



Федеральное государственное автономное
научное учреждение
Институт СВЧ полупроводниковой
электроники им. В. Г. Мокерова
РАН, Москва

Физико-технологические аспекты создания СВЧ приборов на полупроводниковых структурах АЗВ5: эпитаксия и субмикронная литография

Евгений Климов (лаб. МЛЭ)

Ринат Галиев (лаб. ЭЛЛ)

Две установки электронно-лучевой литографии (пр-во Raith GmbH, Германия)

Raith150-Two (с 2008 г.)



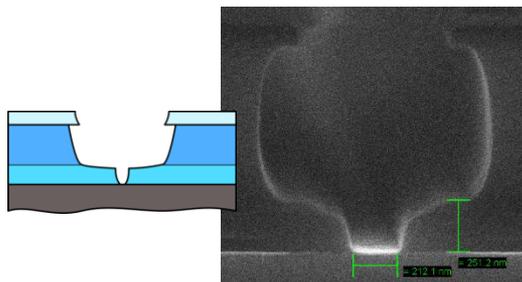
Voyager (с 2014 г.)



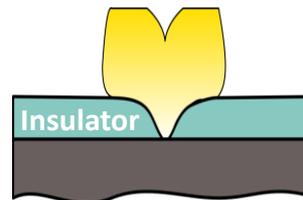
E_{acc}	1..30 кэВ	30..50 кэВ
I_{beam}	до 20 нА	до 40 нА
$D_{beam\ min}$	~1.6 нм	< 2.5 нм @50 кэВ
Размер поля	< 250 ² мкм ² ; режим РЭМ x30..x10 ⁶	до 500 ² мкм ²
Точность сшивки/совмещения	не хуже 40 нм ($ \mu +3\sigma$)	не хуже 25 нм ($ \mu +3\sigma$); режим MBMS (литография периодических структур без сшивки полей)
Паттерн-генератор	20 МГц/16 бит	50 МГц/20 бит

Технологические подходы к формированию T-образных затворов СВЧ-транзисторов (GaN, GaAs, InP HEMT)

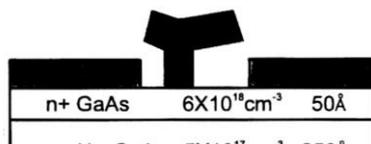
Профиль в многослойных резистах



Комбинации резиста и диэлектрика для достижения нужного профиля

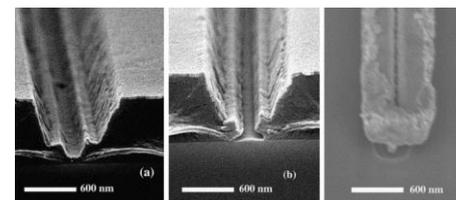


Самосовмещенные технологии (gate first)



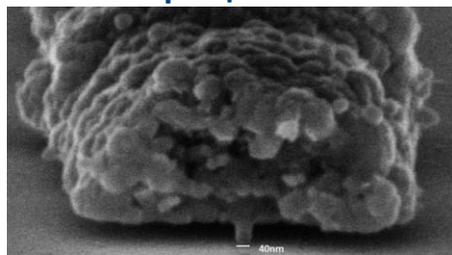
J. of the Korean Physical Society, Vol. 33, No. , Nov. 1998, pp. S374-S378

Nanoimprint-технологии



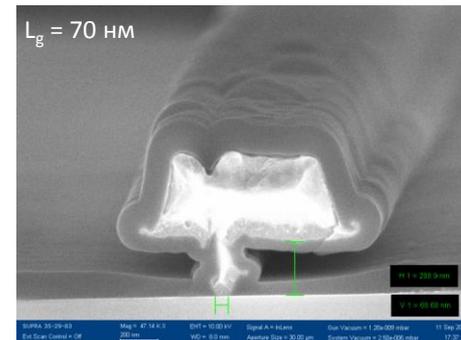
Microelectronic Engineering
Vol. 67–68, June 2003, pp. 189-195

Технологии с гальваническим наращиванием

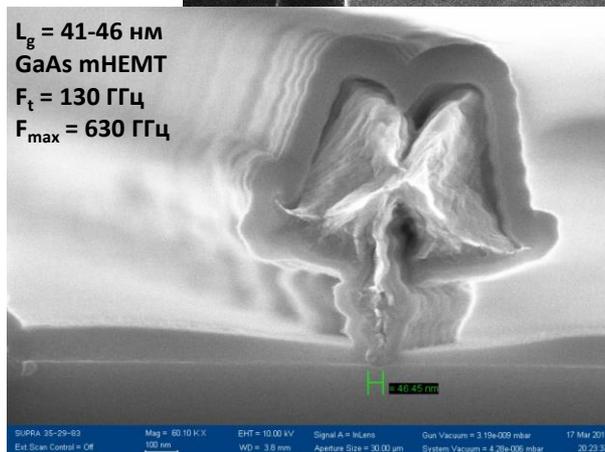
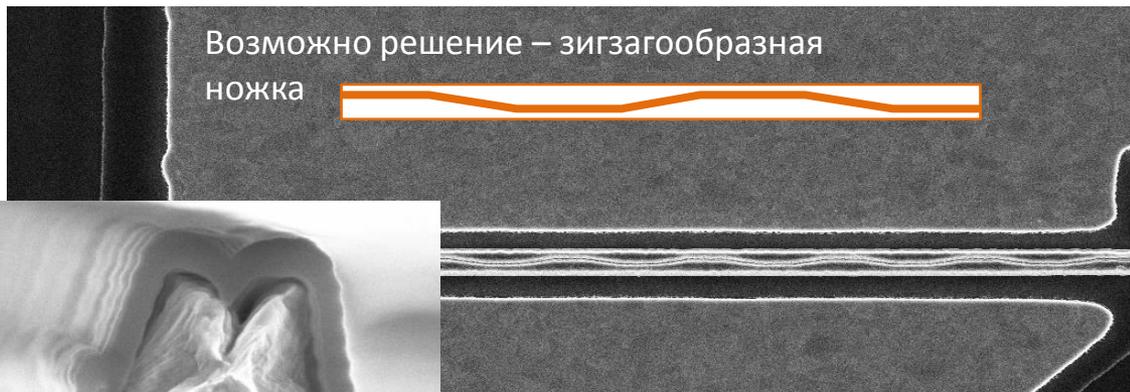


Microelectronic Engineering, Vol. 121, pp. 153–155, (2014).

T-затворы по маске резиста



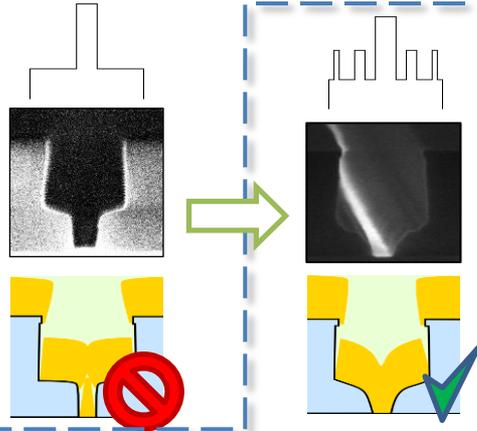
Проблемы с механической устойчивостью коротких затворов



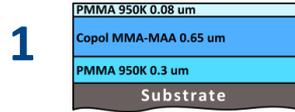
ФТП, 2014, т. 48, № 1, с. 73–76

T-затворы по маске резиста

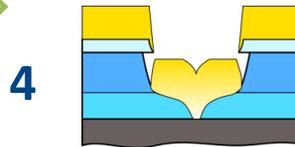
Оптимизация профиля
проявления для его наилучшего
запыления металлом



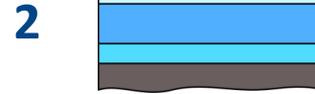
3-слойный резист (50 кэВ, однократное экспонирование)



Нанесение резистов



Осаждение металла



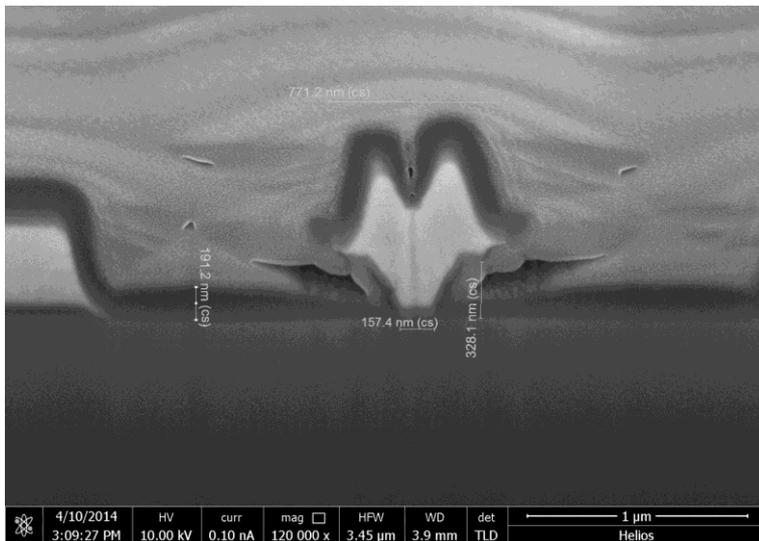
Экспонирование сложного
профиля дозы (шляпа и ножка)



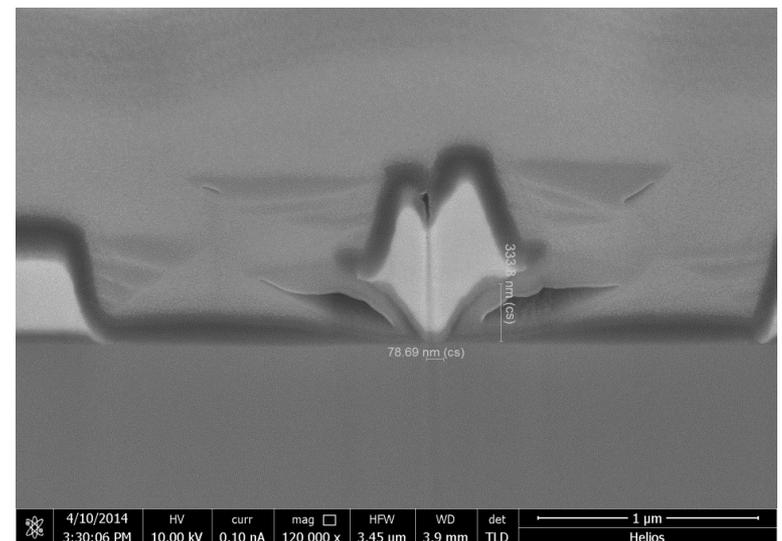
Проявление всех
слоев



Взрыв металла



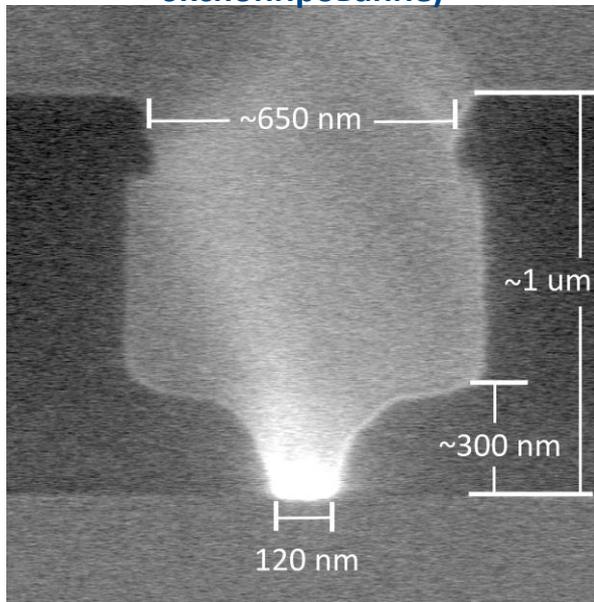
$L_g \approx 158 \text{ нм}$, F_t до 67 ГГц



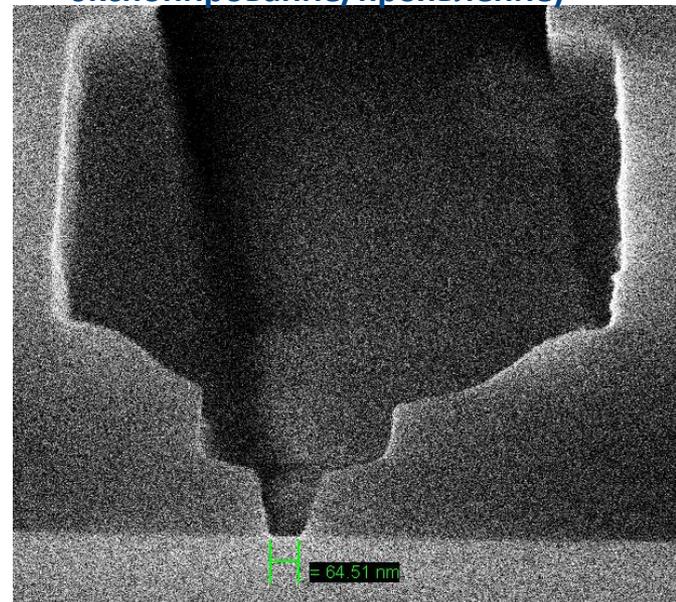
$L_g \approx 80 \text{ нм}$

T-затворы по маске резиста

3-слойный резист (50 кэВ, однократное экспонирование)

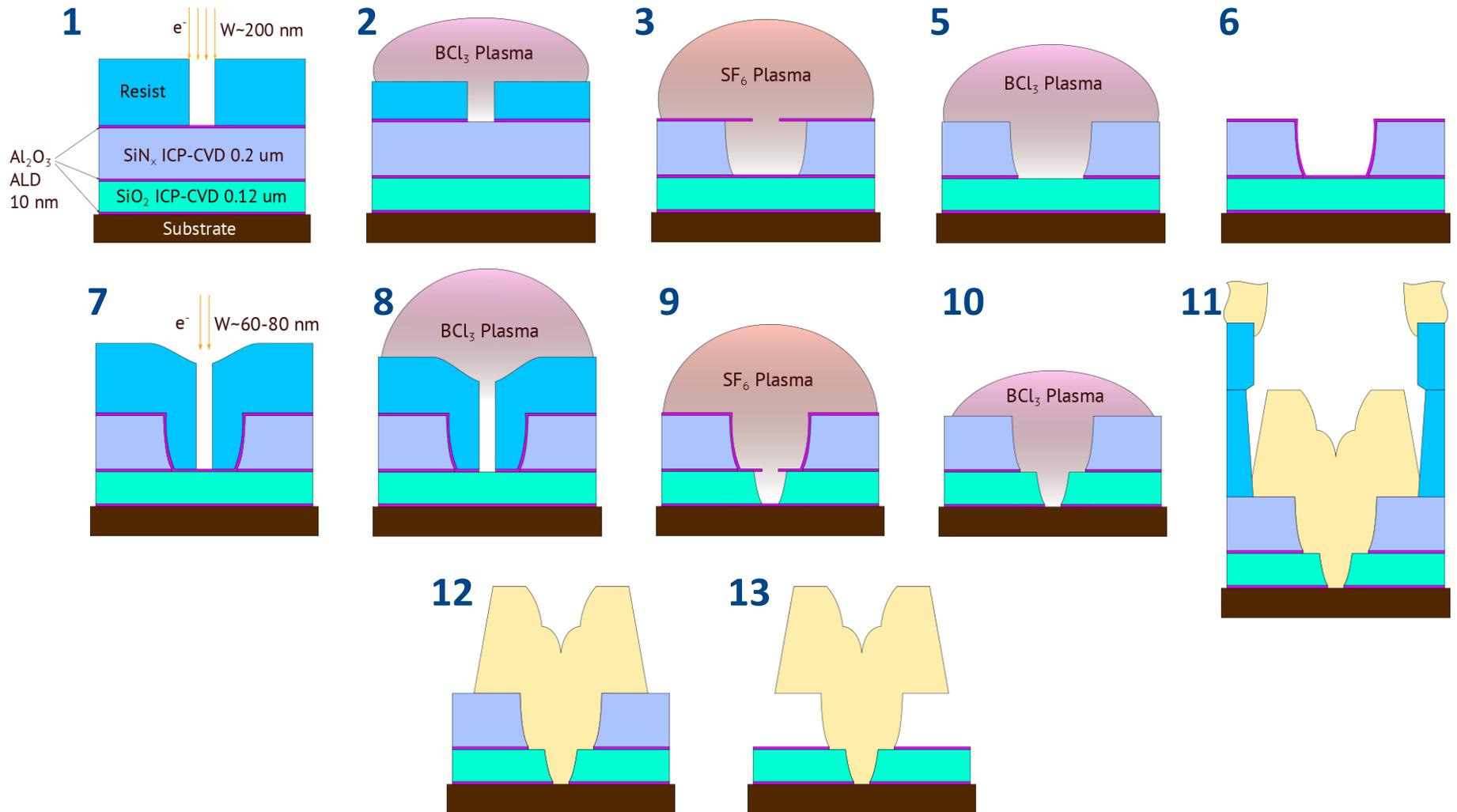


6-слойный резист (30..50 кэВ, двойное экспонирование/проявление)



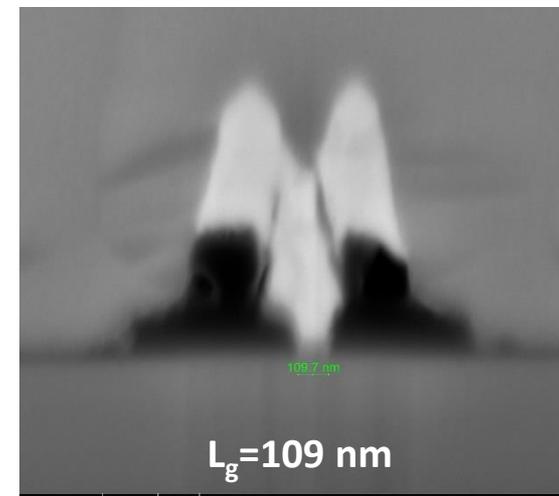
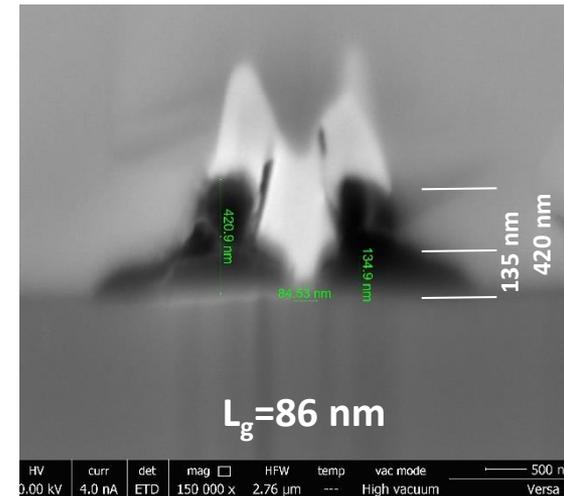
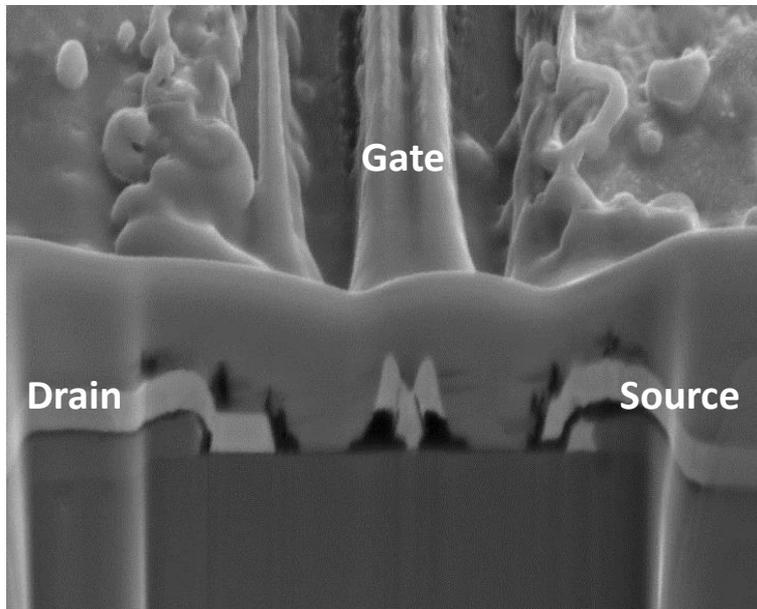
T-затворы по маске из диэлектрика

Вариант технологического маршрута «профилированная щель в диэлектрике»



T-затворы по маске из диэлектрика

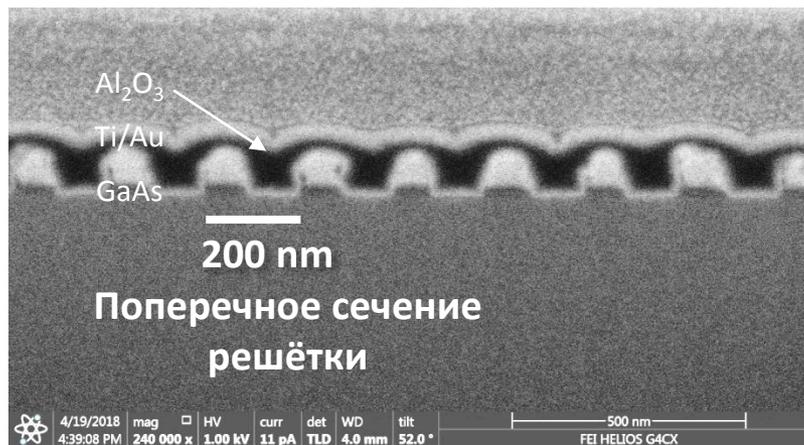
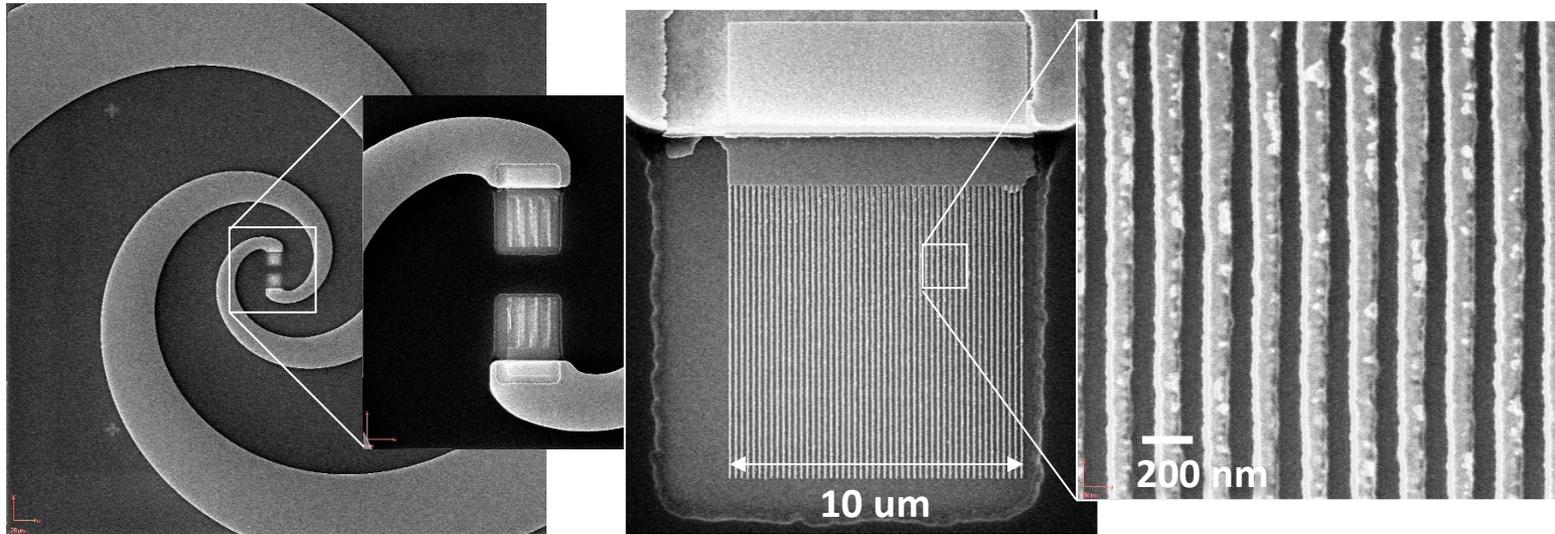
Результаты использования маршрута с диэлектриками



- Размеры щели (длина затвора) 60-100 нм и менее
- Воспроизводимость геометрии
- Возможность контроля на каждом этапе
- Профиль с положительным наклоном стенок

Периодические структуры: фотопроводящие ТГц-антенны с плазмонными решётками

Плазмонная решётка (ПР) - электрод в виде металлической гребёнки с шагом ~ 200 нм.
Используется в фотопроводящих антеннах (ФПА) излучения ТГц диапазона для значительного увеличения эффективности оптико-ТГц конверсии ($\lambda_{\text{pump}}=800..1500$ нм)



Используются подложки со структурами LT-GaAs и InAs-QDs

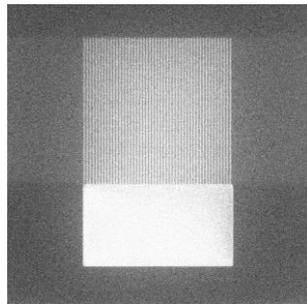
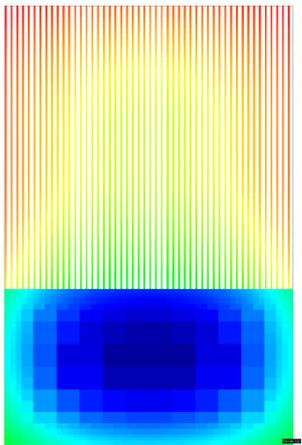
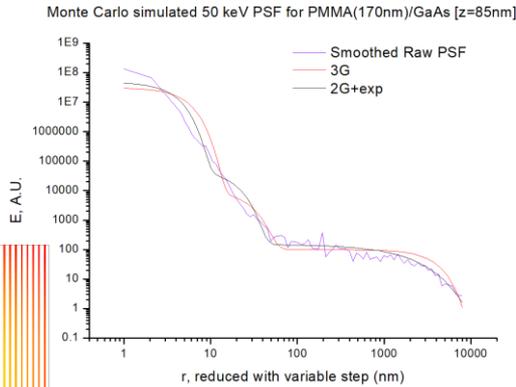
AIP Advances, vol. 9,
pp. 015112-1-5, 2019

Периодические структуры: фотопроводящие ТГц-антенны с плазмонными решётками

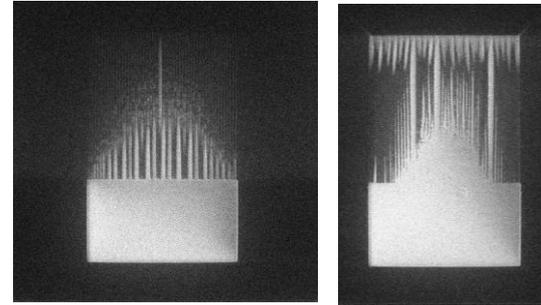
Коррекция эффектов близости

- Высокая плотность рисунка (~100 нм ширина линии с шагом ~200 нм)
- Подложка GaAs требует коррекции эффектов близости даже на 50 кэВ
- Высота/ширина металлизации >1:1 требует толщины резиста >150 нм

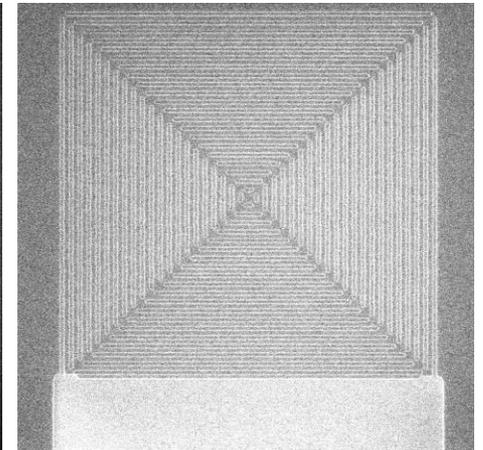
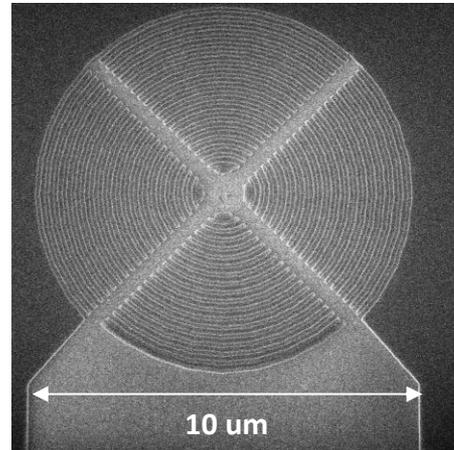
Весовая аппроксимация функции рассеяния (из данных Монте-Карло) в критическом диапазоне 30-200 нм



Проявление резиста без коррекции эффектов близости



Омниполярные плазмонные решётки

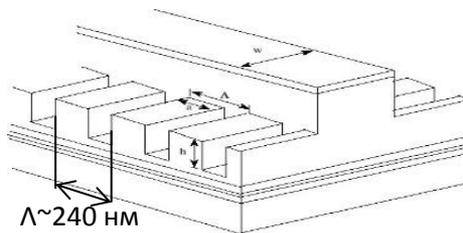


Лазерные гетероструктуры с MQW InAlAs/InGaAs на подложках InP

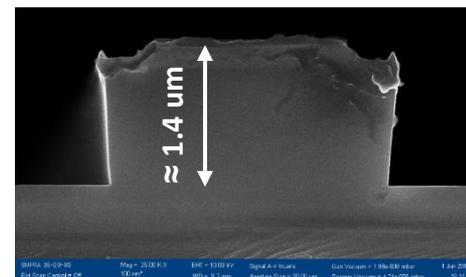
Параметры решёток :

- Диапазон периода решетки $\Lambda \approx 235..250 \text{ нм}$
- Длина непрерывной области $L = 0.2 - 10.0 \text{ мм}$
- Фазовый сдвиг $\lambda/4$ ($\Lambda/2$) в позиции $L/2$
- Точность задания периода не хуже 0.2 нм
- Глубина травления $100\text{-}150 \text{ нм}$

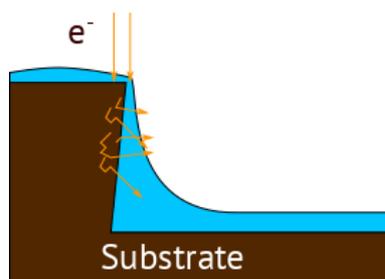
Схема лазера



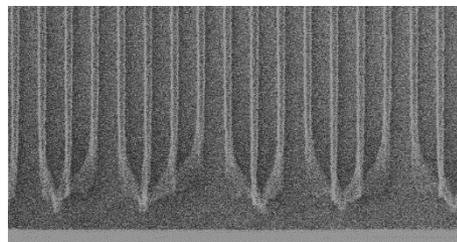
Скол структуры с полоском-ребром



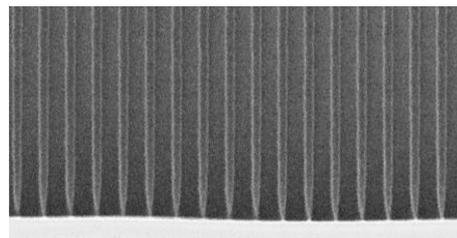
Прецизионная литография дифракционной решётки вплотную к краю уже сформированного гребня представляет собой нетривиальную задачу



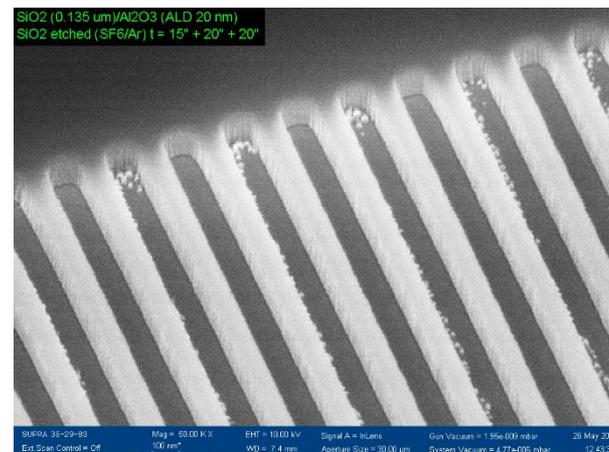
Паразитная боковая засветка электронами толстого резиста у края гребня требует оптимизации процессов нанесения и проявления



Отрыв и слоупывание ламелей резиста у края гребня



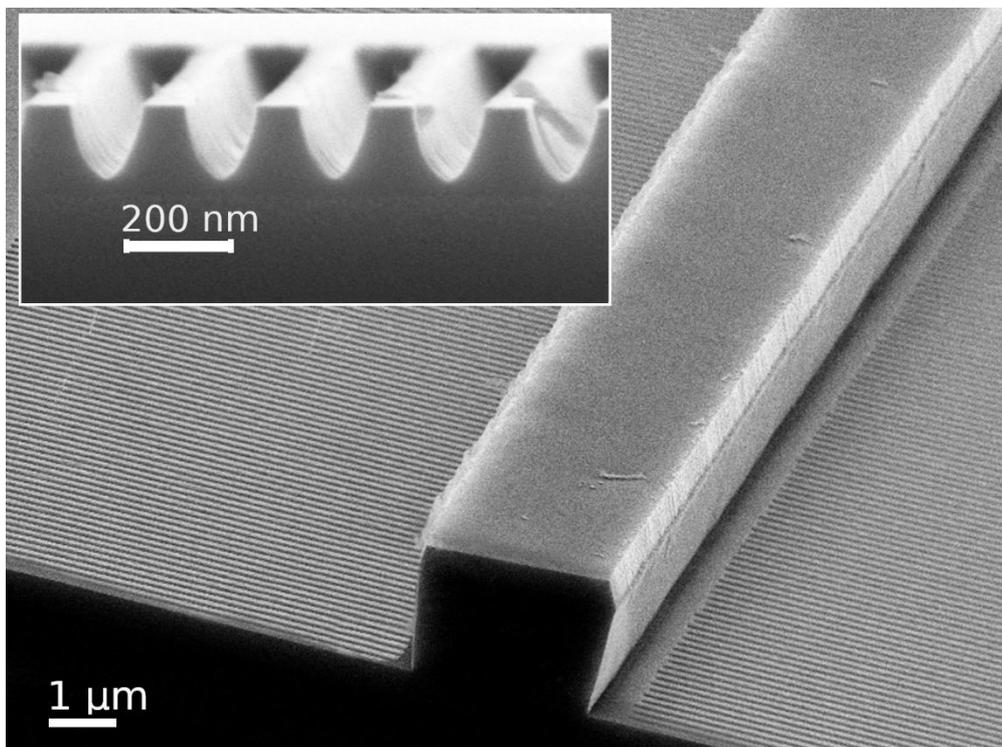
Устойчивая маска резиста после оптимизации процессов



Результат переноса маски резиста в слой SiO_2 , используемый для дальнейшего ионно-химического травления слоя InP

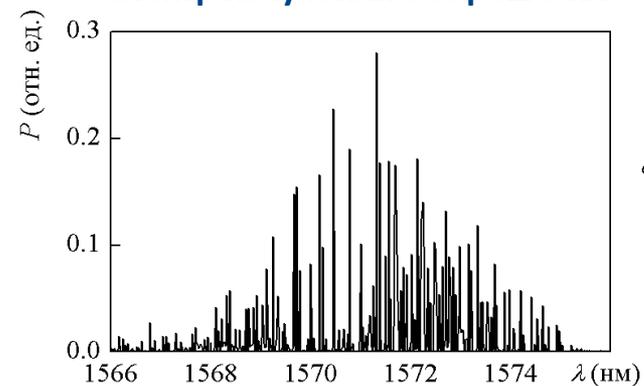
Периодические структуры: брэгговские решётки для одномодовых РОС-лазеров

Полученные результаты

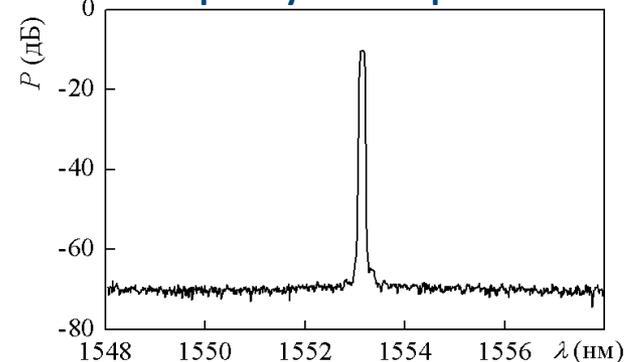


Квантовая Электроника, 2020, Том 50, № 2, с. 143-146.

Спектр излучения без решётки



Спектр излучения с решёткой



$P_{out}[500 \text{ мА}]$ > 165 мВт
 λ_0 1.55 мкм
 Подавление боковых мод не хуже 55 дБ

$\Delta\lambda/\Delta T$ 0.09 нм/°C
 $\Delta\lambda/\Delta I$ $4.3 \cdot 10^{-3}$ нм/мА

Спасибо за внимание!