

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)



Проведение исследований и организация  
учебного процесса в области микро- и нанотехнологий  
на кафедре НИ РТФ и в НОЦ ИТ СГАУ

Самара  
2013

# СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ КАФЕДРЫ НАНОИНЖЕНЕРИИ

Кафедра создана в 2007 году, до 2011 года входила в состав факультета базовой подготовки и фундаментальных наук, а затем вошла в состав радиотехнического факультета СГАУ.

Кафедра является выпускающей по направлению 210100 “Электроника и наноэлектроника” (бакалавриат). Кафедра готовит магистров по магистерской специализации “Физика и технология наноэлектронных приборов” направления 010900 “Прикладные математика и физика”. Кроме того, кафедра проводит занятия у студентов 5 и других факультетов СГАУ.

На кафедре работает аспирантура по специальностям 01.04.05 “Оптика” и 01.04.01 “Приборы и методы экспериментальной физики”.

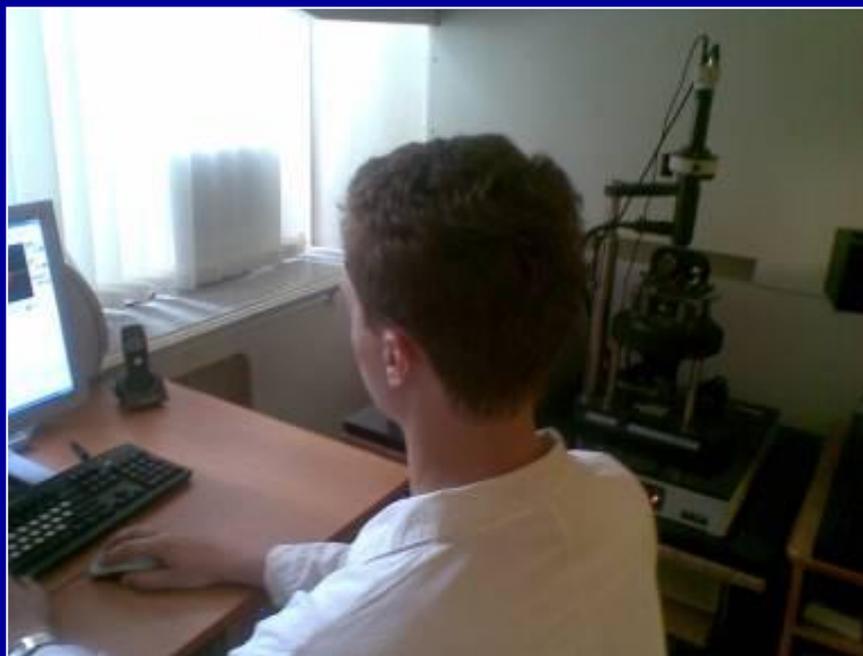
Кафедра наноинженерии осуществляет научно-методическое руководство НОЦ нанотехнологий СГАУ.

**МАГИСТЕРСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ  
«ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ НАНОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ»  
НАПРАВЛЕНИЯ «ПРИКЛАДНЫЕ МАТЕМАТИКА И ФИЗИКА»**

**Первый выпуск состоялся в 2008 году**

**Курсы, входящие в учебный план магистерской программы:**

- **Технология микро- и наноструктурирования**
- **Оптические информационные технологии и системы**
- **Методы диагностики и анализа микро и наноструктур**



## ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»



Применение учебного СЗМ-комплекса Nanoeducator-6 (компания НТ-МДТ) в учебном процессе



На кафедре разработаны учебные лабораторные стенды для обеспечения учебного процесса

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА КАФЕДРЫ

- Разработано и внедрено в учебный процесс 8 лабораторных стендов.
- Издано 11 учебных пособий и методических указаний (около 80 п.л.).
- Одно учебное пособие получило гриф УМО “Прикладные математика и физика”.
- Разработано 8 электронных учебных пособий в среде “Moodle”.
- Подготовлено 3 электронных ресурса.



Разработанные учебные стенды

## СТАТЬИ СОТРУДНИКОВ КАФЕДРЫ В РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЖУРНАЛАХ (2007-2012)

№ п/п	Название журнала	Импакт- фактор	Число статей
1.	Phys. Rev. B	3,77	1
2.	Optics Express	3,749	1
3.	Optics Letters	3,316	2
4.	Physics of Wave Phenomena	0,714	1
5.	Optics Communications	1,517	3
6.	Mendeleev Communications	0,814	1
7.	Applied Optics	1,7	2
8.	Optics and Laser Technology	1,616	1
9.	Journal of Optical Society of America A	1,933	1
10.	Journal of Modern Optics	0,98	3

# НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

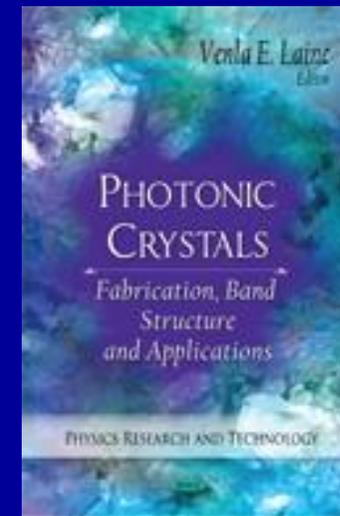
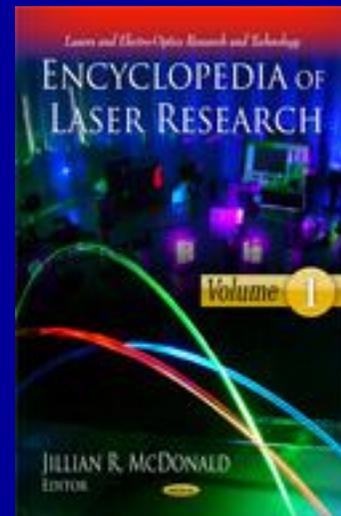
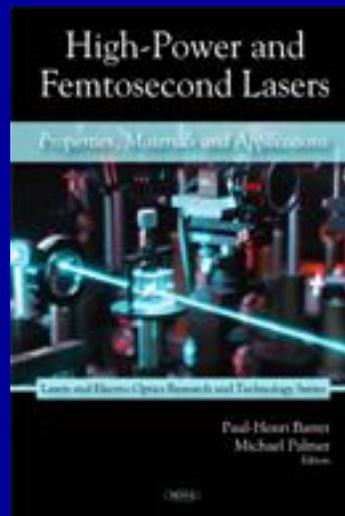
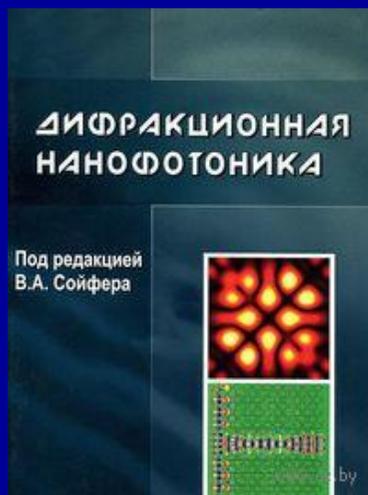
По результатам НИР опубликовано более 80 научных работ, в том числе 47 статей в рецензируемых журналах и 8 монографий

## Статьи в российских журналах, рекомендованных ВАК:

Компьютерная Оптика, Автометрия, Письма в ЭЧАЯ, Известия РАН, Вестник СГАУ, Краткие сообщения по физике ФИАН, Электронная техника, Известия СНЦ РАН, Оптический журнал, Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики и т.д.

## Главы в монографиях:

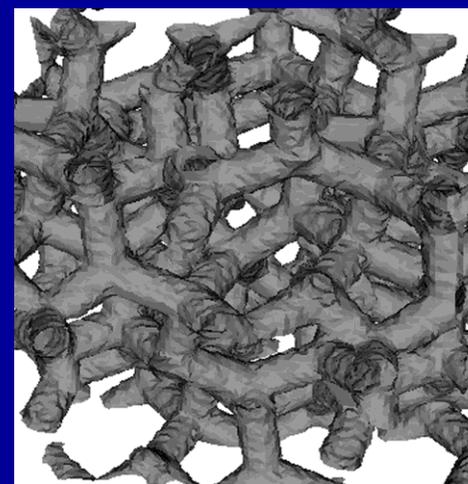
8 монографий в издательствах Физматлит (Россия), Nova Science Publishers (США), LAP LAMBERT Academic Publishing (Германия), Tianjin Science & Technology Press (Китай)



# НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ КАФЕДРЫ НАНОИНЖЕНЕРИИ

Направления научно-исследовательской работы:

- Проектирование и создание элементов микросистемной техники и нанофотоники
- Синтез и исследование фотоннокристаллических структур и оптических метаматериалов



Аспирант кафедры П.Н. Дьяченко стал победителем областного конкурса «Молодой ученый» 2008 г. и получателем гранта фонда «Династия». Тема работы – «Трехмерный фотонный квазикристалл с полной запрещенной зоной».

# ВНЕШНИЕ СВЯЗИ КАФЕДРЫ НАНОИНЖЕНЕРИИ

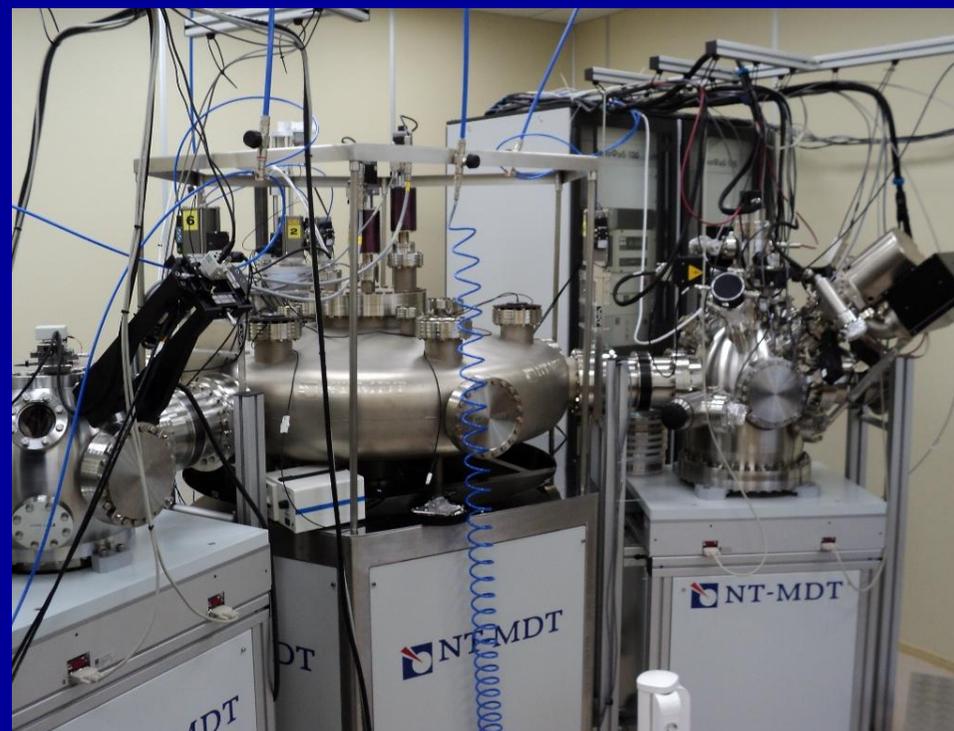
№ п/п	Партнер	Статус сотрудничества
1.	ИСОИ РАН (г. Самара).	Совместные исследования, совместные публикации, совместная работа в ЦКП “Дифракционная оптика и нанофотоника”
2.	ИОФ РАН (г. Москва).	Гранты РФФИ, совместные публикации
3.	НИИЯФ им Г.И. Будкера (г. Новосибирск).	Совместные исследования, совместные публикации
4.	Ганноверский Лазерный Центр (г. Ганновер, Германия).	Проведение стажировок, выполнение исследований, совместные публикации, подготовка заявок на финансирование, подписан Меморандум о сотрудничестве
5.	Институт прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университета (г. Йена, Германия).	Проведение стажировок, выполнение исследований, подготовка заявок на финансирование
6.	Институт фотонных технологий (г. Йена, Германия).	Проведение стажировок, выполнение исследований, подготовка заявок на финансирование
7.	Компания ЗАО “Тидекс” (г. Санкт-Петербург).	Выполнение хоздоговорных работ, подписан Протокол о сотрудничестве

# СОЗДАНИЕ НОЦ НАНОТЕХНОЛОГИЙ (НОЦ НТ) В СГАУ

**НОЦ нанотехнологий** создан  
в рамках ФЦП «Развитие инфраструктуры  
наноиндустрии  
в Российской Федерации  
на 2008 - 2010 годы» в 2008 году.

**Основные направления исследований:**

- дифракционная микрооптика и  
нанофотоника;
- синтез метаматериалов и композитов;
- микросистемная техника;
- наноизмерения.



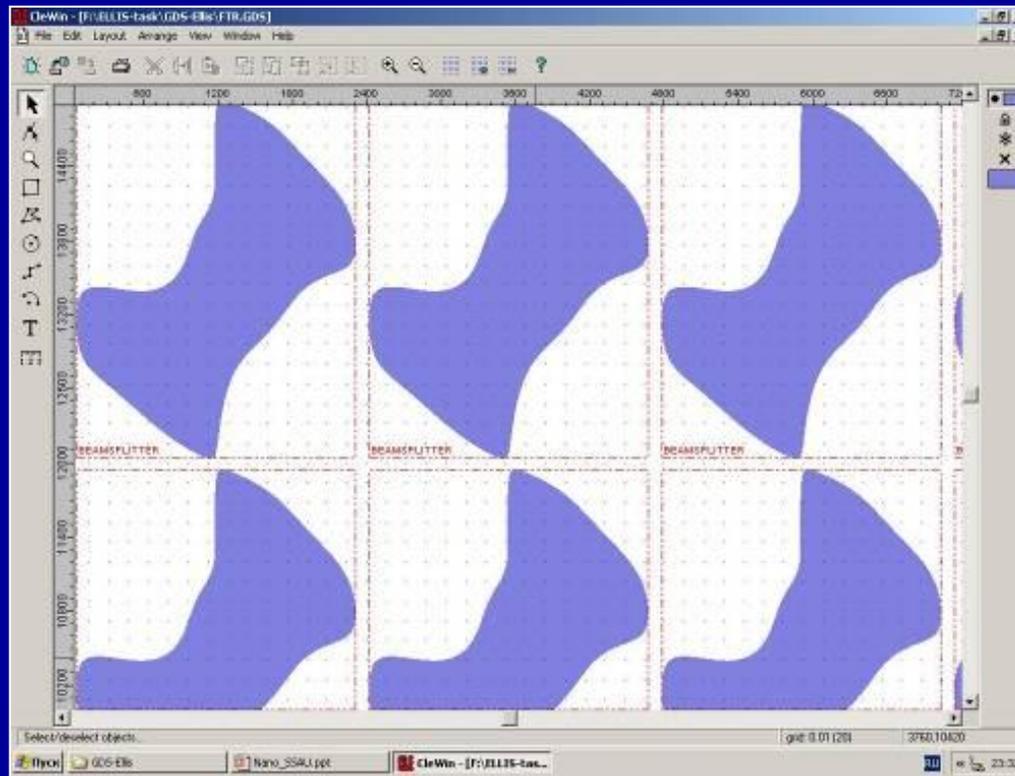
Сверхвысоковакуумный нанотехнологический  
комплекс НАНОФАБ-100 (НТ-МДТ)  
в НОЦ НТ СГАУ

# ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НОЦ ИТ

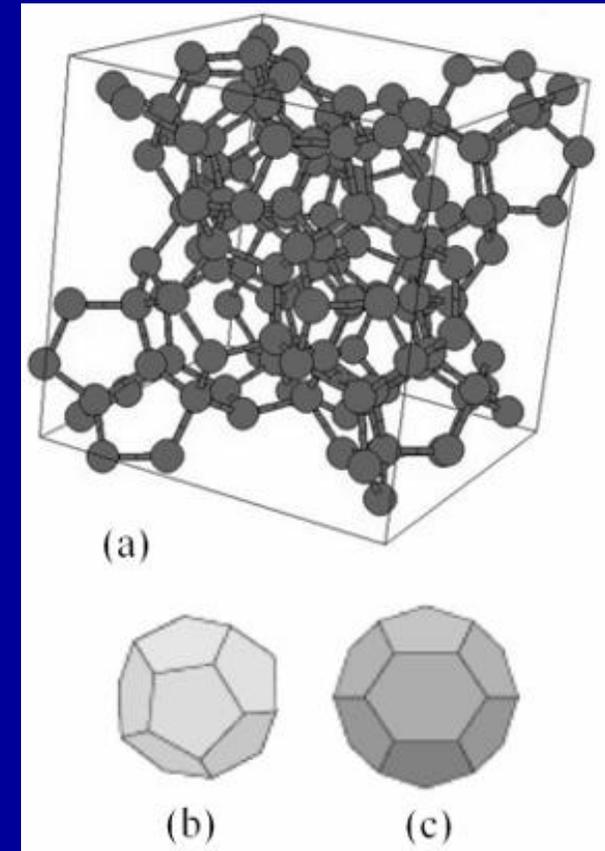
Деятельность НОЦ ИТ в 2008-2012 финансировалась из следующих источников:

1. Мероприятие *«Развитие Регионального центра нанотехнологий коллективного пользования с обеспечением доступа научно-образовательных и промышленных организаций в Самарской области к его ресурсам с целью создания новых материалов и технологий»* Губернской Программы.
2. АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)», ФЦП ««Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»».
3. Хоздоговора с предприятиями.
4. Гранты РФФИ, фонда «Династия», немецкого фонда DAAD.
5. Гранты областного конкурса «Молодой ученый».
6. Гранты программы «У.М.Н.И.К.».

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ НАНОФОТОНИКИ

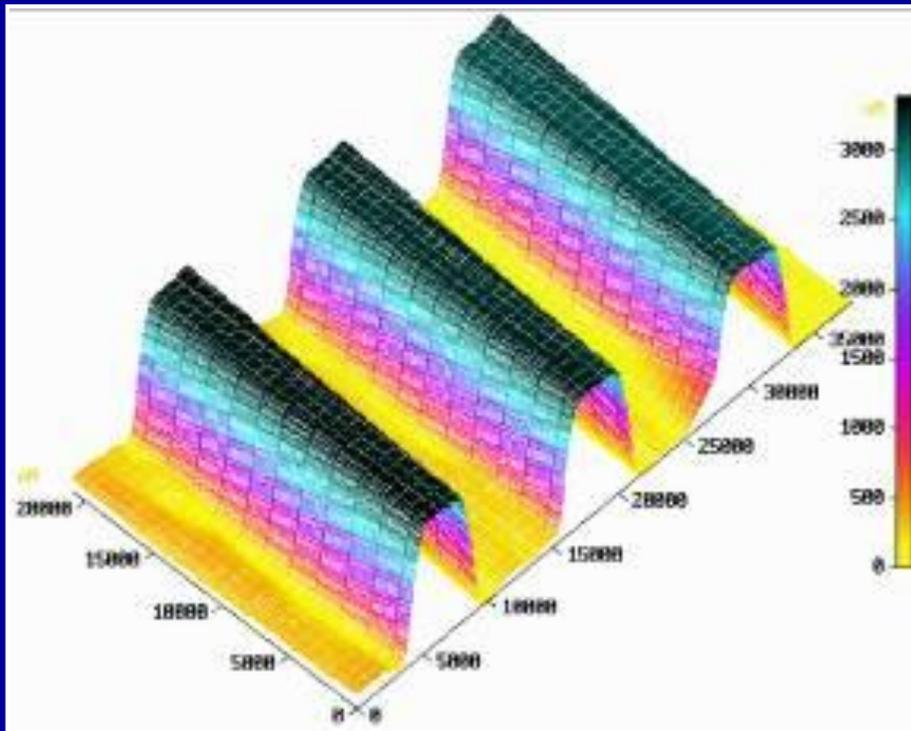


Рассчитанная структура делителя пучка с субволновыми характерными размерами в литографическом формате .GDS2.  
“Fables- оптика”.



Структура фотонного кристалла Si<sub>34</sub>.  
*Phys. Rev. B, 2009*

# СИНТЕЗ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ ДЛЯ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ



Длина волны  $\lambda=10,6$  nm.

Максимальная глубина травления 7.5 nm.

поликристаллические алмазные пленки

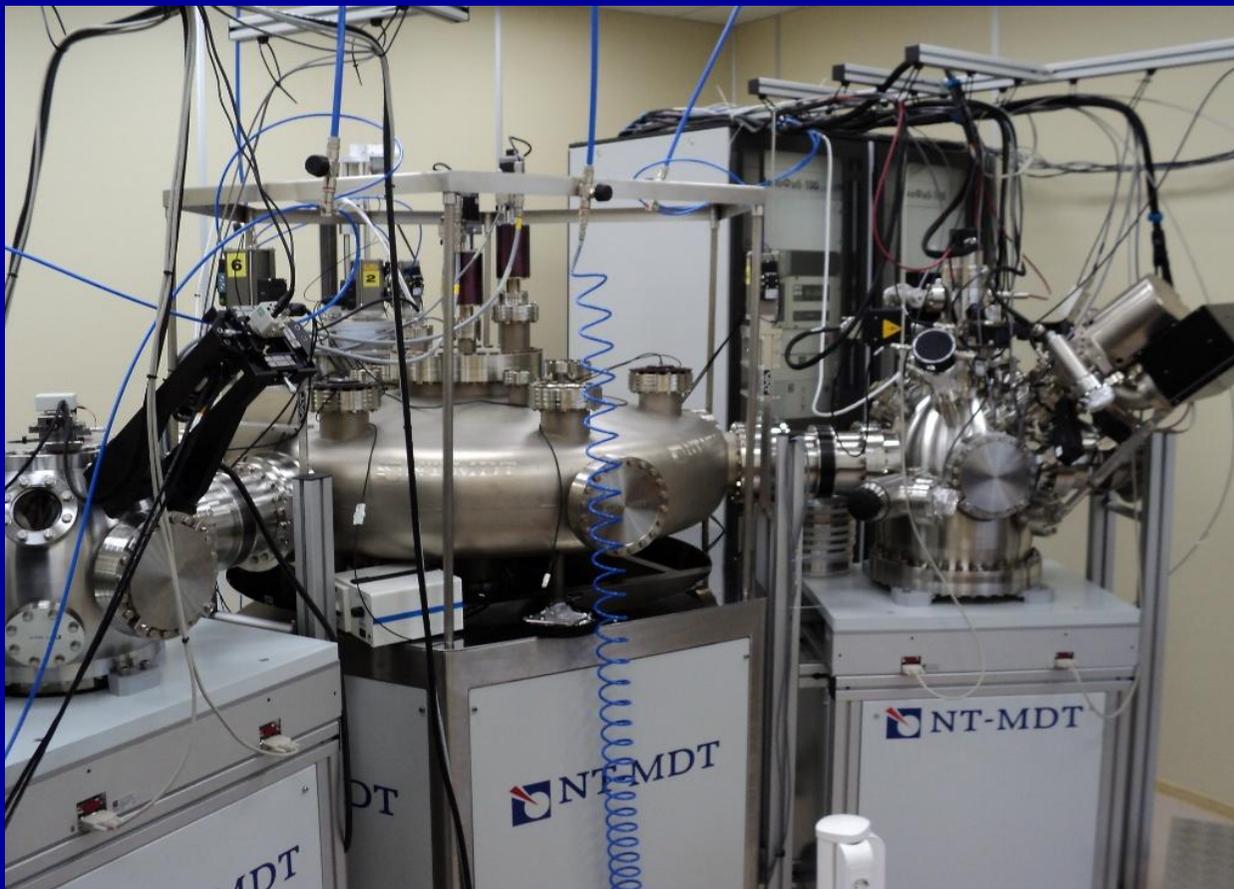
**Технология:** плазмохимическое травление.

Рабочие газы: Ar+O<sub>2</sub> (50% смесь).

Маскирующий слой – ниобий.

*V. S. Pavelyev, V. A. Soifer, V. I. Konov et al. in: High-Power and Femtosecond Lasers,  
Editor: Paul-Henri Barret and Michael Palmer, 2009, Nova Science Publishers, Inc.*

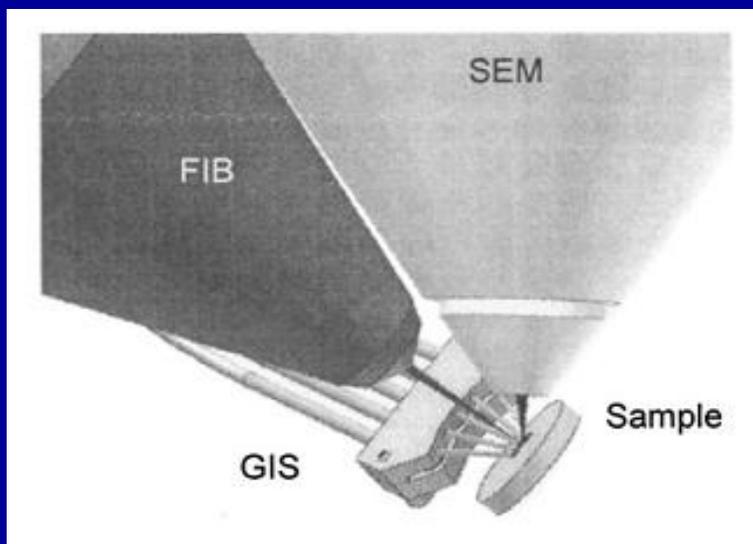
# КОМПЛЕКС “НАНОФАБ-100” С ФИП-КОЛОННОЙ В НОЦ ИТ СГАУ



Разрешение структурирования: **20 nm**, Рабочее поле **600X600  $\mu\text{m}$** .  
Материалы : металлы, кремний, алмазные пленки

**Достоинство** : возможность высокоразрешающей прямой записи.

# ТЕХНОЛОГИЯ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ (ФИП)



Orsay Physics Canon 31 Plus UHV FIB Column

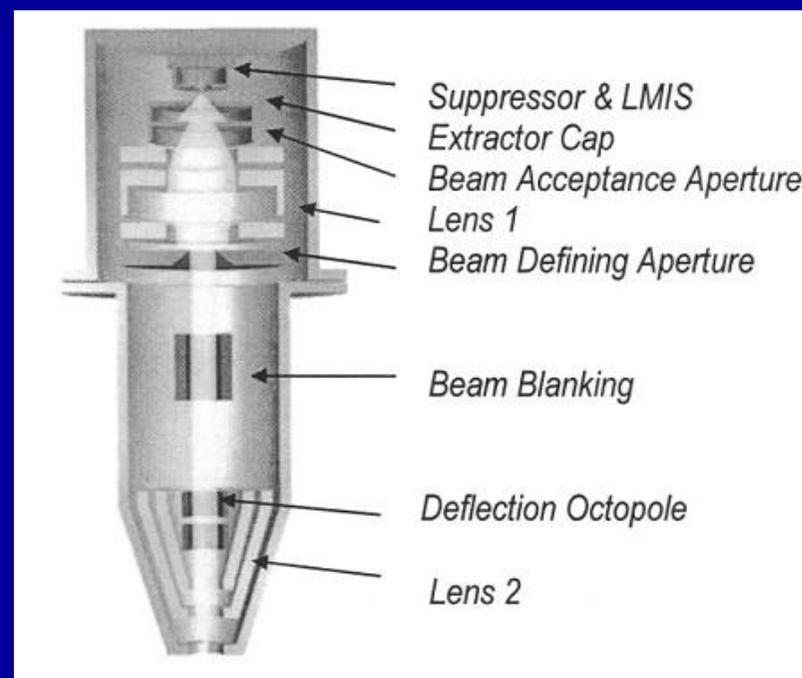
Технические Данные:

- ускоряющее напряжение: 1 – 30 кV
- источник: жидкий Ga+
- Разрешение сканирования : < 7 nm
- ток: 1 pA – 40 nA
- Набор апертур: 10 – 400  $\mu\text{m}$ , 13 апертур

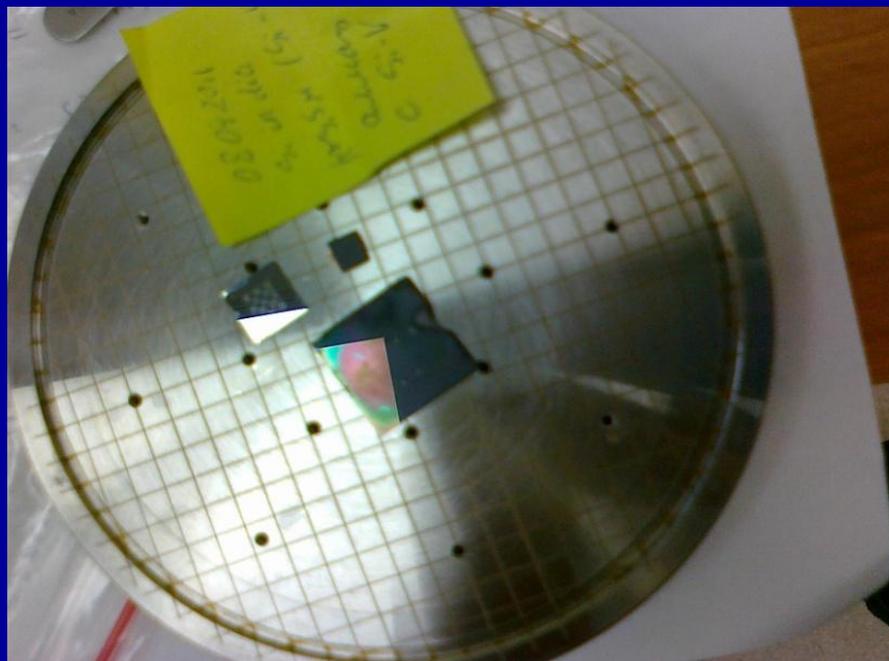
Кобинированная система FIB\SEM  
DualBeam

Сканирующий электронный микроскоп и  
фокусированные пучки

Схема колонны фокусированных пучков



# ЭТАПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НАНОФОТОНИКИ НА АЛМАЗНОЙ ПЛЕНКЕ



Изготовление резонатора в 300 нм алмазной мембране с SiV центрами окраски

Нанесение тонкой пленки SiO<sub>2</sub> на поверхность искусственного алмаза для увеличения эффективности ввода излучения

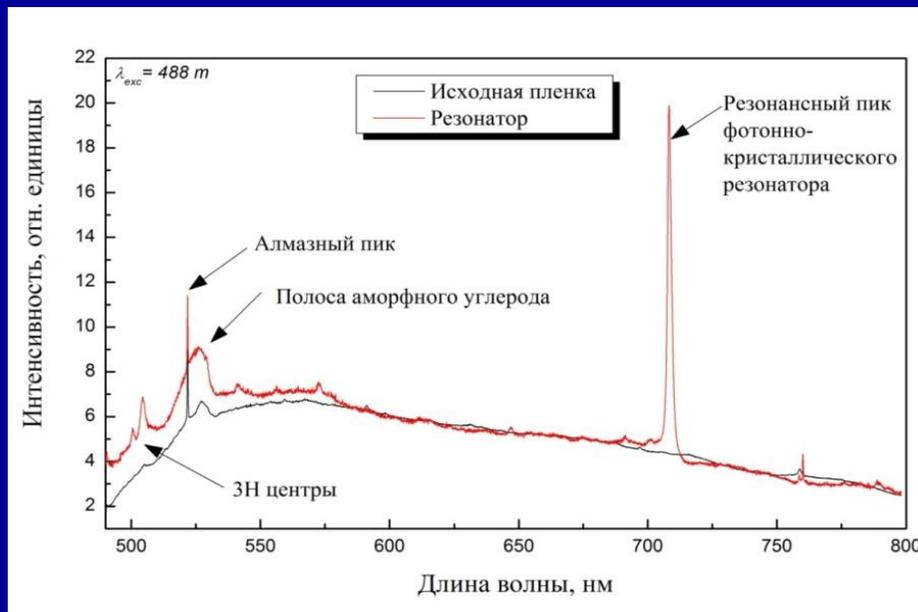
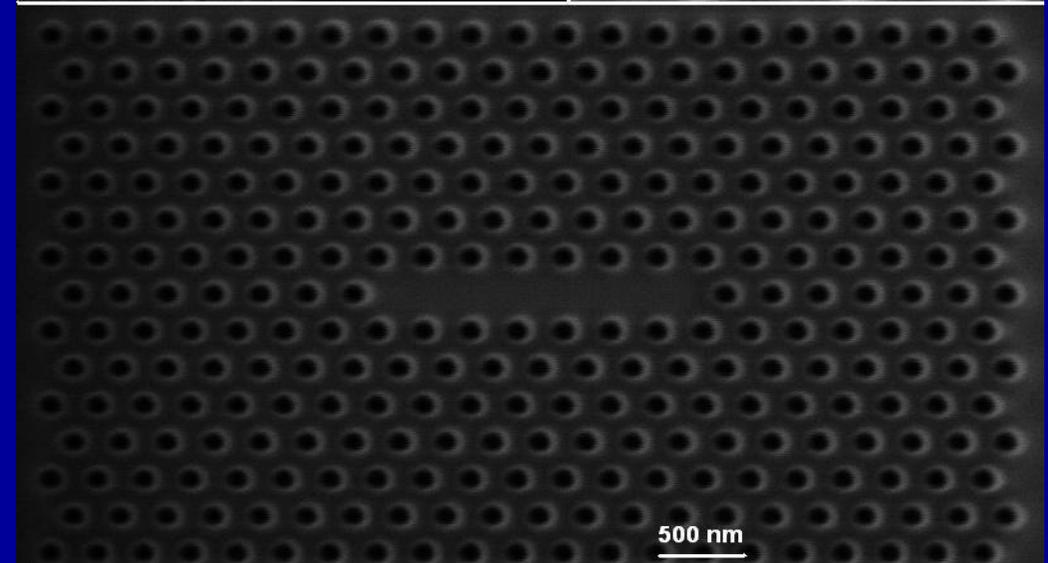
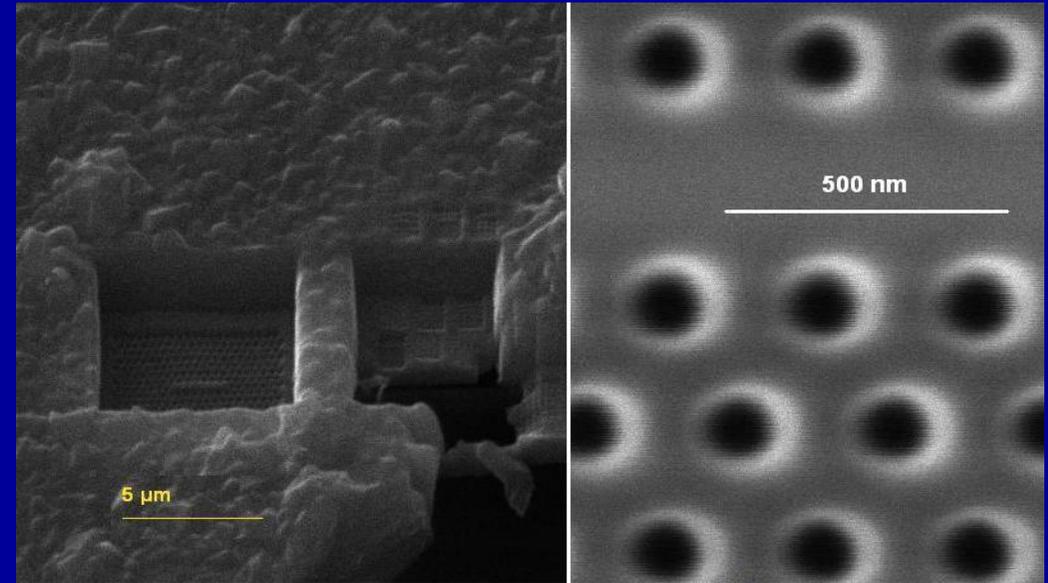
*Работа поддержана грантами:*

*грант РФФИ 11-02-90730-моб\_ст; грант РФФИ 12-02-90820\_мол\_рф\_нр*

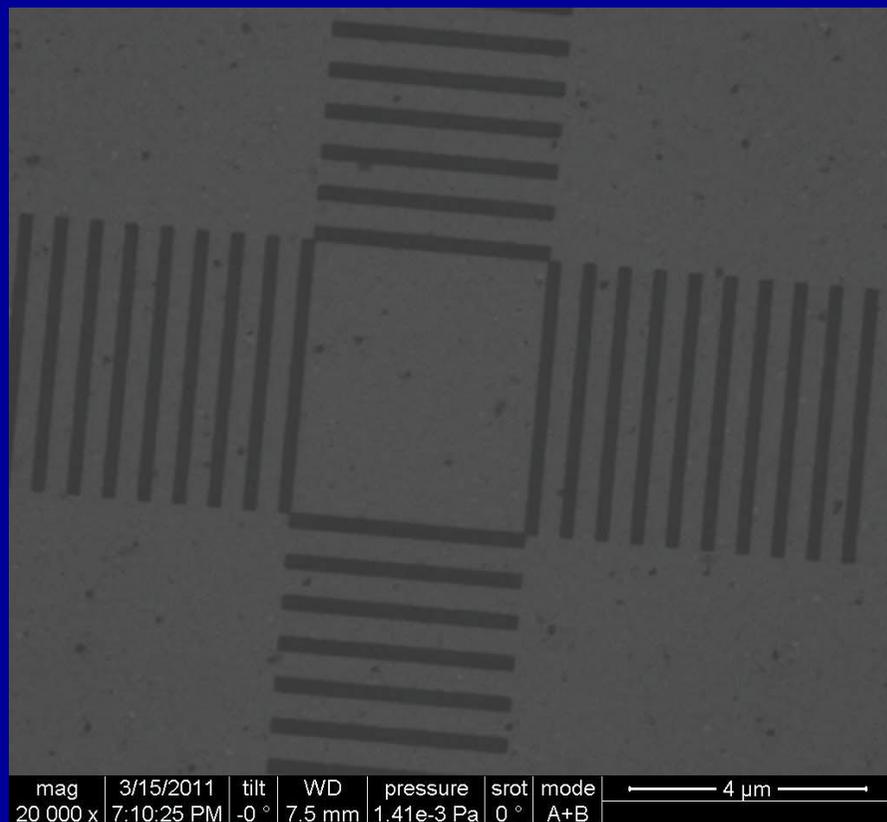
# СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ НАНОФОТОНИКИ НА АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ С ПОМОЩЬЮ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ (ФИП)



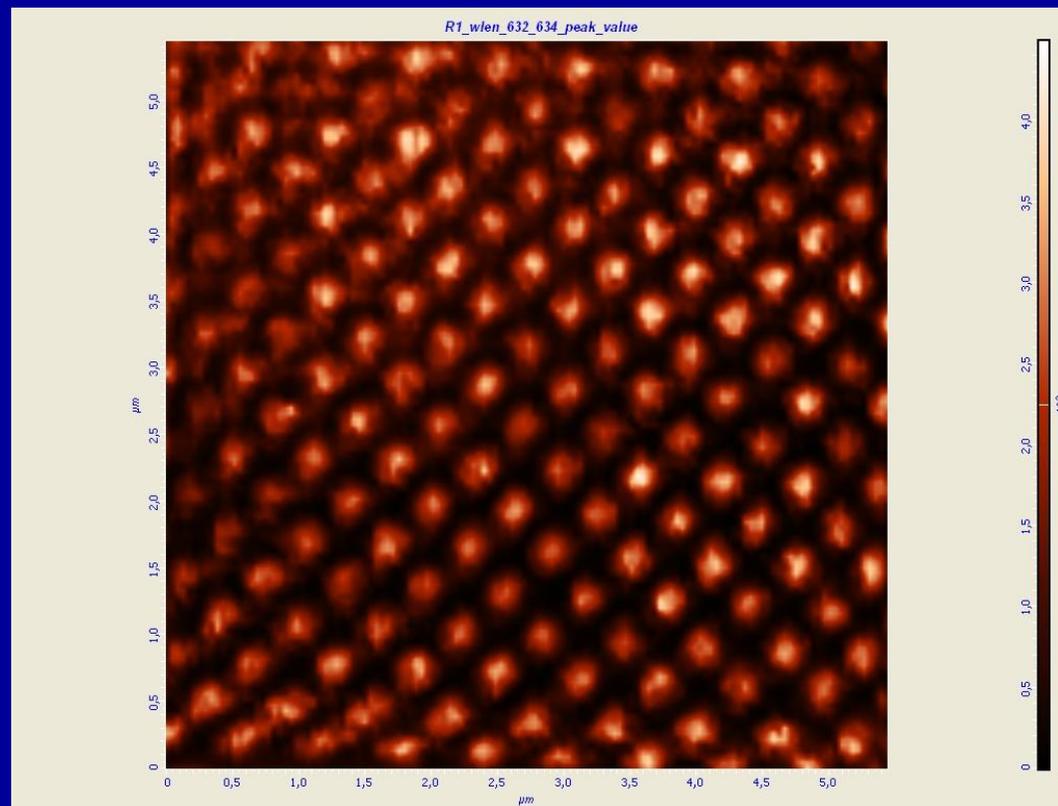
Совместно с ИОФ РАН (г. Москва)



# СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НАНОПЛАЗМОНИКИ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ (ФИП)



Структура для формирования плазмонной интерференционной картины (ионная нанолитография с разрешением 30 нм)

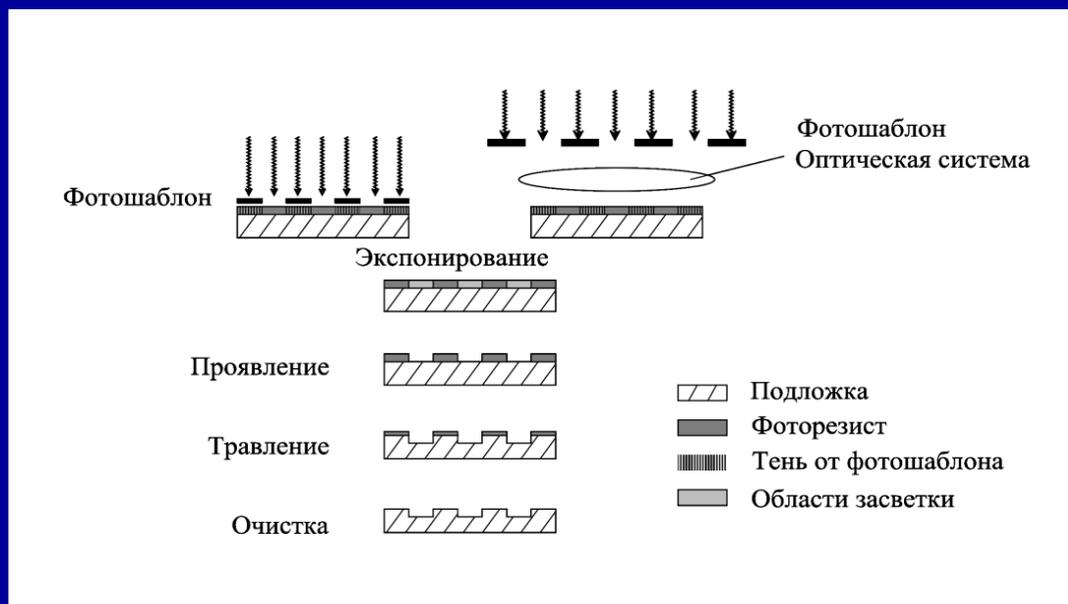


СБОМ-изображение плазмонной интерференционной картины

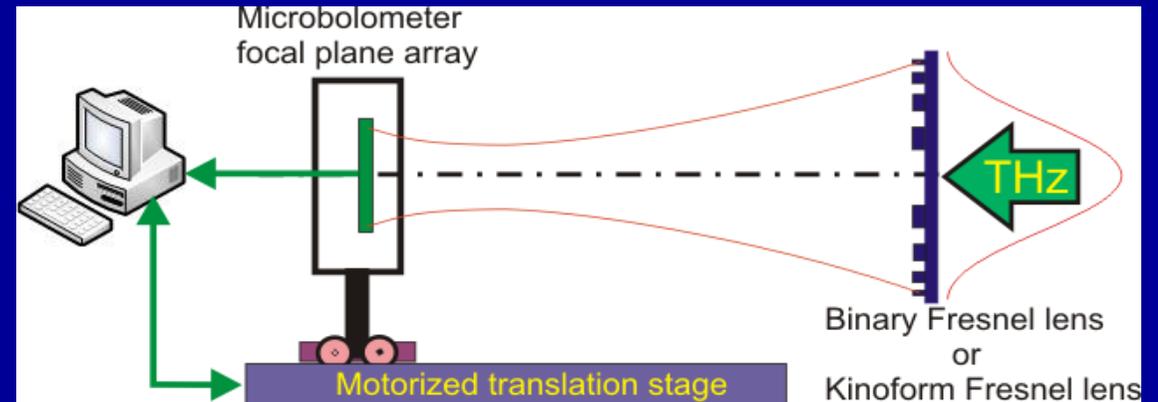
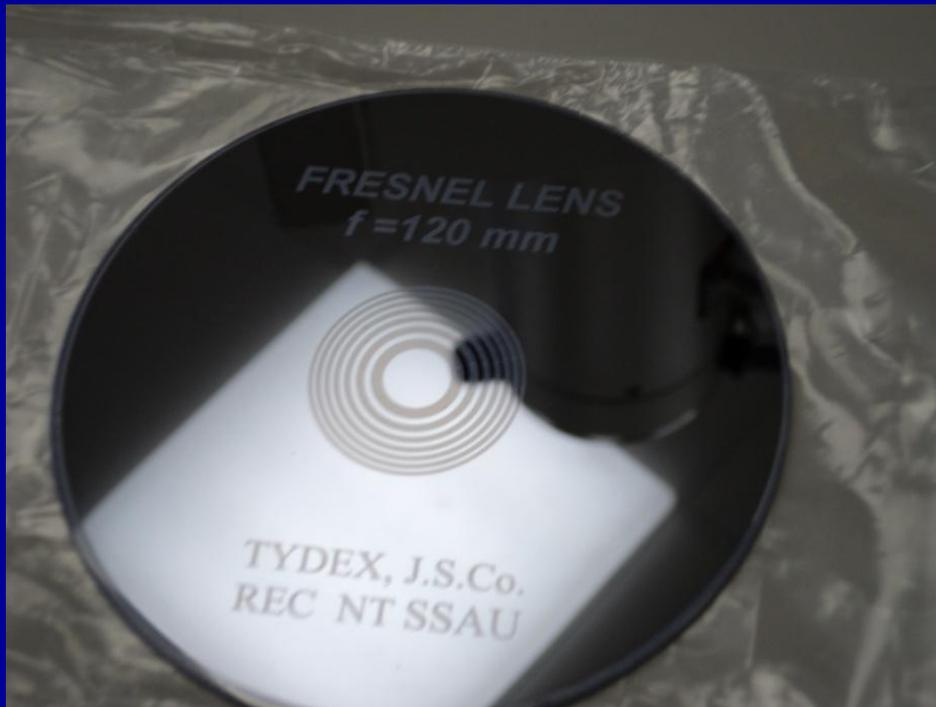
# ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ МИКРООПТИКИ И НАНОФОТОНИКИ В НОЦ ИТ СГАУ



- Участок фотолитографии;
- Установка плазмохимического травления ЭТНА 100-ПТ (ИТ-МДТ, Россия);
- Установка магнетронного напыления ЭТНА 100-ИТ (ИТ-МДТ, Россия).



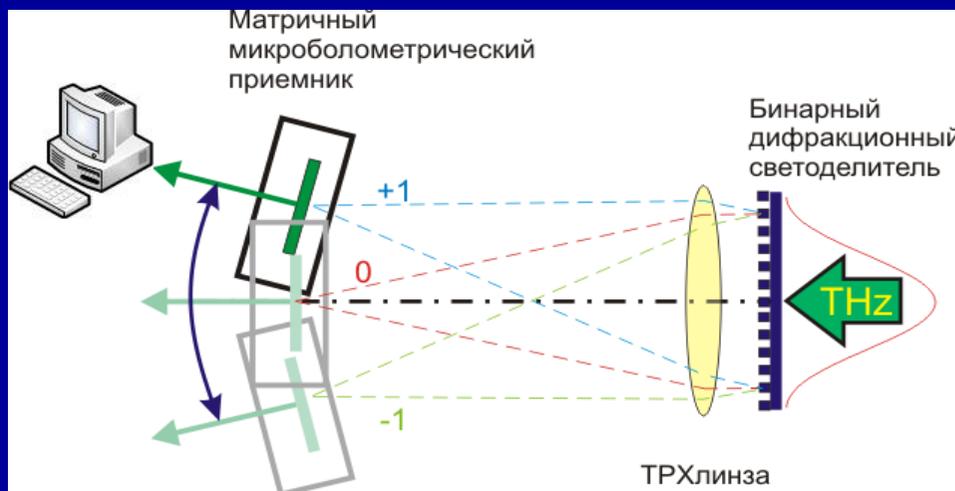
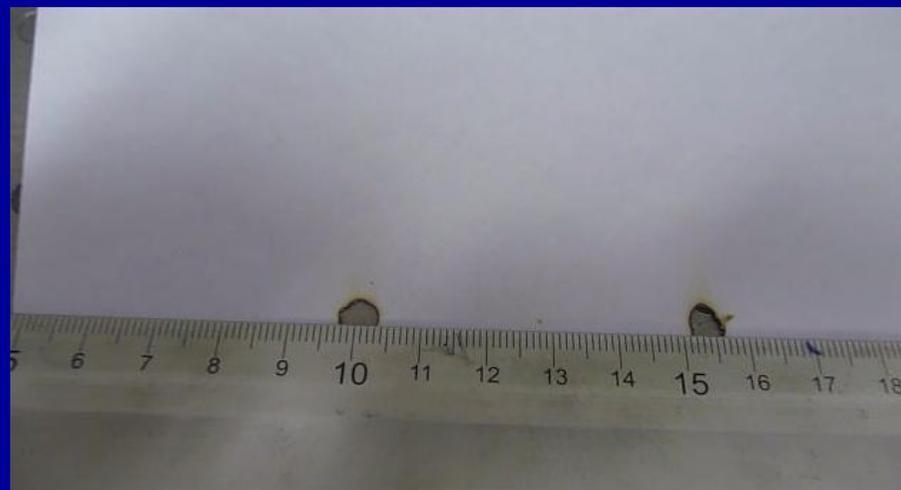
# КРЕМНИЕВЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ



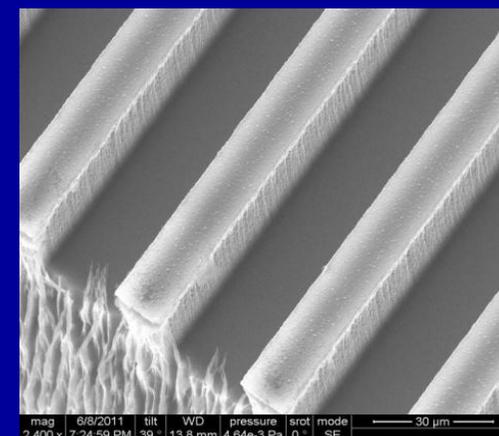
Длина волны  $\lambda=141$  мкм, диаметр апертуры 30 мм. Материал: высокоомный кремний HRFZ-Si; полимерное антиотражающее покрытие Parilene C (покрытие наносилось в ЗАО “Тидекс”). Максимальная глубина травления 27 мкм.

*In: Materials of The 2-nd International Conference “Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications”, p.111, TERA-2012, Moscow, Russia, 20-22 June, 2012.*

# КРЕМНИЕВЫЕ ДЕЛИТЕЛИ ПУЧКА ДЛЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

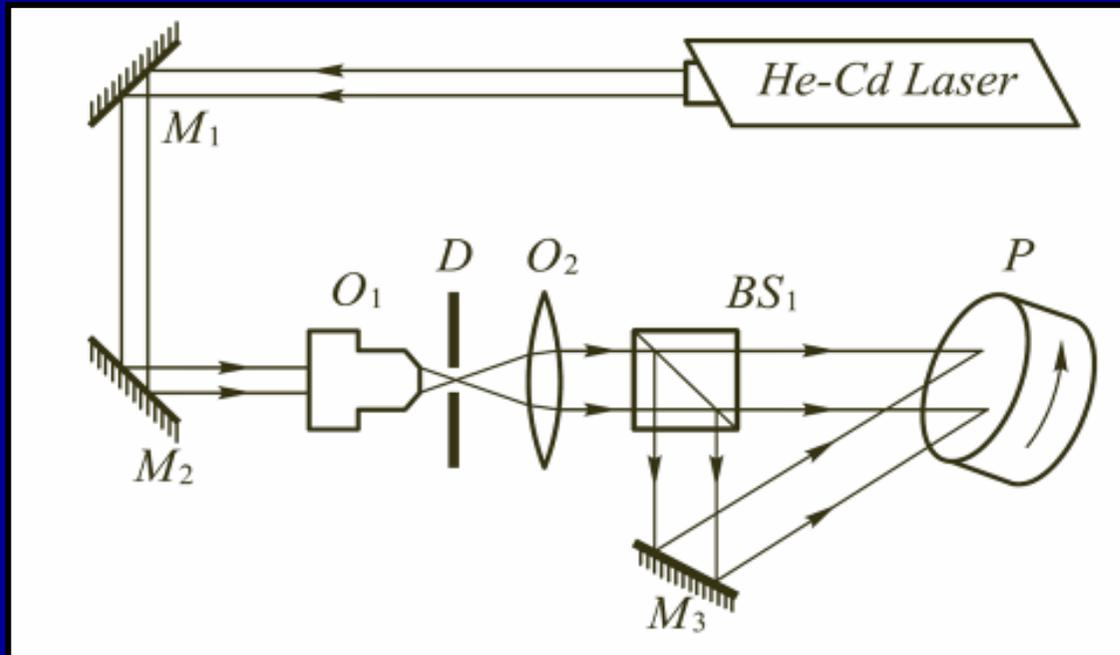


Расчетная дифракционная эффективность - 82%.  
Измеренная дифракционная эффективность 79%.



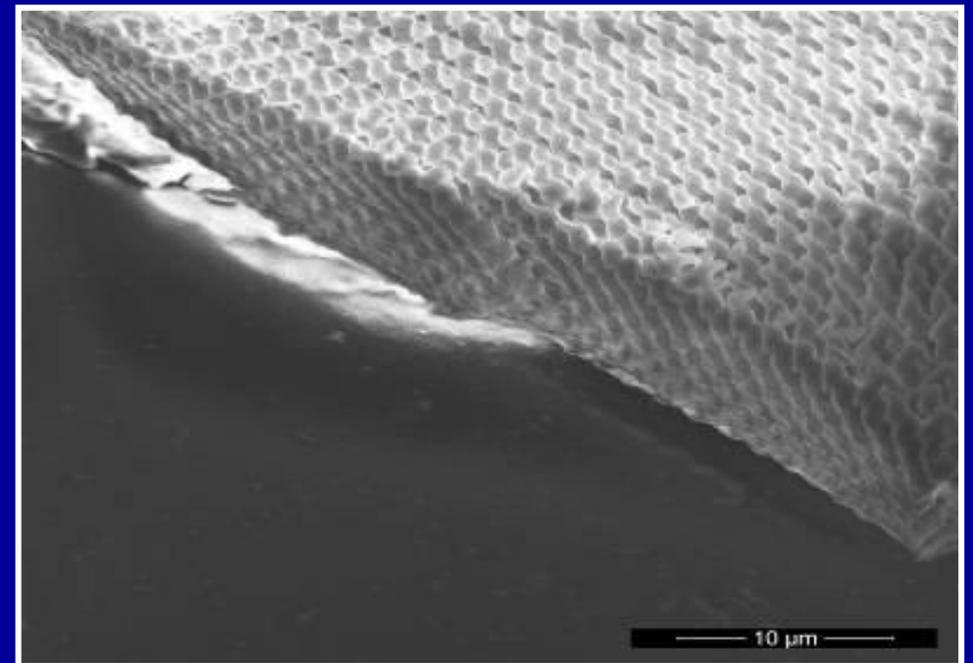
*In: Materials of The 2-nd International Conference  
“Terahertz and Microwave radiation: Generation,  
Detection and Applications”, p.111,  
TERA-2012, Moscow, Russia, 20-22 June, 2012.*

# СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ 3D МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ



$M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  - зеркала;  $O_1$ ,  $O_2$  - объективы;  
 $D$  - диафрагма;  $BS_1$  – делитель пучка;  
 $P$  – подложка с нанесенным резистом SU-8

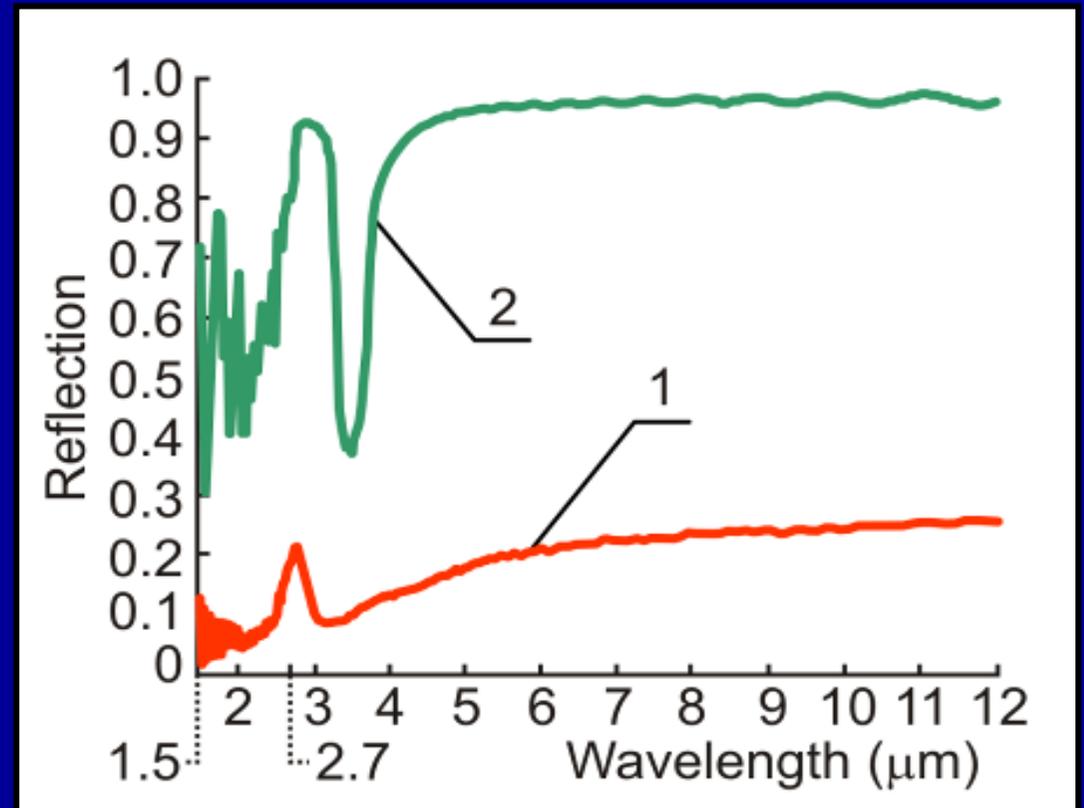
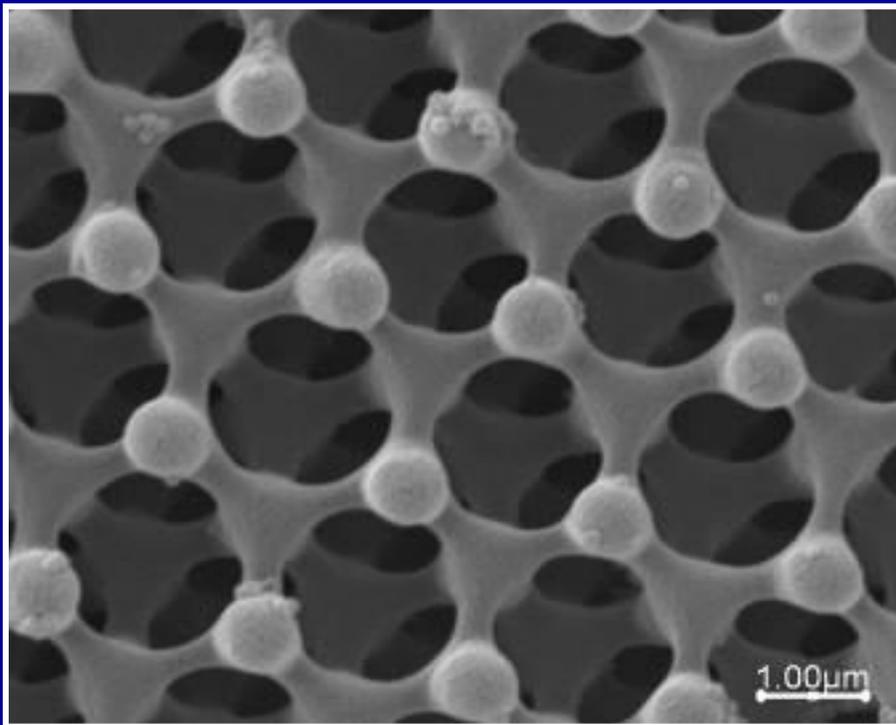
Источник - 80mW He–Cd лазер  
ГКЛ-60; длина волны  
442 нм. Толщина слоя резиста SU-  
8-50- 40-50 мкм.



Электронная фотография  
изготовленной матрицы

# СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ 3D МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Электронная фотография полимерной ФК-матрицы с нанесенной золотой пленкой 50 нм



Результаты спектрометрии и FDTD моделирования подтверждают наличие ФЗЗ на длине волны, равной периоду ФК-решетки

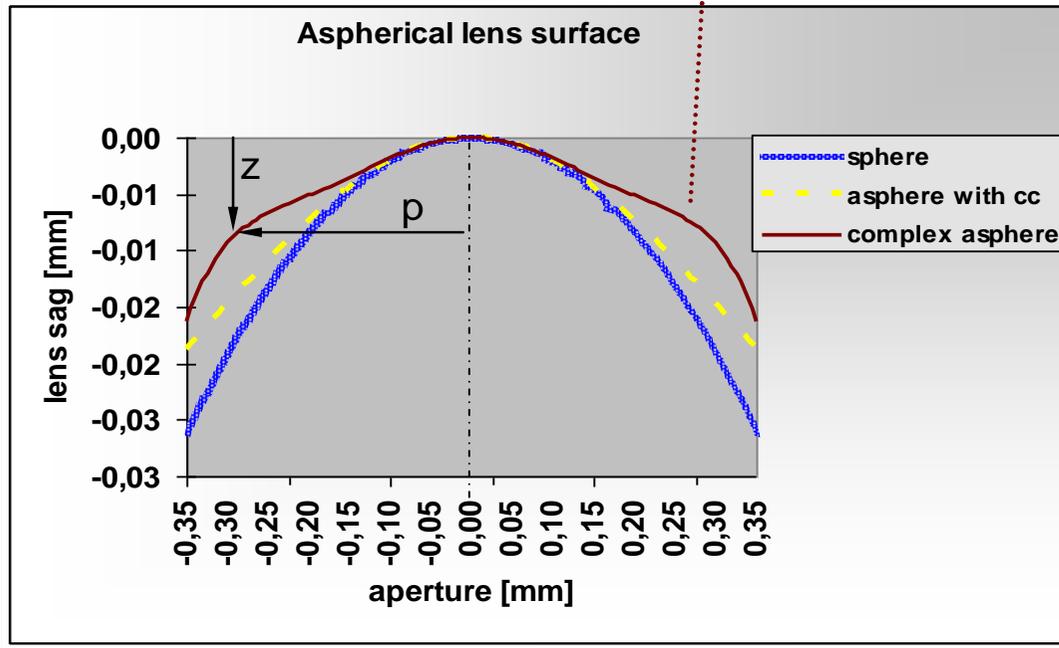
Спектр отражения ФК с периодом 2,6 мкм.

1 – эксперимент (объектив скользящего падения);

2 – численное моделирование.

# СОВМЕСТНЫЕ ПРОЕКТЫ С LIMO GmbH: СИНТЕЗ ДЕЛИТЕЛЯ ПУЧКА С НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОФИЛЕМ

$$z = \frac{cv \cdot p^2}{1 + \sqrt{1 - cv^2(cc + 1)p^2}} + \sum_{i=1}^{\infty} AS_i p^i$$



**Технология**- микромеханическая обработка [V. Lissotschenko ] позволяет изготавливать микрорельеф с непрерывным профилем с точностью 50 nm;

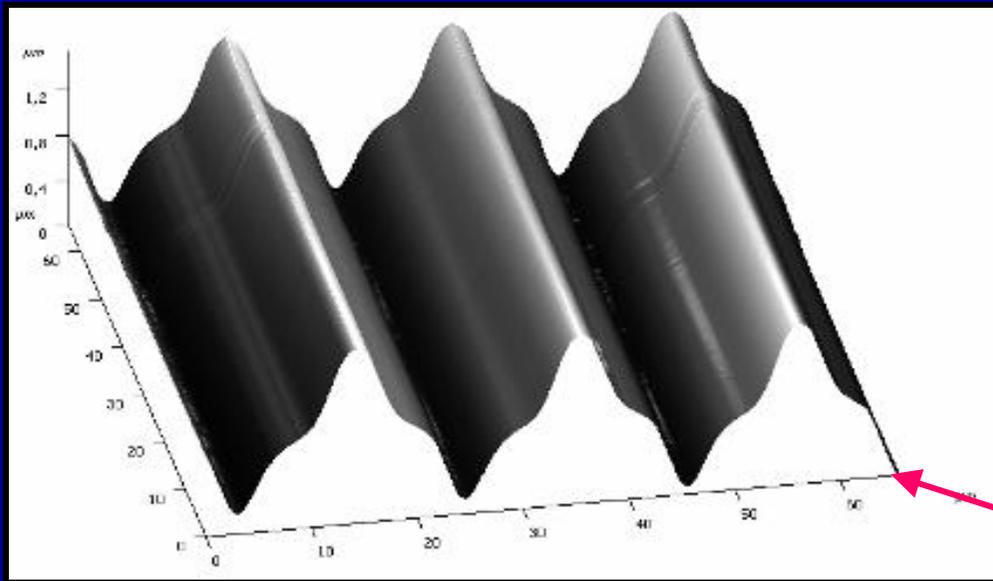
**Расчет** – для поиска непрерывной фазовой функции использовался формализм [L. A. Romero and F. M. Dickey].

$$\tan(\varphi(x)) = \frac{Q(x, \alpha, \mu)}{P(x, \alpha, \mu)},$$

$$P(x, \alpha, \mu) = \sum_{k=1}^N \mu_k \gamma_k \cos(m_k x + \alpha_k)$$

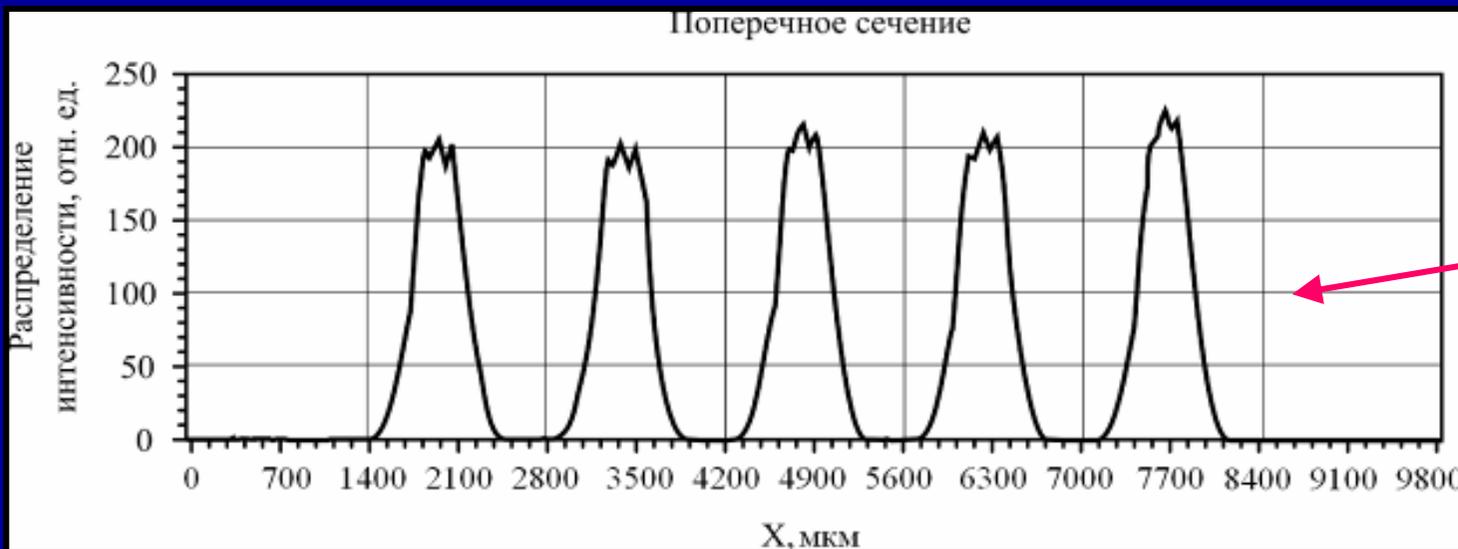
$$Q(x, \alpha, \mu) = \sum_{k=1}^N \mu_k \gamma_k \sin(m_k x + \alpha_k)$$

# СОВМЕСТНЫЕ ПРОЕКТЫ С LIMO GmbH: СИНТЕЗ ДИФРАКЦИОННОГО ДЕЛИТЕЛЯ ПУЧКА С НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОФИЛЕМ



Методы микромеханической обработки, разработанные компанией LIMO GmbH позволяют формировать непрерывный микро рельеф с точностью 50-nm. Делитель пучка с периодом 20 μm и непрерывным профилем реализован в подложке из стекла BK-7 (рабочая длина волны 1064 nm).

Профиль микро рельефа, полученный СЗМ

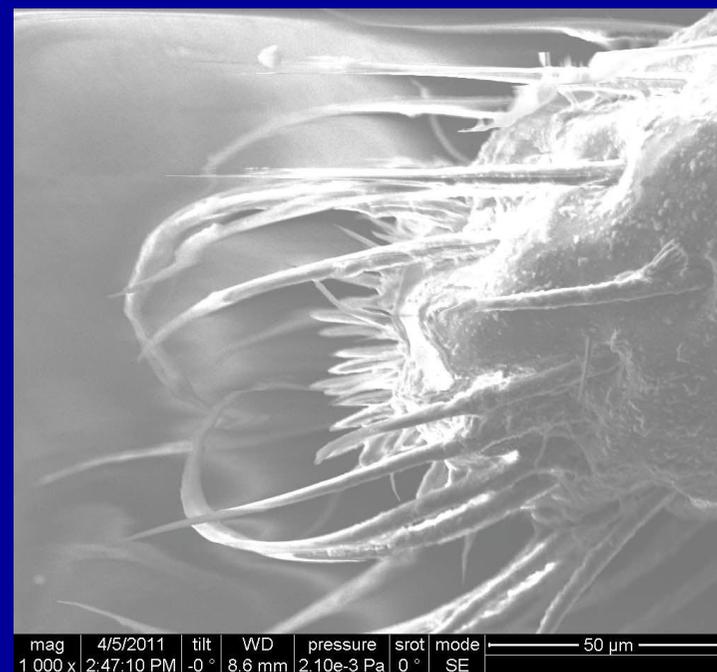
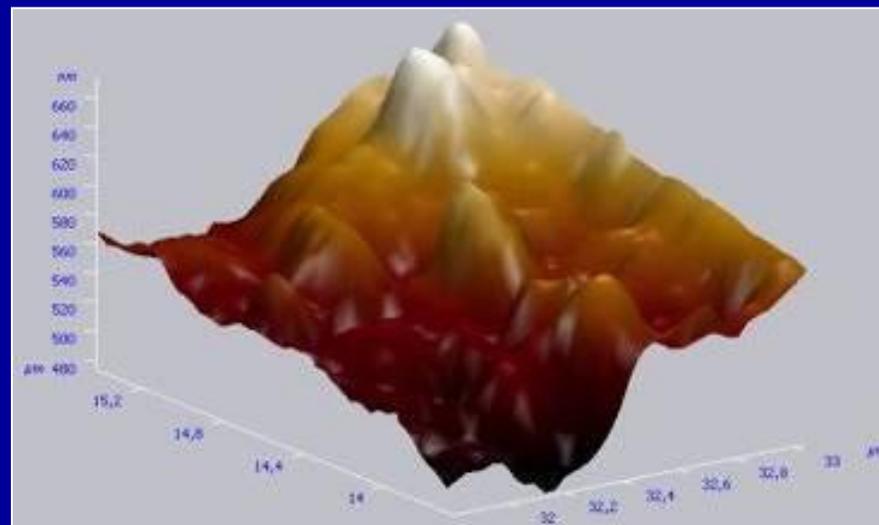


Распределение интенсивности, сформированное делителем пучка

Измеренная эффективность - более 89%.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

- Комплекс трехмерной сканирующей зондовой микроскопии “Ntegra-Tomo” с приставкой ближнепольной микроскопии («НТ-МДТ», Зеленоград)
- Автоматизированный интерферометр белого света “WLI-DMR” (Институт Фраунгофера, Германия)
- Растровый электронный микроскоп “Quanta-200” (производства компании FEI)
- ИК-спектрометр и УФ-спектрофотометр Shimadzu



# ВХОЖДЕНИЕ СГАУ В НАЦИОНАЛЬНУЮ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ СЕТЬ (ННС)

## Взаимодействие СГАУ с ННС (НОЦ Нанотехнологий):

- Информационно-аналитическая система поддержки образовательного процесса и научных исследований Научно-образовательных центров Национальной нанотехнологической сети
- Компьютеризированная система централизованной поддержки и мониторинга объектов основных составляющих инфраструктуры наноиндустрии





Визит академика Ж.И. Алферова в НОЦ НТ СГАУ

СПАСИБО!

E-mail: [nano@ssau.ru](mailto:nano@ssau.ru)