

Приборы на нитридах третьей группы

На основе докладов С . Шаповала на
WOCSDICE 2002-2006,
Симпозиумах «Наноструктуры: физика и технология»
И доклада М. S. Shur на WOCSDICE 2004

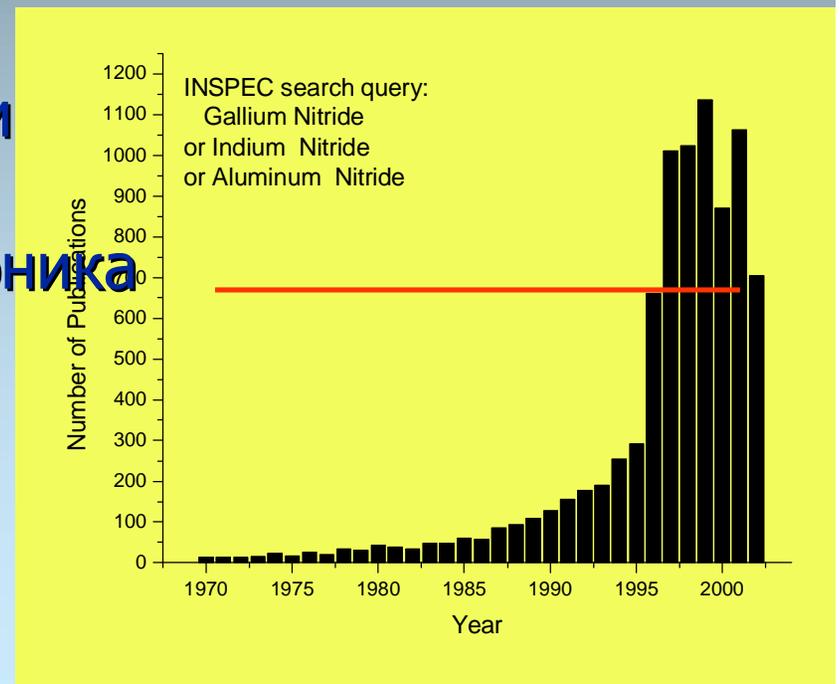


Содержание

- n Потенциальные применения
- n Новая физика приборов
- n Транзисторы
- n Электронные приборы на плазменных волнах
- n Фотодетекторы и приборы на ПАВ
- n Ультрафиолетовые светодиоды
- n Твердотельные источники света

Возможные и реализованные применения приборов на нитридах

- n Голубой, зеленый, белый свет и УФ источники
 - n Светофоры
 - n Дисплеи
 - n Стерилизация воды, еды, воздуха и определение биологических веществ and detection of biological
 - n Твердотельные источники света
- n Visible-blind and solar-blind photodetectors
- n Мощные СВЧ генераторы
- n Мощные и СВЧ переключатели
- n Беспроволочная связь
- n Высокотемпературная электроника
- n ПАВ и акустоэлектроника
- n Пироэлектрические сенсоры
- n Терагерцовая электроника
- n Non volatile memories

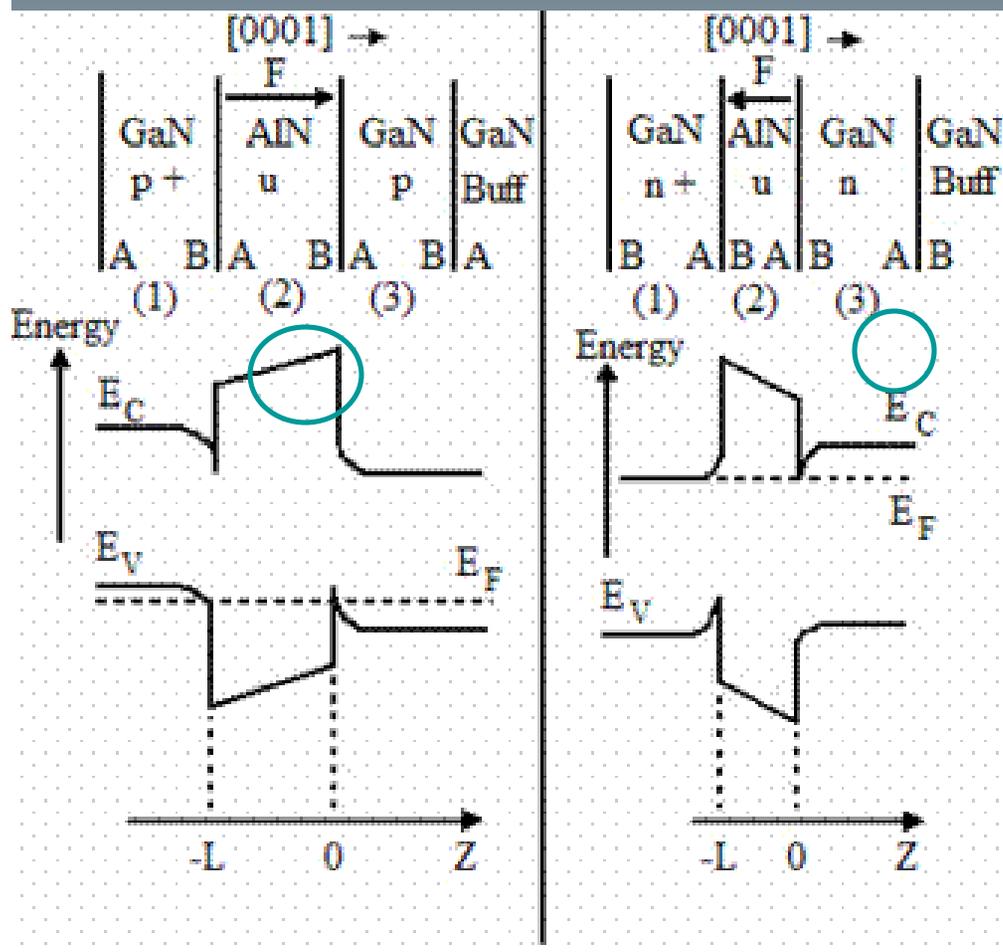


Биотехнические и медицинские применения

- UV detection of biological hazards
- УФ для источников воды, воздуха, обработки пищи
- Фотосинтез для сельского хозяйства
- Phototherapy of Neonatal Jaundice
- Освещение операционных
- Visual stimuli for electroencephalography and electroretinography
- Capillaroscopy
- Optical-transmission monitoring of arterial oxygen
- Photodynamic Therapy
- Phototherapy of Seasonal Affective Disorder
- Photopolymerization of Dental Composites
- Photobioreactors

Нитриды: новая симметрия, новая физика

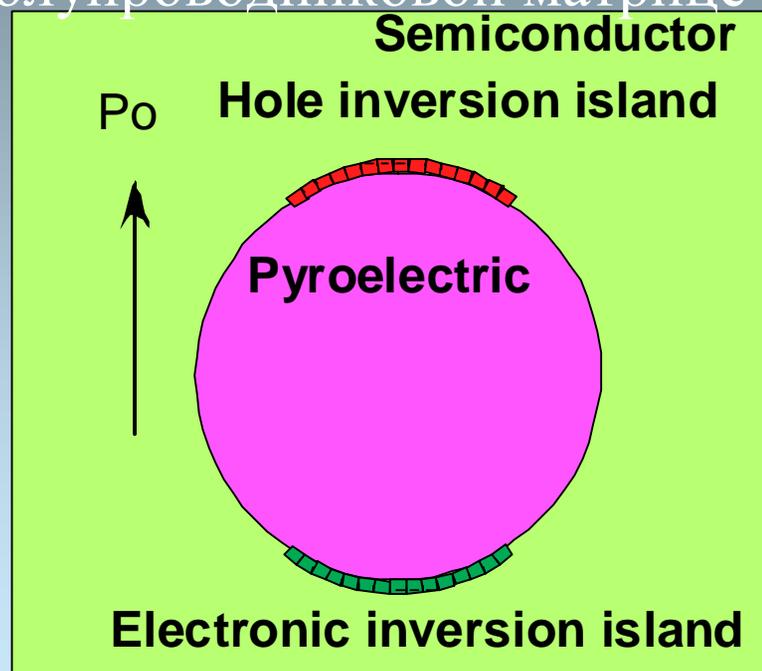
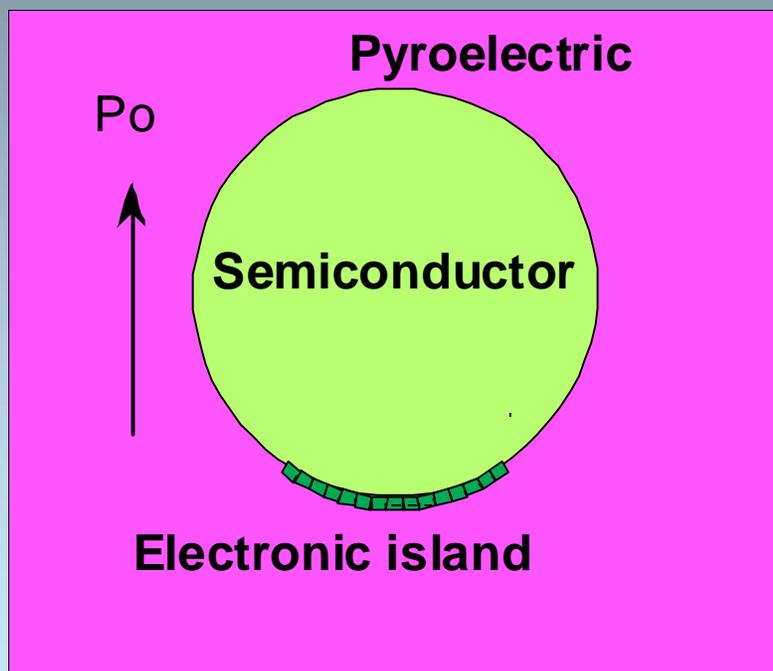
Гетероструктуры на нитридах третьей группы: Индукцированный поляризацией двумерный газ электронов и дырок



Электронные острова на поверхности полупроводниковых зерен в пирозлектрических матрицах

(MQDs – Перемещаемые квантовые точки)

Инверсионные электронные и дырочные острова пирозлектрических зерен в полупроводниковой матрице



Управление внешним полем – 0-мерный полевой эффект (НПЭ)

Новые особенности электронного транспорта в нитридах третьей группы

- n Large polar optical phonon energy leads to two step scattering optical photon absorption and re-emission resulting in an elastic scattering process
- n В высоких электрических полях вылет электронов играет ключевую роль [2]. Эффект вылета усиливается в 2-мерном электронном газе
- n В короткоканальных структурах на основе нитридов, с уверенностью предсказываются баллистики и овершут

1.

Новая физика 2-мерного транспорта

- н Скорость в высоких полях меньше, чем в твердом теле (из-за вылета электронов)
- н Impact ionization in quantum well is determined by cladding layers

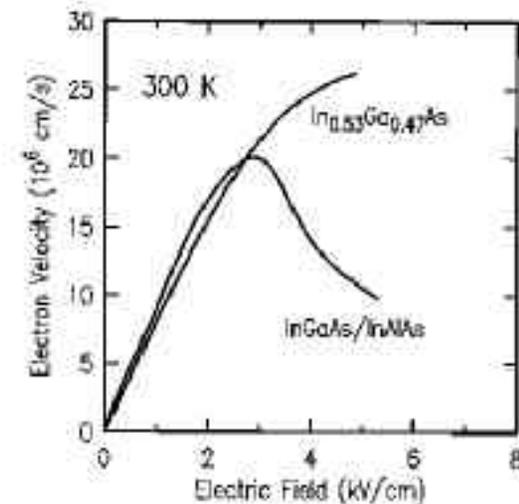
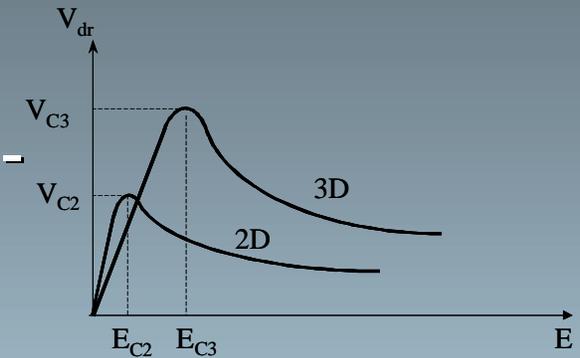


FIG. 2. Comparison of electron velocity in lightly doped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ with that in a $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ modulation-doped heterostructure.

ПТШ на нитридах – прогнозы и проблемы

Прогнозы

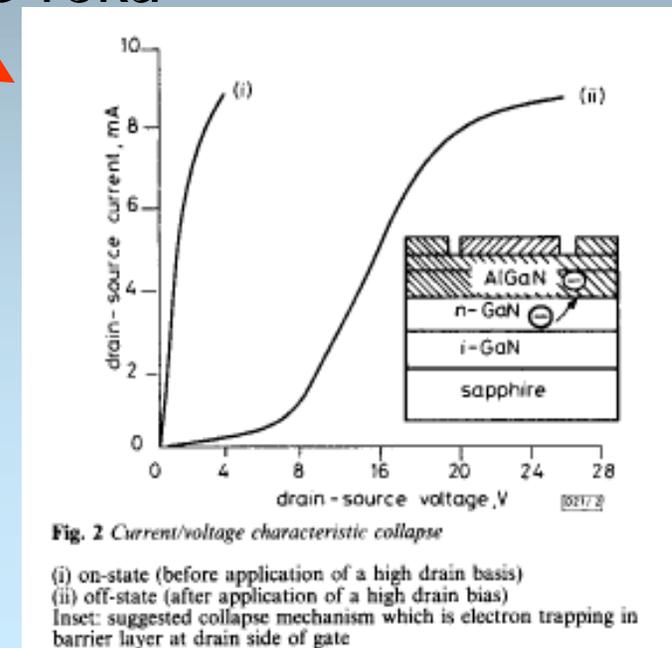
- n 30 Вт/мм на 10 ГГц вместо 1.5 Вт/мм
- n > 300 Вт на кристалл

Проблемы – диод Шоттки мало пригоден

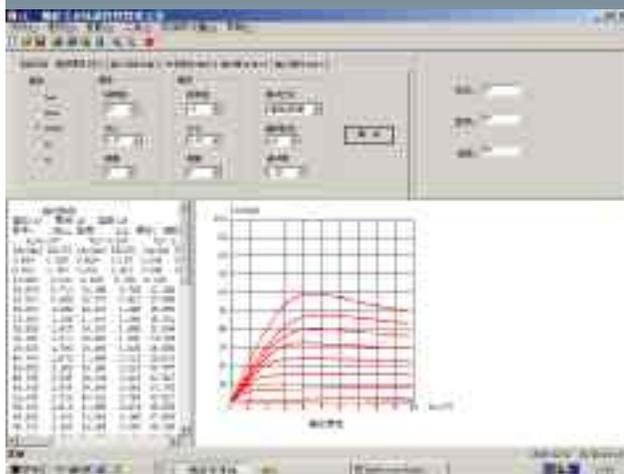
- n Утечки затвора
- n «Защелкивание» затвора и коллапс тока
- n Надежность
- n КПД и выход годных

Решение проблем

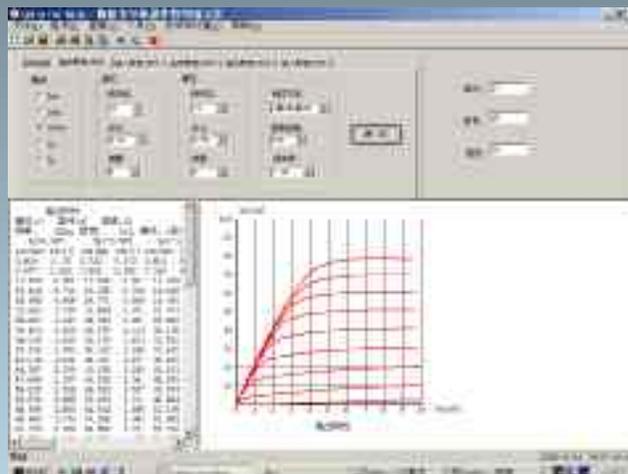
- n Strain energy band engineering
- n MEMOCVDtm
- n Изолированный затвор



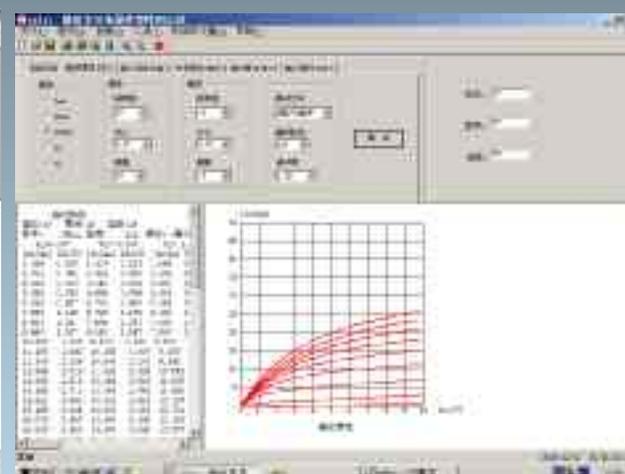
Коллапс тока



**На постоянном
токе**



**Импульсные (2 КГц)
измерения без
смещения**



**Импульсные (2 КГц)
измерения со
смещением**

Эпитаксия

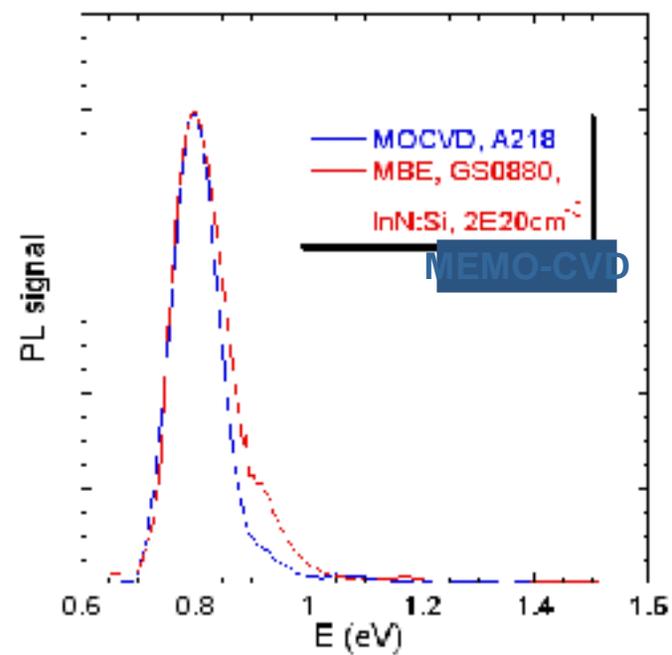
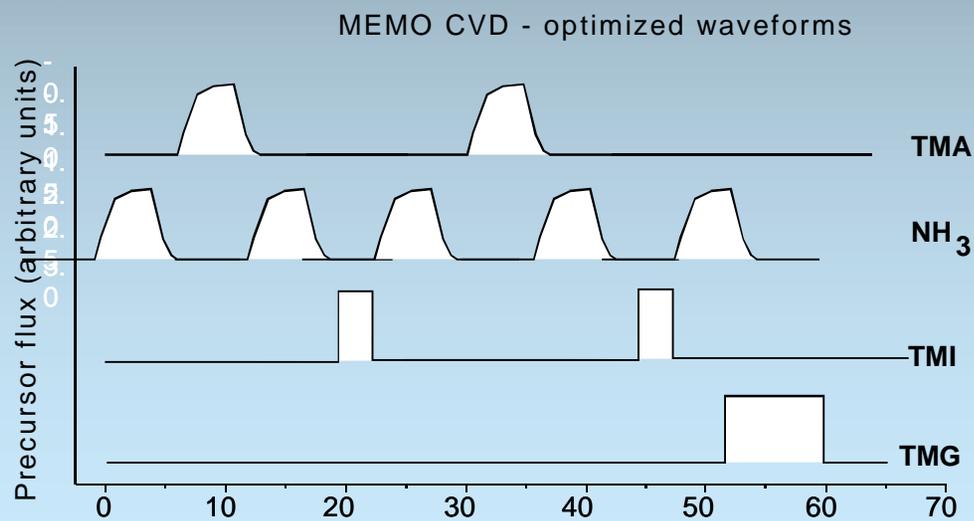
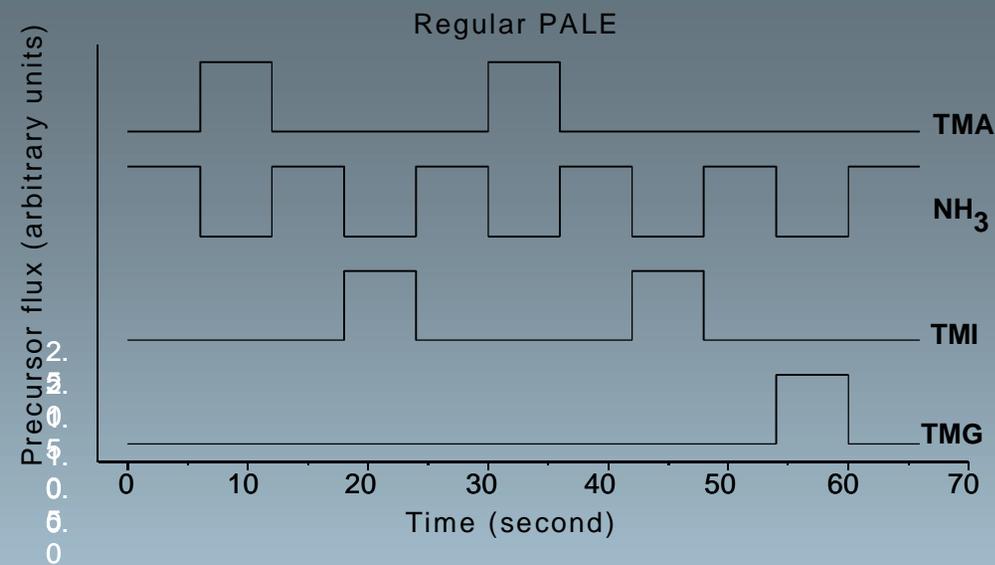
МЛЭ-аммиачная

МОС-аммиачная

МОС-азотная
(плазма)

МЛЭ-
плазменная

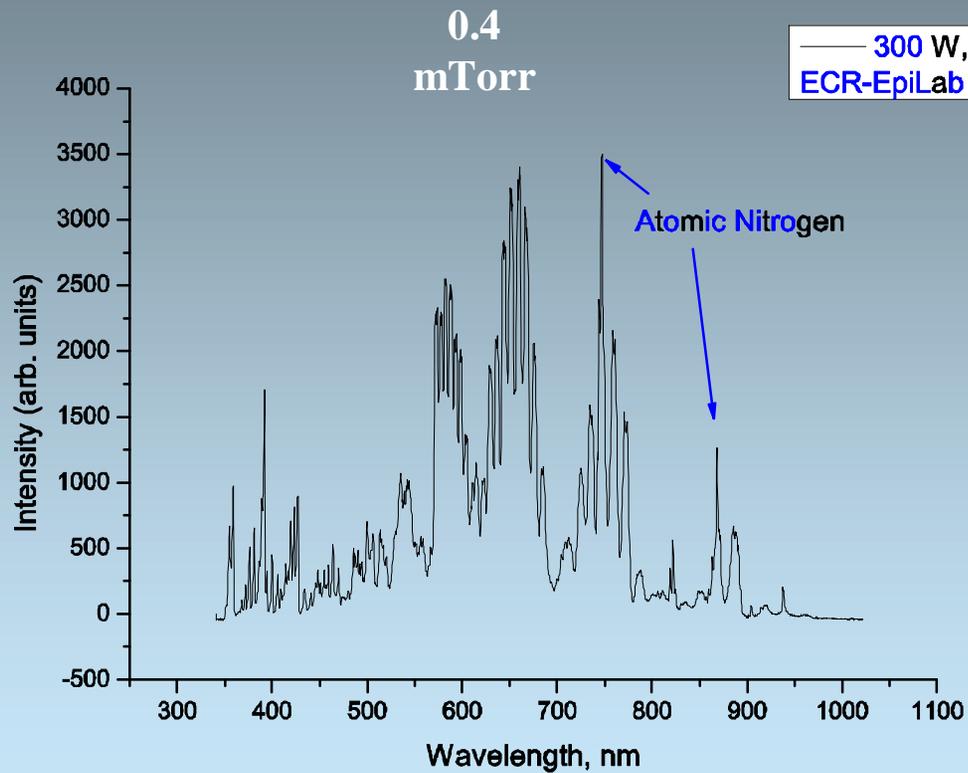
Импульсная эпитаксия



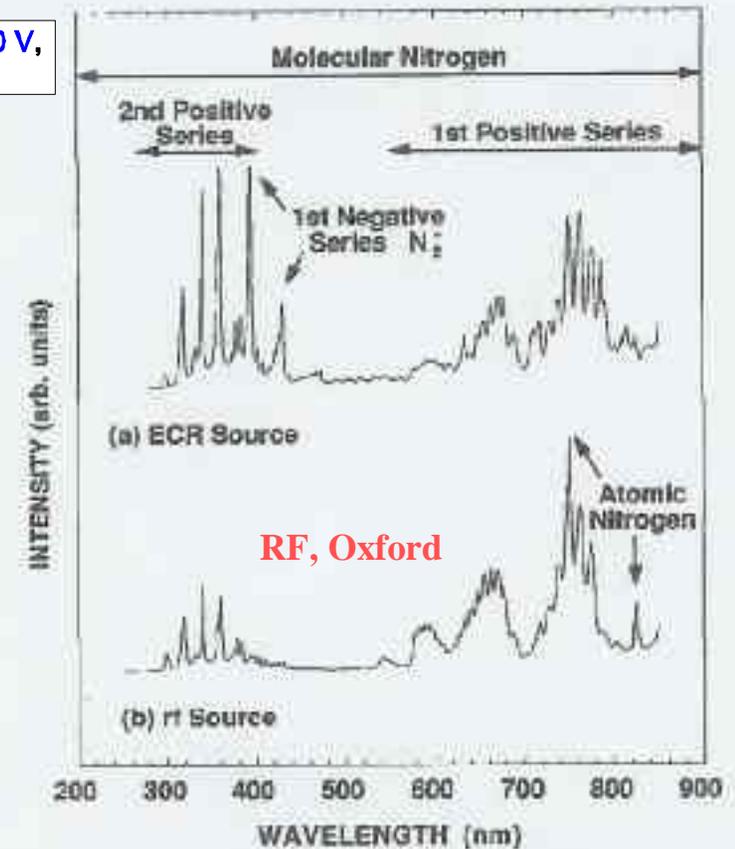
Эпитаксия, стимулированная плазмой

EpiLab 0.4 mTorr, 300 W

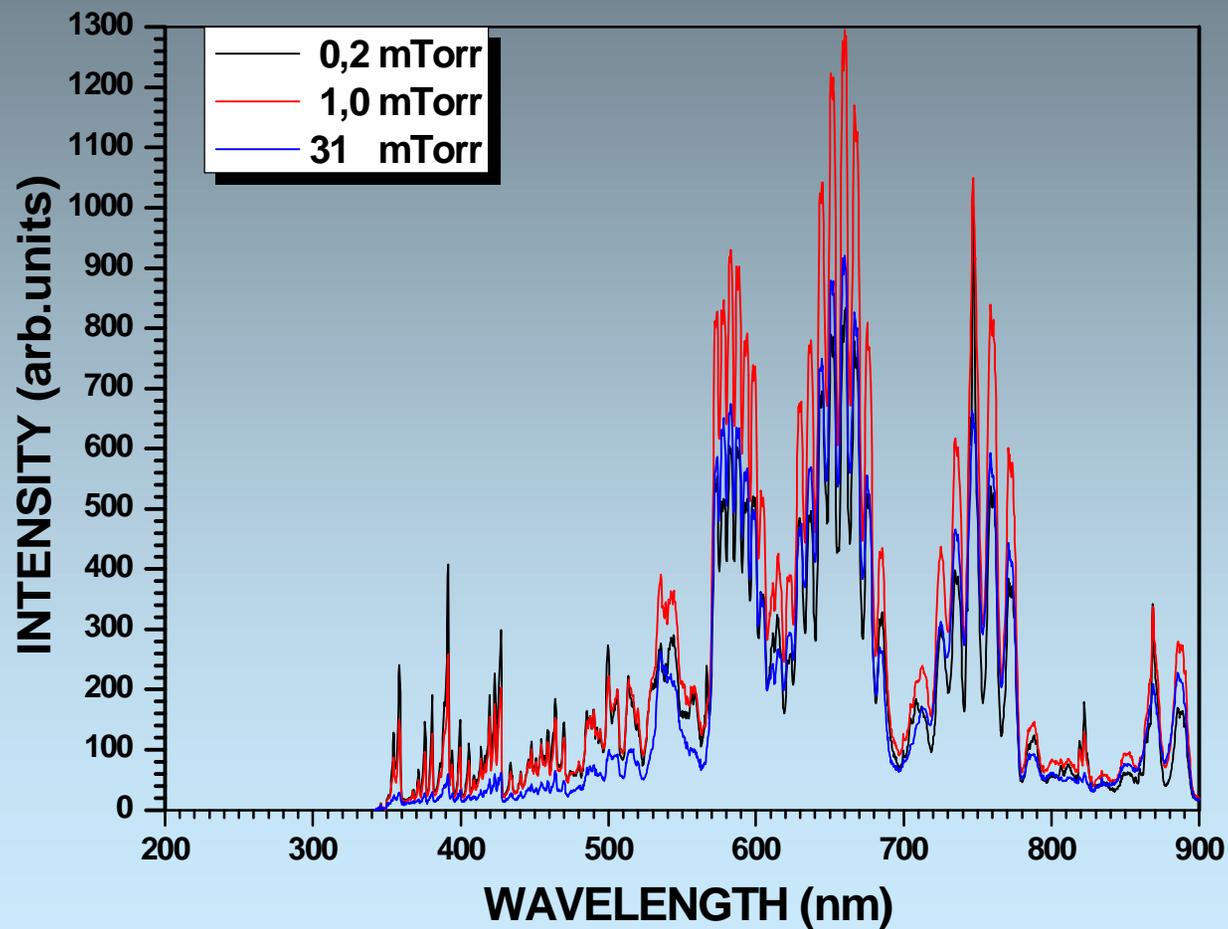
Astex 0.2 mTorr, 100 W



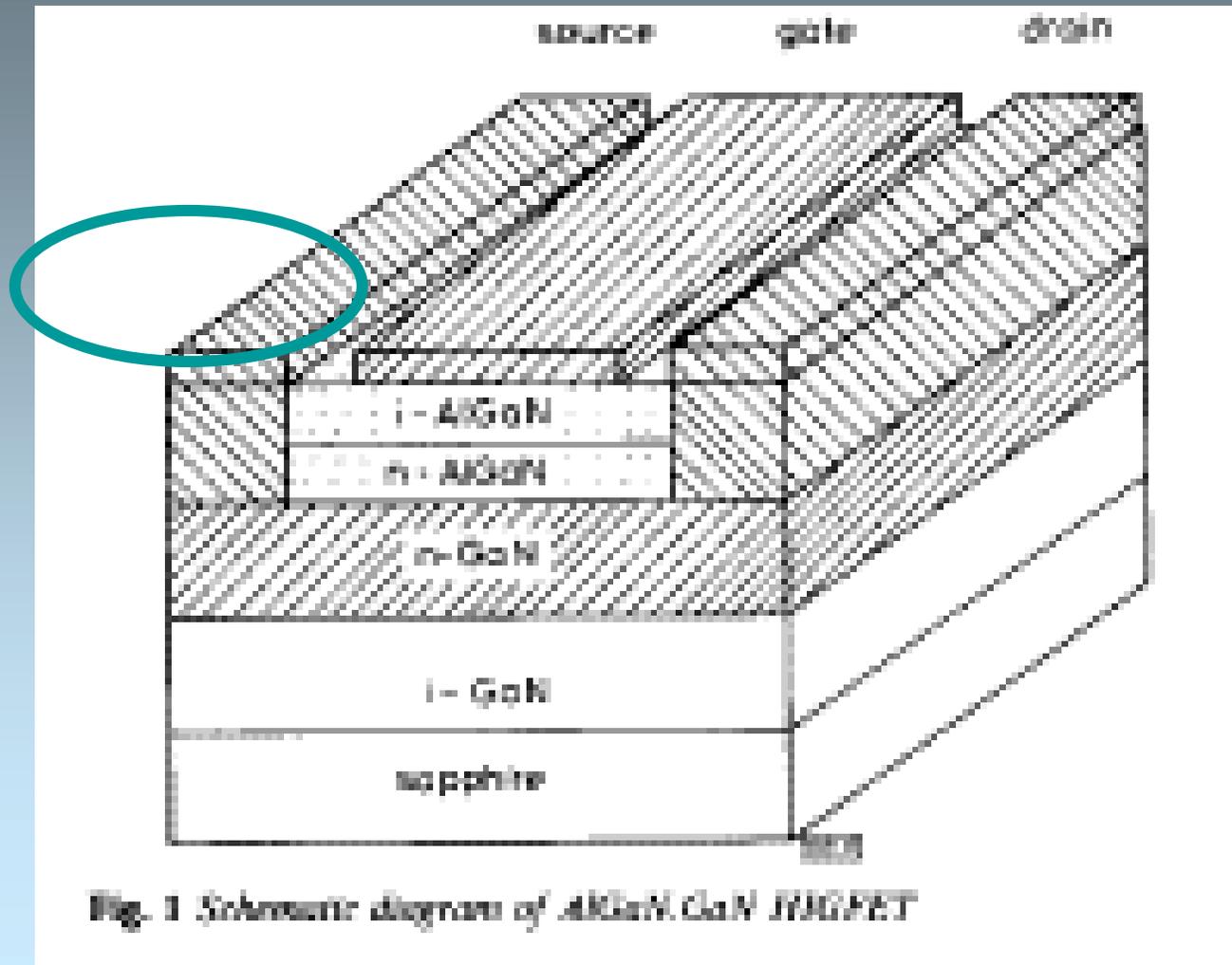
1673: Hughes et al.: GaN films on GaN/SiC substrates



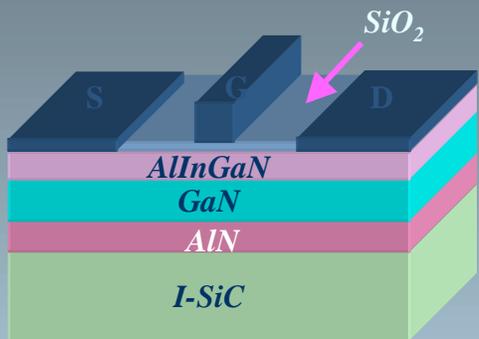
Эпитаксия, стимулированная плазмой



Высокая поверхностная плотность электронов позволяет использовать новый прибор: AlGaN/GaN MISFET

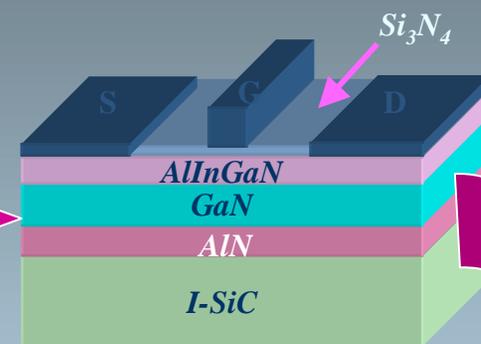


Варианты: AlGaInN, подзатворный диэлектрик, InGaN канал



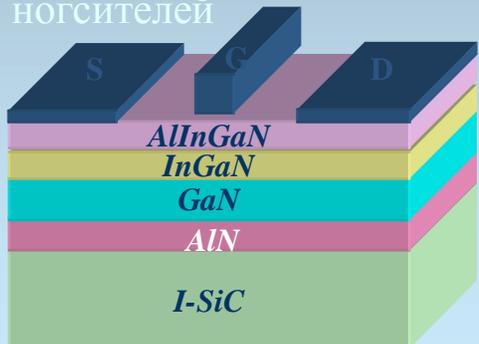
Уменьшение утечки затвора ($10^4 - 10^6$ раз)

MOSHFET (SiO_2)



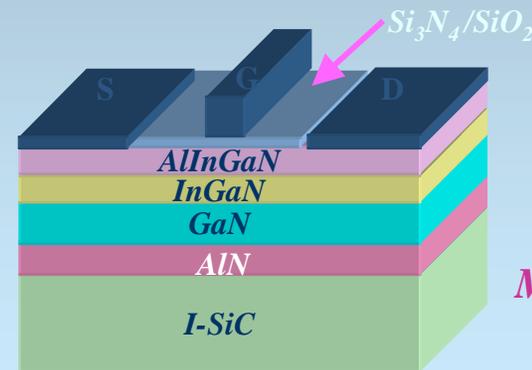
MISHFET Si_3N_4

Уменьшение коллапса тока,
усиление удержания
носитеелей



AlGaInN/InGaN GaN DHFET

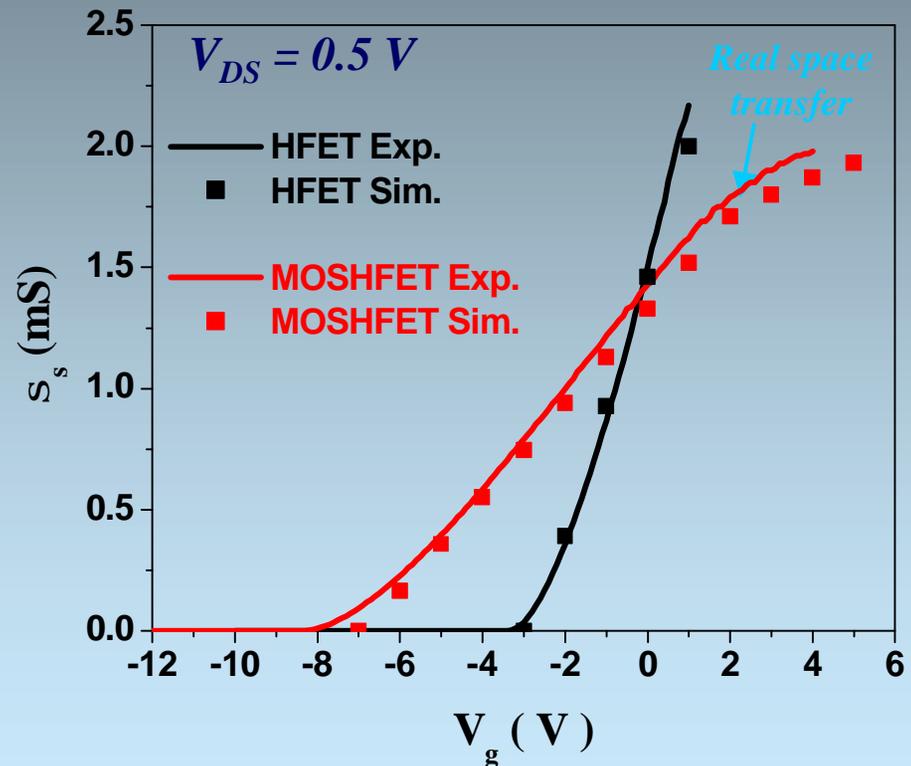
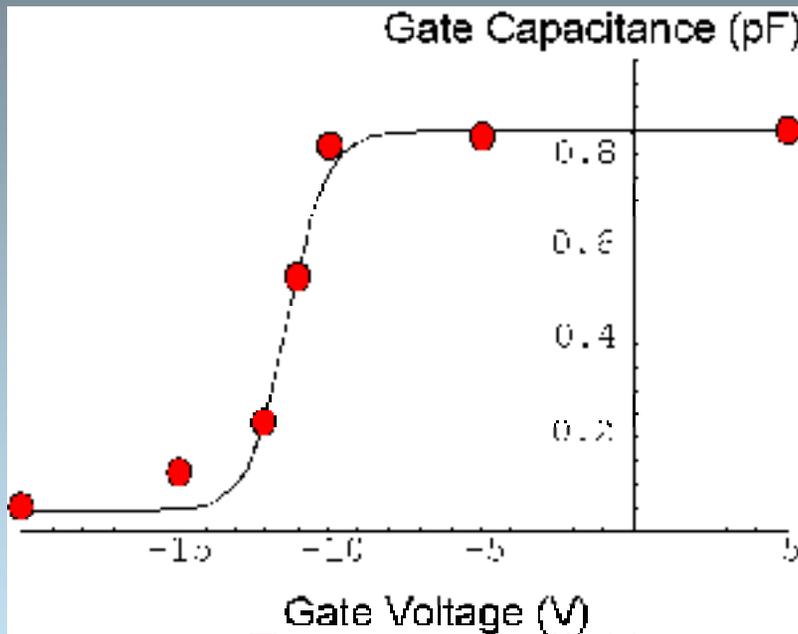
Суммирование преимуществ



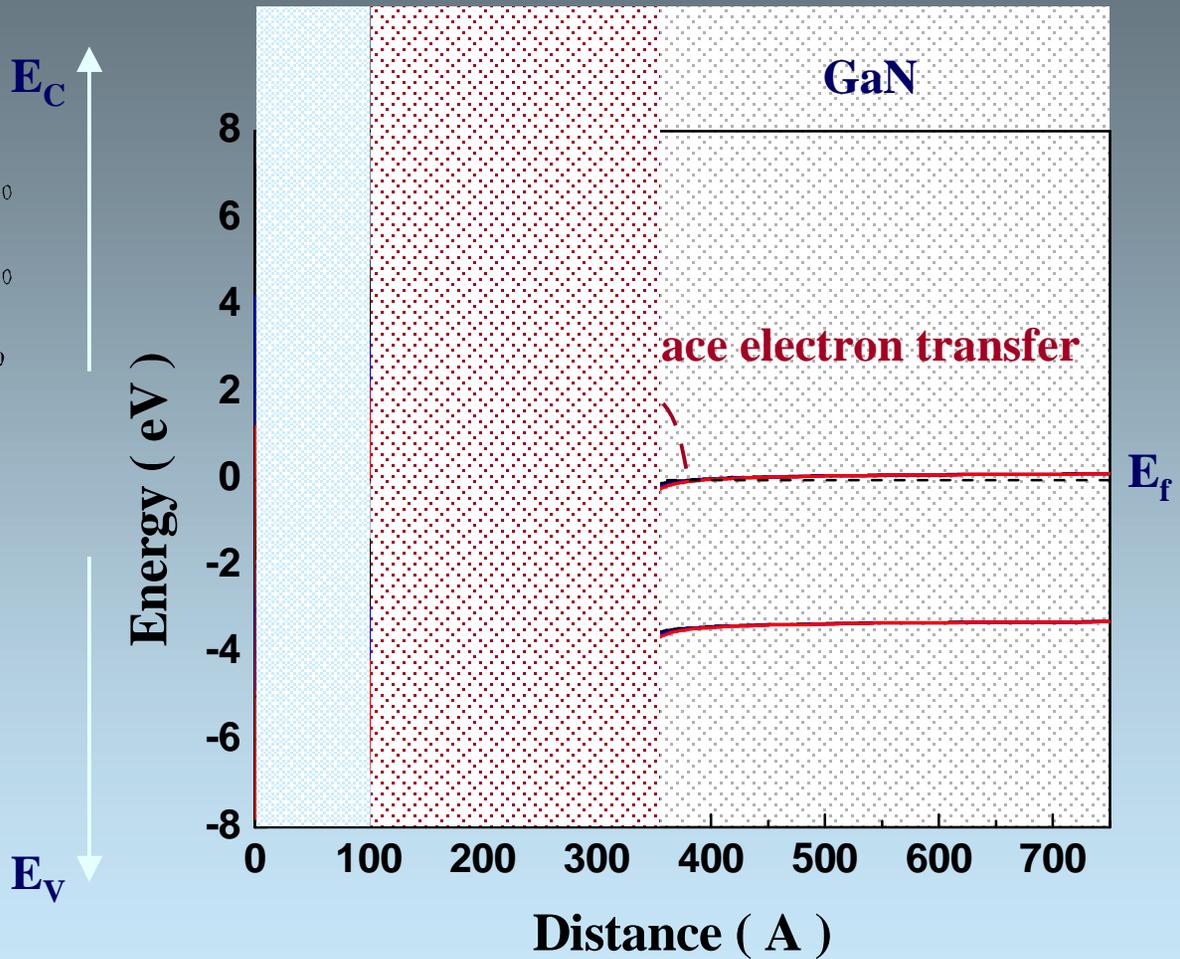
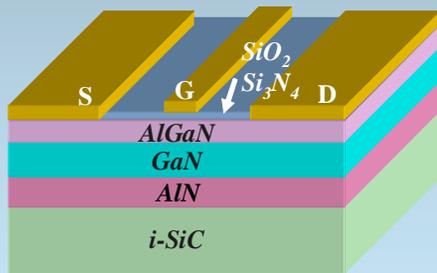
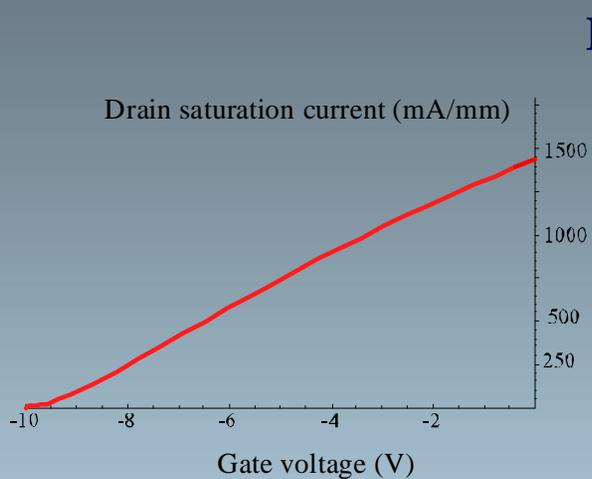
MISDHFET

Модель управления зарядом MOSFETs и HFETs

$$V_{GT} - \alpha V_F = a(n_s - n_0) + \eta V_{th} \ln\left(\frac{n_s}{n_0}\right)$$

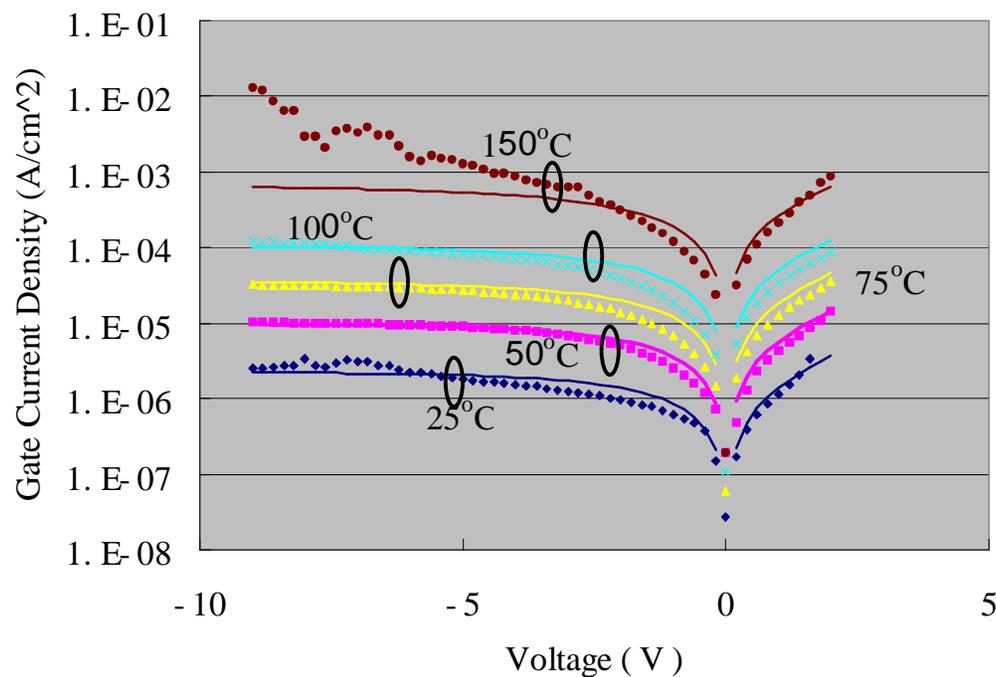


Real Space Transfer in MOSHFET



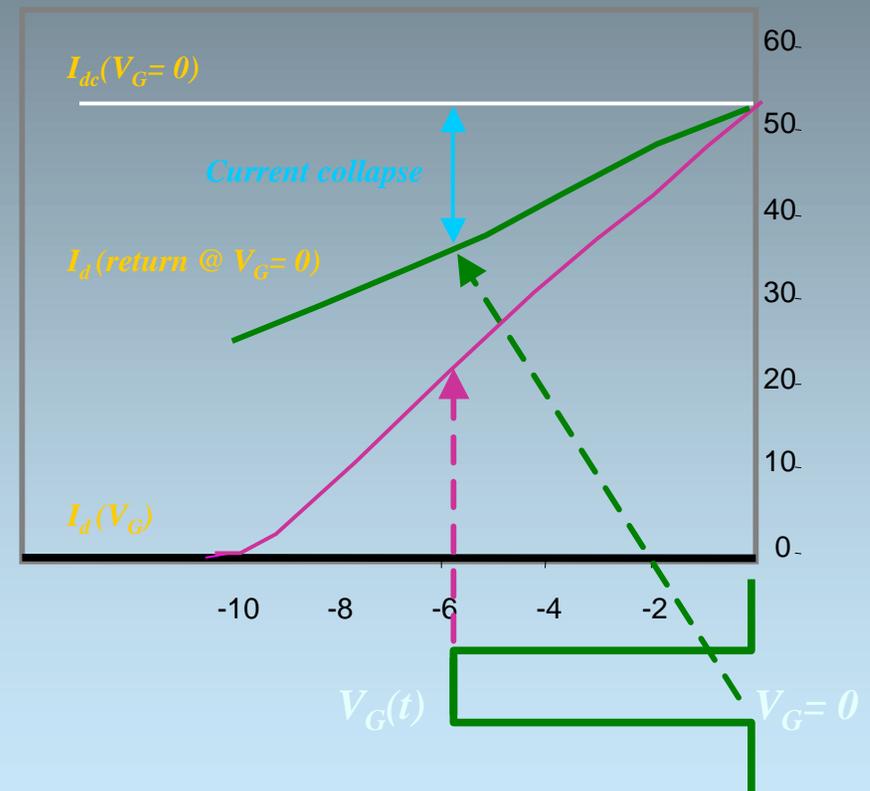
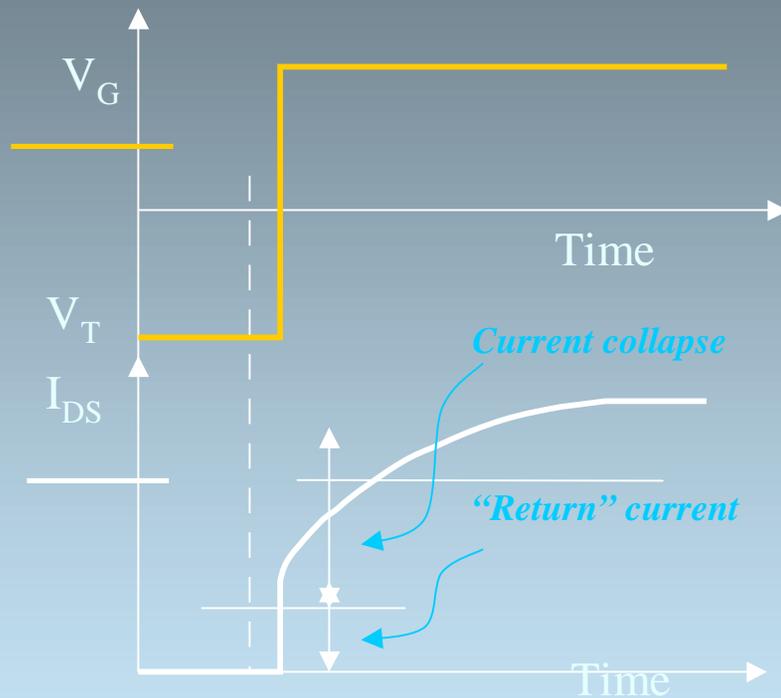
Ток утечки в GaN MOSHFETs

- Ток утечки затвора в AlGaN / GaN HEMTs is determined by trap-assisted tunneling and thermally-assisted direct tunneling of electrons into the AlGaN layer



- Both tunneling and temperature activation also determine gate leakage current in MOSHFETs

«Защелкивание» затвора и коллапс тока в AlGaN/GaN HFETs: Импульсные измерения «возвратного тока»



Сходные эффекты «защелкивания затвора и коллапса тока» были обнаружены в:



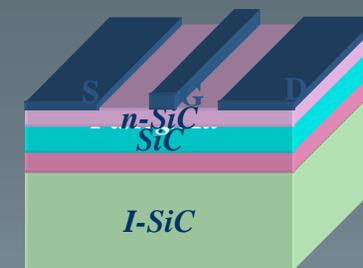
GaN MESFET



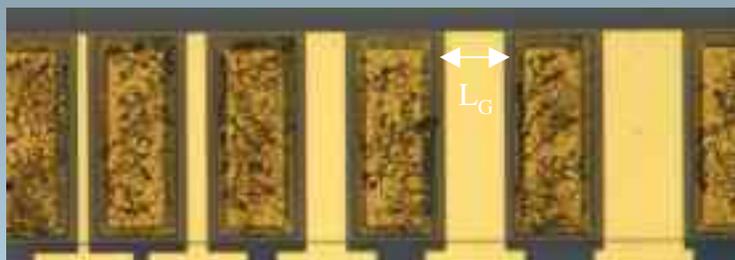
AlGaIn/GaN HFET



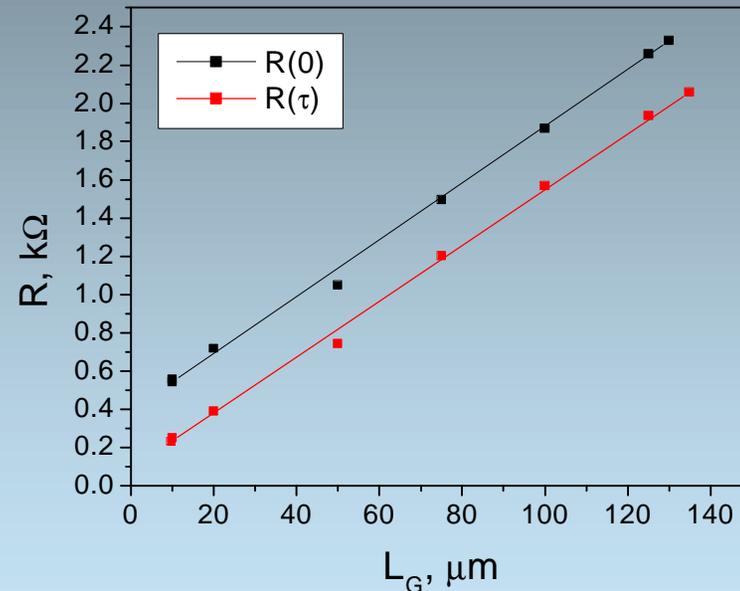
AlGaIn/GaN MOSHFET



SiC MESFET



GTLM pattern
(L_G variable, $L_{GS} = L_{GD} = \text{const}$)

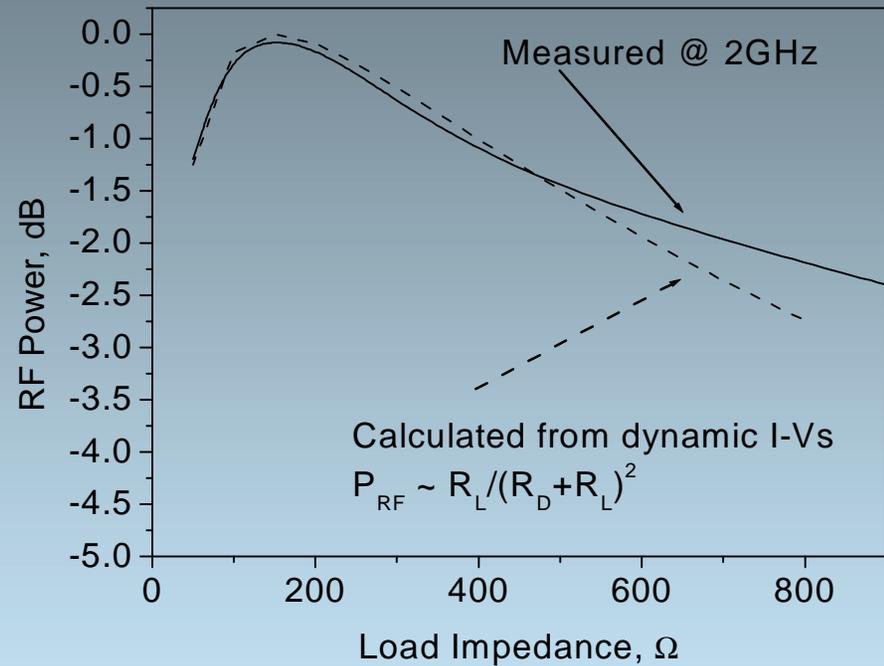
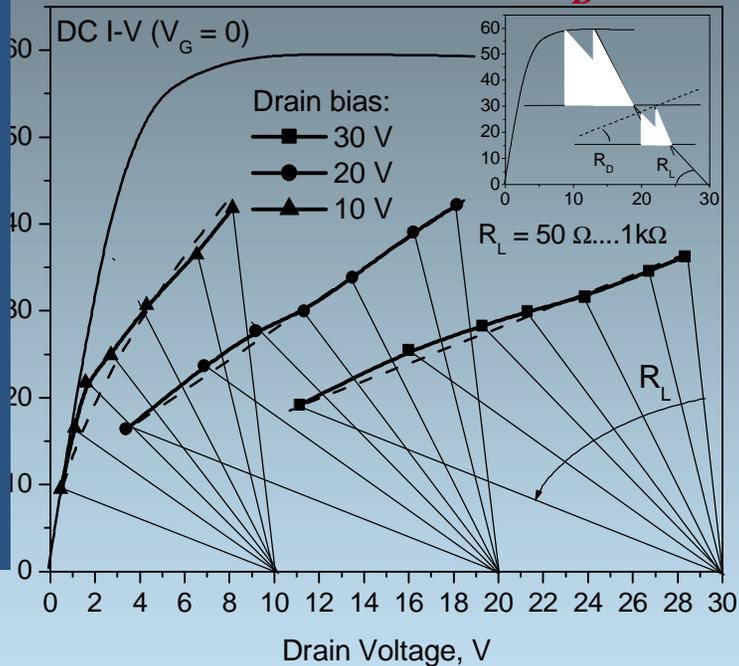


- **AlGaIn верхний слой незначительно влияет на КТ**
- **Только угловая область затвора отвечает за КТ**

Динамические ВАХ AlGaN-GaN HFETs

Сканирование импеданса нагрузка при постоянном $V_D = 10\text{ V} \dots 30\text{ V}$

Peak drain current (@ max V_G)



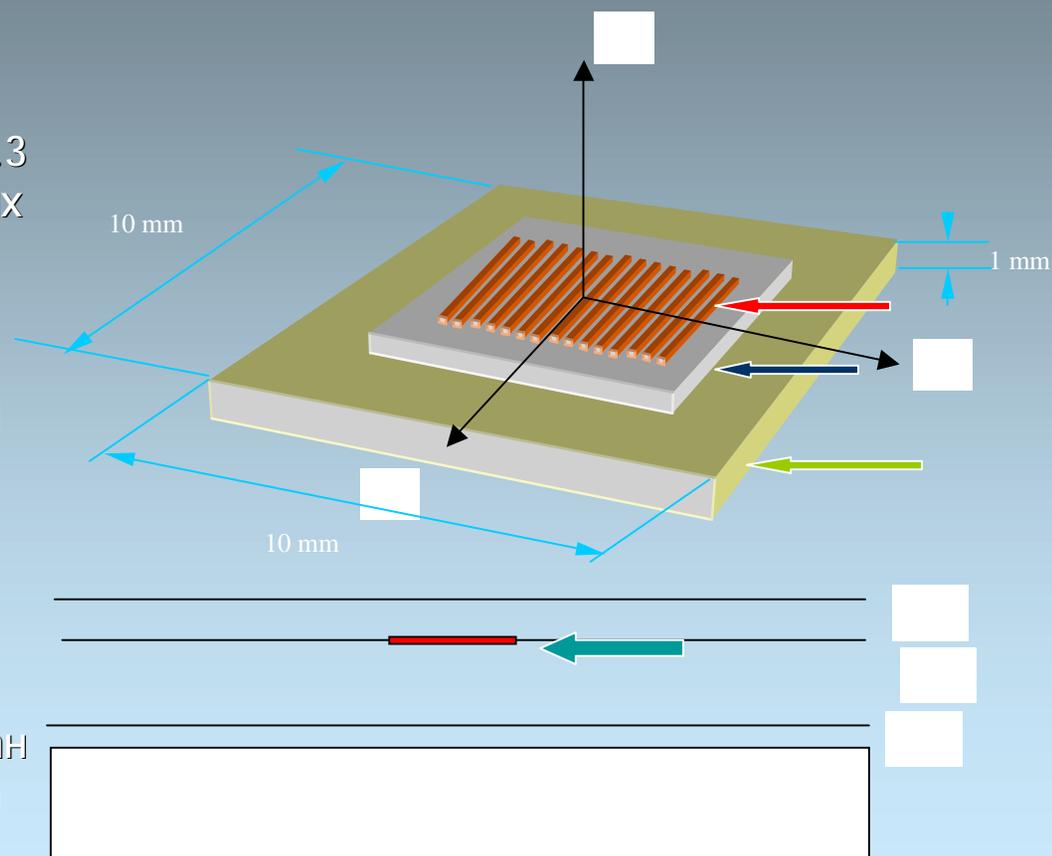
3^x мерное моделирование

атвор состоит из 15
параллельных пальцев ($0.3 \times 700 \mu\text{m}^2$) расположенных
на расстоянии $52 \mu\text{m}$ с
общей шириной 10.5 mm

ристалл транзистора $1 \times 1 \text{ mm}^2$

$0 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ медный
радиатор

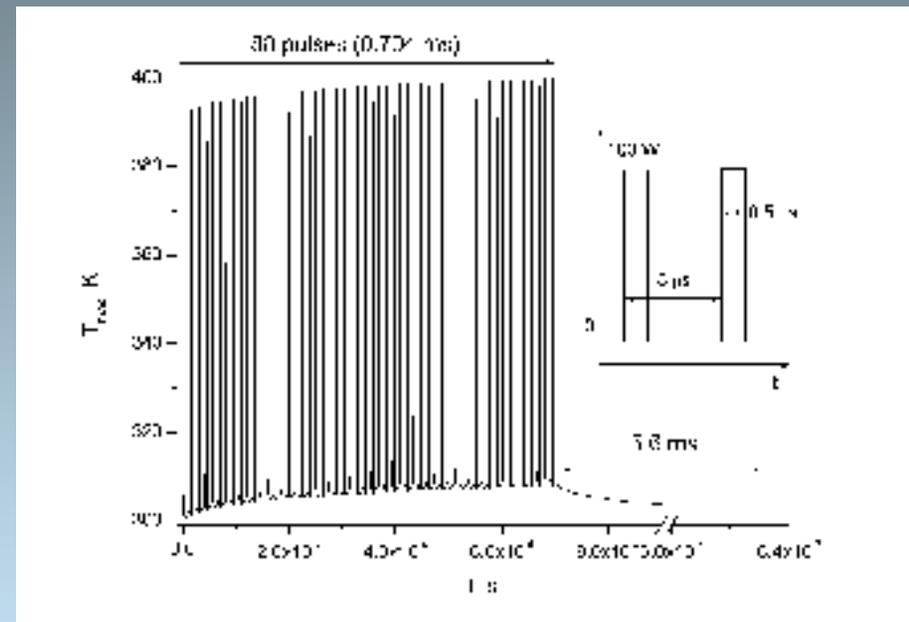
сточник тепла локализован
в области гетероперехода



3^x мерное моделирование

Временная диаграмма

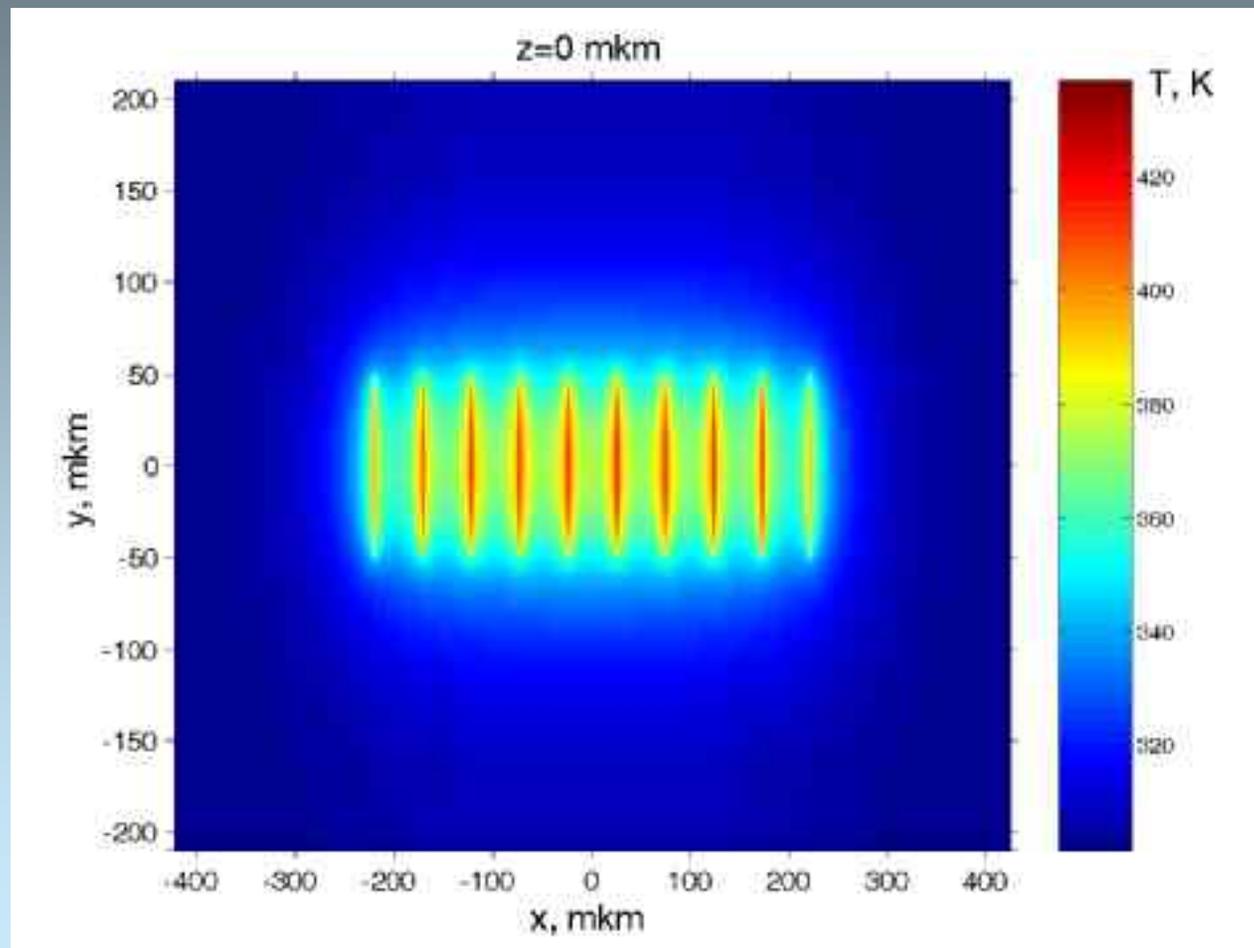
- Временная диаграмма состоит из периодически повторяющихся пакетов 88 импульсов (10 W/mm и длительностью 0.5 μ s).



3^x мерное моделирование

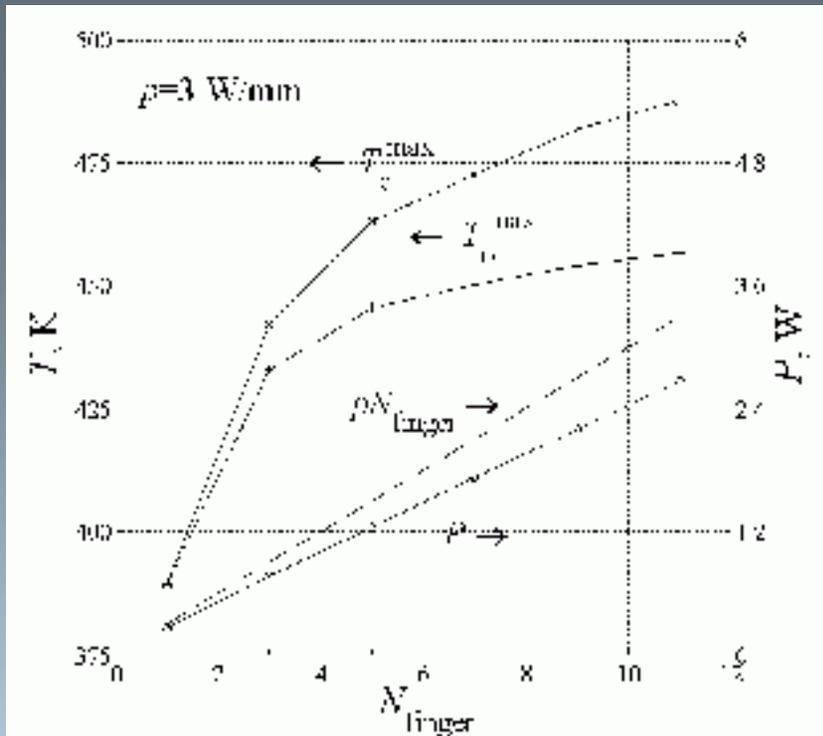
Тепловые параметры полупроводников

<i>T = 300 K</i>	<i>AlN</i>	<i>BN</i>	<i>GaN</i>	<i>SiC</i>	<i>Si</i>
<i>l, W/cm K</i>	2.85	7.70	1.20	3.90	1.50
<i>C, J/cm³ K</i>	2.53	5.39	2.97	2.28	1.64

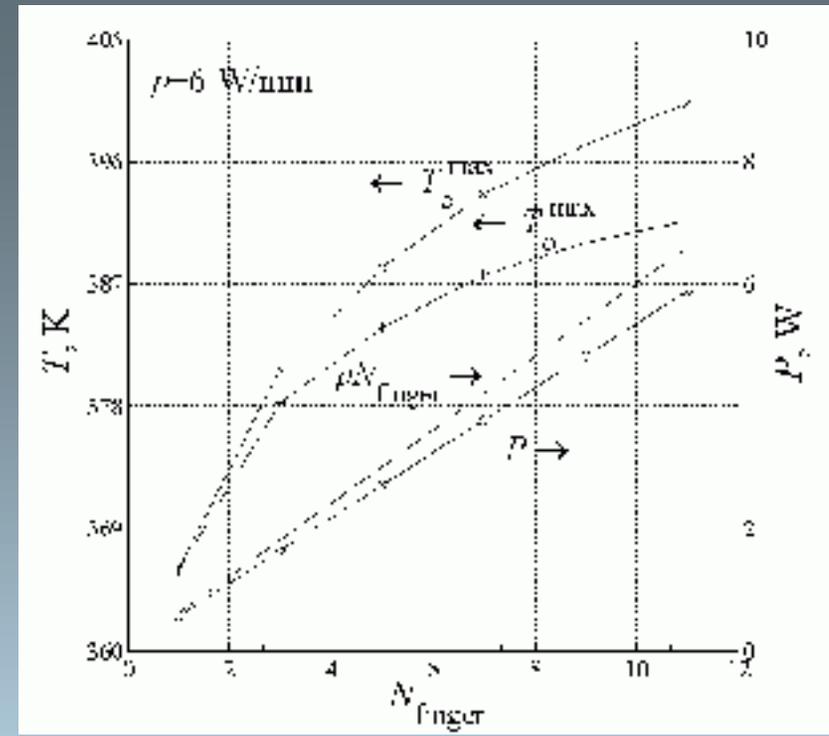


Simulation

ЭлиЛаб, С. Шаповал, 2005

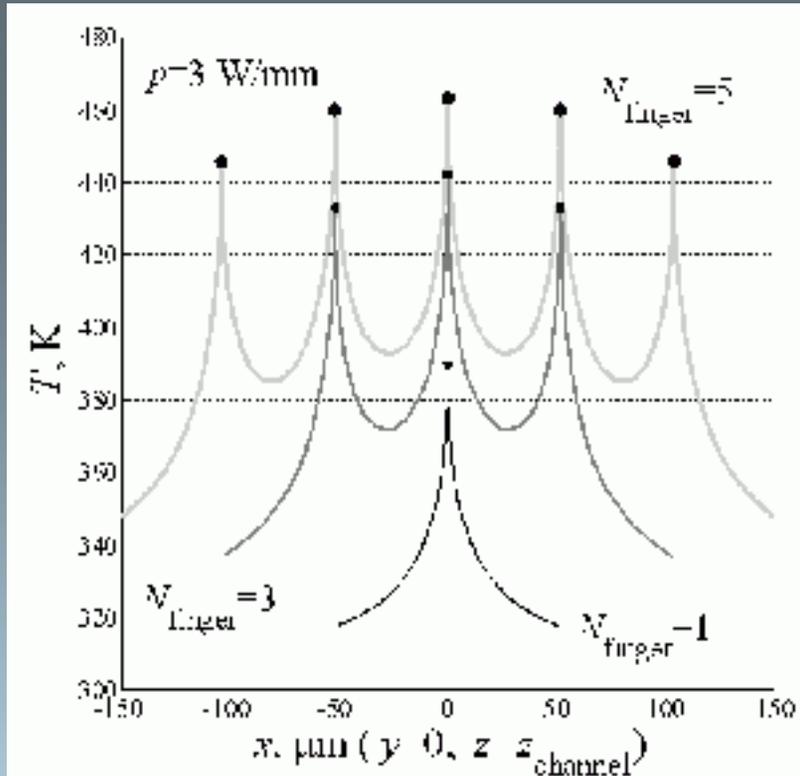
T_c^{\max} 

Sapphire substrate

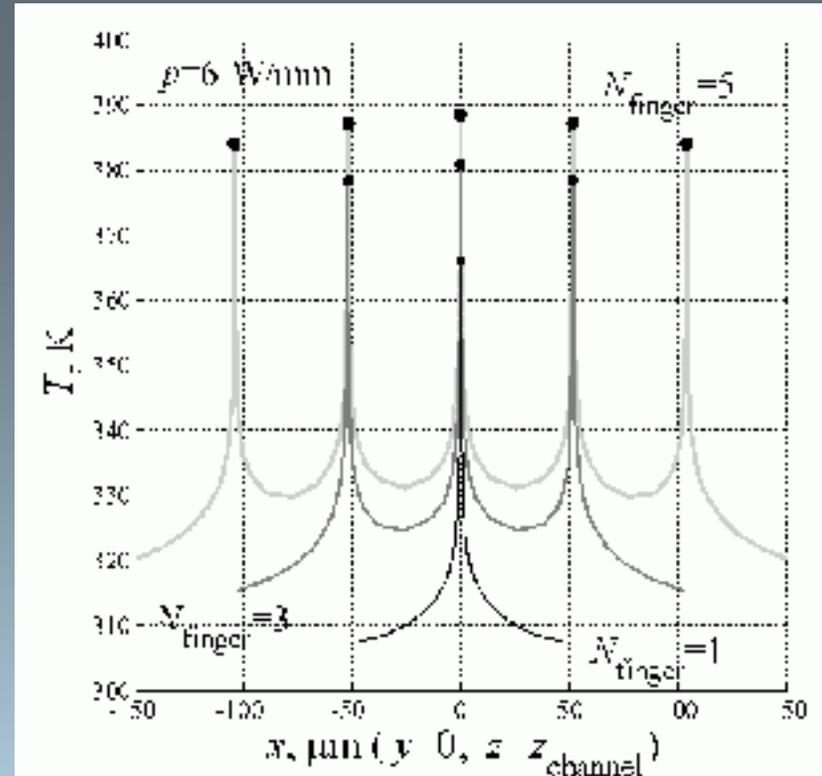


SiC substrate

Maximal temperatures T_c and T_0 for the central and outermost channels, respectively, and dissipated power P as functions of N_{finger} at $W_g = 100 \text{ }\mu\text{m}$. Dashed lines correspond to the power dissipated at channels temperature of 300 K.



Sapphire substrate

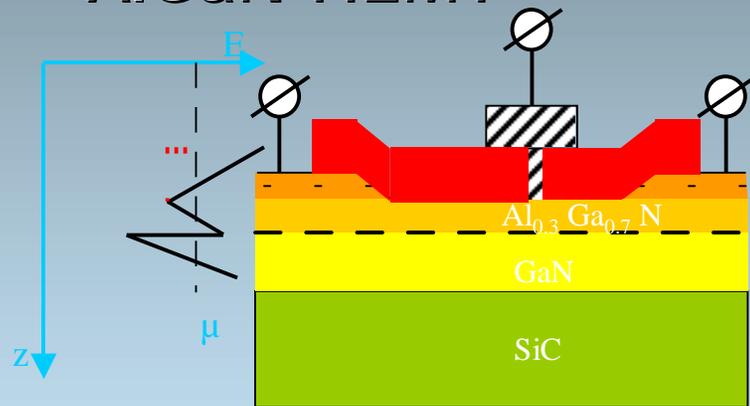


SiC substrate

Simulation results are presented in figures 2 and 3. From the figures we notice that by the optimal values of W_g and N_{finger} found from large-signal modelling the reasonable values of thermal overheating (about 100 K) and non-uniformity of channel temperature (about 10 K) can be obtained only for HEMTs on SiC substrates. In the case of sapphire substrates (even with the power density reduced by half) the values of thermal overheating are a lot more.

Изготовление кристаллов транзисторов

n Нелегированный AlGaN HEMT



n Преимущества:

- n - высокая плотность электронов в двумерном газе (до 10^{13} см⁻²)
- n - низкое рассеяние электронов
- n - простая конструкция и технология эпитаксиальных структур

n Проблемы:

- n - высокий уровень поляризации; как результат, существенно выше влияние процессинга на параметры транзистора;
- n Эффект памяти (МНОП-структура)
- n Параметры диода Шоттки недостаточны

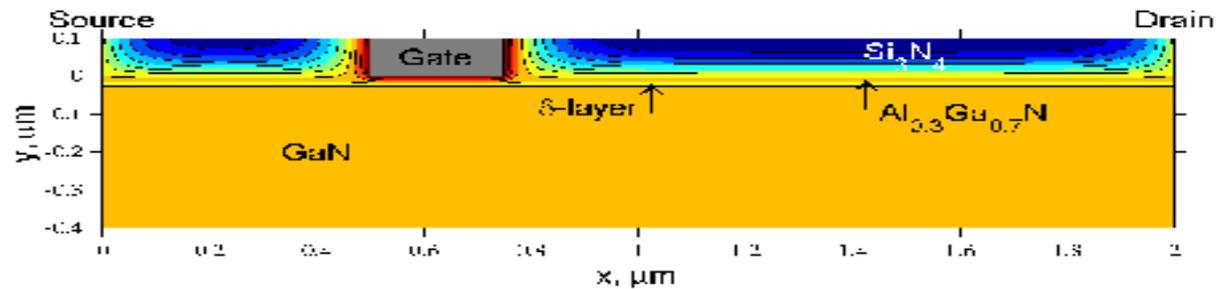
2^х мерное электростатическое моделирование

$$e_1 \Delta y(P) = -qN_V^*, \quad P \in \Omega_{Si_3N_4}$$

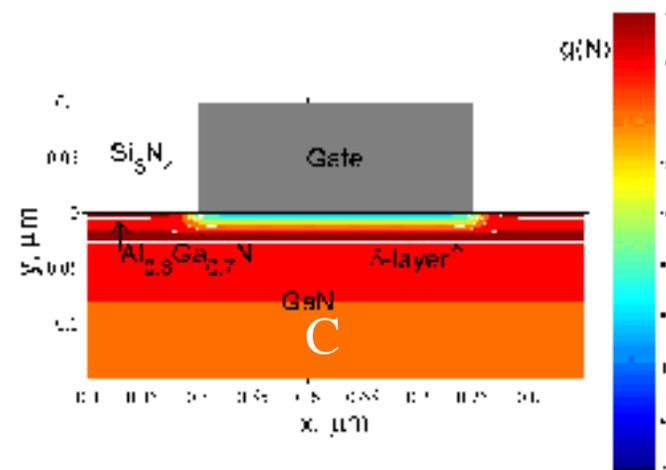
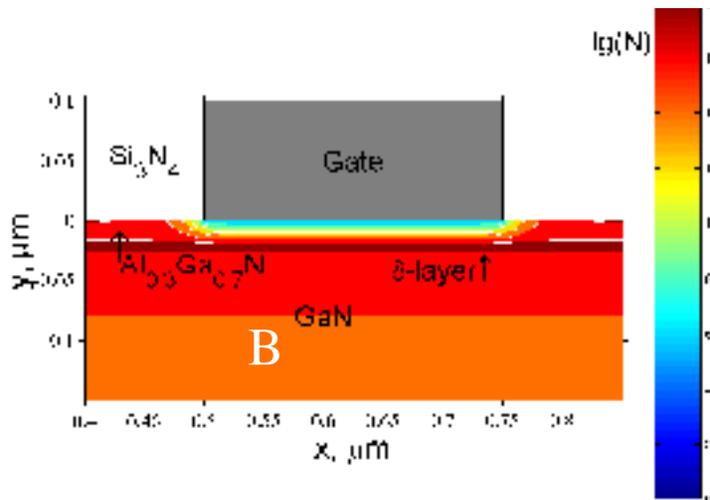
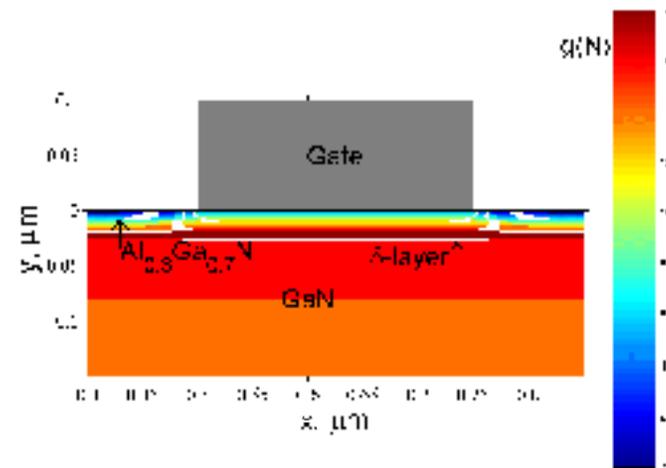
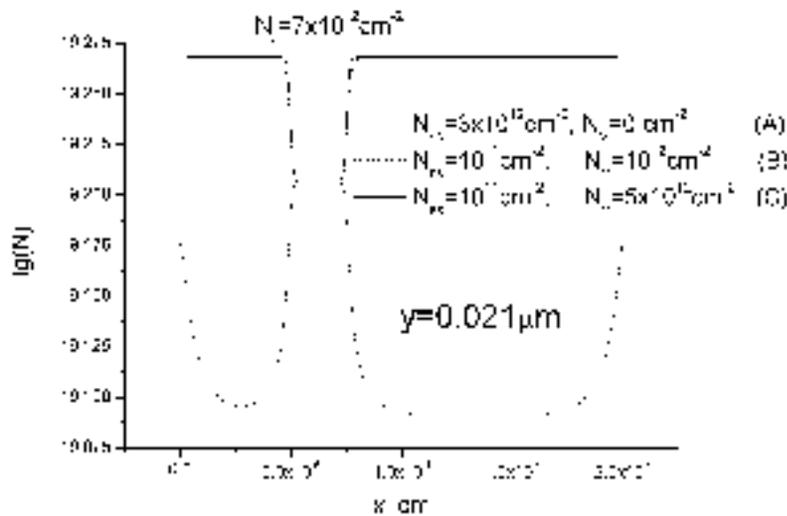
$$e_1 \nabla y|_{+0} - e_2 \nabla y|_{-0} = qN_{ss}$$

$$e_2 \Delta y(P) = q\{N[y(P)] - N_D(P)\}, \quad P \in \Omega_{GaN}$$

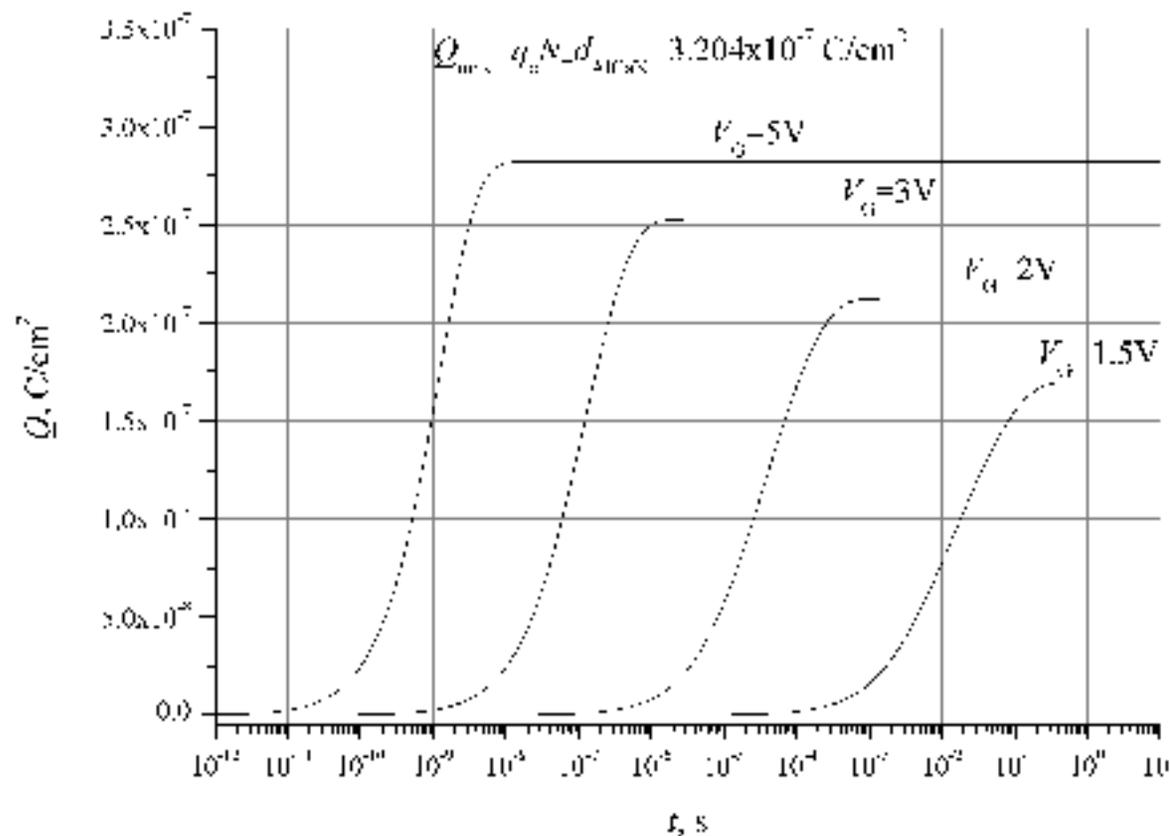
Electrostatic potential distribution $y(P)$



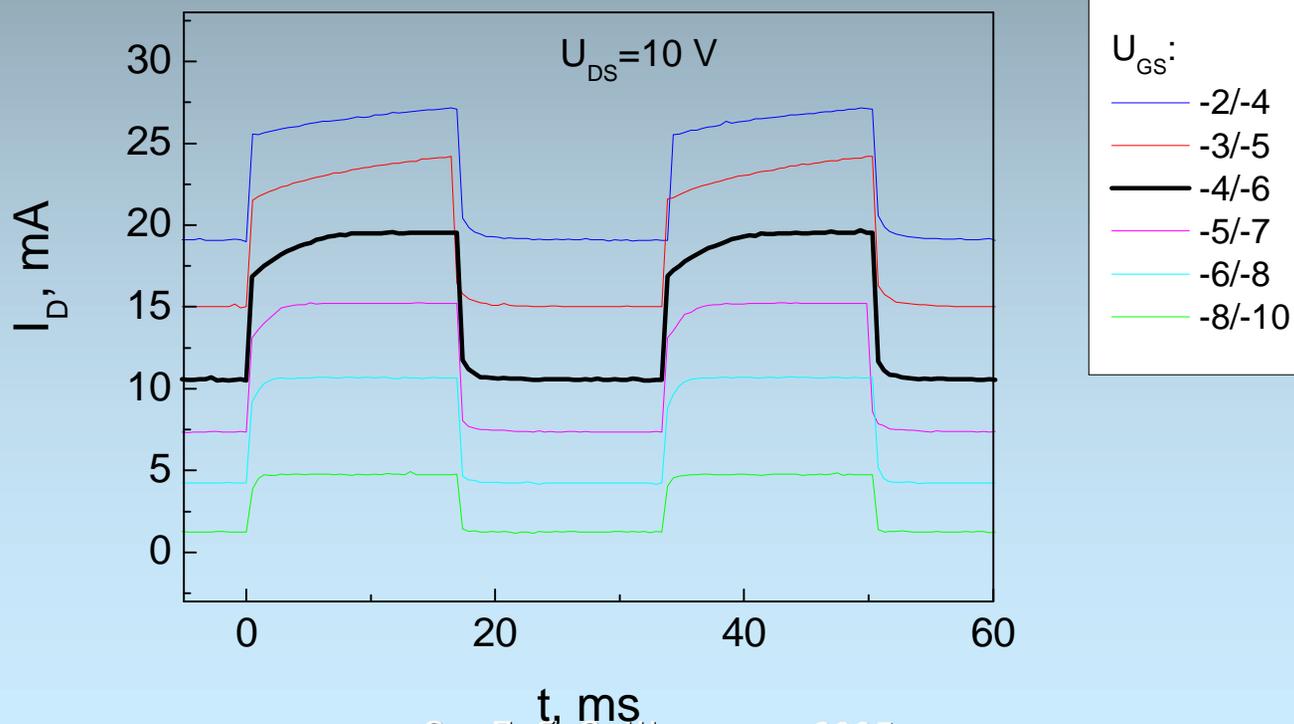
2^x мерное электростатическое моделирование



Dynamics of trapped charge density Q in the layer $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ ($d_{\text{AlGaN}}=20\text{ nm}$) for i-AlGaN/i-GaN HEMT by switching of the gate voltage from 0 V to the level V_G . The electron trap has an activation energy of 0.61 eV and capture cross-section of $1.9\times 10^{-15}\text{ cm}^2$ [3]. The uniform concentration of the electron trap N_T equals to 10^{18} cm^{-3} .



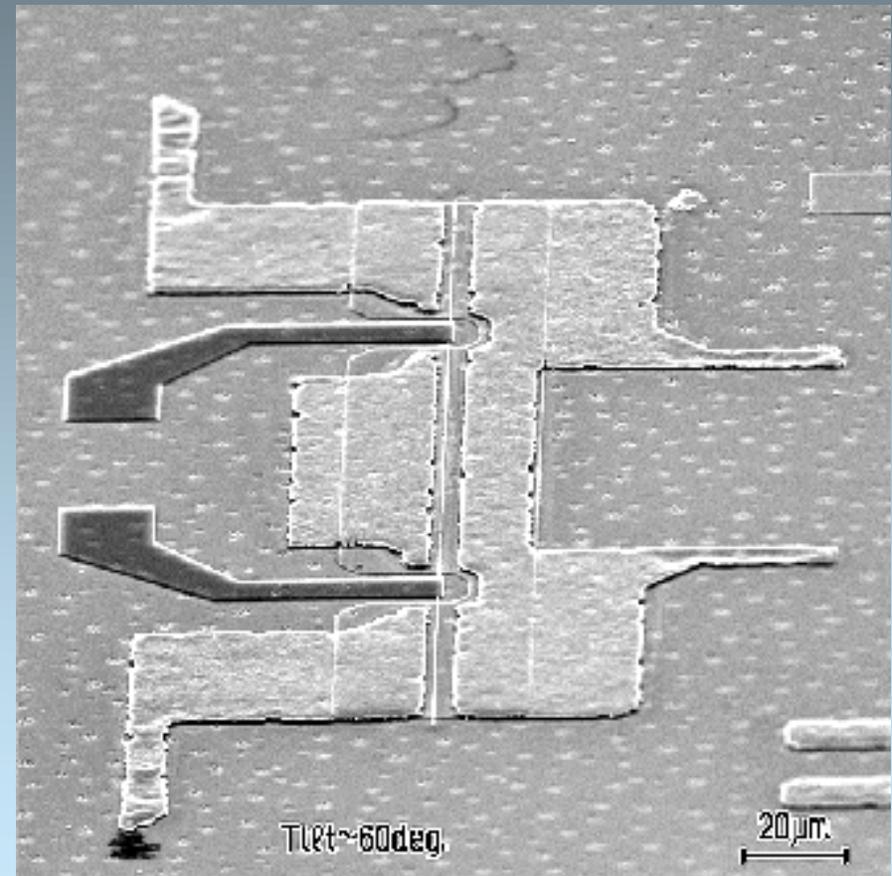
Similar instability was observed for SiC FET. The transient of drain current in SiC FET was studied as a function of bias and temperature. A voltage pulse of 2 V is superimposed on DC bias applied to the gate. At room temperature, the transient time varies from a few tenths of ms to a few tens of ms with the bias varying from -8 to -4 V. The transient rate was found to increase as the temperature increased from 295 to 420 K. After the pulse was switched off, the drain current relaxation was found to proceed much faster. The strong dependence of current transient on the applied bias suggests that this transient is determined by tunneling on the surface states.



Изготовление кристаллов

Основные этапы

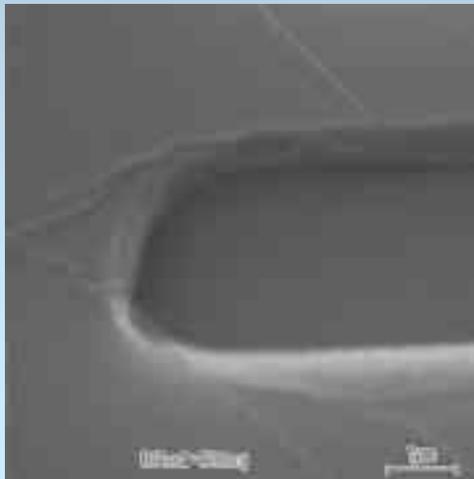
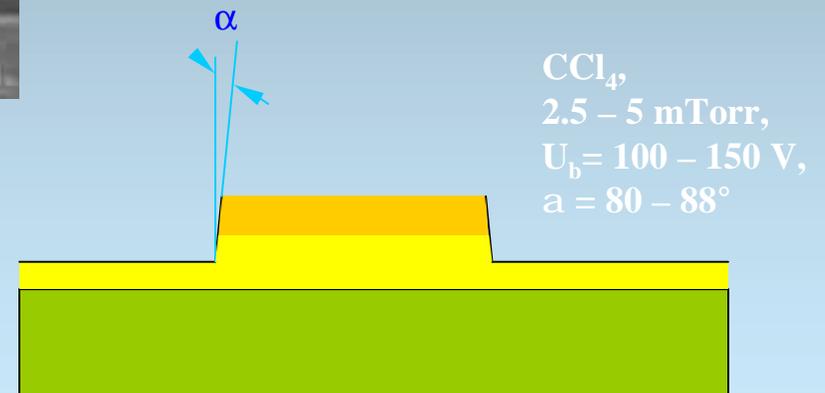
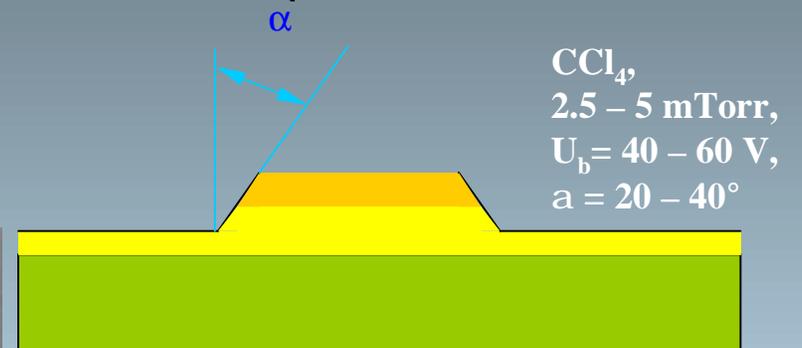
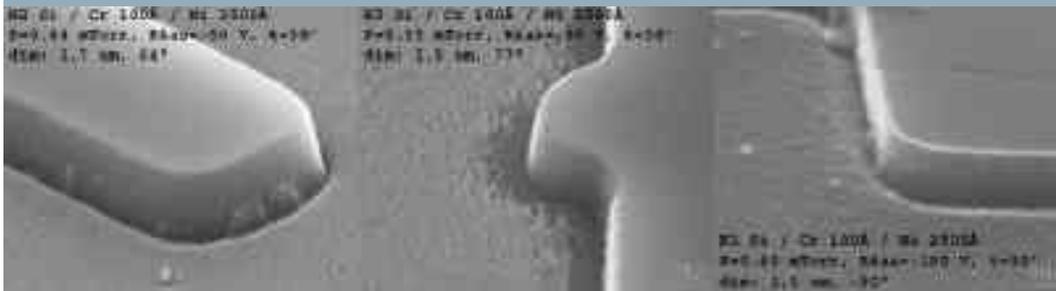
- n ЭЦР-травление меза-структуры
- n Формирование омических контактов
- n T-образный затвор (ЭЦР-осаждение и травление)
- n Пассивация Si_3N_4 в ЭЦР-плазме
- n Формирование микромостиков для соединения истоков



Изготовление кристаллов

n ЭЦР-травление
меза-структуры

n Влияние ВЧ-смещения



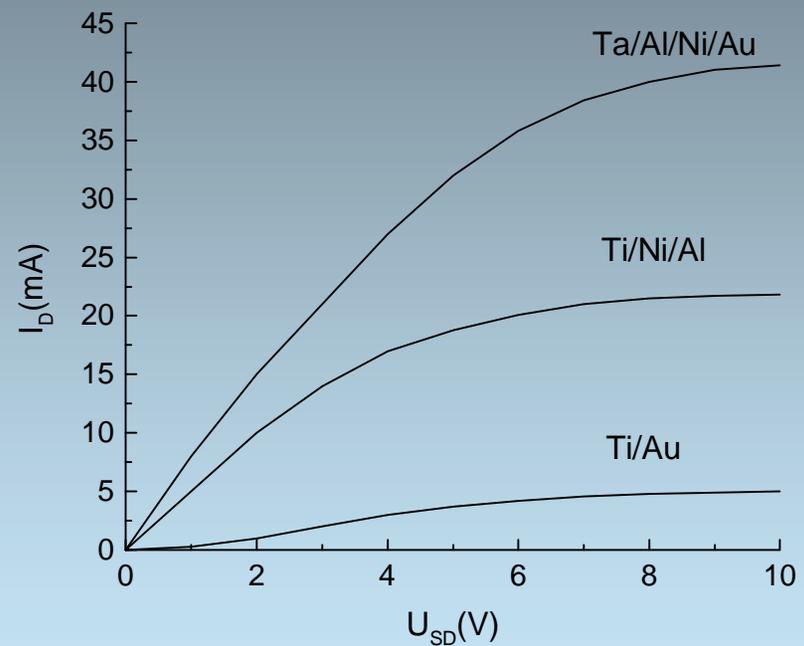
Изготовление кристаллов

n Омические контакты

n Ta/Al/Ni/Au (20/20/100/600 nm)

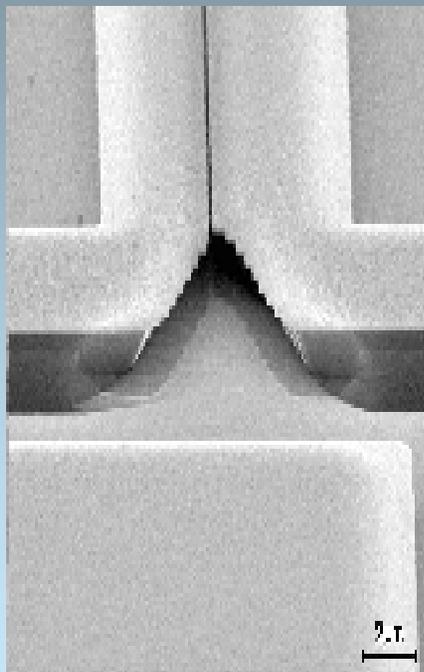
n Ti/Ni/Al (100/100/100 nm)

n Ti/Au (100/600 nm)



Изготовление кристаллов

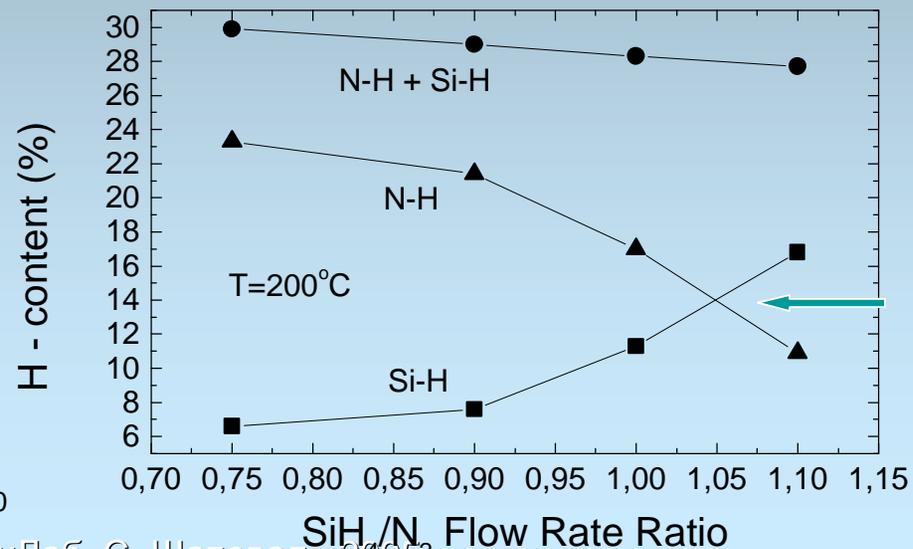
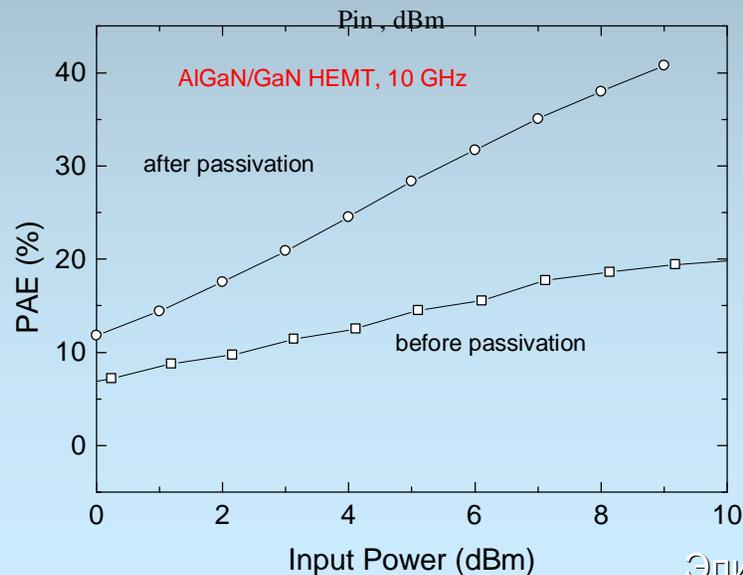
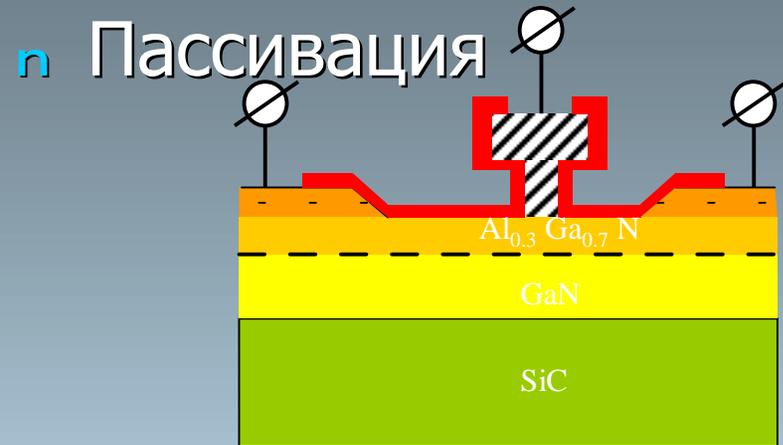
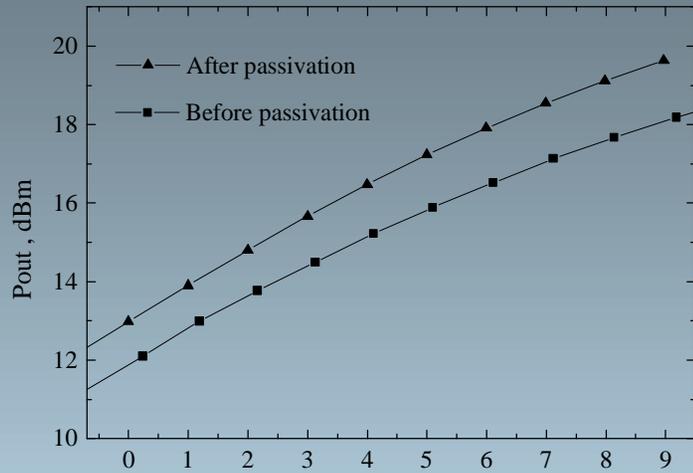
n T-образный затвор



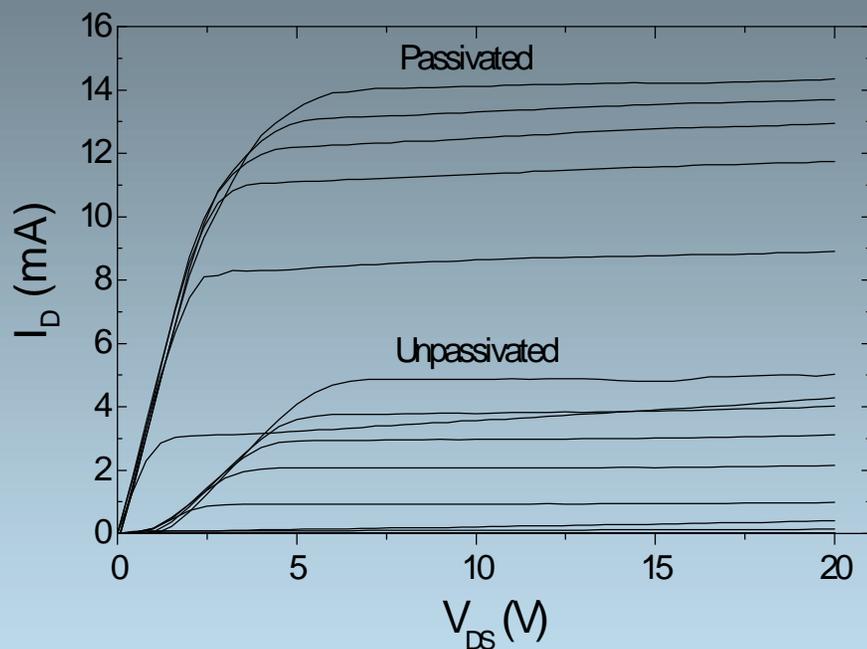
ECR etching of the trench in silicon nitride for the T-shaped gate formation. Angle 75°



Изготовление кристаллов



Влияние пассивации of Si_3N_4 на ток насыщения GaN/AlGaN HEMTs



• **Increase** in the extrinsic transconductance and decrease in the parasitic source resistance for a GaN/AlGaN transistor with a gate of $2 \times 50 \times 0.3 \mu\text{m}^2$

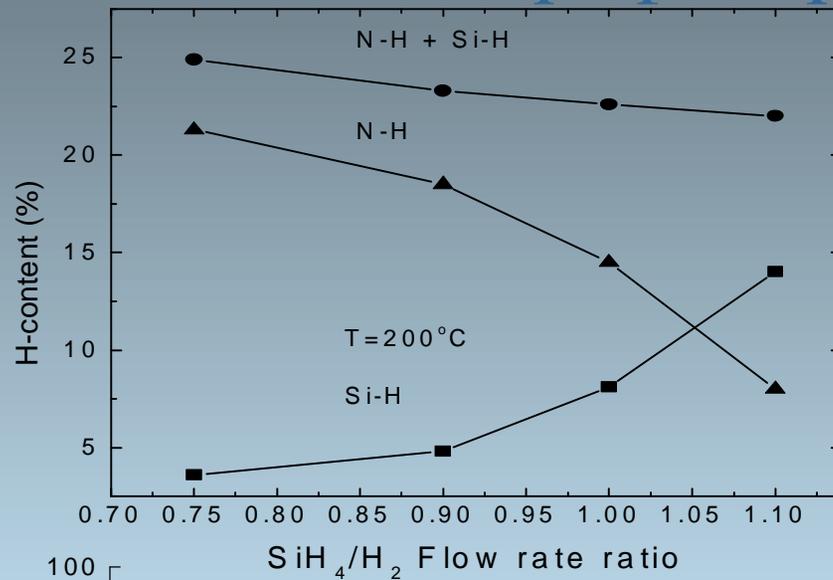
DC I-V characteristics of GaN/AlGaN HEMT with a gate $2 \times 50 \times 0.3 \mu\text{m}^2$. Maximum $V_G = 4 \text{ V}$, step 1 V.

Пассивация слоями GaN , осажденными при низкой температуре с ЭЦР-плазменным стимулированием

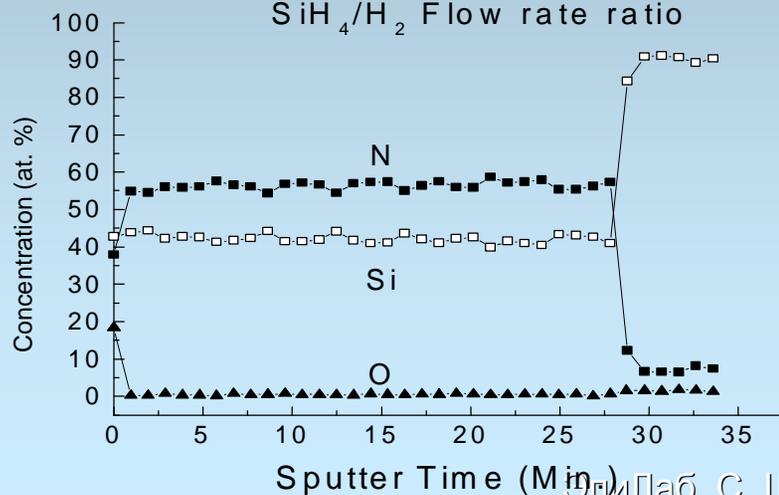


Эффект коллапса тока: после пассивации и до

Водородные связи в слоях Si_3N_4 и Оже-профилирование



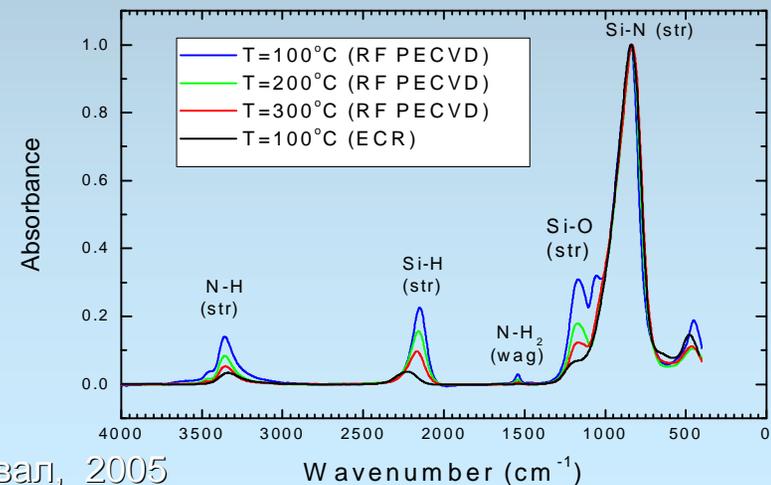
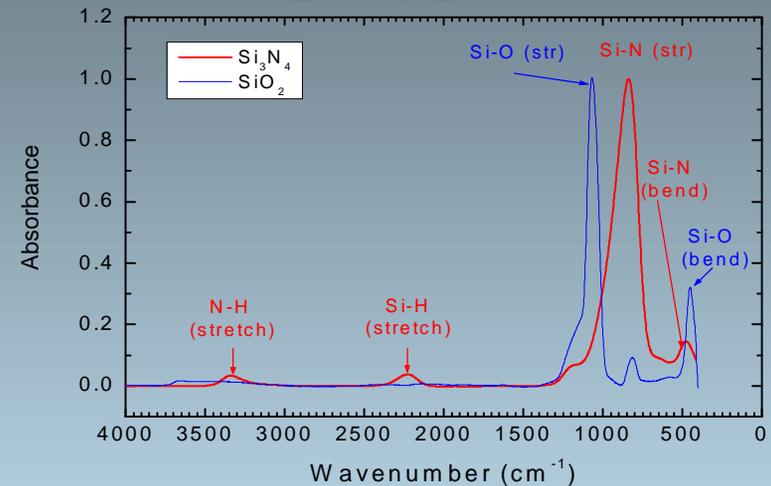
- Содержание водородных связей в слоях Si_3N_4 как функция соотношения расходов SiH_4/N_2



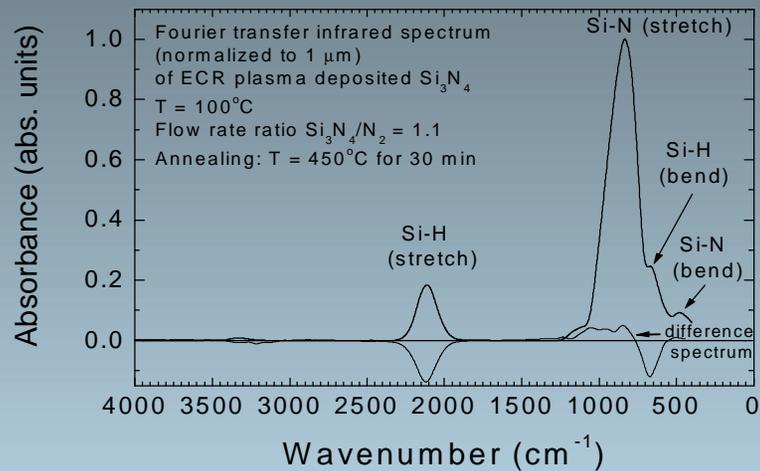
- Оже-профилирование слоя Si_3N_4 осажденного с помощью ЭЦР-плазмы

Фурье ИК спектроскопия нитрида кремния, осажденного в ЭЦР-плазме и методом RF PECVD при различных температурах

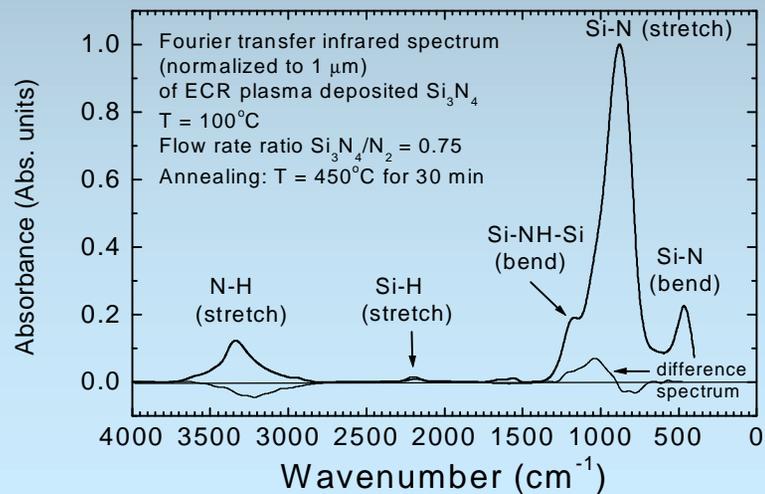
- ИК-спектры слоев SiO_2 и Si_3N_4
- ИК-спектры слоев Si_3N_4 осажденных с помощью ВЧ и ЭЦР плазменного разряда при различных температурах



Влияние термического отжига при 450°C на содержание водородных связей в Si_3N_4

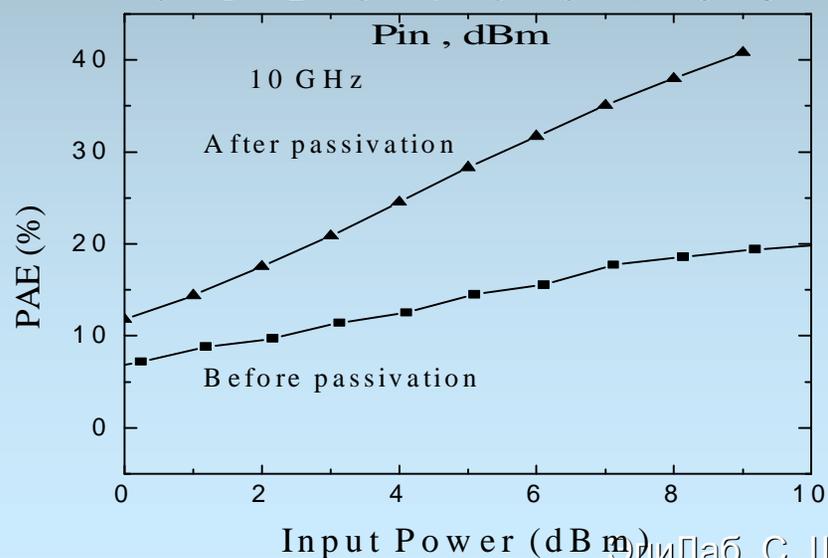
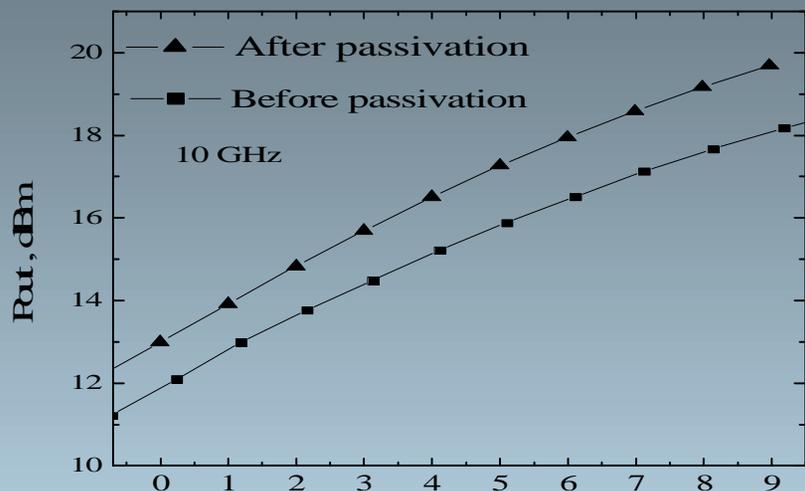


- Si-rich Si_3N_4



- N-rich Si_3N_4

Влияние пассивации Si_3N_4 на СВЧ параметры GaN/AlGaN HEMTs



Выходная мощность и коэффициент полезного действия $2 \times 37.5 \times 0.3 \mu\text{m}^2$ AlGaN/GaN HEMT

Измерения проводились на частоте 10 ГГц ($V_{ds}=15\text{V}$, $V_{gs}=-3.8\text{V}$)

ЭЦР- Si_3N_4 пассивация повышает:

- Выходную мощность от 870 до 1220 мВт/мм
- Коэффициент полезного действия от 20 до 41 %

Динамические характеристики AlGaN | GaN на сапфире

