

# Лазеры на полупроводниковых наноразмерных структурах с катодно-лучевой накачкой

**В.И. Козловский**

- **Этапы развития**
- **Лазеры с резонансно-периодическим усилением на полупроводниковых наноструктурах**
- **Широкозонные наноструктуры для видимого диапазона спектра**
- **Возможность освоения УФ области**
- **Лазерная ЭЛТ как источник монохроматического света**
- **Заключение**

---

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Лаборатория ЛКН НФО*

## **Этапы развития**

**Предложение по созданию инверсной населенности в полупроводниках при электронной накачке**

**N.G. Basov, Advances in Quantum Electronics, N.-Y., Columbia Univ. Press, p.506 (1961)**

**Н.Г. Басов, О.Н. Крохин, Ю.М. Попов, Вестник АН СССР, 3, 61 (1961)**

**Реализация первого лазера на CdS с электронной накачкой**

**Н.Г. Басов, О.В. Богданкевич, А.Г. Девятков, ДАН СССР, 155, 78 (1964)**

**Предвидение лазеров с «вертикальным микрорезонатором», продольной накачкой, излучающим зеркалом**

**Н.Г. Басов, Нобелевская лекция, 11 декабря 1964.**

**Предложение лазерной ЭЛТ**

**Н.Г. Басов, О.В. Богданкевич, А.С. Насибов, Авт. Свид. №270100 с приоритетом от 1967 г. Патент США 3558956**

## **Этапы развития (продолжение)**

### **Реализация лазерной ЭЛТ**

Parkard I.R., Tait W.C., Dierssen G.H. Appl. Phys. Lett., 19, 338 (1971).  
Н.Г. Басов и др. ДАН СССР, 205, 72 (1972).

### **Создание отпаянного прибора «Квантоскопа»**

ФГУП «Платан» - 1980-1991 г.

### **Соглашение с Principia Optics на 20 лет с 1991 г.**

### **Макет лазерного проектора на монокристаллах, работающий при комнатной температуре**

ФИАН совместно с комп. Principia LightWorks Inc. CA, USA – 1999 г.

### **Реализация первого лазера на наноструктуре**

ФИАН совместно с Центром волоконной оптики при ИОФ РАН – 1995 г.

### **Реализация лазера на наноструктуре с резонансно-периодическим усилением**

ФИАН совместно с Технологическим центром при Университете г. Шеффилда (Великобритания) – 2004 г.

# ПАТЕНТЫ

V.I. Kozlovsky, A.S.Nasibov, Ya.K. Skasyrsky. Laser screen for a cathode-ray tube. US Patent #5339003.

N.V. Derdyra, V.I. Kozlovsky. Laser screen cathode-ray tube with beam axis correction.. US Patent #5280360.

V.I. Kozlovsky, A.A. Kolchin. Laser screen for a cathode-ray tube and method for making same. US Patent #5313483, 1994.

V.I. Kozlovsky, A.A. Kolchin. Method for making a laser screen for a cathode-ray tube. US Patent #5283798, 1994.

V.I. Kozlovsky. Laser screen for a cathode-ray tube and method for making same. US Patent #5254502.

A.M. Akhekyan, V.I. Kozlovsky, A.S. Nasibov, M.N. Sypchenko, I.A. Krykanov. Laser screen cathode-ray tube with increased life span. US Patent 5374870, 1994.

V.I. Kozlovsky, B.M. Lavrushin. Laser cathode-ray tube. US Patent # 5687185, 1997, Nov. 11, PCT Pub. Date: Jul.7, 1994; Priority Date: Dec.28 1992 [Ru].

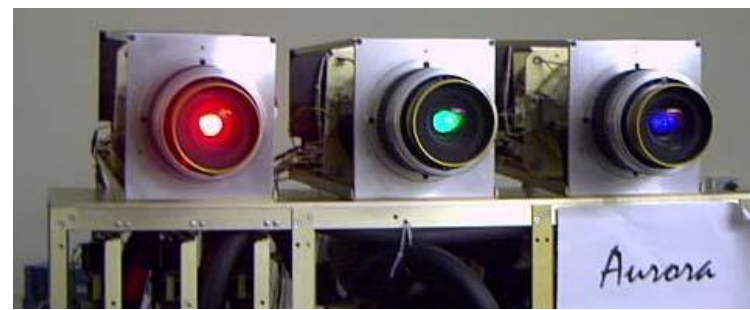
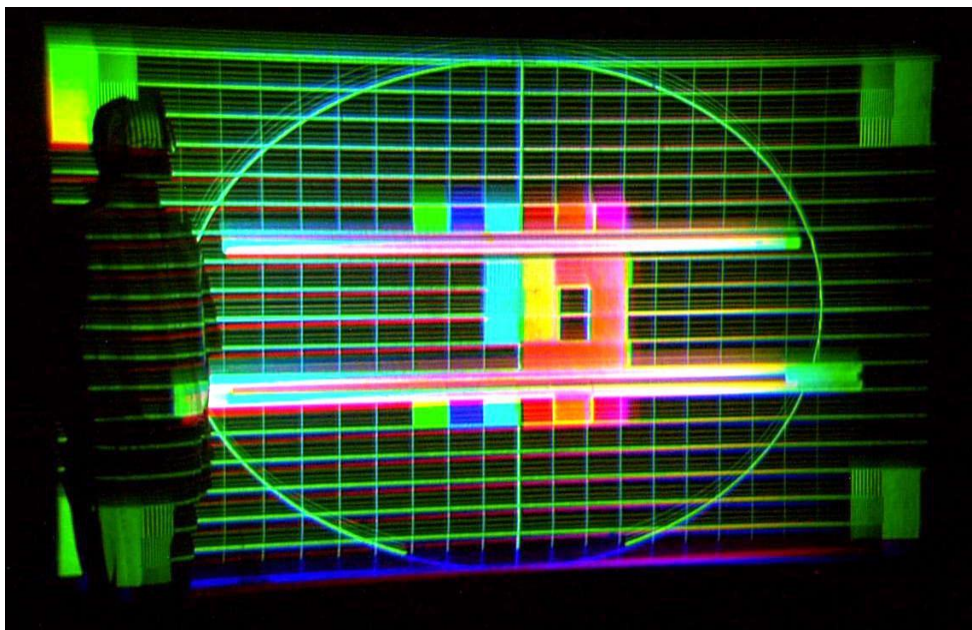
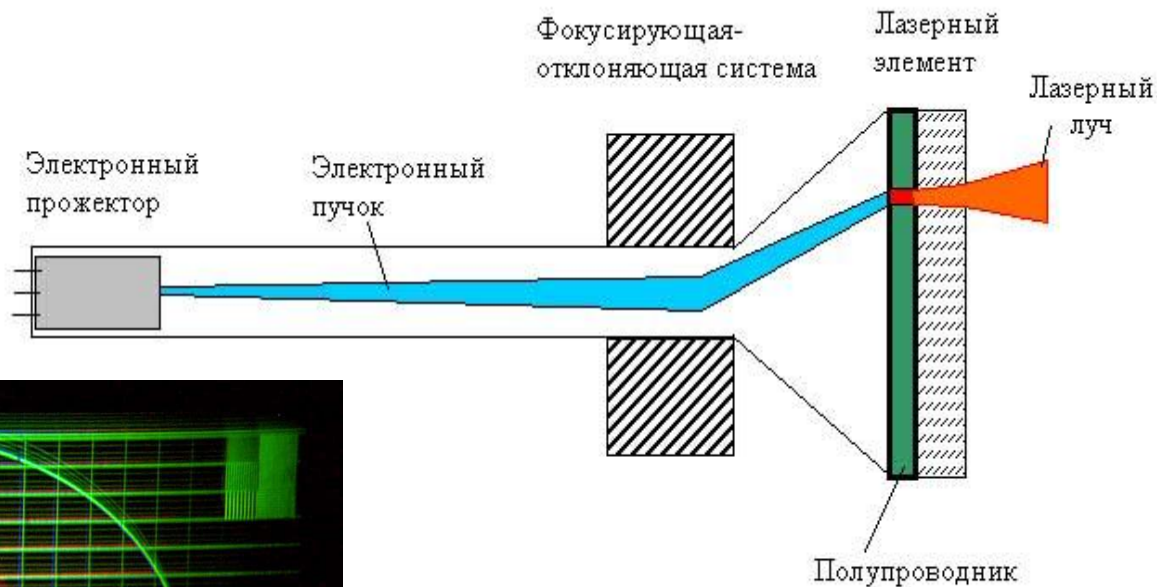
A.S. Nasibov, P.V. Reznikov. Semiconductor laser screen of a cathode-ray tube. US Patent No. 5317583, 1994.

V.I. Kozlovsky, B.M. Lavrushin. Laser electron-beam tube. European Patent No. EP 0696094 B1, Bulletin 1999/41.

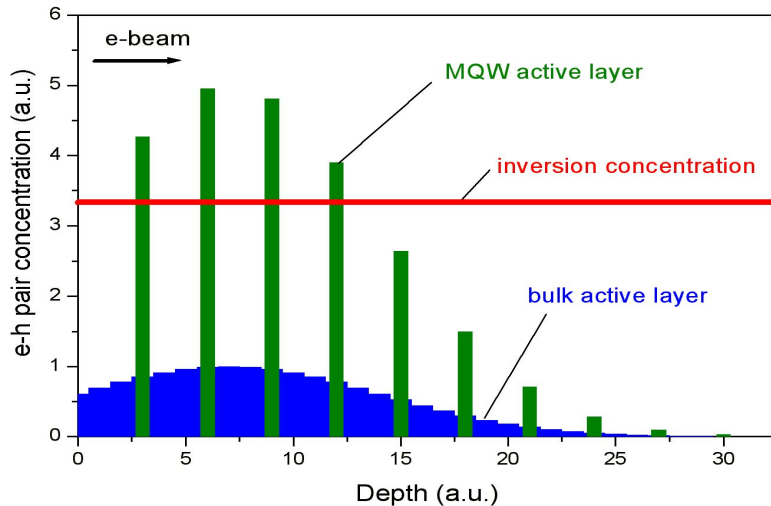
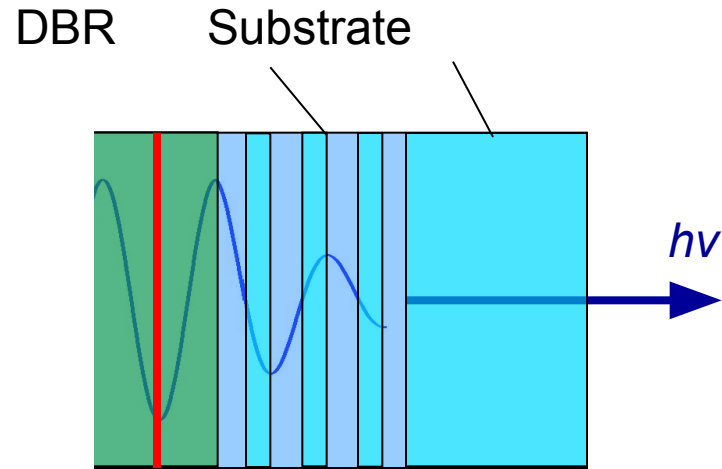
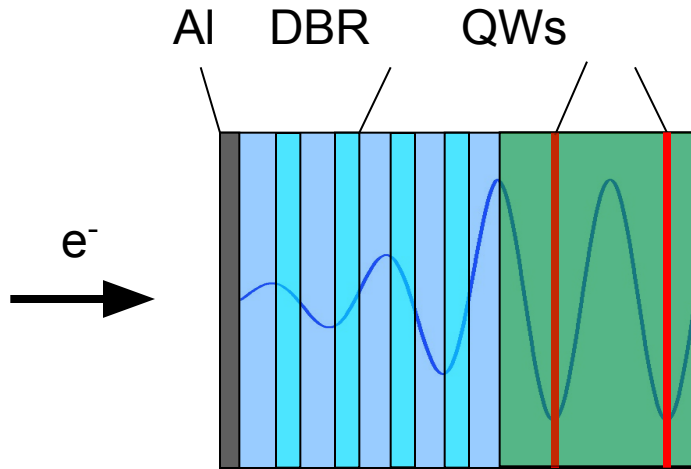
# Лазерные ЭЛТ на монокристаллах



25 см



# Лазера на наноструктуре с резонансно-периодическим усилением



Оптимальное число КЯ – 15-25

Глубина возбуждения – 4-5 мкм

Период –  $m \cdot \lambda / 2N$

Длина волны в структуре – 0,2 мкм

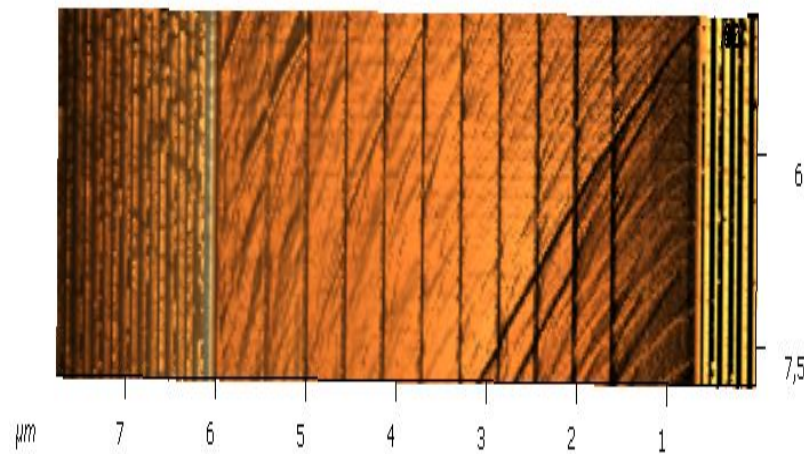
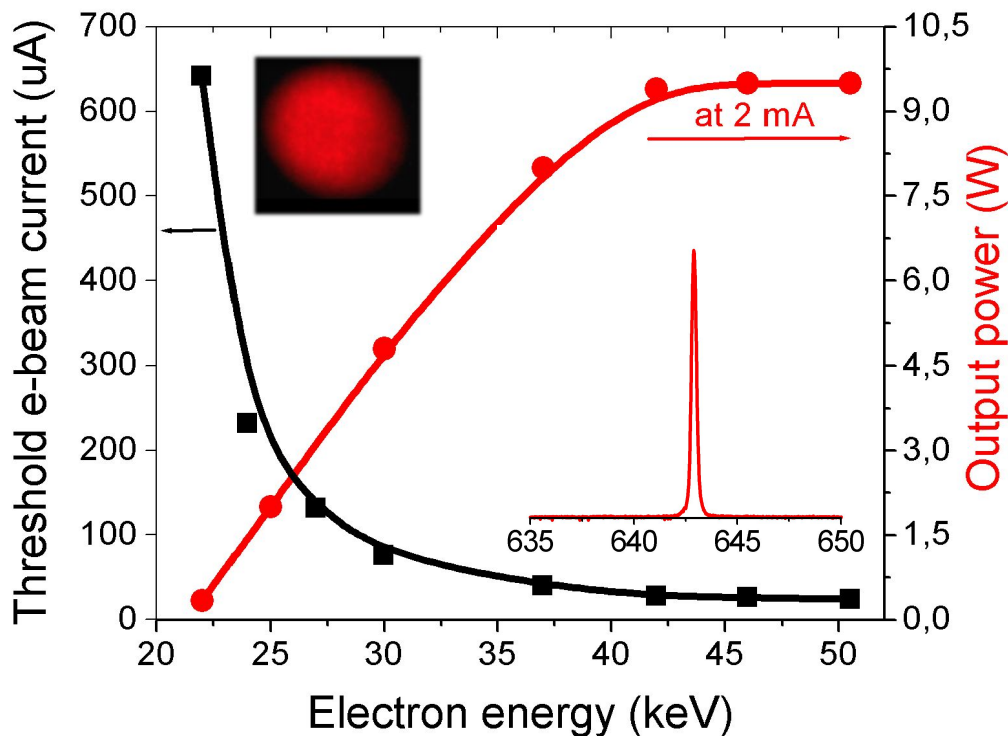
КЯ должны быть в пучностях стоячей волны, соответствующей максимуму усиления

# Красный лазер на наноструктуре GaInP/AlGaInP с 25 и 13 КЯ

4.38 мкм AlGaInP пассивный слой  
8 нм GaInP 25 слоев  
193 нм AlGaInP 25 слоев  
Зеркала - 99 и 94 %

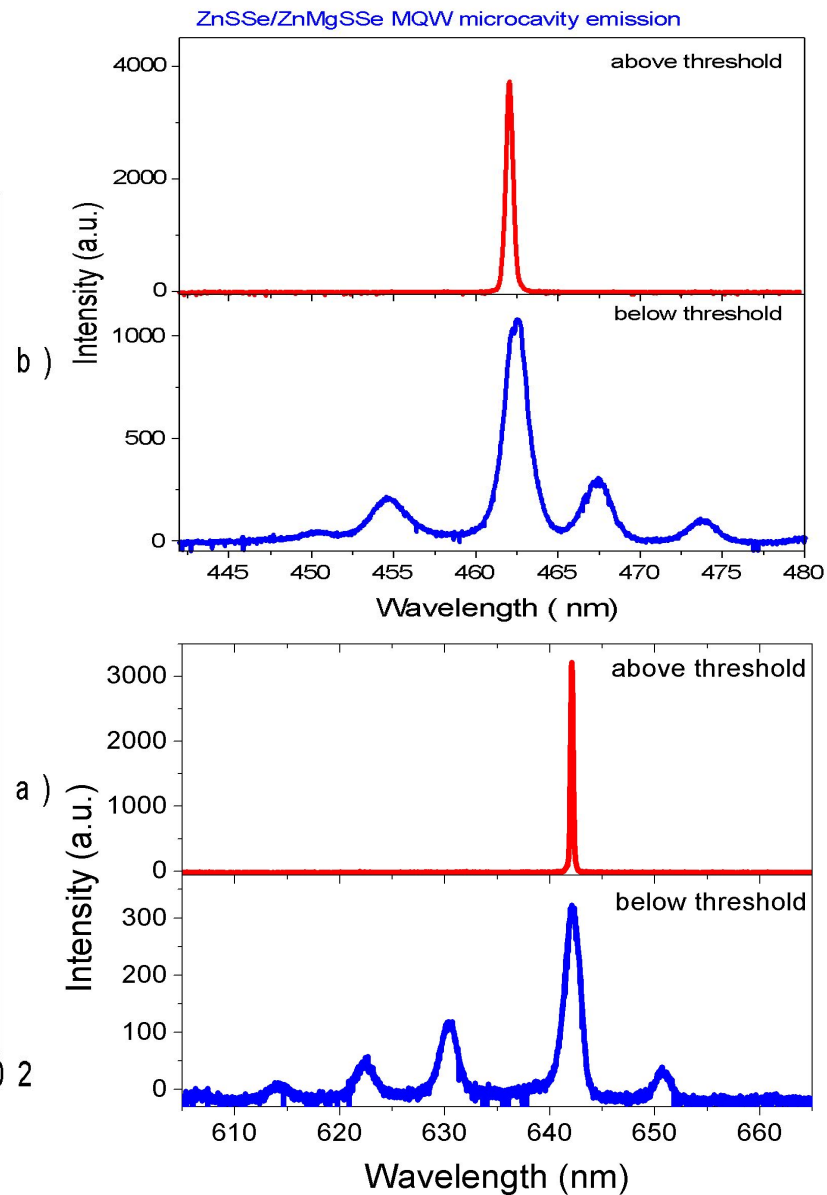
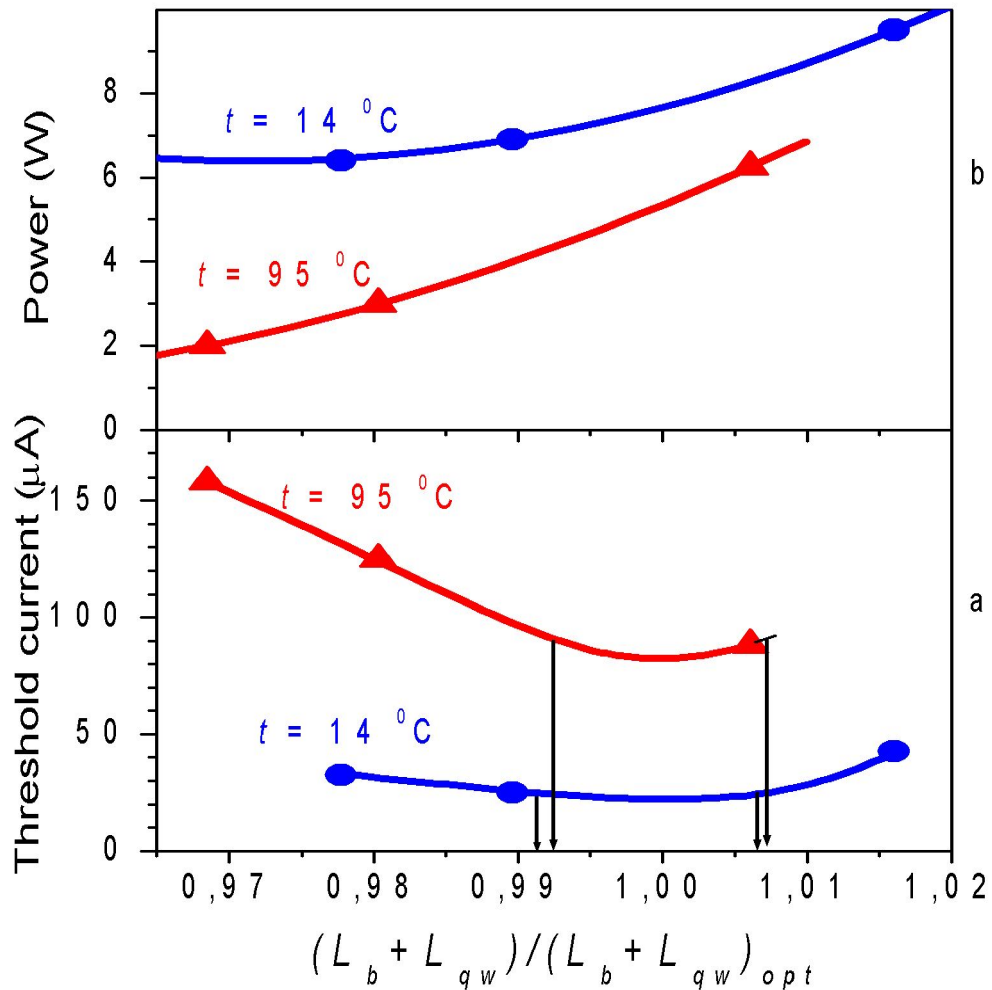


Лазер с мощностью 8 Вт на наноструктуре с 13 КЯ и двумя брэгговскими зеркалами AlAs-AlGaAs



Изображение скола лазера в зондовом микроскопе

# Мощность и порог лазера от периода структуры





# Модель лазера

$$r_1 r_2 \exp(i2\pi N_b L_b / \lambda) = 1$$

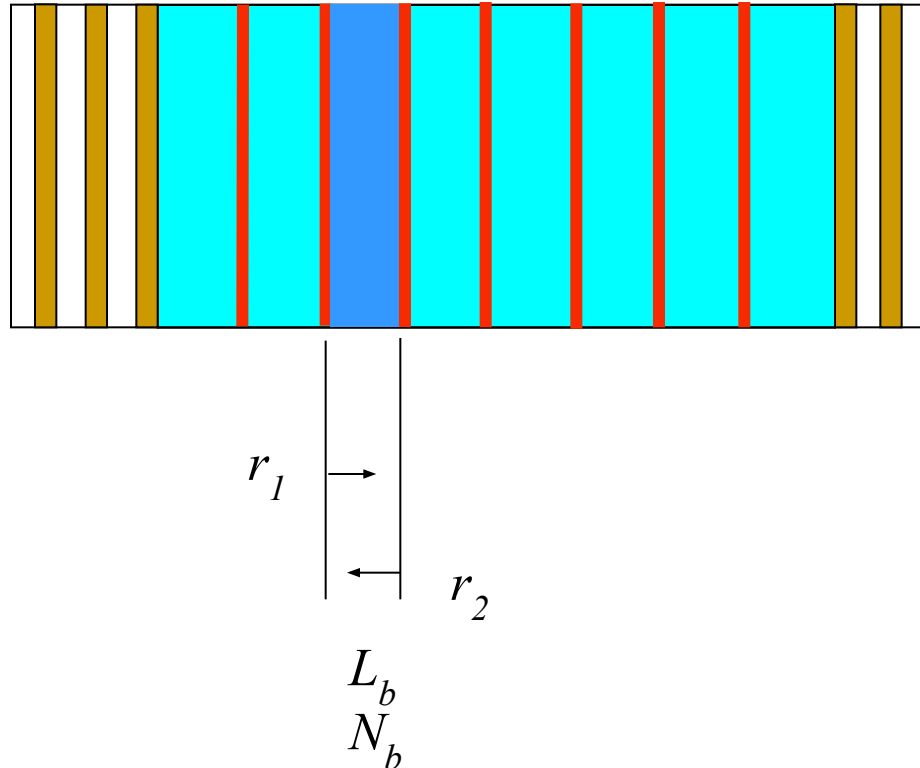
$r_1$  и  $r_2$  - КОМПЛЕКСНЫЕ И  
ВЫЧИСЛЯЮТСЯ МАТРИЧНЫМ  
МЕТОДОМ

$$N_{qw} = n_{qw} - i \times g(\omega)$$

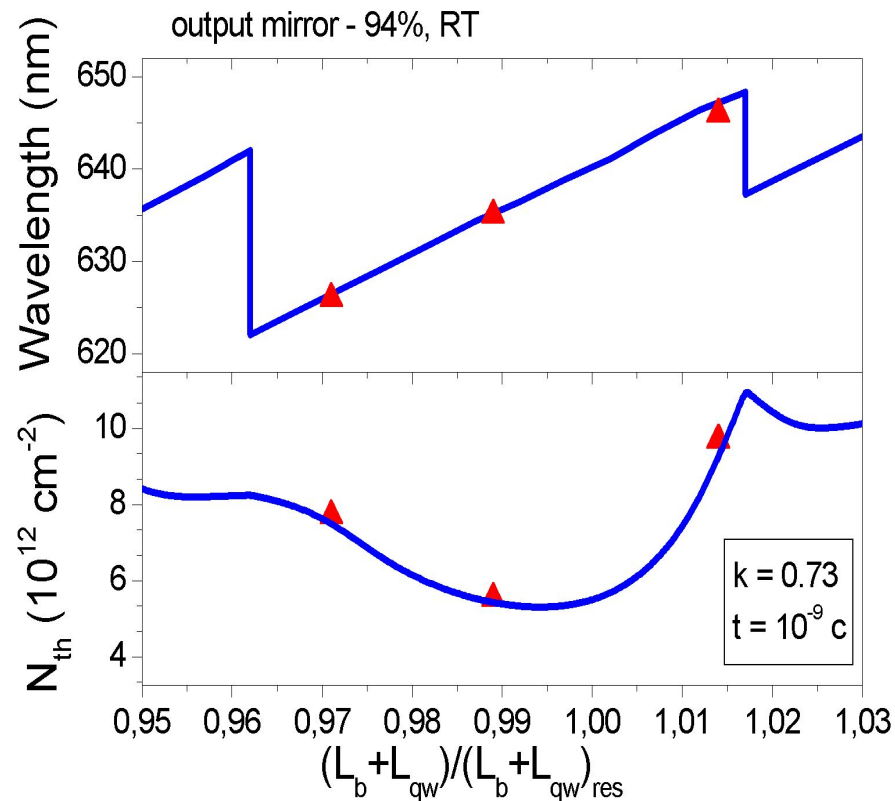
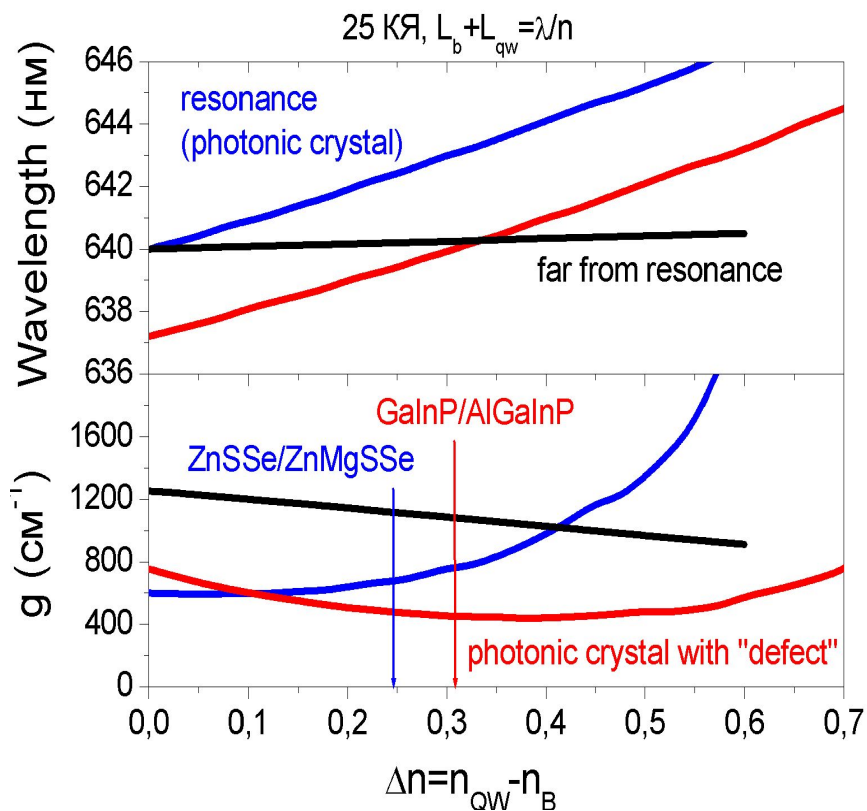
$$N_b = n_b + i \times \alpha(\omega)$$

$g(\omega)$  пропорционален  
материальному  
коэффициенту усиления  
КЯ

$\alpha(\omega)$  – внутренние потери

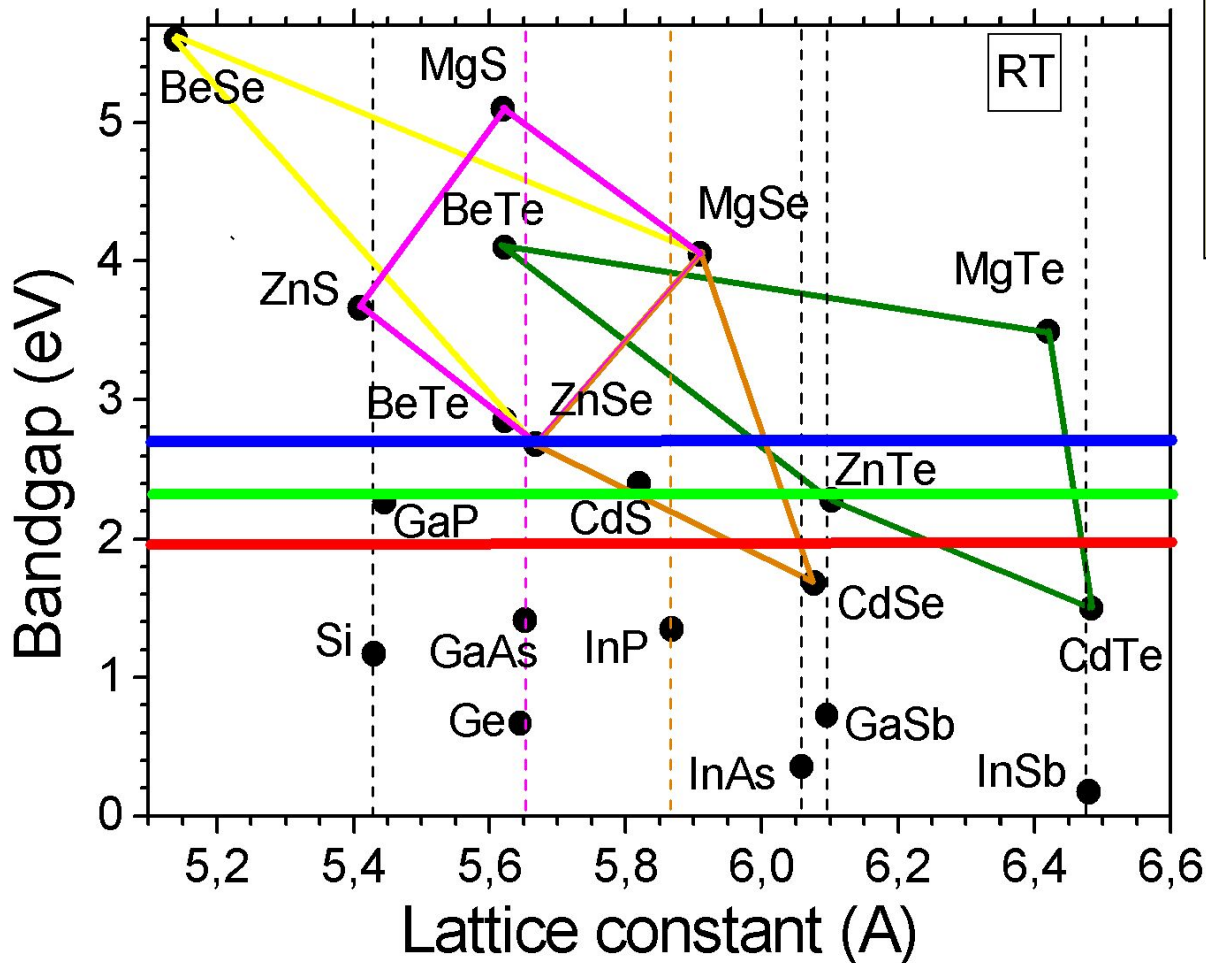


# Зависимость порога и длины волны генерации от положения КЯ в резонаторе



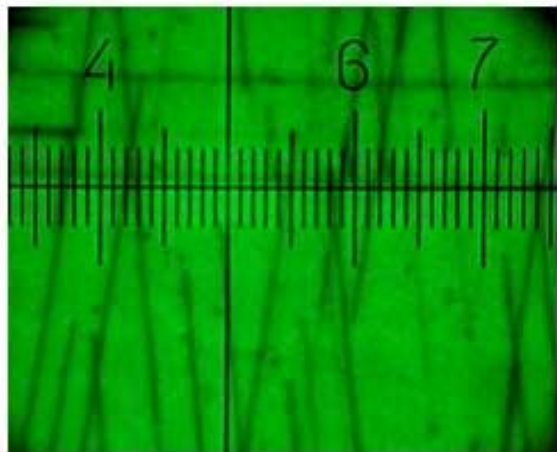
Может возникнуть ситуация, когда резонансная структура не дает выигрыша по сравнению с хаотически расположенными КЯ. Тогда надо вводить отстройку или «дефект».

# Возможные варианты зеленого и синего лазера

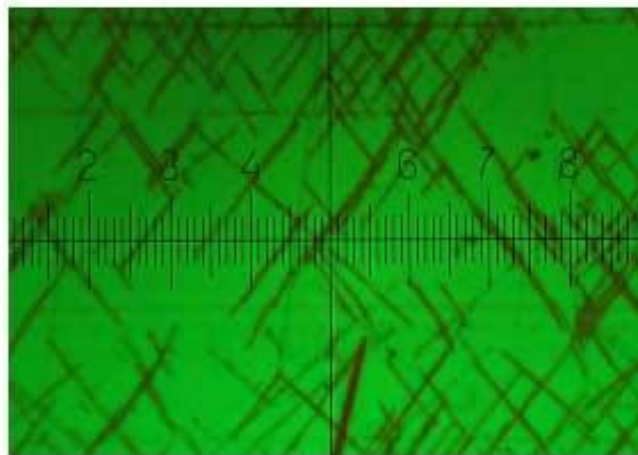


- ZnCdSe/ZnSSe//GaAs
- CdSSe/CdZnS//CdS
- ZnCdS/ZnSSe//GaAs
- ZnCdSe/ZnSe//ZnSe
- ZnCdSe/ZnMgCdSe//InP
- CdSSe/ZnSSe//GaAs
- ZnTe/ZnMgSeTe//GaSb
- ZnSe/ZnMgSSe//GaAs
- ZnSe/ZnMgSSe//ZnSe
- CdS/CdZnMgSe//CdS
- ZnCdSe/ZnMgSe//CdS
- ZnTe/ZnMgSeTe//GaSb

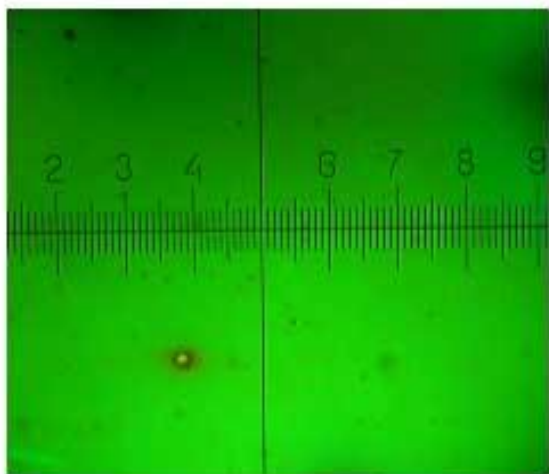
# Структуры ZnCdSe/ZnSSe на GaAs



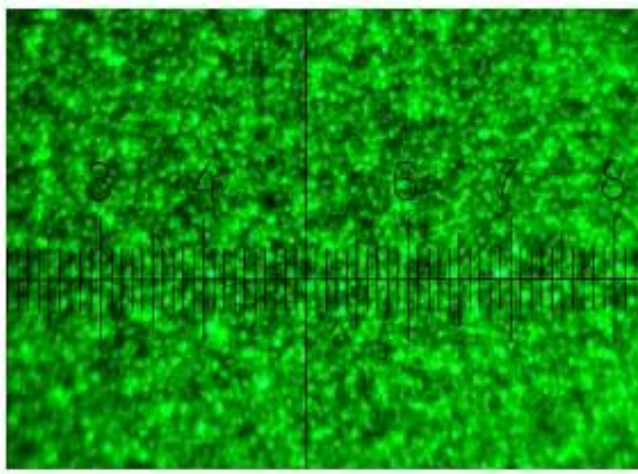
a)



b)



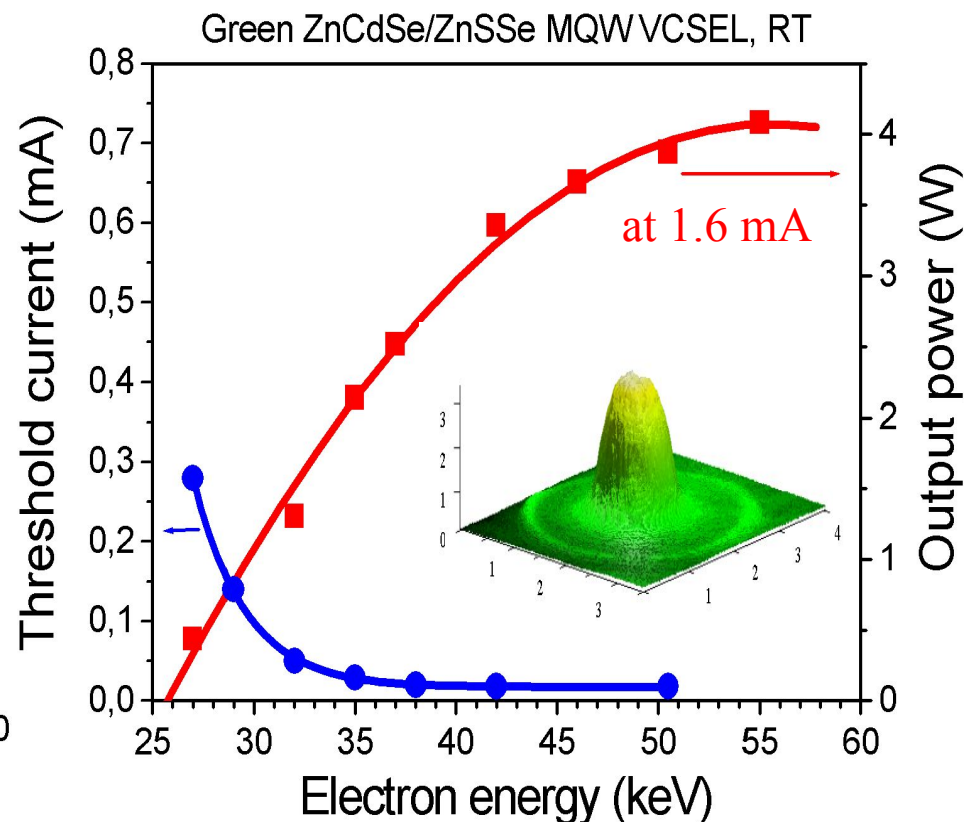
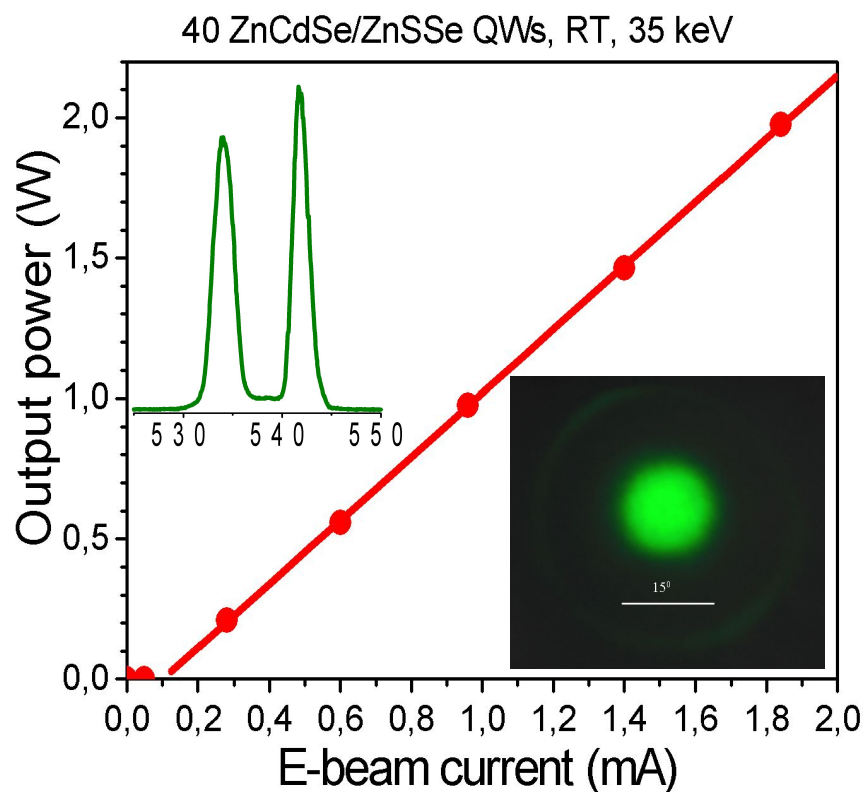
c)



d)

# Характеристики лазера на наноструктуре ZnCdSe/ZnSSe с 40 КЯ

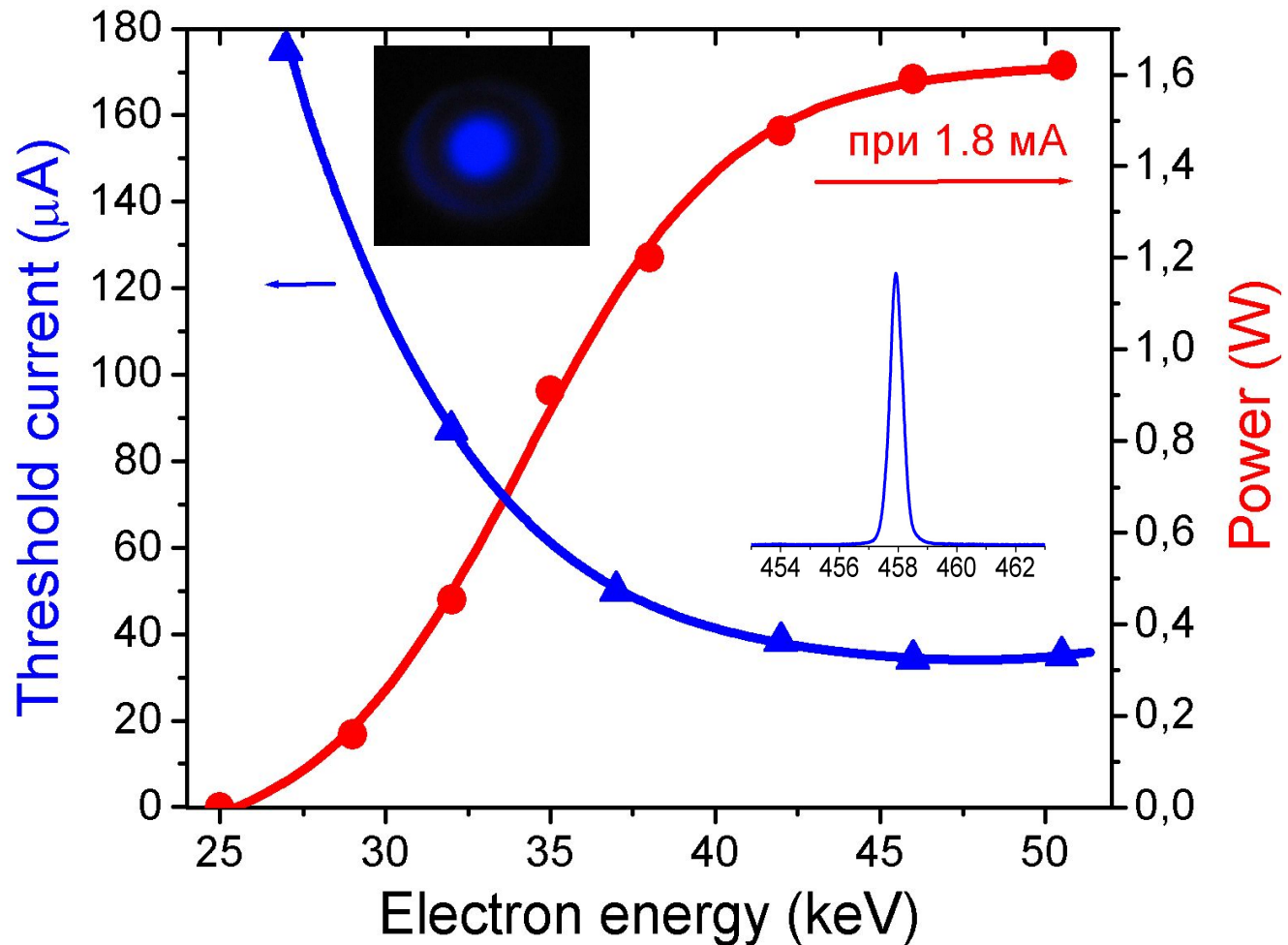
**Проблема** – высокие внутренние напряжения в структуре



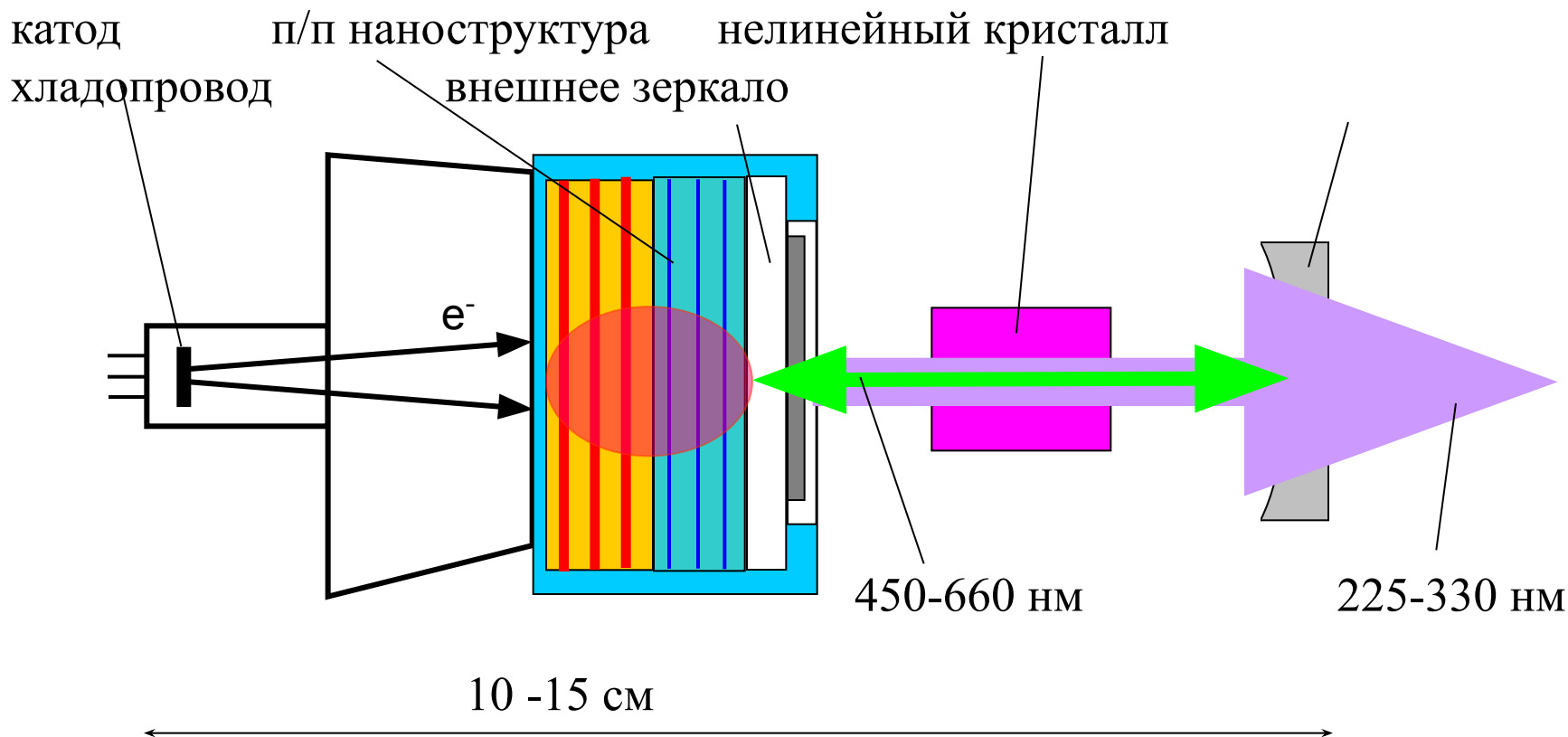
Лазер с мощностью 2 Вт при 550 нм был реализован также на структуре CdSSe/CdS

# Характеристики лазера на наноструктуре ZnSe/ZnMgSSe с 30 КЯ

Проблема –  
термодинамическая  
неустойчивость  
ZnMgSSe,  
транспорт  
носителей в КЯ



# УФ лазер (225-330 нм, 0.1-1 Вт)- проект



Реализована непрерывная генерация на 338 нм с мощностью 0.12 Вт с оптической накачкой второй гармоникой Nd- лазера с диодной накачкой – (*Appl. Phys. Lett.* 89, 061114 (2006), UK)

## **Проблема – создание эффективного источника монохроматического излучения в видимой области спектра для светоклапанных дисплейных технологий**

В настоящее время используются лампы с дуговым разрядом

### *Новые разработки*

**SemLED** – синие и зеленые GaInN светодиоды, 1.4 Вт (10 %),

*малая яркость (август 2006)*

**Q-peak** – твердотельные лазеры с диодной накачкой, импульсно-периодический режим, 22.5 кГц, 15.4 Вт средняя (< 4 %),

*высокая стоимость, спеклы (июль 2002)*

**Coherent** – удвоение частоты в лазере на полупроводн. наноструктуре с диодной накачкой, непр. 15 Вт на 488 нм (27 %) и 5 Вт на 460 нм (15 %),

*высокая стоимость, спеклы (2004 Photonics West)*

**Novalux** - удвоение частоты в матрице инжекционных лазеров с внешним зеркалом, 0.75 Вт на 620 нм, 3 Вт на 535 нм, 3 Вт на 465 нм, ожидаемая эффективность - 15 %

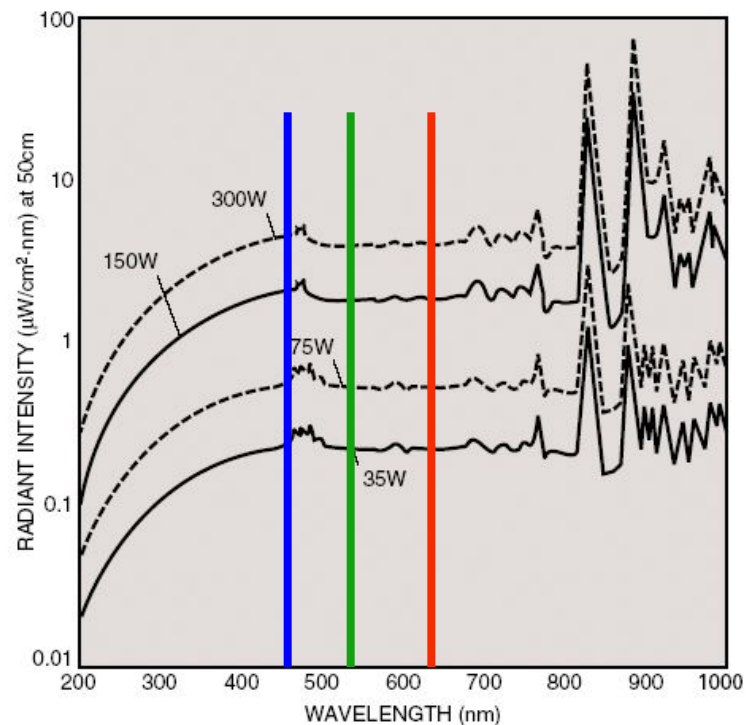
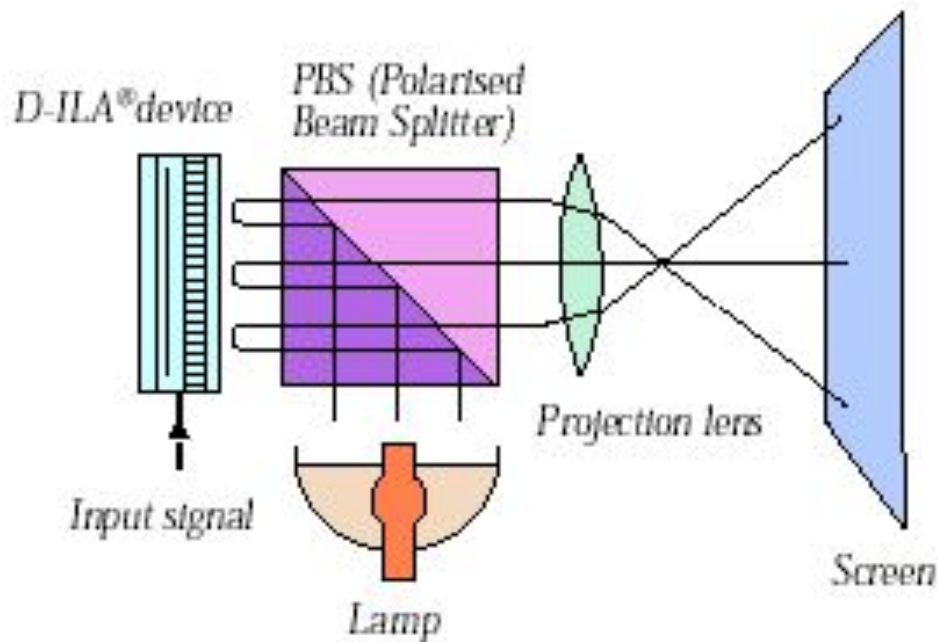
*высокая стоимость (August 2006)*

**ФИАН - Principia LightWorks** – ЛЭЛТ на наноструктурах, 9.4 Вт на 640 нм (11 %), 3.2 Вт на 535 нм, 1.5 Вт на 460 нм (*декабрь 2006*)



# Пректоры с ксеноновой лампой

JVC projector, 5000 lm, 2.2 kW

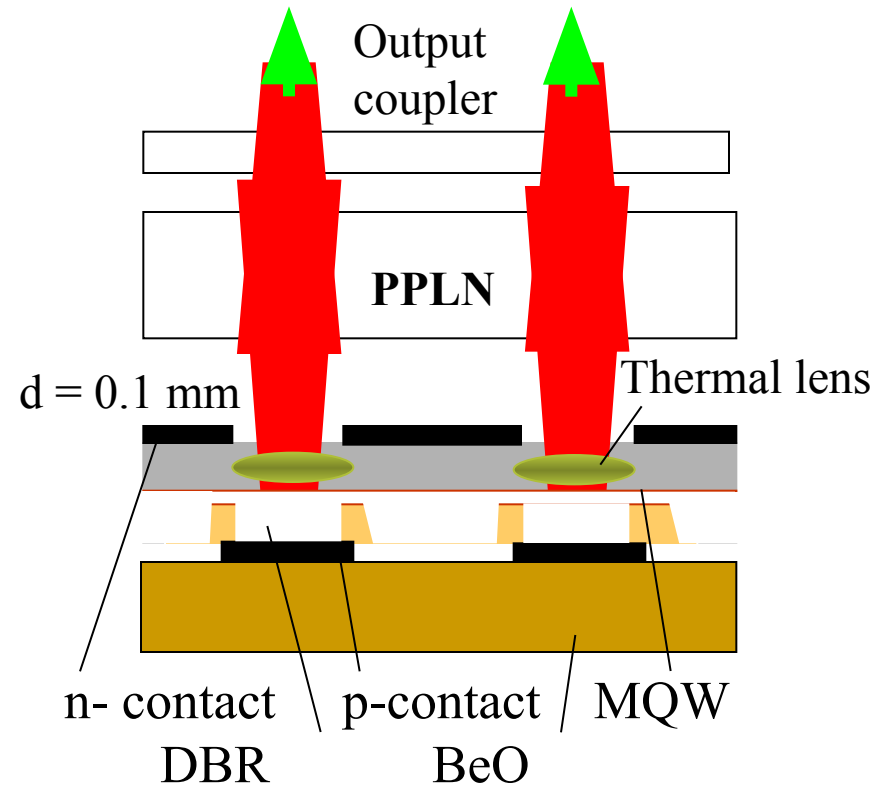
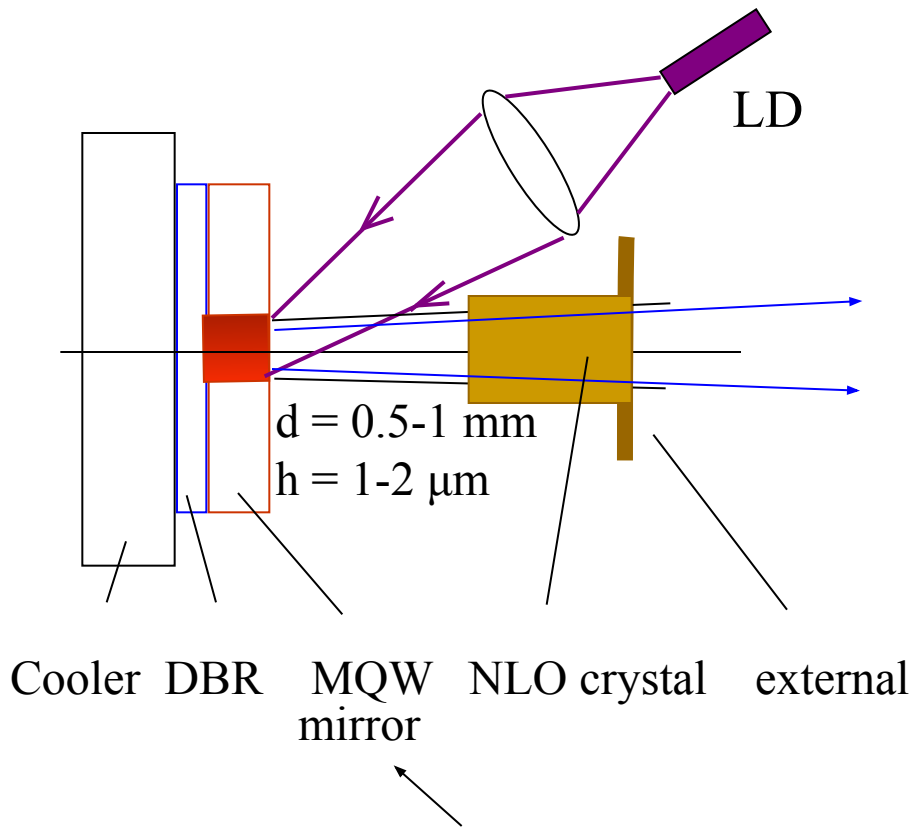


Xe-lamp, 1.6 kW, 15 W used, efficiency  $< 1\%$

# Лазеры для дисплейных применений

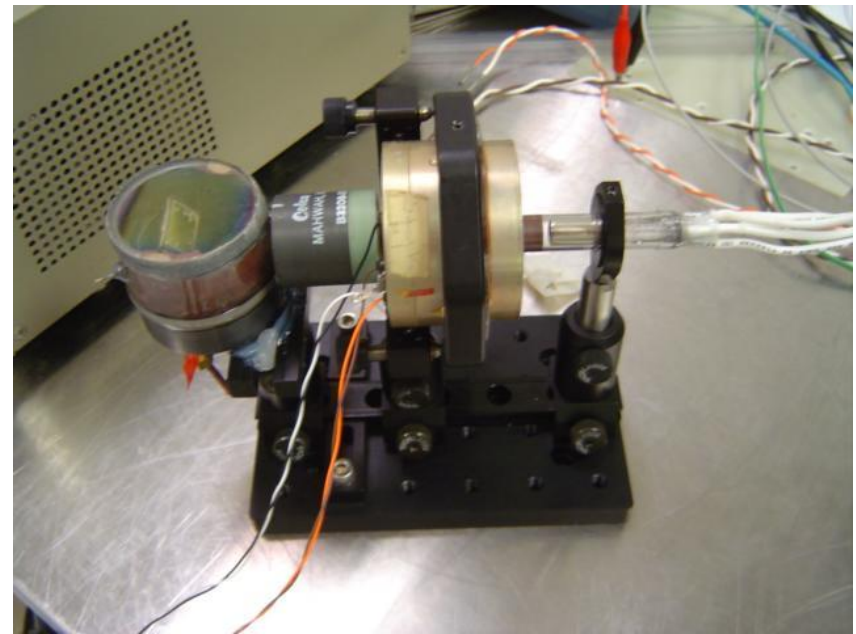
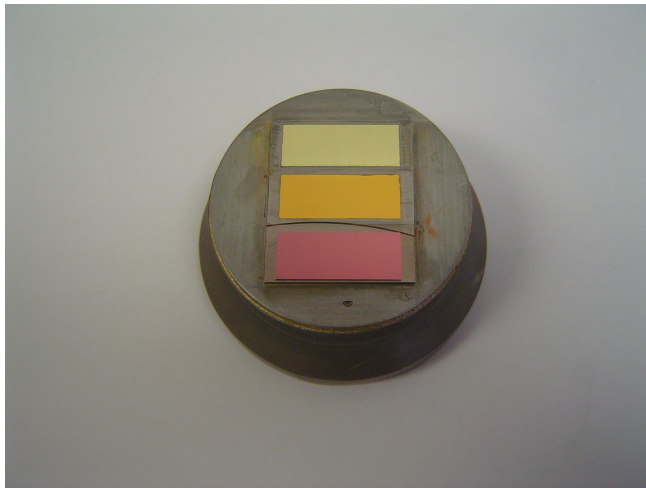
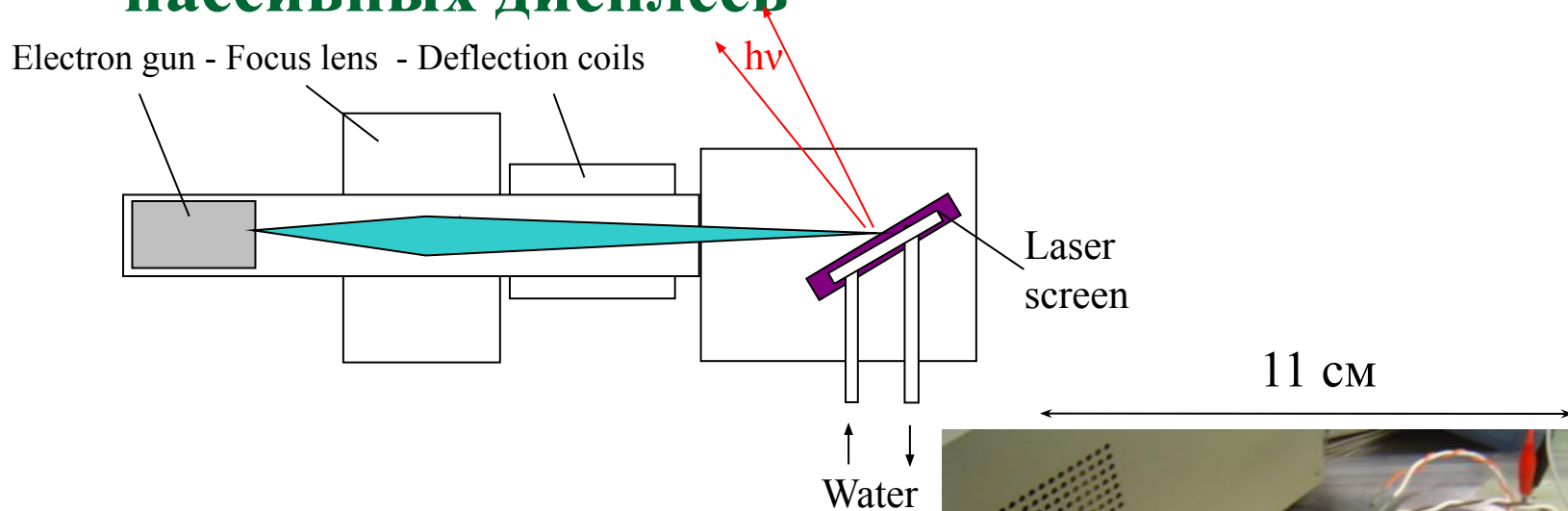
Coherent

Novalux



Структура из III-V соединений с резонансно-периодическим усилением

# Лазерная ЭЛТ как источник излучения для пассивных дисплеев



## eVCSEL light source provides deep colors

Laser Focus  
World, May 2005

MICHAEL D. TIBERI

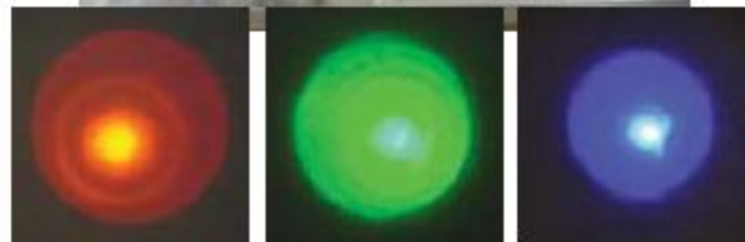


FIGURE 1. An eVCSEL light source (top; laboratory prototype) is electron-beam-pumped; the electron beam is scanned as in a cathode-ray tube. The eVCSEL produces high-quality red, green, and blue light (bottom).

**T**

he use of lasers as light sources for rear-projection television (RPTV) has captured the attention of manufacturers in the drive to create true-to-life, movie-theater-quality imagery in the home. Microdisplay technol-

ogized UV and IR emission is also eliminated, operating lifetimes are significantly longer (exceeding 10,000 hours), and the directionality and small divergence angle of laser light cones allow for simple optical coupling.

These advantages, however, have yet to be made into a

# Публикации о данной технологии (продолжение)

Photonics  
West-2005

## Electron Beam Pumped VCSEL Light Source For Projection Display

Michael D. Tiberi<sup>\*a</sup>, Dr. Vladimir I. Kozlovsky<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Principia Lightworks, Inc., 6455 Independence Avenue, Woodland Hills, CA91367

<sup>b</sup>P.N. Lebedev Physical Institute, 53 Leninsky Prospect, 119991 Moscow, Russia

Compound  
Semiconductor,  
October 2006

LEDs may be the first solid-state technology to be used in RPTVs, but Don Klein, VP of business development at Principia Lightworks in Woodland Hills, CA, considers lasers to be the light source of the future. "The reason LEDs have got any traction is because of the industry's need to replace UHP lamps, and the cost and power efficiency obstacles to a broad adoption of laser light sourcing. Principia's eVCSEL [electron-beam-pumped-vertical-cavity surface-emitting lasers] overcomes those obstacles."

### eVCSELs

VCSELs are preferable over their edge-emitting counterparts because they can be grown and tested on a single wafer, reducing manufacturing costs. Principia's

light that a microdisplay necessitates. Nevertheless, they do maintain the characteristics that make lasers a tempting alternative to UHP lamps and LEDs: a 30,000h lifetime (as long as the TV itself) and a color gamut that is more than double the requirements of the US standardizing body, the NTSC.

The trick up Novalux's sleeve, however, is the variety of devices aside

**"Lasers offer the widest color gamut – substantially greater than phosphors or LEDs."**

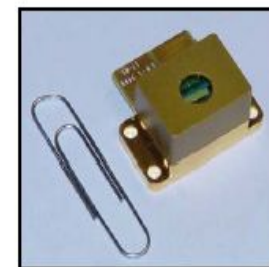
**Don Klein**  
Principia Lightworks

Projection  
summit,  
June 2006



■ Current products soon to be demonstrated include ...

- ◆ Novalux NECSEL™ arrays
- ◆ Principia LightWorks eVCSEL
- ◆ Coherent OPSL
- ◆ Plus others to be announced ...



Novalux 3W Laser

# Заключение

Лазеры на п/п наноструктурах с катодно-лучевой накачкой являются перспективными источниками света для дисплейных технологий.

*Красный лазер.* Достигнуты высокие характеристики по эффективности лазера, до 12 % при энергии 40 кэВ и комнатной температуре. Уровень разработки близок к промышленному освоению отпаянных приборов.

*Зеленый и синий лазеры.* Требуется дальнейшие усилия по совершенствованию технологии получения соответствующих наноразмерных структур.

Имеются хорошие перспективы освоения **УФ** диапазона: создание эффективного малогабаритного лазера с мощностью 0.1-1 Вт в спектральном диапазоне 225-330 нм.

Научные основы и технология получения наноструктур для видимой области спектра могут быть использована в лазерах с **оптической накачкой** лазерными диодами на основе GaN.

## Партнеры

Principia LightWorks Inc., CA, USA

Институт радиотехники и электроники, Лаб. MOCVD

EPSRC National Centre for III-V Technologies, University of Sheffield, UK;

Центр волоконной оптики при ИОФ РАН

## Гранты

РФФИ, гранты 05-02-16390, 07-02-01139

Программы ОФН РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур», «Новые материалы и структуры»

Программа «Научные школы», грант 6055.2006.2; УНК ФИАН

Контракт с Principia LightWorks Inc.



FOR IMMEDIATE RELEASE

# NEWS RELEASE

## Spire's Bandwidth Semiconductor Subsidiary Signs a Manufacturing Agreement with Principia Lightworks for Rear-Projection Television Laser Wafers

Bedford, MA — September 5, 2006 — Spire Corporation (Nasdaq: SPIR) announced today that its wholly owned subsidiary, Bandwidth Semiconductor, LLC (Bandwidth), entered into a five-year manufacturing agreement in which it will be the exclusive supplier to Principia Lightworks, Inc. (Principia), of semiconductor wafers, enabling Principia, a Woodland Hills, California firm, to begin high volume production of its patented device, an electron beam pumped vertical cavity surface emitting laser (eVCSEL) as a light source for projection display applications, including rear-projection consumer television (RPTV).

Under the terms of this agreement, Bandwidth will be producing III/V and II/VI wafers for Principia with full production expected to start in mid 2007. During the first three years of the agreement, Bandwidth anticipates revenues will be in excess of \$16 million which includes revenue from the production of wafers and recognition of certain nonrecurring engineering and facility access payments.

**\$16 million**

Bandwidth will begin the scale-up of its existing metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) and related processing facilities to satisfy Principia's requirements. Principia has made an up-front payment for nonrecurring