

Научный совет ОНИТ РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания»

Москва, 8 апреля 2021 г.

GaAs вертикальный полевой транзистор с управляющим p-n переходом

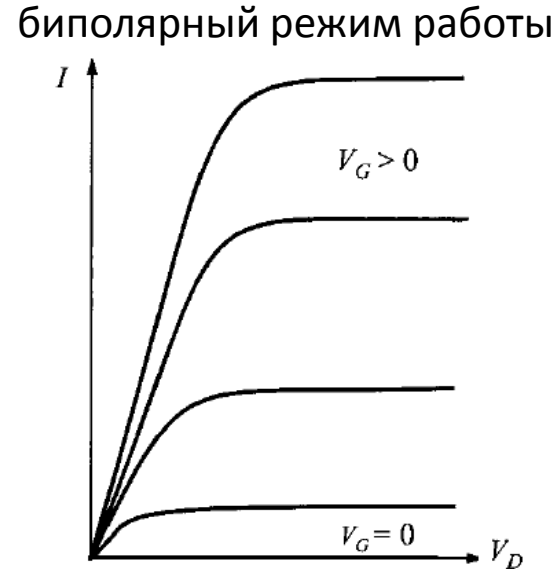
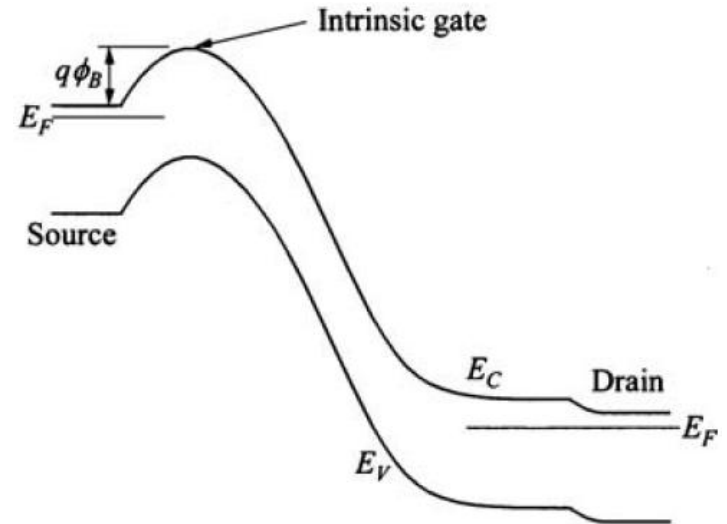
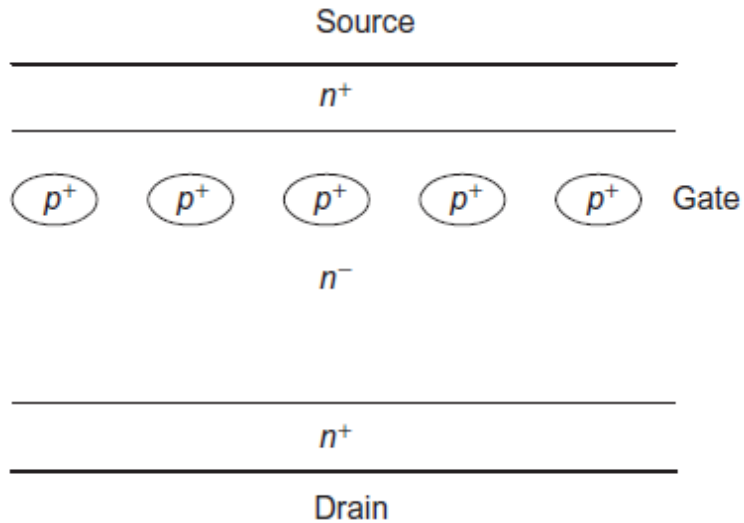
Е.А. Архипова¹, Н.В. Востоков¹, В.М. Данильцев¹, М.Н. Дроздов¹,
Ю.Н. Дроздов¹, М.И. Колесников², С.А. Королёв¹, С.А. Краев¹,
В.Л. Крюков³, А.И. Охапкин¹, Е.В. Скороходов¹, М.Э. Харченко²,
О.И. Хрыкин¹, В.И. Шашкин¹

¹ ИФМ РАН, Нижний Новгород

² АО «ВЗПП-С», Воронеж

³ ООО «МеГа Эпитех», Калуга

Транзистор со статической индукцией (SIT)



Достоинство SIT - сочетание высоковольтных и высокоскоростных характеристик

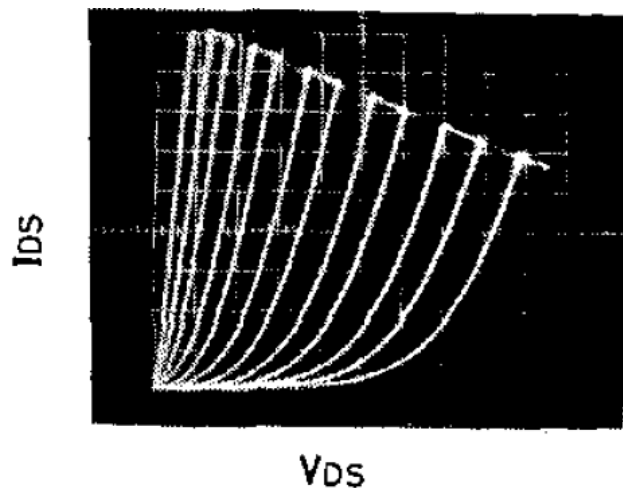
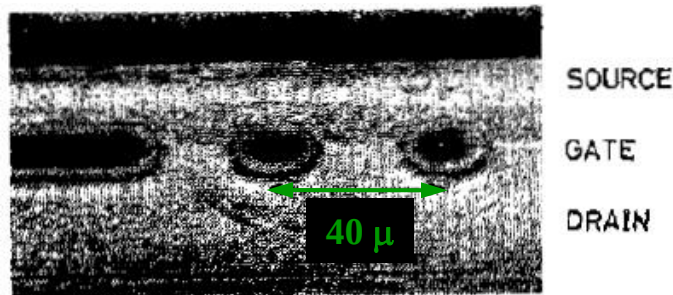
Транзистор со статической индукцией (SIT)

Si

IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, APRIL 1975

Field-Effect Transistor Versus Analog Transistor (Static Induction Transistor)

JUN-ICHI NISHIZAWA, FELLOW, IEEE, TAKESHI TERASAKI, AND
JIRO SHIBATA



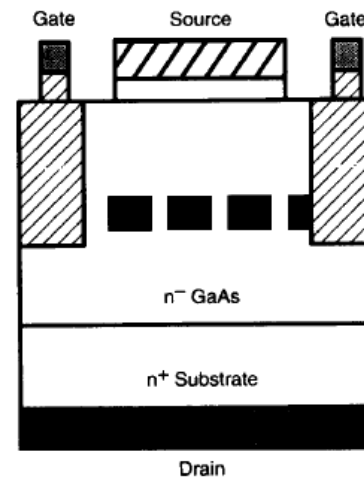
GaAs

IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 16, NO. 4, APRIL 1995

A Low On-Resistance, High-Current GaAs Power VFET

D. L. Plumton, *Member, IEEE*, H. T. Yuan, *Member, IEEE*, T. S. Kim, A. H. Taddiken, *Member, IEEE*, V. Ley, R. L. Kollman, I. Lagnado, and L. Johnson, *Life Member, IEEE*

Abstract— We have developed a new fabrication process for GaAs VFET's that results in excellent performance in a 10 A prototype designed for switching in low voltage synchronous rectifier applications. The new fabrication process uses a buried carbon-doped GaAs gate structure for the gate electrodes and an epitaxial overgrowth step. We have demonstrated 10 A devices with 3.5 m of gate width and 1.5 mOhm of on-resistance (specific on-resistance of $84\ \mu\text{Ohm} - \text{cm}^2$). The device required a $0.5\ \mu\text{m}$ channel etched between $0.5\ \mu\text{m}$ gates placing stringent requirements on the gate side wall etch profile and epitaxial doping uniformity.



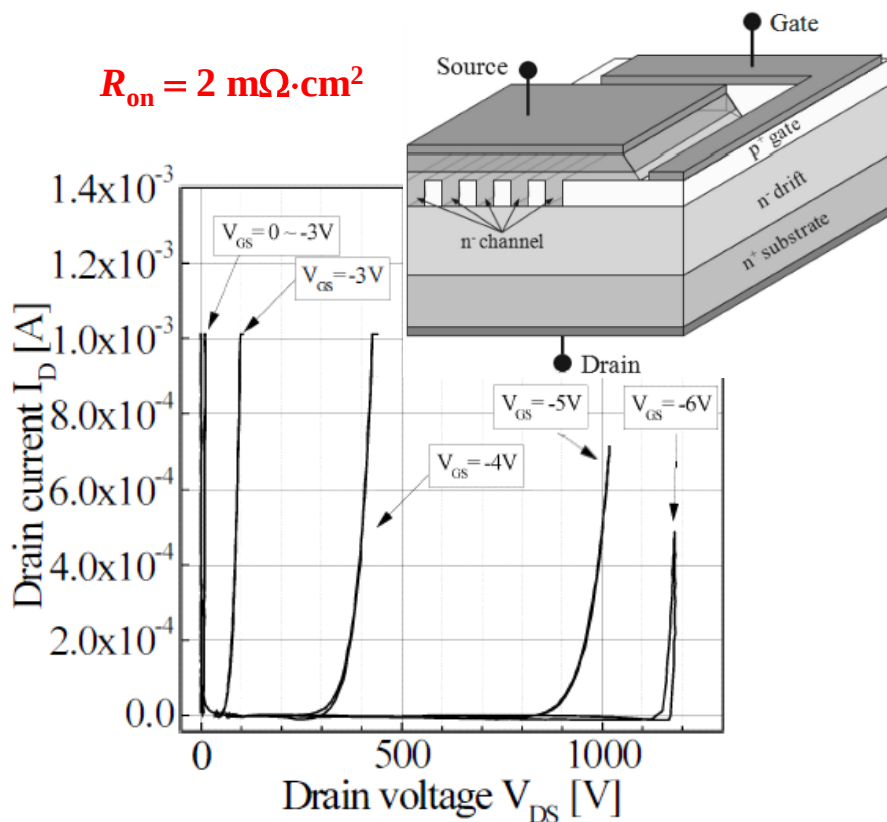
Транзистор со статической индукцией (SIT)

SiC

2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment – Japan

Development of Semiconductor Switches (SiC-BGSIT) applied for DC Circuit Breakers

Yasunori Tanaka , Akio Takatsuka , Tsutomu Yatsuo , Yukihiro Sato , and Hiromichi Ohashi



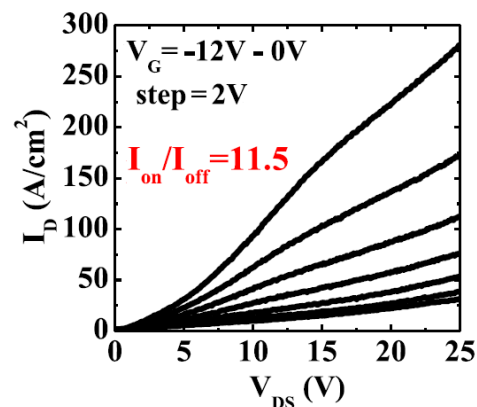
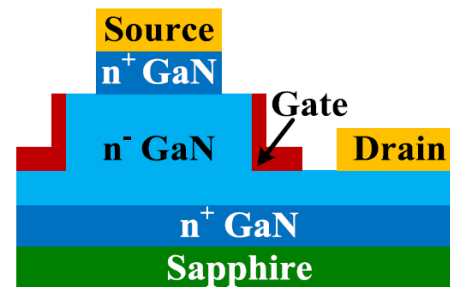
Проблема деградации характеристик
в биполярном режиме работы

GaN

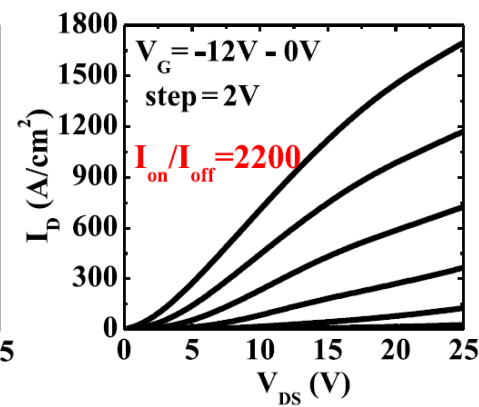
JOURNAL OF THE **ELECTRON DEVICES SOCIETY**, NOVEMBER 2017

Demonstration of GaN Static Induction Transistor (SIT) Using Self-Aligned Process

WENWEN LI , DONG JI , RYO TANAKA , SAPTARSHI MANDAL (Student Member, IEEE),
MATTHEW LAURENT , AND SRABANTI CHOWDHURY (Senior Member, IEEE)



high power ICP etch



two-step low power etch

Проблема p⁺-легирования

Мотивация

2014 - 2016

«Разработка технологии получения
эпитаксиальных гетероструктур
арсенидов галлия и алюминия для
нового поколения силовых
приборов»

Участники проекта

ИФМ РАН, г. Нижний Новгород

ООО «МеГа Эпитех», г. Калуга

ООО «Мега СМ», г. Зеленоград

ООО НПО «КРИСТАЛЛ», г. Королёв

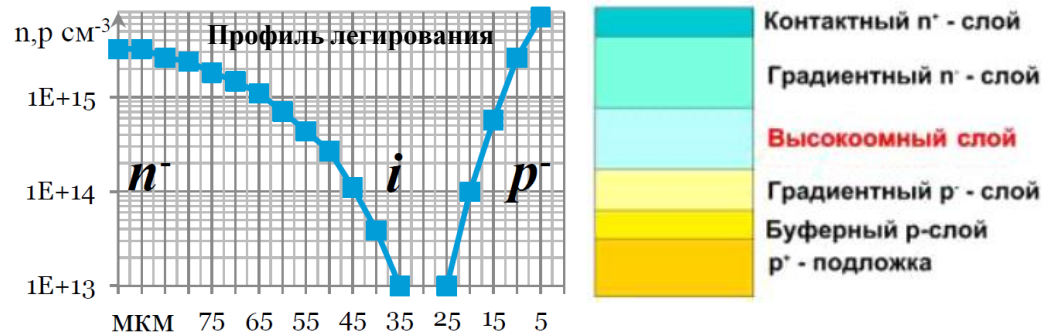
ЗАО «ОКБ МЭЛ», г. Калуга

Руководитель проекта

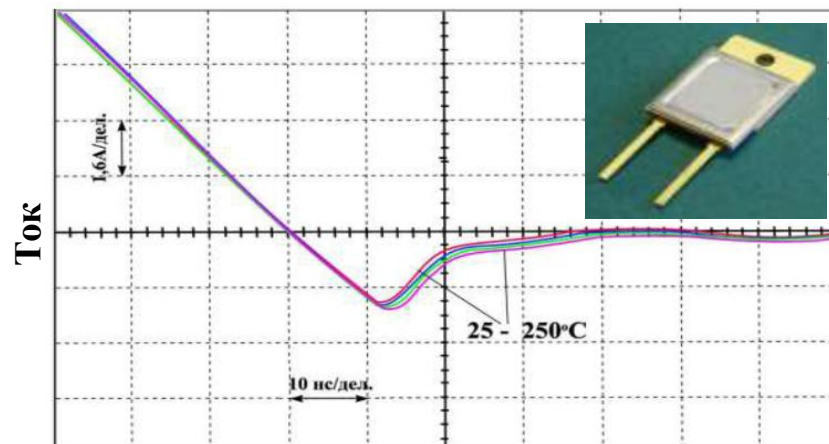
зав. отделом ИФМ РАН В.И. Шашкин

Разработаны и изготовлены силовые р-і-п диоды на основе гетероструктур (Al)GaAs, выращенных методом жидкофазной эпитаксии.

Диоды превосходят существующие аналоги на основе Si и SiC по быстродействию и максимальной температуре работы.



Процесс обратного восстановления р-і-п диода



I	5 А
U_{BR}	> 610 В
t_{RR}	< 23 нс
$f_{S\max}$	> 3.1 МГц
$T_{\max}$	250°C

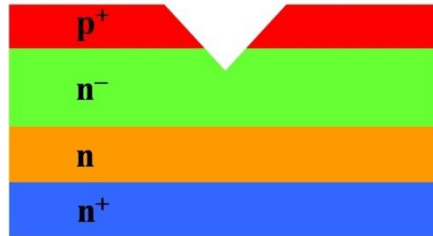
Конструкция и маршрут изготовления GaAs SIT

Формирование
областей стока,
дрейфа и затвора
методом ЖФЭ

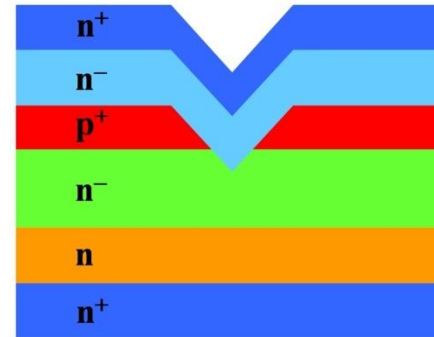


Формирование
канавки до слоя n^-

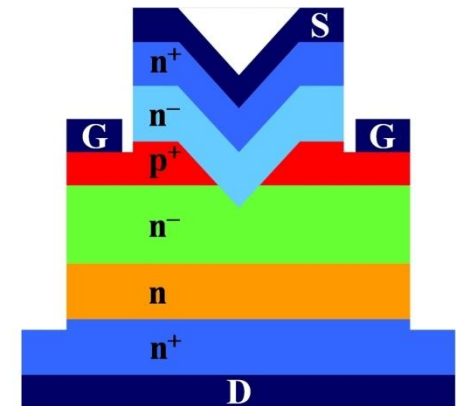
жидкостное
анизотропное травление
V-образной канавки



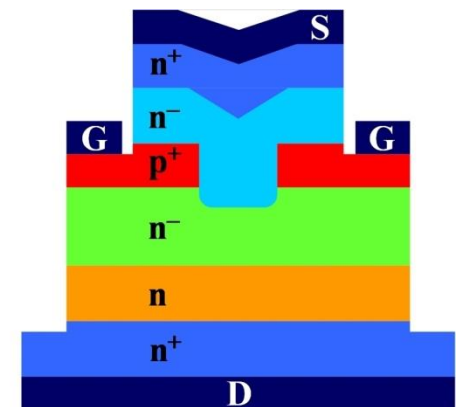
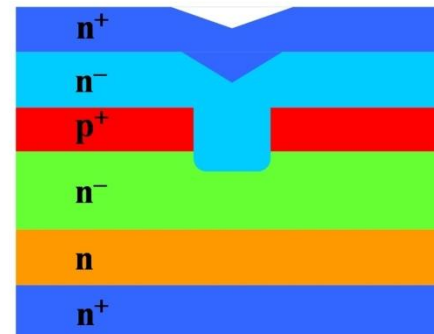
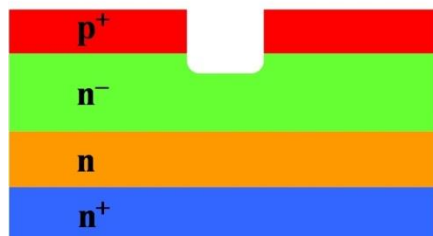
Формирование
областей канала и
истока методом
МОГФЭ



Формирование
мезоструктуры и
омических контактов



плазмохимическое
травление U-образной
канавки



Используемое технологическое оборудование



Ростовое графитовое устройство
для ЖФЭ (ООО «МеГа Эпитех»)



Установка ультрафиолетовой
фотолитографии Suss MJB4



Установка плазмохимического
травления Oxford Plasmalab 80



Установка МОГФЭ
Epiquip VP-502 RP



Установка электронно-
лучевого напыления Amod



Установка быстрого термического
отжига AccuThermo AW 410

Используемое аналитическое оборудование



Рентгеновский дифрактометр
Bruker D8 Discover



Масс-спектрометр
вторичных ионов TOF.SIMS 5



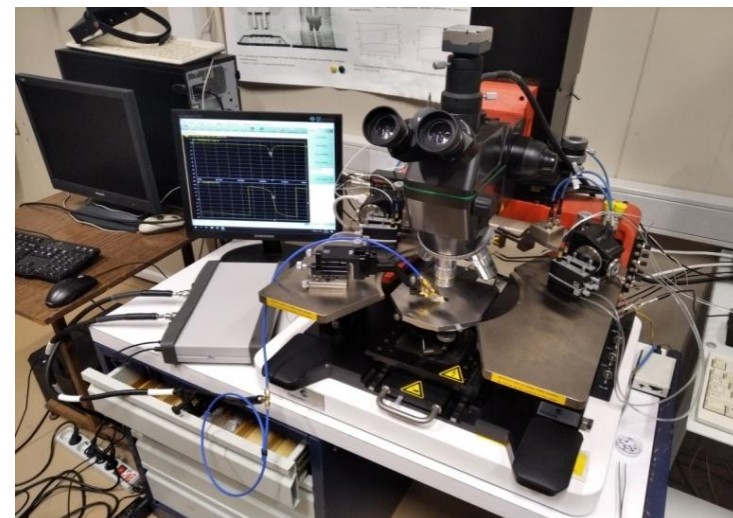
Интерференционный
микроскоп Talysurf CCI 2000



Электронный
микроскоп Supra 50

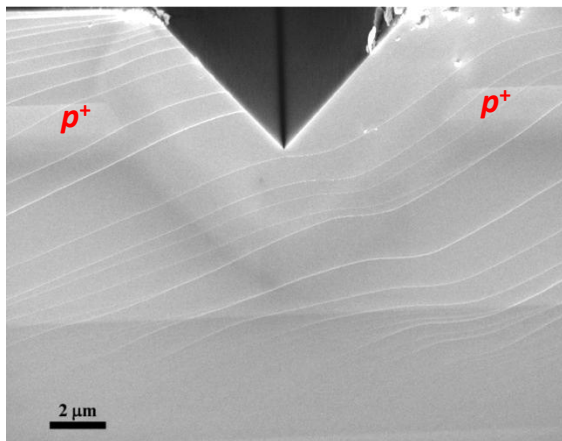


Электронно-ионный
микроскоп Neon 40

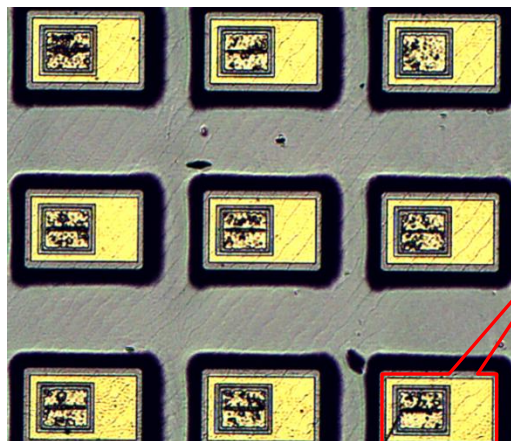


Зондовая станция
Cascade Microtech PM5

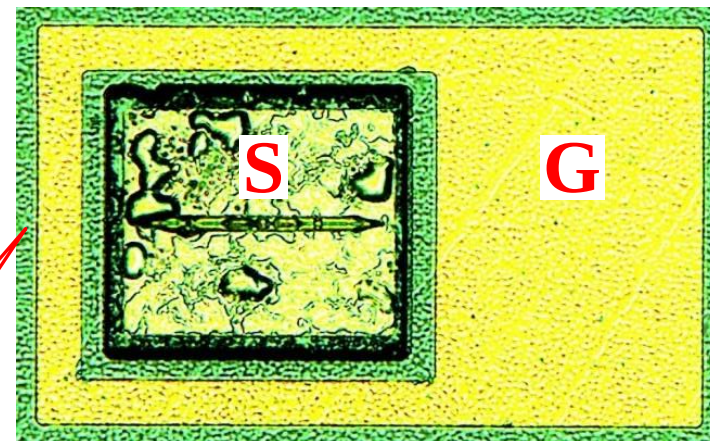
Транзистор с V-образной канавкой



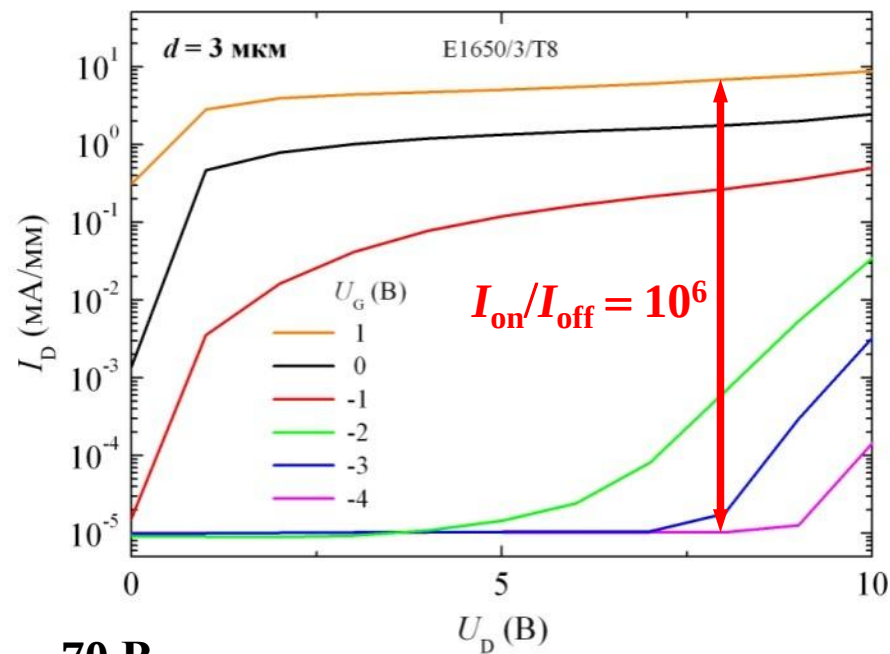
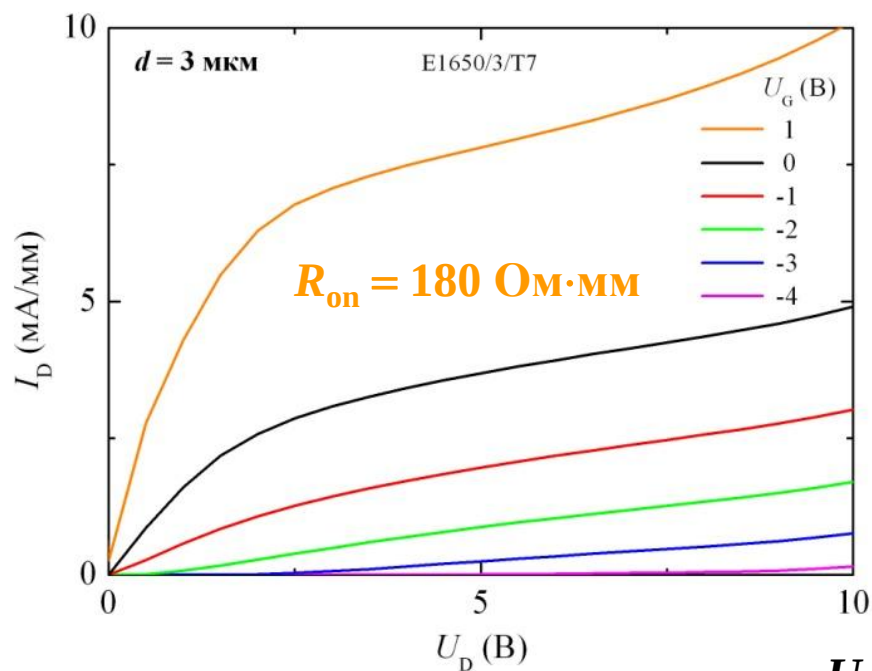
Скол V-образной канавки после МОГФЭ-заращивания



9 транзисторов с шириной канавки $d = 0, 2, 3, \dots, 9$ мкм

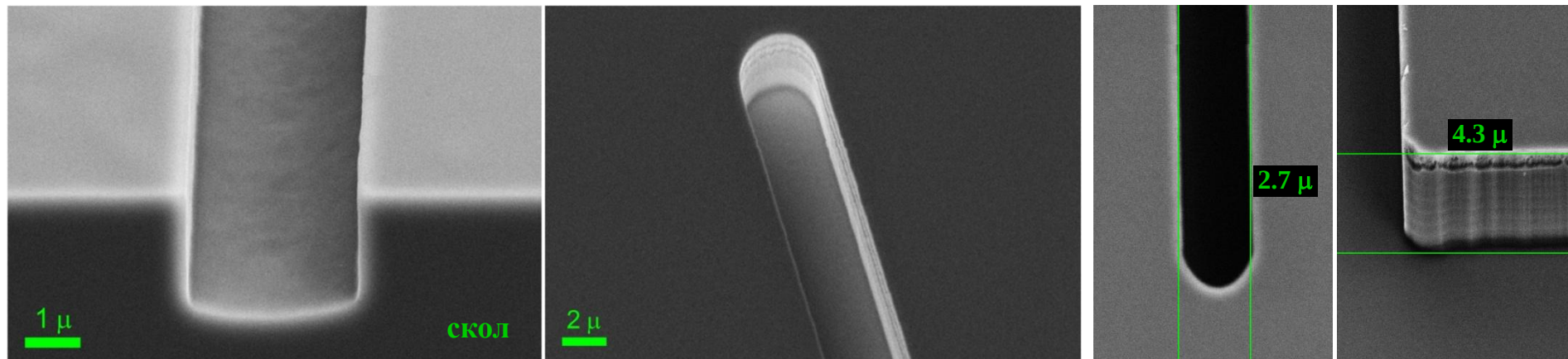


Транзистор с шириной канавки 3 мкм



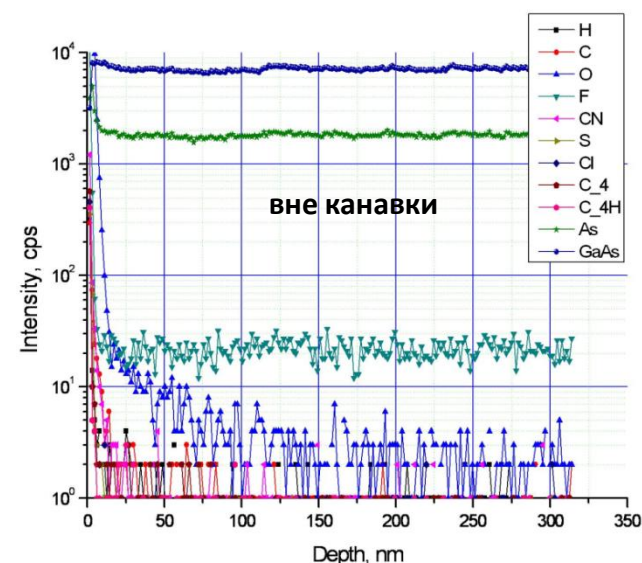
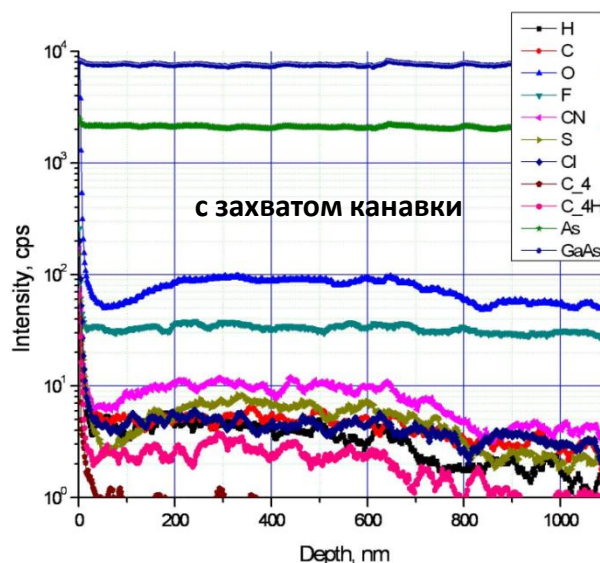
$U_{D BR} = 70 \text{ B}$

Плазмохимическое травление U-образной канавки



Травление канавок с вертикальными стенками
в индуктивно-связанной плазме $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$

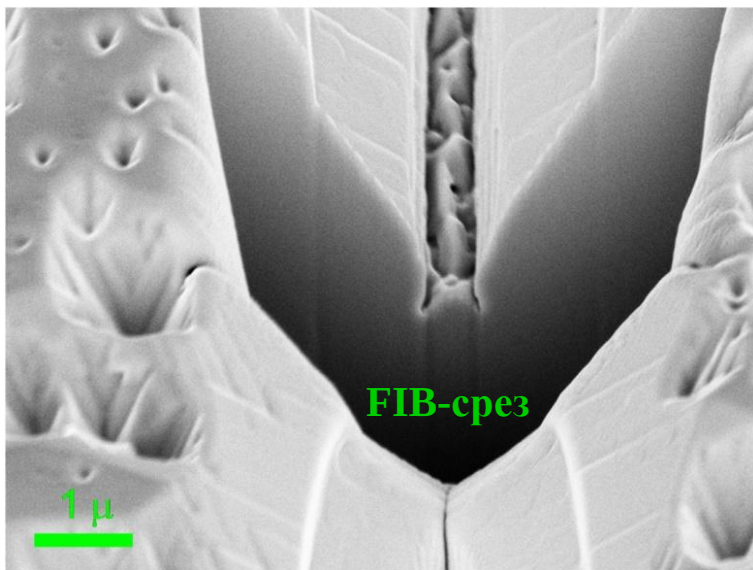
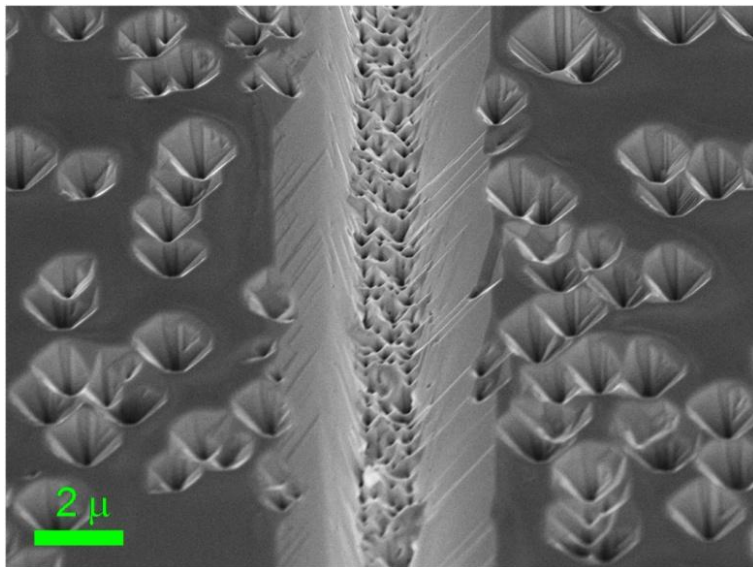
При глубине травления 4 μ
боковой подтрав 0.35 μ



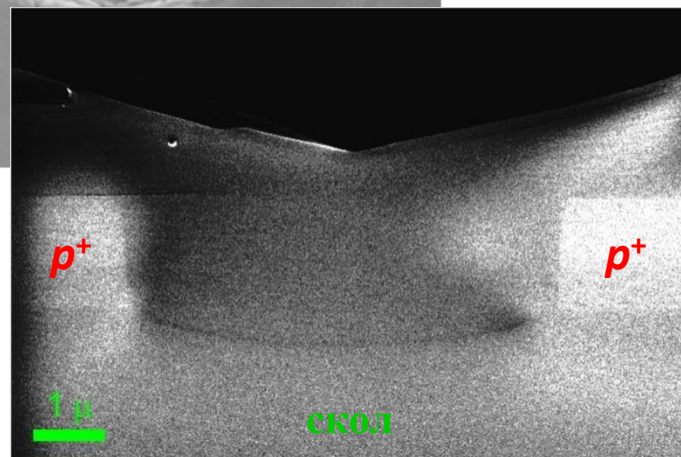
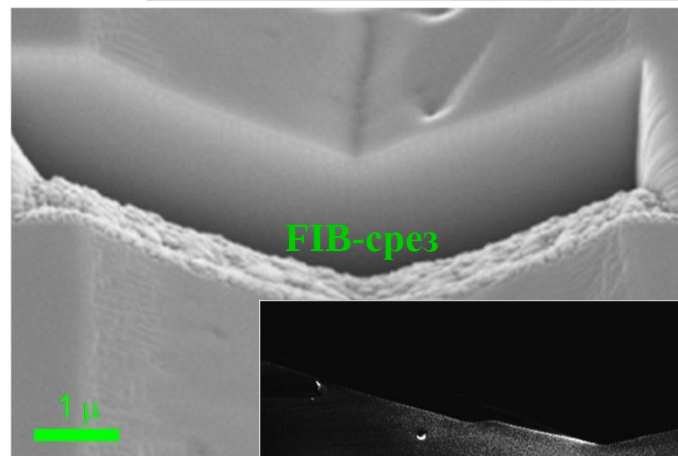
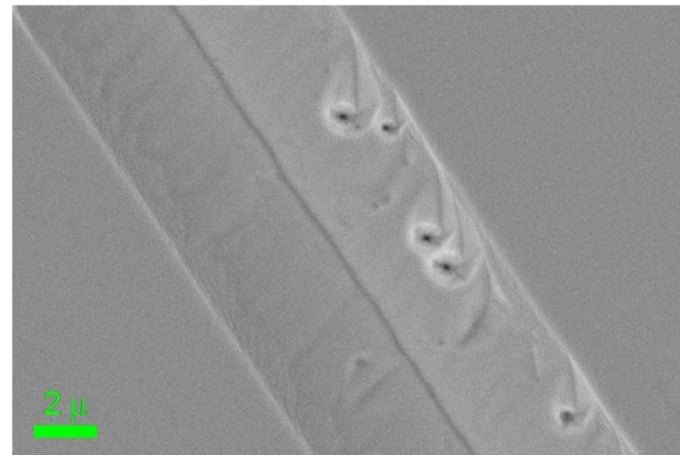
Метод ВИМС регистрирует загрязнения остающиеся после травления канавок. Это позволяет оптимизировать процессы травления и очистки по критерию минимума загрязнения поверхности.

Очистка поверхности и МОГФЭ-заращивание U-образной канавки

Неоптимальные режимы травления и очистки

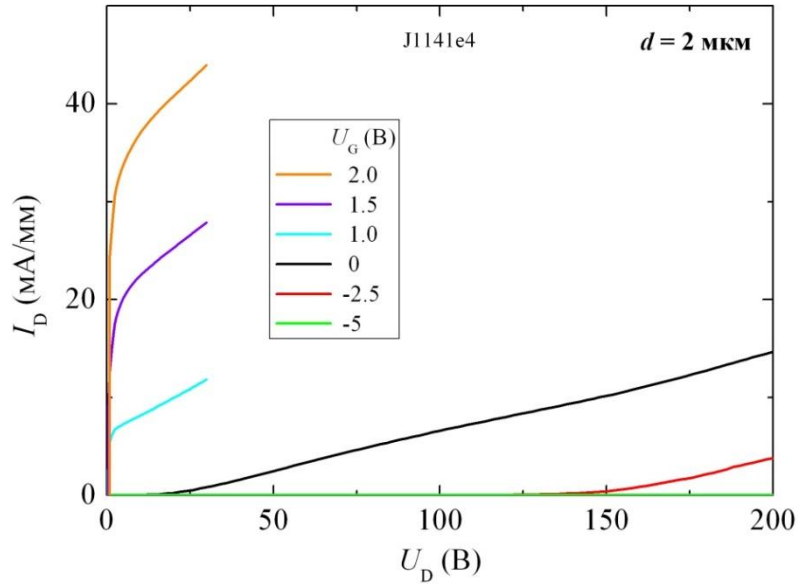


Оптимальные режимы травления и очистки

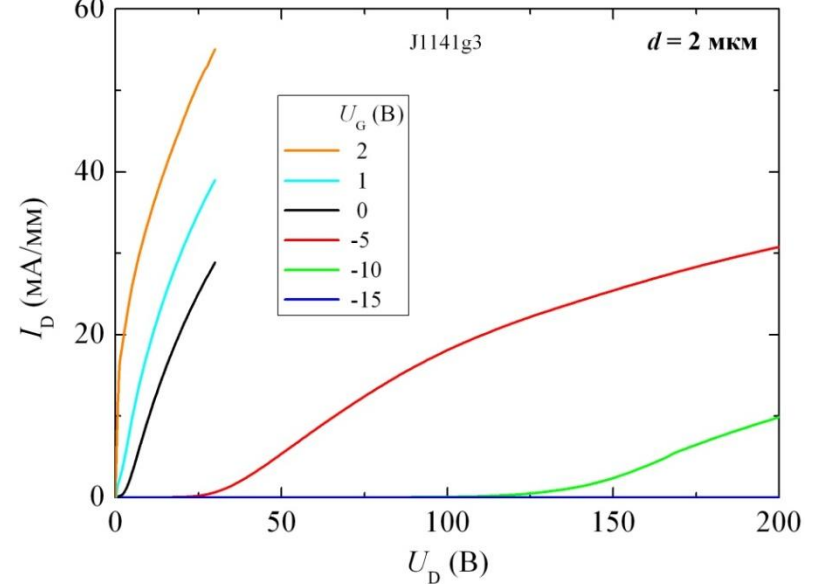


ВАХ транзисторов с U-образной канавкой

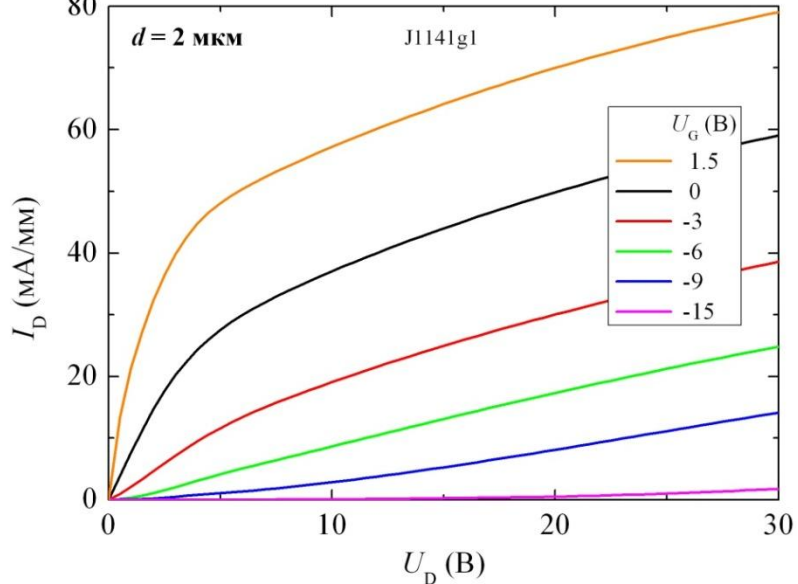
$U_{D \max} = 420 \text{ В}, I_{D \max} = 50 \text{ мА/мм}$



$U_{D \max} = 300 \text{ В}, I_{D \max} = 80 \text{ мА/мм}$



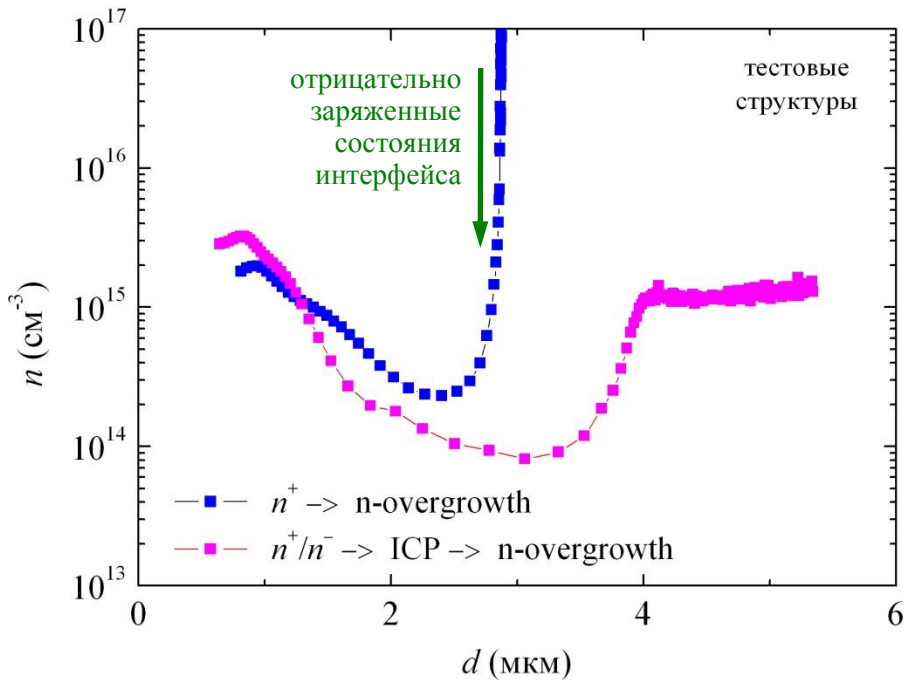
$U_{D \max} = 90 \text{ В}, I_{D \max} = 100 \text{ мА/мм}$



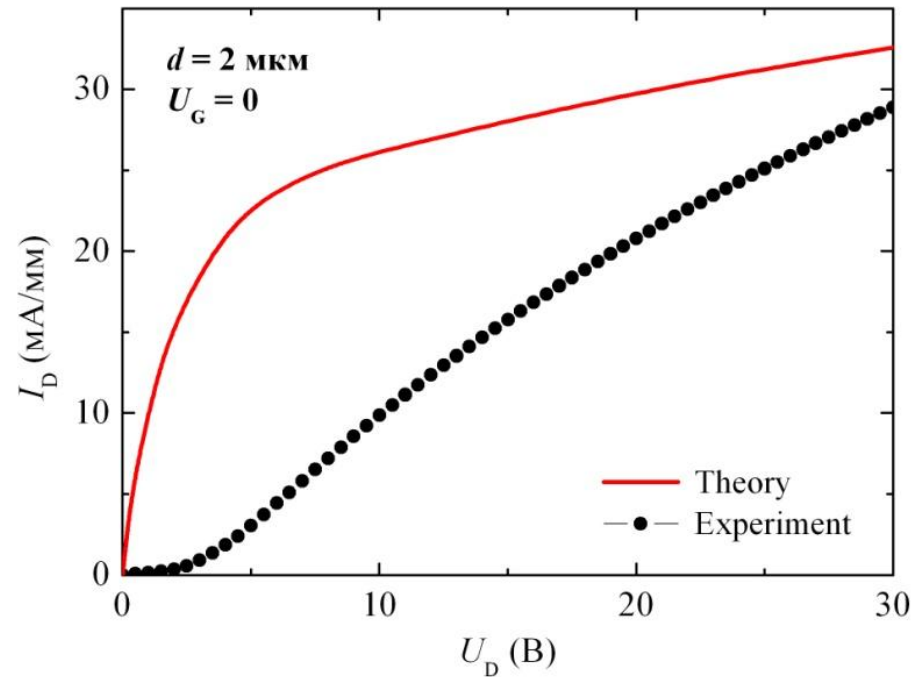
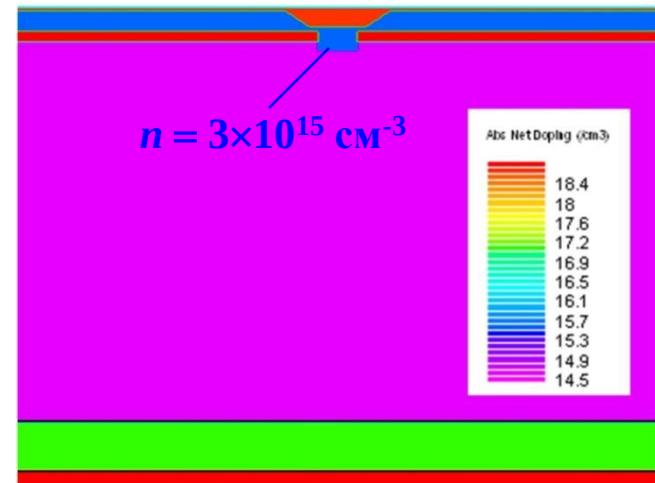
$$R_{\text{on min}} \sim 1 \text{ МОм} \cdot \text{см}^2$$

Электронный транспорт через межстадийные границы раздела

Области обеднения вблизи интерфейса при МОГФЭ-доращивании



Моделирование ВАХ транзистора



Пути улучшения свойств интерфейса:

- предростовая подготовка поверхности в эпитаксиальной установке;
- повышенное донорное легирование на начальных стадиях зарастивания.

Заключение

Разработан и изготовлен прототип вертикального полевого транзистора с управляющим р-п переходом, являющийся мультиплицируемым фрагментом системы мощного высоковольтного силового транзистора на основе GaAs. Оригинальный технологический маршрут формирования транзисторной структуры включает стадии жидкофазной эпитаксии, фотолитографии, плазмохимического травления, очистки и металлоорганической газофазной эпитаксии.

Направления дальнейших исследований

Цель: создание многоканального силового транзистора с напряжением > 600 В, превосходящего аналоги по частоте коммутации и температуре работы.

Задачи:

- ✓ улучшение транспортных свойств межстадийных границ раздела
- ✓ развитие и использование метода селективной МОГФЭ в окнах масок
- ✓ оптимизация дизайна полупроводниковой гетероструктуры и микроструктуры транзистора

Спасибо за внимание!