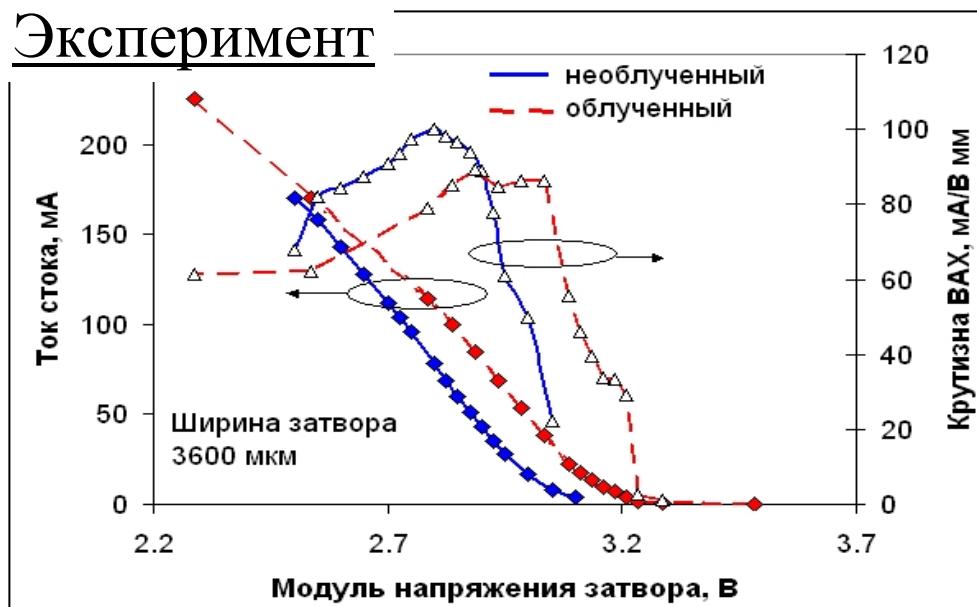
Киселева Е.В., Оболенский С.В., Китаев М.А., В.Т.Трофимов Радиационная стойкость квазибаллистических полевых транзисторов Шоттки с различными конструкциями буферного слоя при воздействии нейтронного облучения разных спектров // ПЖТФ, 2005. №20. С. 58 – 64

Чувствительность GaN НЕМТ к радиационному воздействию

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



Фирма Cree,
США



Н.В. Басаргина, И.В. Ворожцова, С.М. Дубровских, О.В. Ткачёв, В.П. Шукайло, Е.А. Тарасова, А.Ю. Чурин, 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!

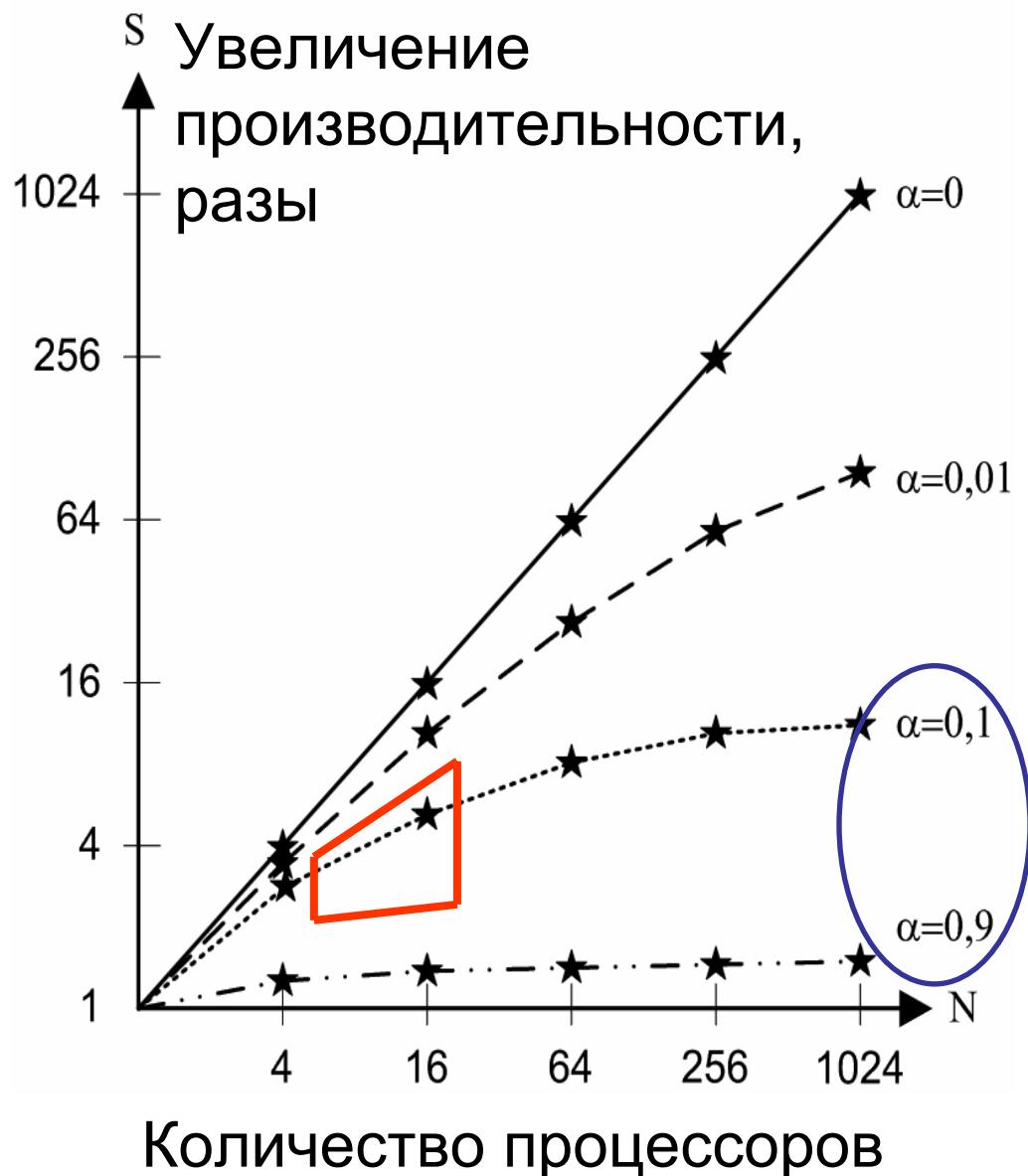
**Наши публикации по теме доклада
можно найти на сайте кафедры электроники ННГУ**
www.rf.unn.ru/eledep/publications/publications.html
www.rf.unn.ru/eledep/publications/favo_obolensk.html

Проблемы ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

21



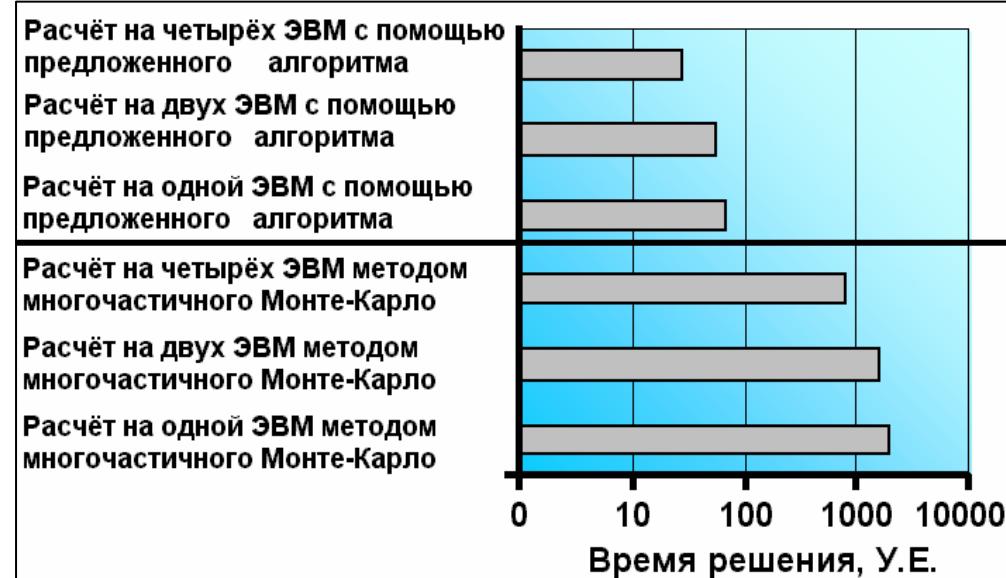
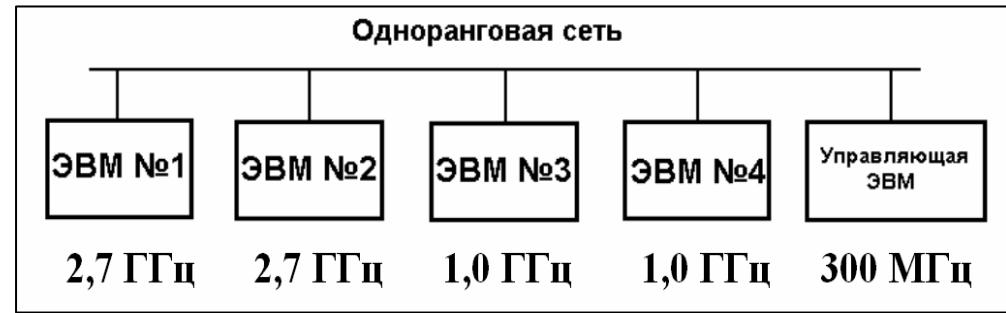
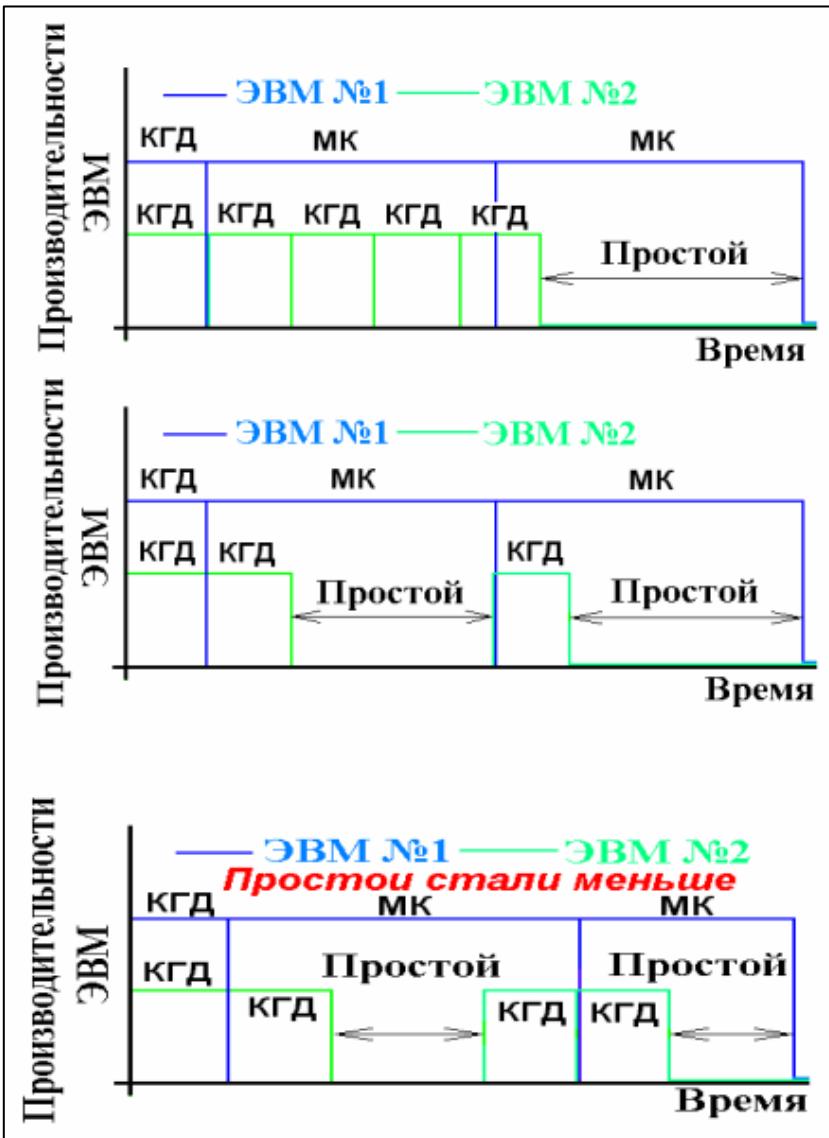
Следствие закона Амдала



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

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

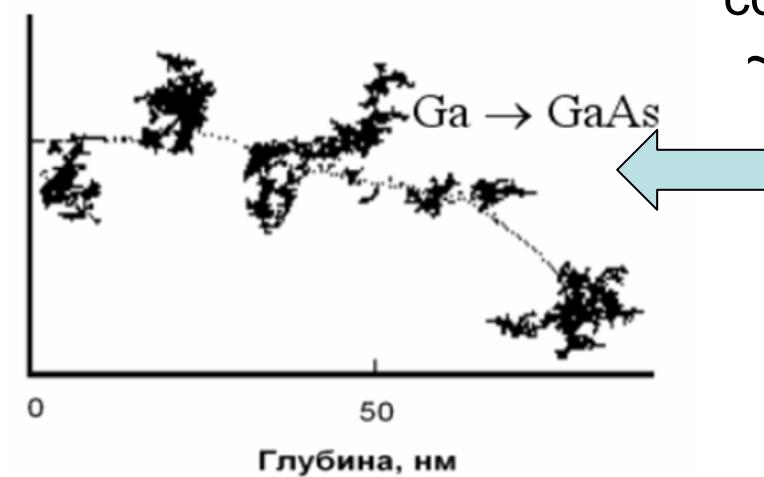
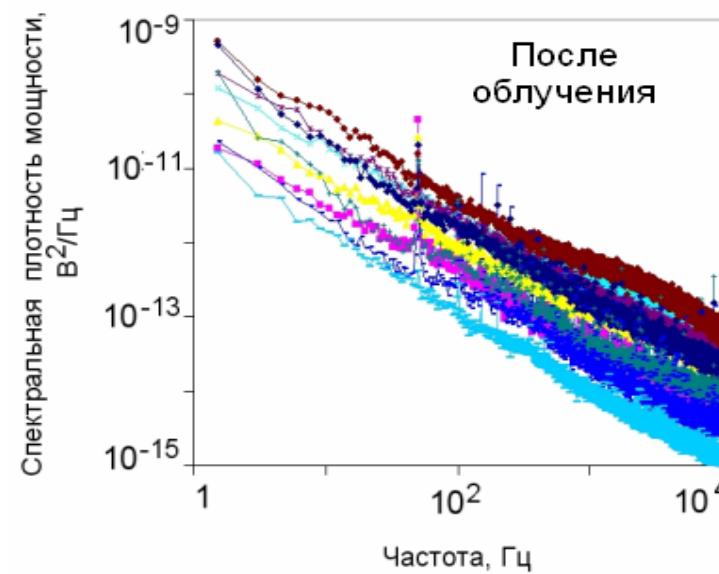
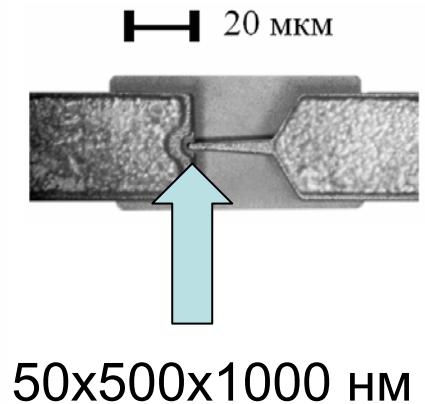
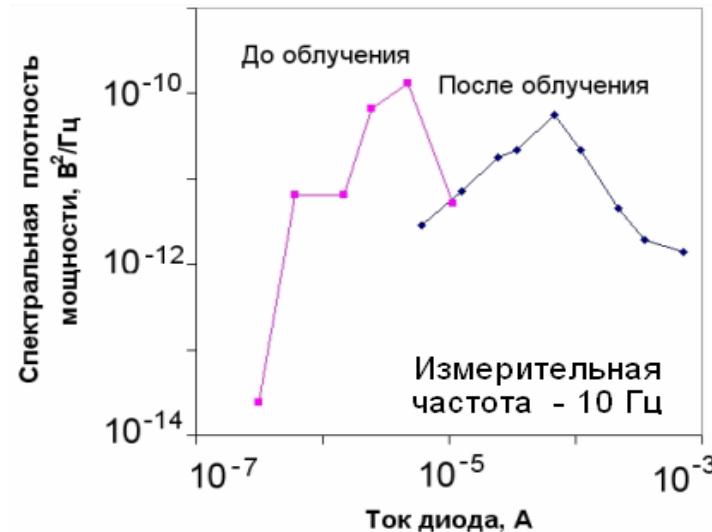
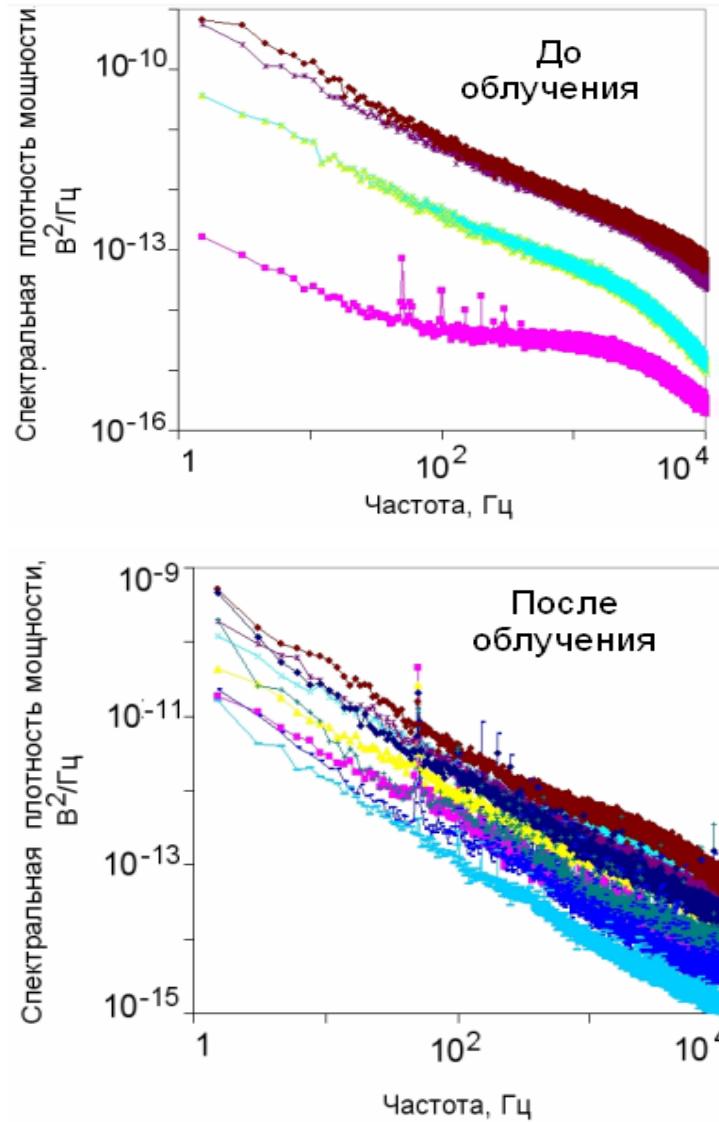
Результаты сравнения производительности

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



При облучении сформировано
~ 5 кластеров дефектов