# АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ (СД)

**(тепловые, электрические и фотометрические измерения)**


***А.Л. Закгейм***

***Учреждение Российской академии наук Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, г.Санкт-Петербург***

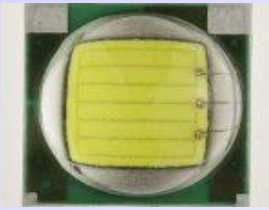

## В докладе

- **Современный уровень и основные тенденции в разработке мощных СД**
- **Измерительные методики при контроле параметров СД:**
  - **тепловые;**
  - **электрофизические;**
  - **спектрорадиометрические, фотометрические, колориметрические**
- **Проблемы однозначности и воспроизводимости измерений, экстраполяции одних режимов на другие и прогнозирования работоспособности**


**LEDTechExpo, Москва, 19-21 апреля, 2011г.**

# Светодиоды сегодня: растет не только световая отдача , но и:

1. *Рабочие токи (плотности токов) до 150 A/cm$^2$*
2. *Рабочие температуры 85-150$^0$C*
3. *Площади единичных кристаллов до > 10mm$^2$*

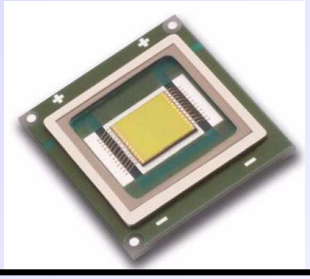


**Cree:**

**XP-E, XP-G :** $S_{ch}$~1mm$^2$, $I_{max}$= 1-1.5 A, $P_{diss}$~5W, $R_{th}$~6K/W, Φ ~400lm

**XM-L:** $S_{ch}$~4mm$^2$, $I_{max}$= 3A, $P_{diss}$~10W, $R_{th}$~2.5K/W, Φ ~900lm, $T_j$=25$^0$C

60W

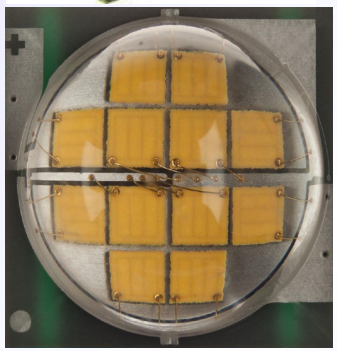


**Luminus:**

**SBT-90-W :** $S_{ch}$ ~9mm$^2$, $I_{max}$= 10A, $P_{diss}$~50W, $R_{th}$~0.7K/W, Φ~2000lm, $T_j$=25$^0$C

**LedEngin :**

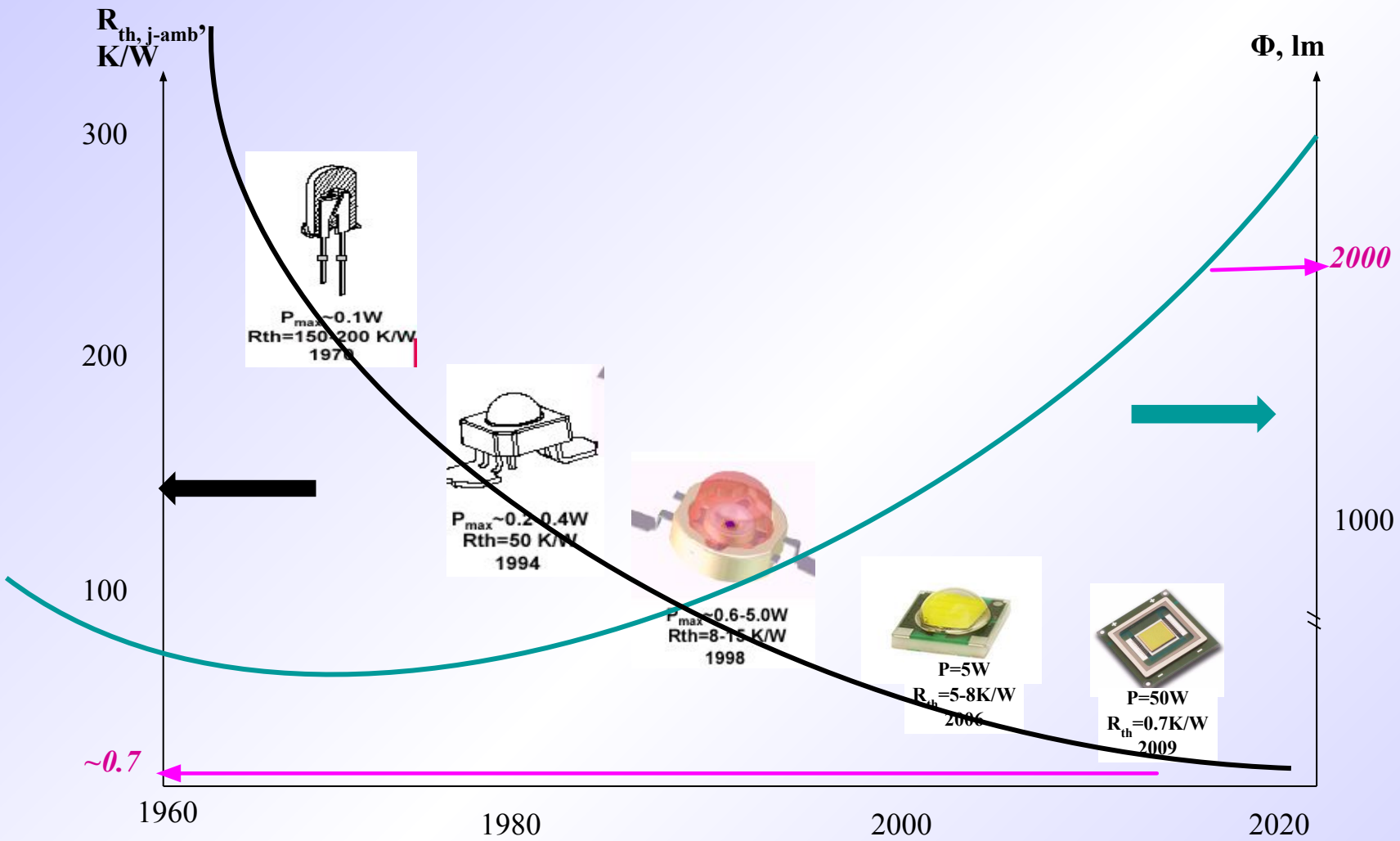
**LZP-00CW00** : $S_{ch}$~12*12mm$^2$, $I_{max}$= 4A, $P_{diss}$~90W, $R_{th}$~0.35K/W, Φ~5600lm, $T_j$=25$^0$C



**Cree:**

**MT-G :** 12-die, $S_{ch}$~9*9mm$^2$, $I_{max}$= 4 A, $P_{diss}$~25W, $R_{th}$~1.5K/W, Φ ~1500lm, $T_j$=85$^0$C

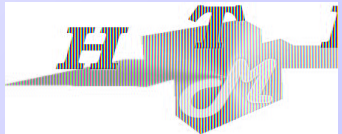
# Эволюция СД: тепловое сопротивление □ - световой поток □



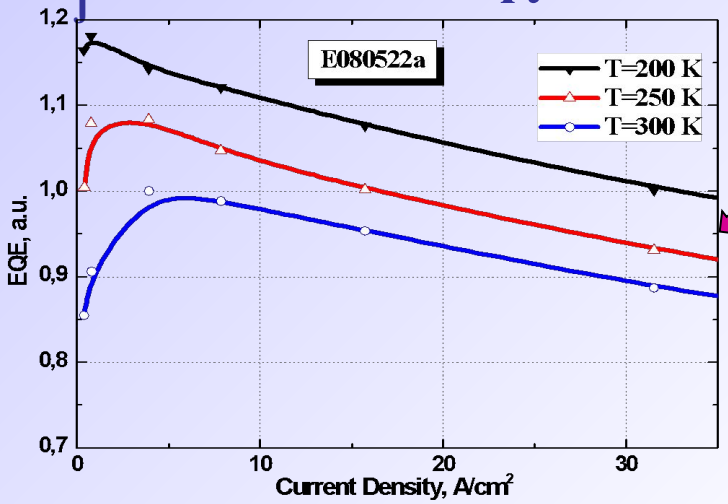

**Разогрев активной области:**

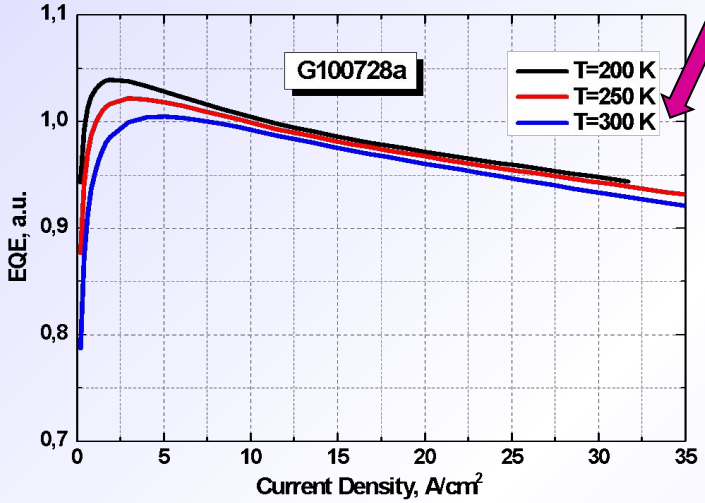
- ограничивает предельные энергетические параметры и ресурс;
- вносит неопределенность в характеристики:

$P_{out}$, EQE, WPE, $\lambda_{peak}$, $\lambda_{dom}$, $\Delta\lambda_{0.5}$, x,y, $T_{col}$, etc. = f(T)



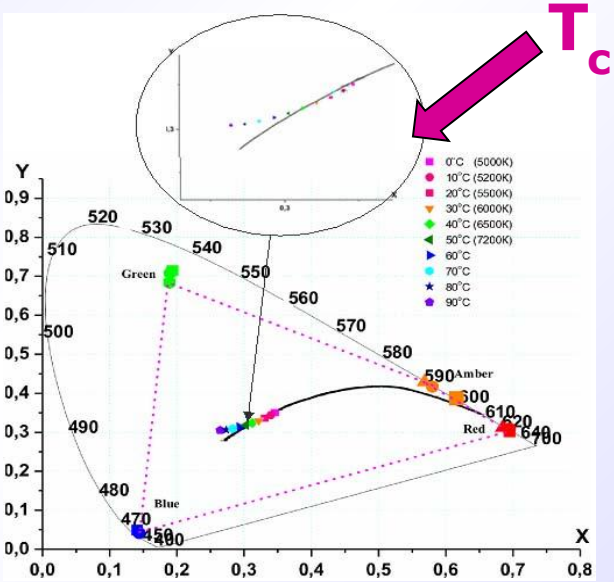
# $T_j$ влияет на функциональные характеристики и ресурс*



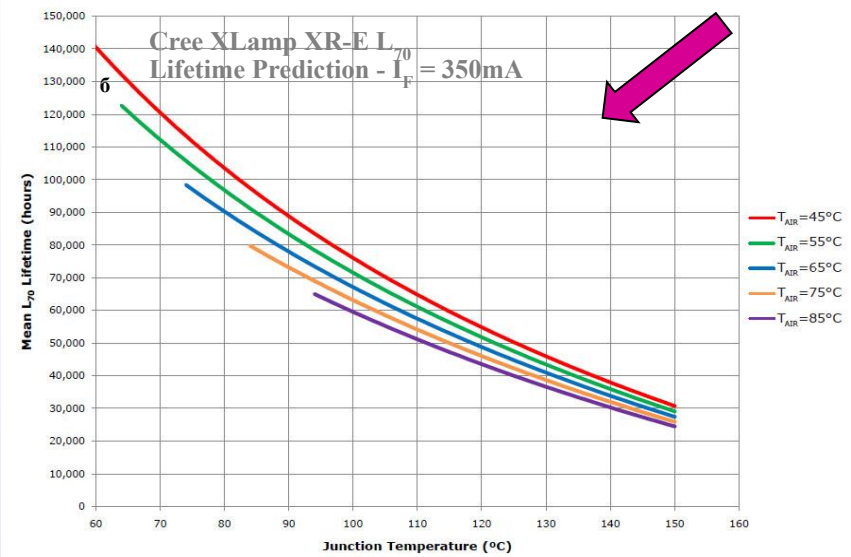




EQE

$T_c$




$L_{70}$

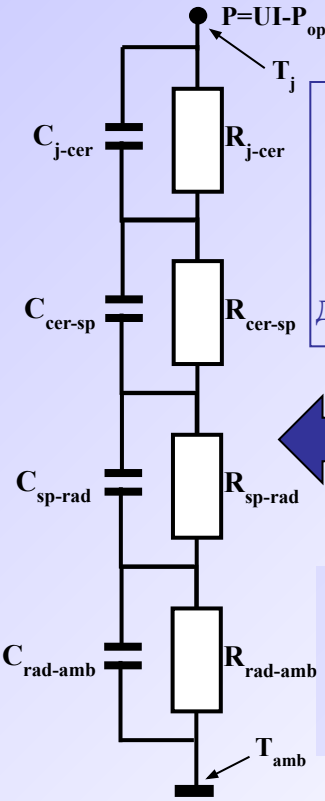



**Надо знать:**

**$T_j$ при приемо-сдаточных испытаниях;**
**$T_j$ в реальном режиме эксплуатации;**
**Температурные зависимости EQE=f(T)**

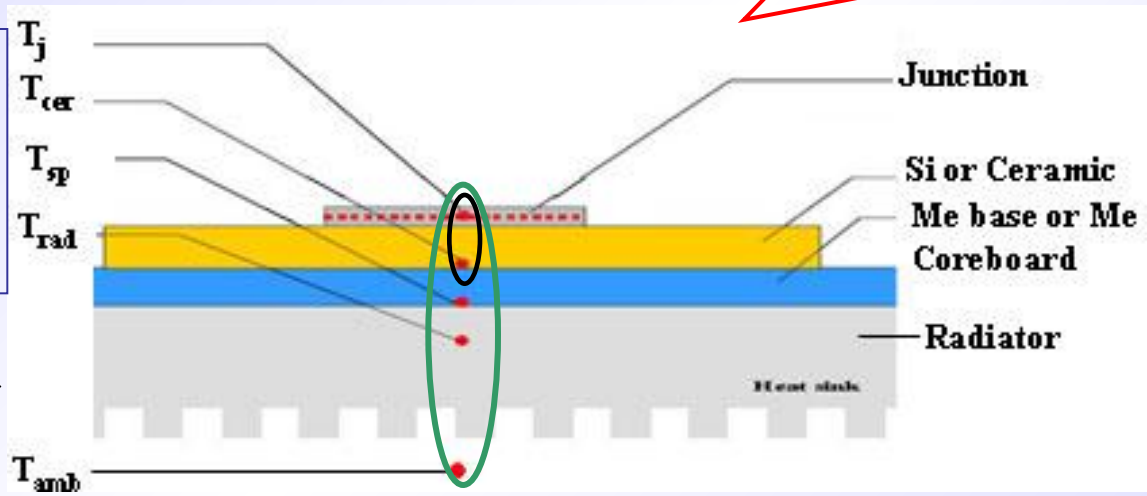
**Для InGaN/GaN гетероструктур температурные зависимости «индивидуальны»: конкретный изготовитель, дизайн наноструктуры и т*

# Тепловая модель




эквивалентная схема: распределенные R, C параметры апроксимируются дискретными звеньями

*$R_{th,\,j\text{-}sp}$ есть в спецификациях*



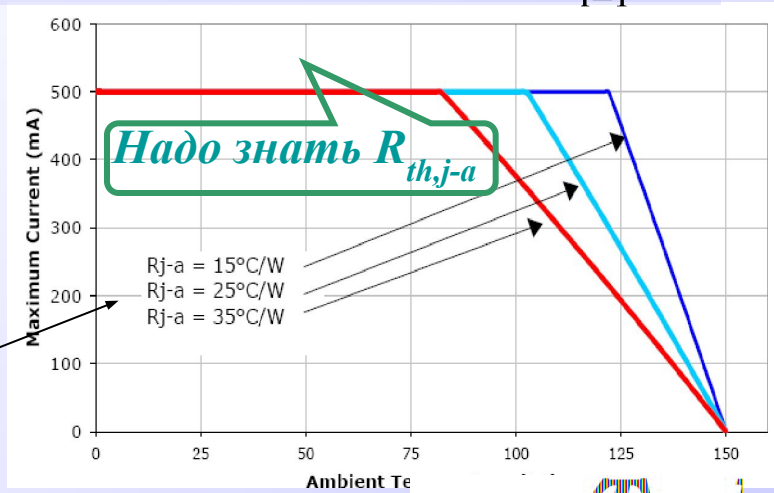

$$T_j = T_{amb} + P_{diss} R_{th,\,j\text{-}amb} = (UI - P_{opt})\, R_{th,\,j\text{-}amb} = (UI - P_{opt}) \sum_{i=1}^{i=n} R_{th,\,i}$$

**<u>В спецификациях приводят</u> $R_{th,\,j\text{-}sp}$ junction – solder point (переход – нижняя плоскость корпуса),**
***например, $R_{th,\,j\text{-}sp}$ = 2.5K/W (Cree XM-L)***

**<u>А надо знать:</u>**

**При применении □ как минимум $R_{th,\,j\text{-}amb}$**

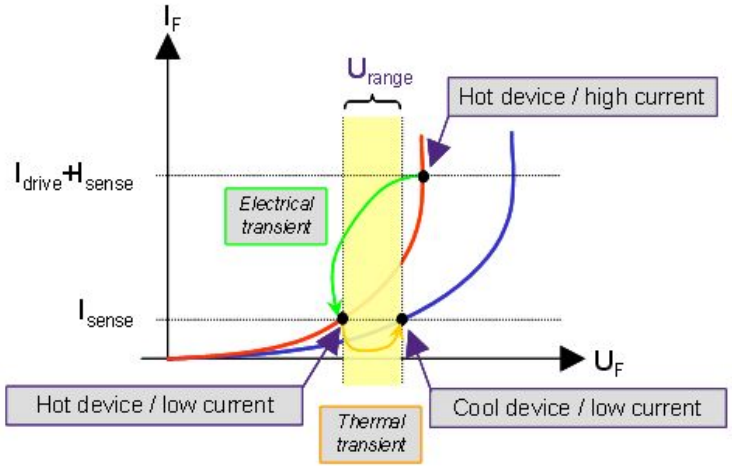
**При разработке □ все звенья цепи $R_{th,i}$**

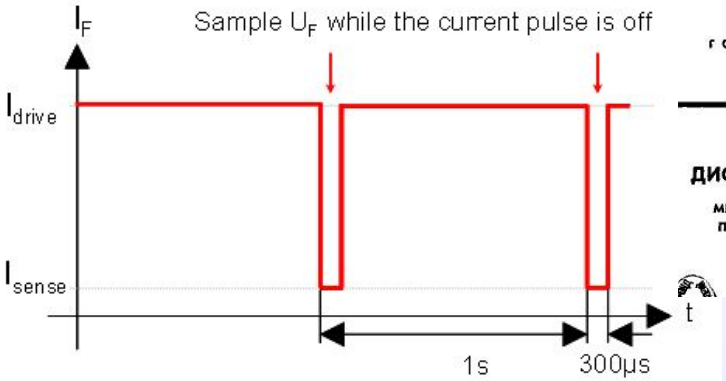


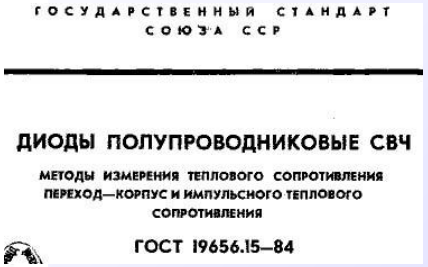

**Как измерить $R_{th,\,j\text{-}amb}$ -? $T_j$ - ?**

# Тепловые измерения: методы и аппаратура

## *I. По температуро-зависимым электрическим параметрам: $U_f$*





ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

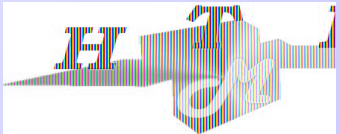
ДИОДЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЧ

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕХОД—КОРПУС И ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

ГОСТ 19656.15—84

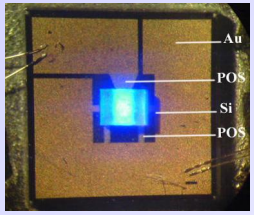
**Практическая реализация: прибор Thermal tester T3Ster (MicRed Ltd.) с «бустером» для питания светодиодных модулей (200V/5A) и термостатом 10-95 $^0$C. Мощное ПО позволяет детально анализировать тепловую цепь**

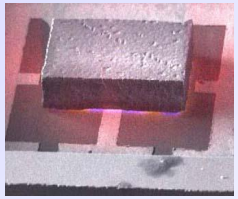
***(всем хорош, кроме цены >$120.000)***

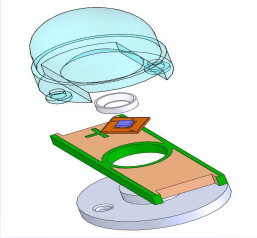


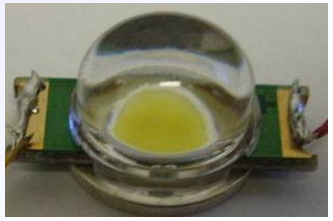
# Пример I: Одна конструкция - МК24, но разный материал платы-носителя

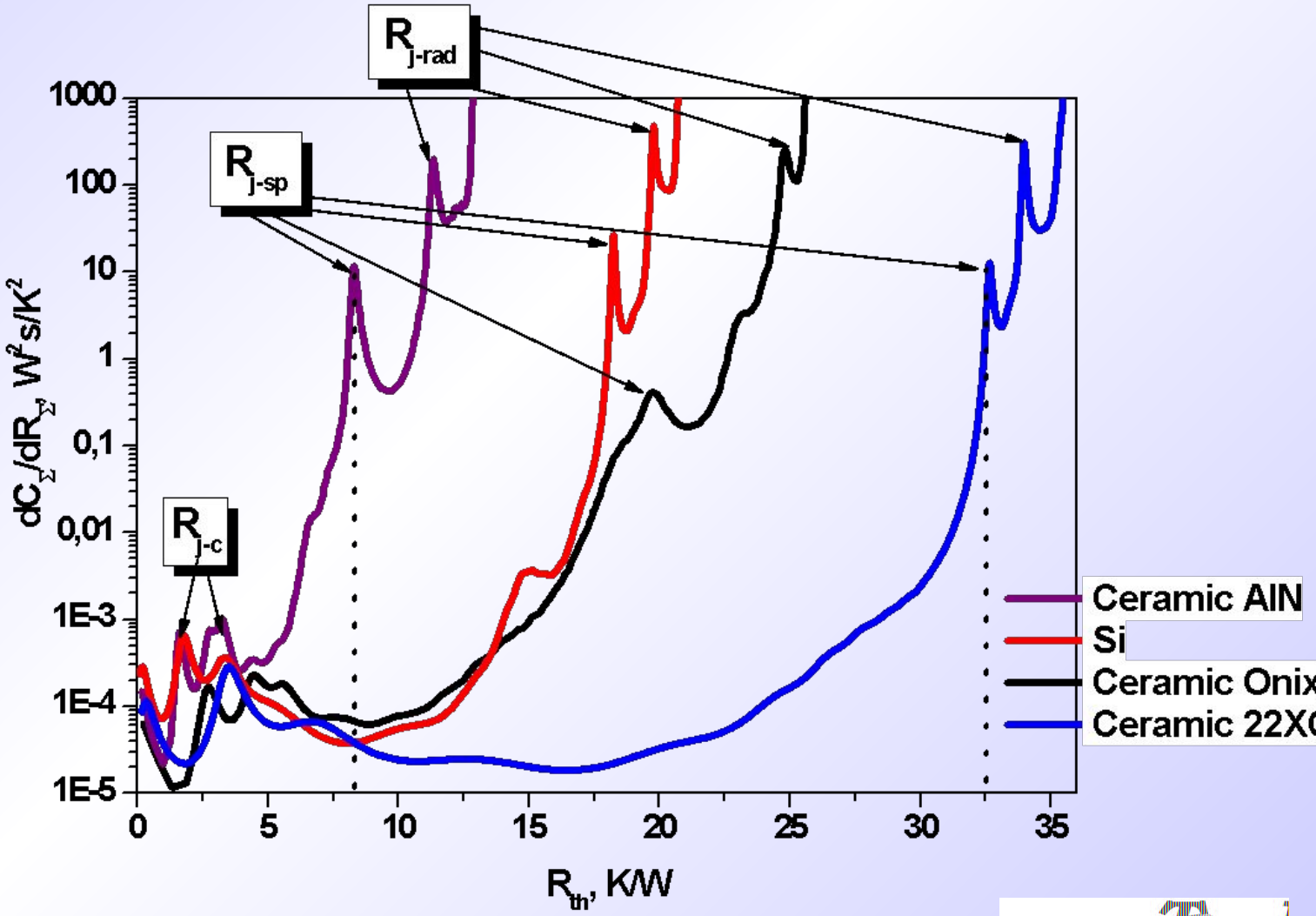
## $R_{th,\ j\text{-}sp}$ изменяется в пределах 7-32 K/W

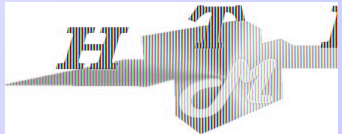






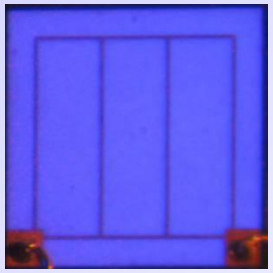


## Пример II. Одна площадь чипа ~1mm$^2$, но разные конструкции:

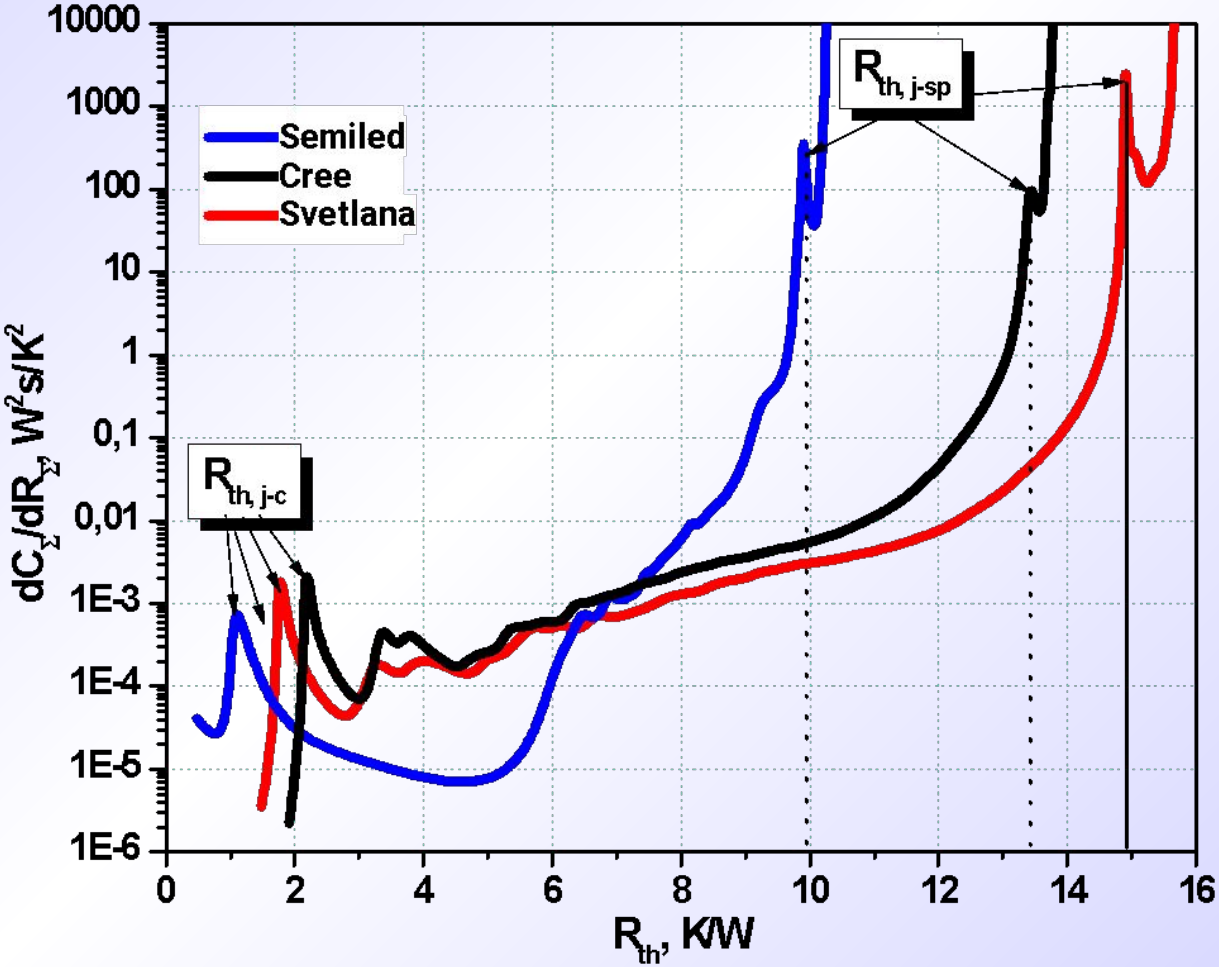
## «Cree EZ1000», «Semiled SL-V-B40AC», «Светлана-Оптоэлектроника МК-24»

## $R_{th,\ j\text{-}sp}$ изменяется в пределах 9-14K/W



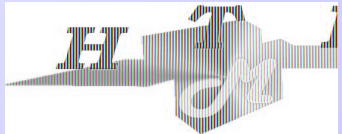
*Cree, Semiled*

*Svetlana*



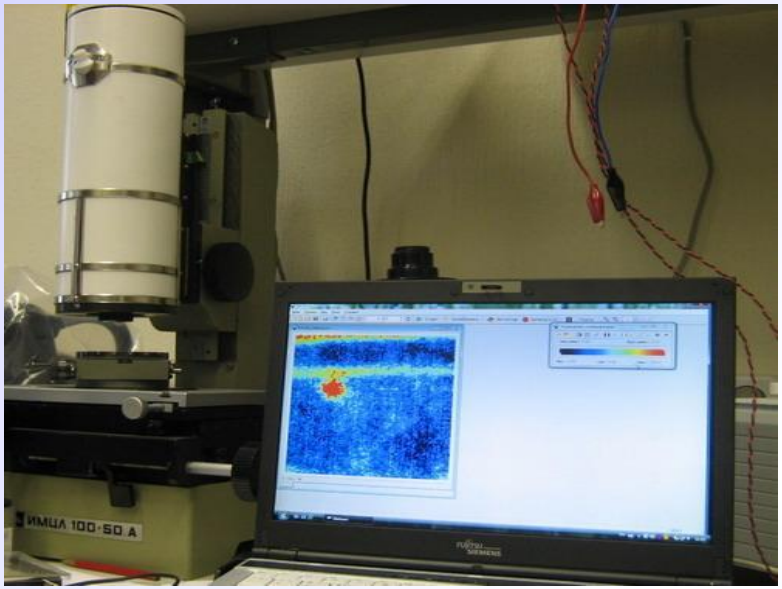

## Недостатки:

- не позволяет непосредственно оценивать $T_j$;
- нет разрешения по площади ( температурного «мэппинга»)



## II. ИК-тепловизионный метод - непосредственное измерение $T_j$ по интенсивности собственного теплового излучения.

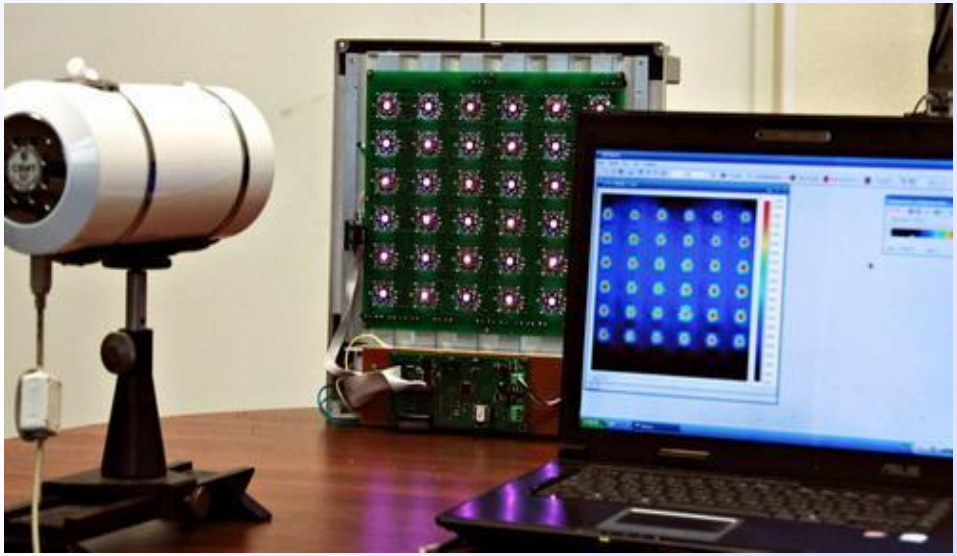
**Универсальный тепловизионный комплекс на базе тепловизора «Свит» и ИК-тепловизионного микроскопа УТК-1 (ИФП СО РАН)**



**ИК-МИКРОСКОП**

**Поле зрения: 400x400 ⇔ 3000 x 3000мкм**

**Пространственное разрешение: 3-4мкм**



**ИК-ТЕПЛОВИЗОР**

**Поле зрения : до 10x10 см**

**Пространственное разрешение: 0.8-1мм**

**Матрица InAs: 128×128, шаг 50мкм. Диапазон длин волн 2.5÷3.мкм**

**Температурное разрешение по АЧТ:**

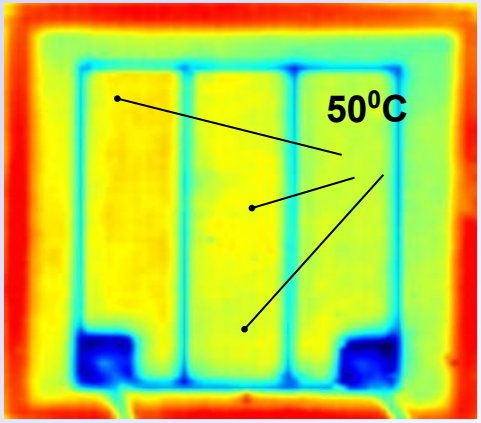
**$0.2^0$C при $T_{об}$=300K ($T_{нак}$=80мс); $0.015^0$C при $T_{об}$=450K ($T_{нак}$=30мс)**

**Реальное разрешение ~$1\text{-}2^0$C**

# Температурный «мэппинг» как отдельного кристалла, так и светодиодных модулей

## Можно увидеть локальный перегрев, выявляющий:

### I. Скрытые дефекты конструкции

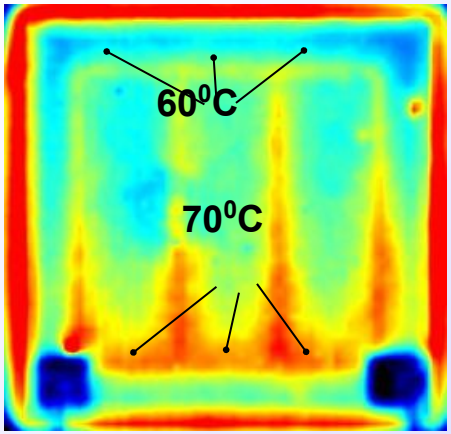



**Semiled SL-V-B40AC; Ток I=1A**

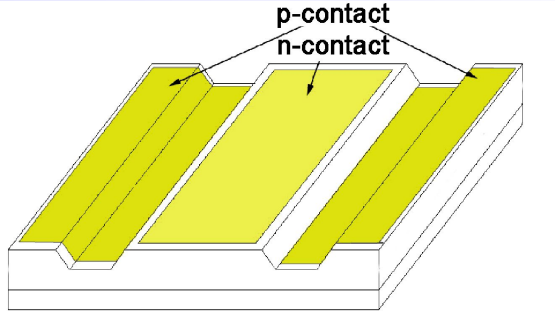
***Однородное растекание тока и разогрев***

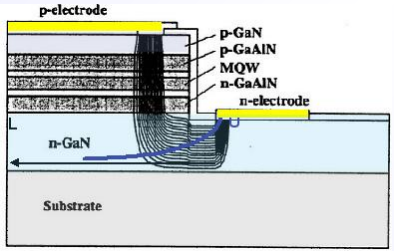
**Cree EZ1000; Ток I=1A**

***Дефект контактной группы, локальный перегрев***

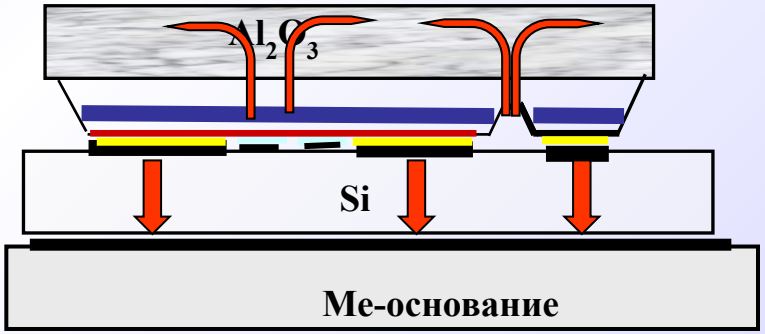


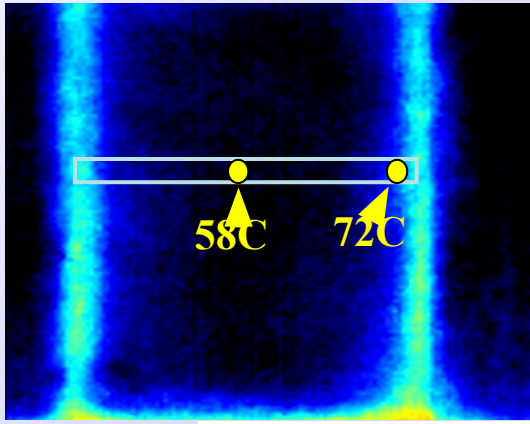

### 2. Скрытые дефекты монтажа (особенно для флип-чип конфигурации)



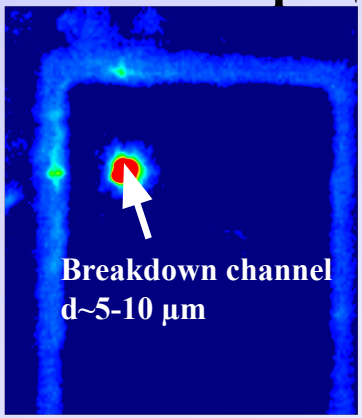



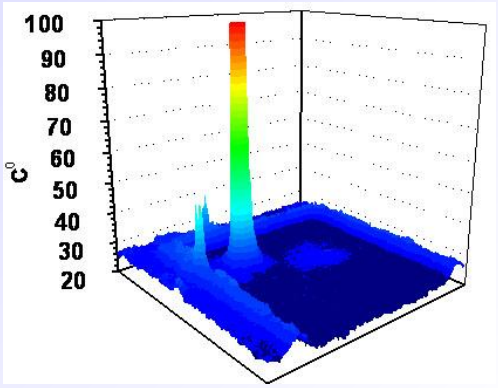

**“Висячие” мостики** → **Локальный перегрев**

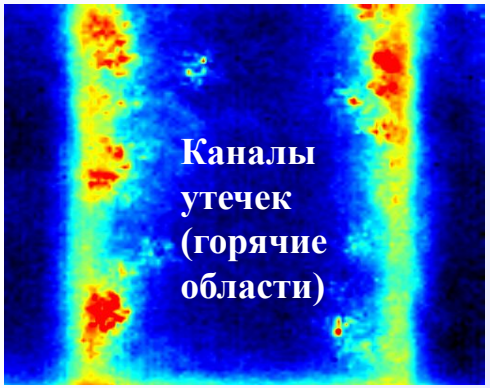


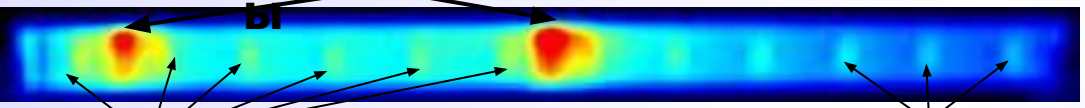
## 3. Развитие процессов деградации, каналы токовых утечек



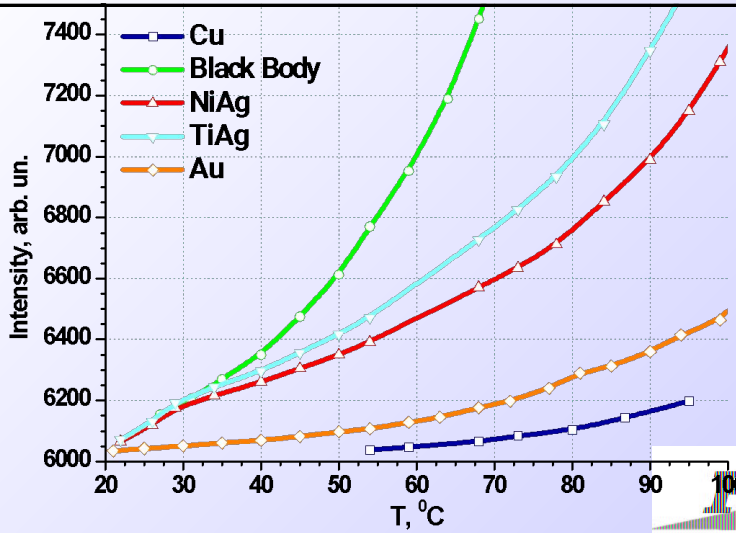




## 4. Неправильное размещение элементов СД модуля



***<u>Основная сложность метода:</u>***
***реальные объекты не АЧТ. Необходима предварительная калибровка излучательной способности (emissivity) материалов, входящих в конструкцию СД***



# Ближнее поле излучение – «мэппинг» собственной эмиссии

*Тот же принцип, что при «ИК-мэппинге», но в видимом диапазоне*

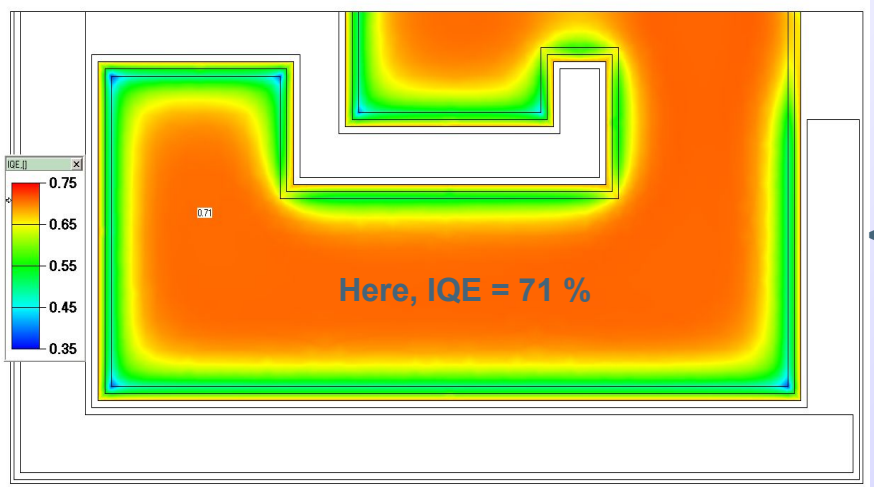
**Оптический микроскоп Mitutoyo со сменной оптикой**
**Камера Canon EOS – 10Mpxs**
**Разрешение 2-3мкм**

$$I_e \sim J \cdot IQE(j);$$

$$\langle IQE \rangle = \int IQE \cdot j \cdot dS$$

**В совокупности IR и VIZ «мэппинг» дают полную картину распределения яркости и температуры по площади p-n-перехода  основа для компьютерного моделирования и оптимизации излучающего кристалла**

**Локализация тока снижает квантовый выход примерно на 10%**




IQE @ < j > = 62 %

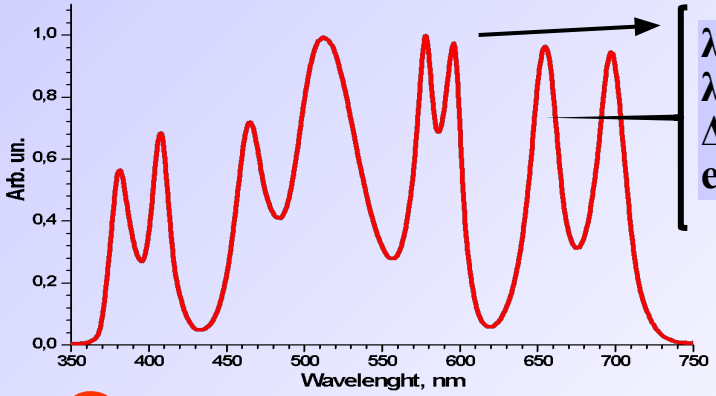
< IQE > = 52 %

I = 1000 mA

<j> = I / S = 100 A/cm$^2$

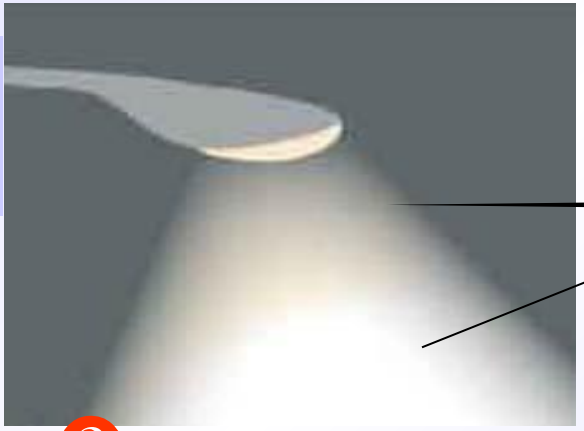
$j_{max}$ = 2240 A/cm$^2$

# Спектрорадиометрия, фотометрия, колориметрия



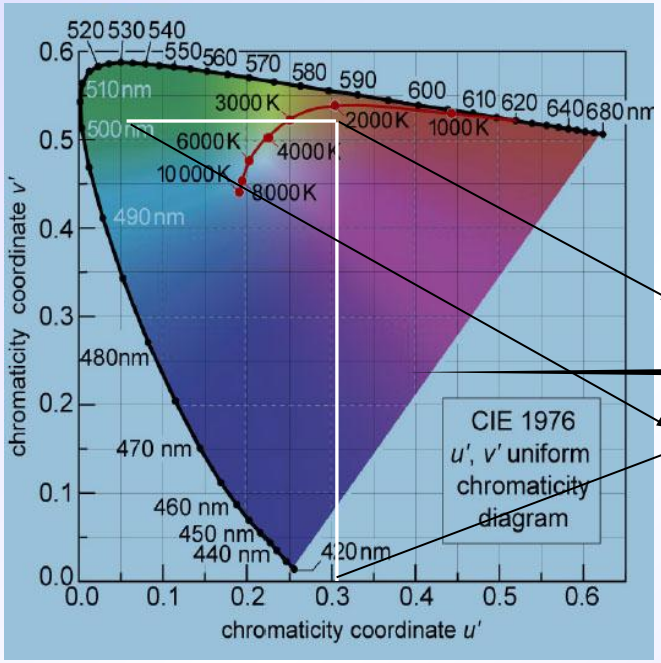

$\lambda_{peak}$
$\lambda_{centr}$
$\Delta\lambda_{0.5}$
etc.

1 Спектральное распределение



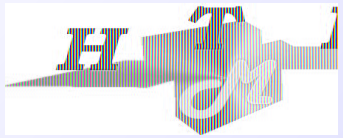
F[W]
Φ[lm]
$I_e$[W/sr]
$I_v$[cd]
η[%]
WPE [lm/W]
etc.

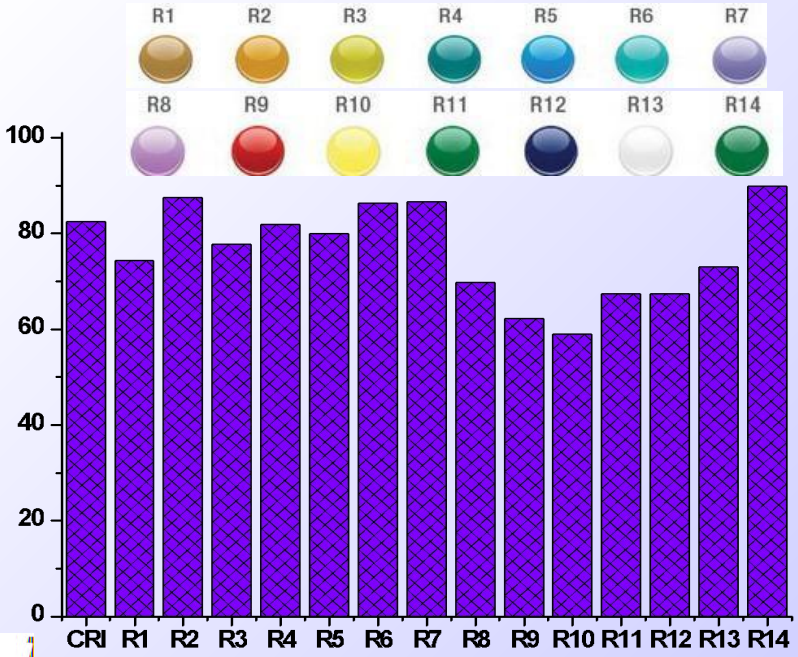
2 Радио- и Фотометрия




CCT
Chromatic coordinates:
x,y; u,v; u',v'
$\lambda_{dom}$

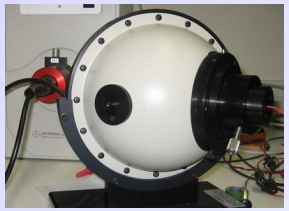
3 Колориметрия



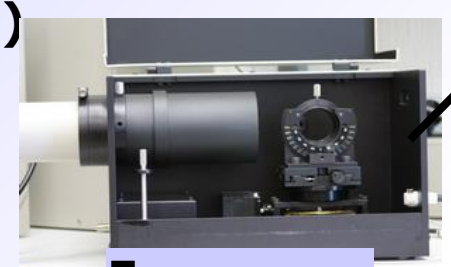



4 Общий $R_a$ и частные $R_{1-14}$ индексы цветопередачи (для белого света)

# Базовый подход к построению универсального измерительного комплекса



**Набор сфер (интегрирующих)**



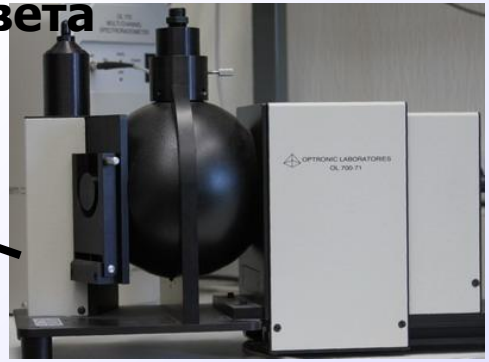
**Гониомет**

**Калибровочные и вспомогательные лампы**

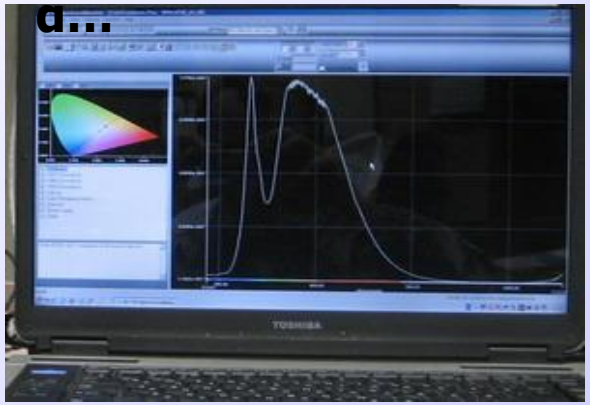
**Блок UV/VIZ/NIR спектро-радиометра с волоконным вводом, ПО, др.**

**Электронные блоки**

**Блок осевой силы света**



**Специальные опт. блоки – изм. R, T, d…**



**Управляющий компьютер**

# Специализированные измерительные комплексы для испытаний светодиодов (*LED Measurement and Test Systems*)

## За рубежом оборудование производят:

1. Optronic Laboratories Inc. (США)*
2. Instrument Systems (Германия)
3. Labsphere (Англия)
4. StellarNet Inc. (США)
5. Pro-Lite Technology (Англия)
6. Radiant Imaging Inc. (США)*
7. Light Tools (США)

**Приобретены и эксплуатируются в НТЦ микроэлектроники РАН*

*Total spectral flux (W/nm)*
*Luminous flux (lm)*
*Radiant flux (W)*
*Radiant intensity (W/sr)*
*Luminous intensity (lm/sr)*
*Chromaticity x,y; u,v, u',v'*
*Correlated color temperature CCT*
*Color rendering index CRI*
*Peak, centroid, center, dominant wavelengths (nm)*
*Purity*
*Angular distribution (Spatial radiation pattern)*
*I,V and luminous efficiency*

***Аппаратура соответствует стандартам:***

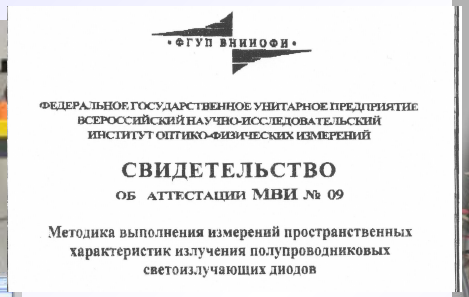
1. **IESNA LM-79:** *Approved Method for the Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Product*
2. **IESNA LM-58:** *Approved Method for the Measurements of Correlated Color Temperature and Color Rendering Index*
3. **CIE 127:2007:** *Measurement of LEDs*

## В России

**ГОСТ 19834.3-76 «Диоды полупроводниковые. Излучатели. Метод измерения спектрального состава излучения»**
**ГОСТ 19834.2-74 «Диоды полупроводниковые. Излучатели. Метод измерения силы некогерентного излучения»**

# Измерительный комплекс НТЦ микроэлектроники РАН

I.



ФГУП ВНИИОФИ

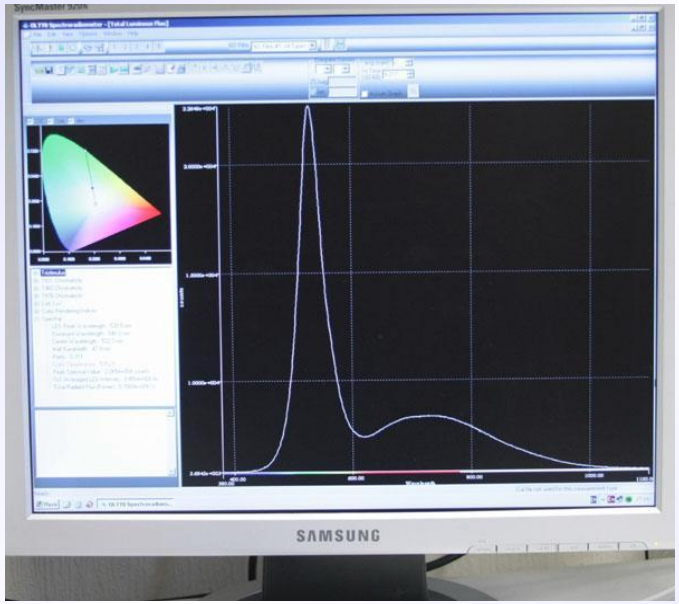
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

СВИДЕТЕЛЬСТВО
ОБ АТТЕСТАЦИИ МВИ № 09

Методика выполнения измерений пространственных характеристик излучения полупроводниковых светоизлучающих диодов

**“OL 770-LED High-speed LED Test and Measurement System UV/VIZ and VIZ/NI: 250 - 1100 nm ”** ***(~$100.000)***

**CCS-450 Standard Optical Closed-cycle Refrigerator 10-500K** ***(~$40.000)***




**Время 1-го измерения 15-20с**

**На дисплей выводятся**

- **x,y; u,v: u’v’ ;**
- **CCT [K];**
- **$\lambda_{peak}$ [нм];**
- **$\lambda_{dom}$ [нм];**
- **Purity;**
- **$R_a$, $R_{1-14}$;**
- **P[Вт];**
- **F [лм];**
- **I [кд];**
- **WPE [лм/Вт]**

**Динамический диапазон:**

**P =0.001…10Вт**

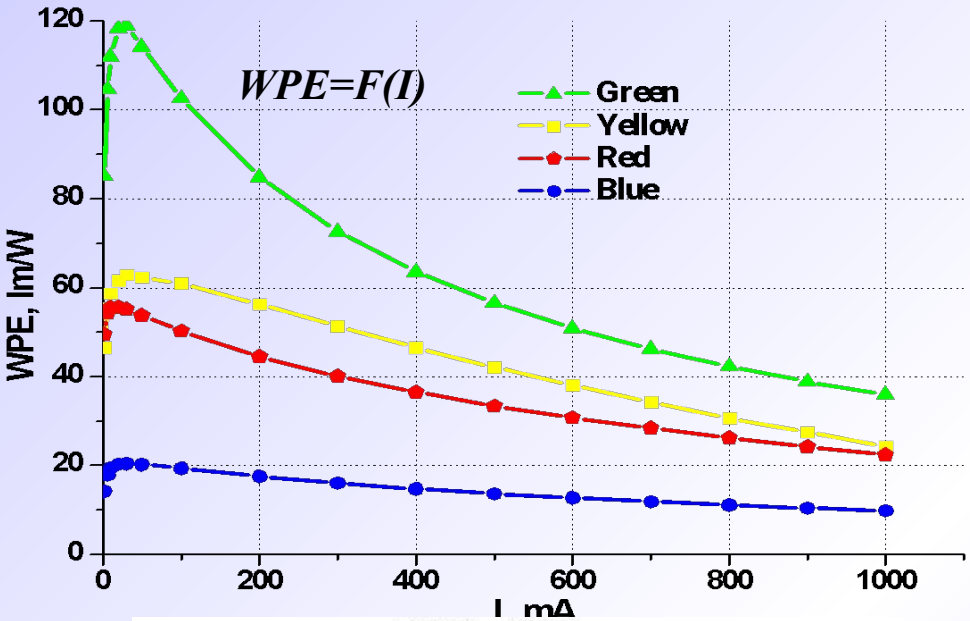
**F =0.005…3000лм**

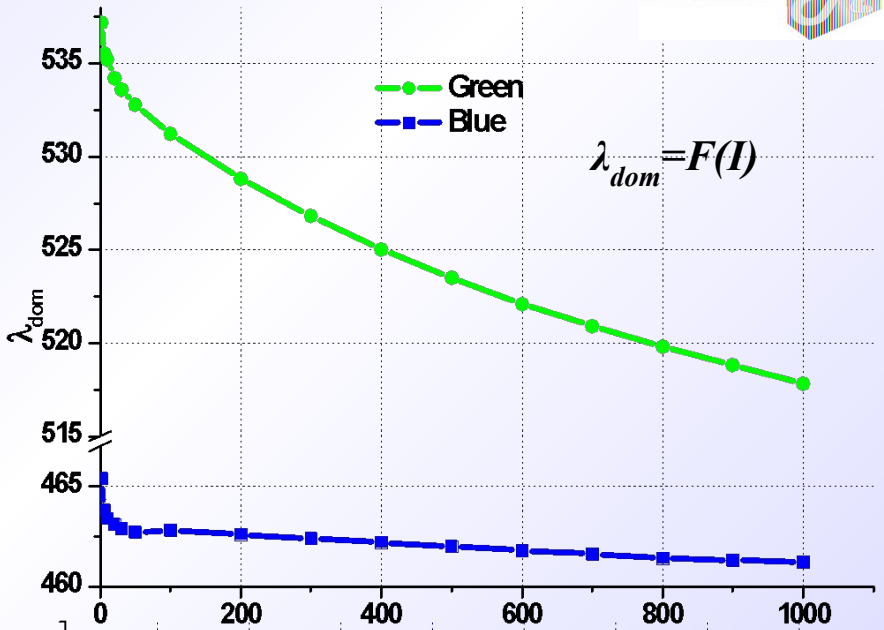
**$I_e$=0.001-20Вт/ср**

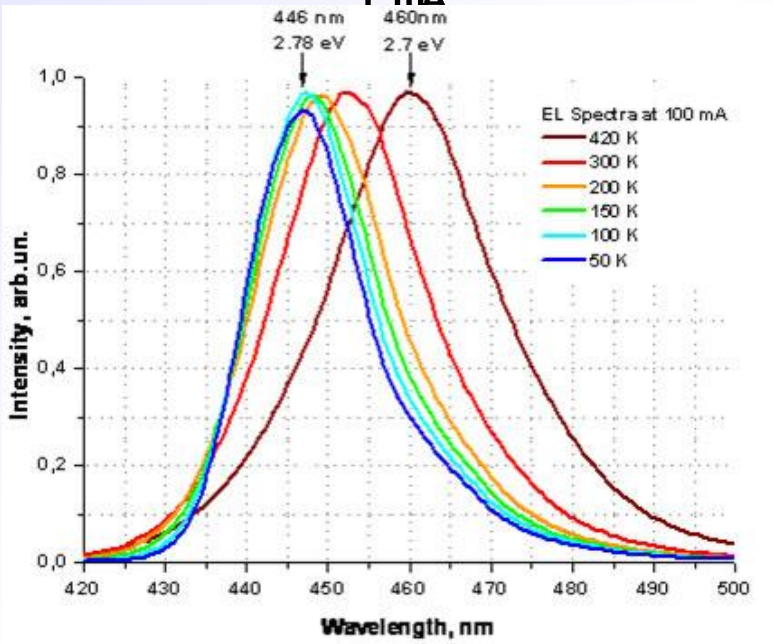
**$I_v$=1…10000кд**

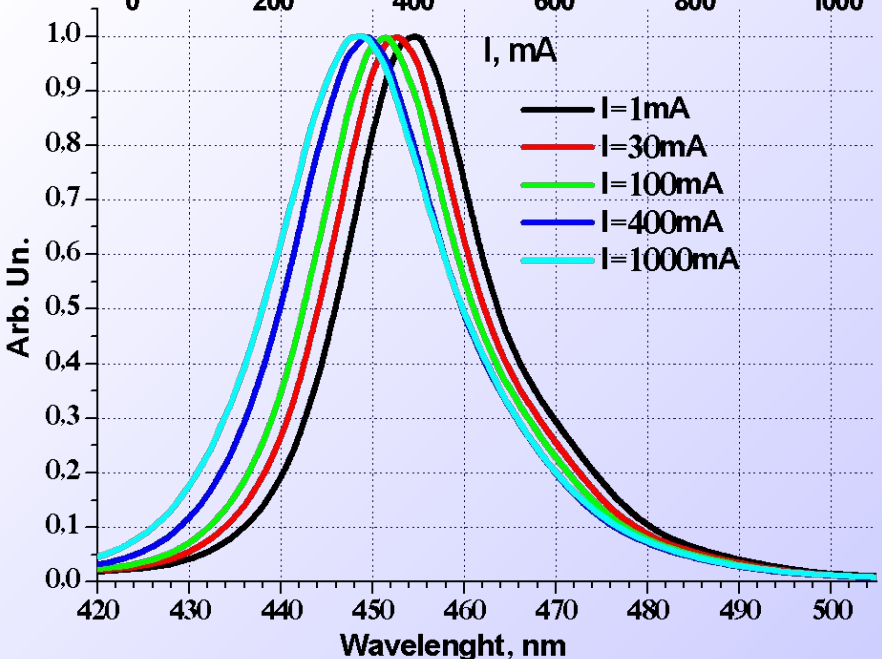
**……**

# Примеры: зависимости от температуры и тока световой отдачи, пиковой и доминантной длин волн

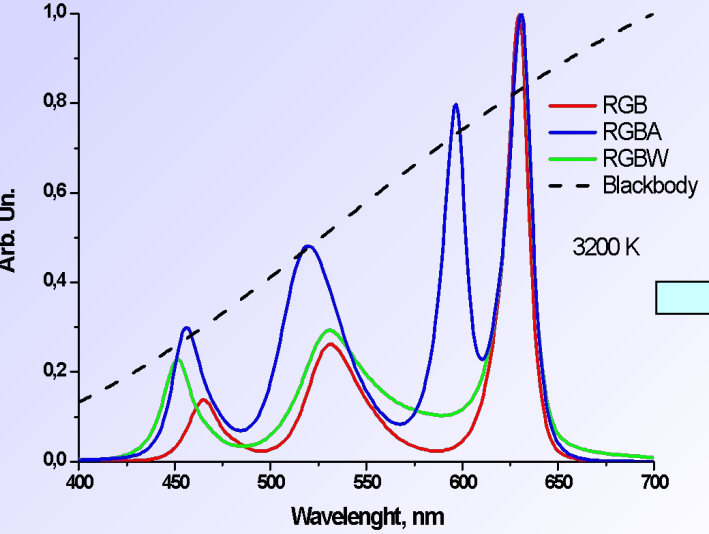


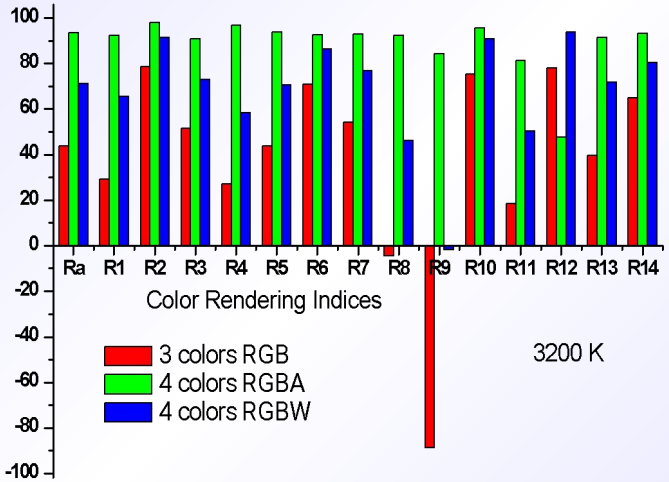



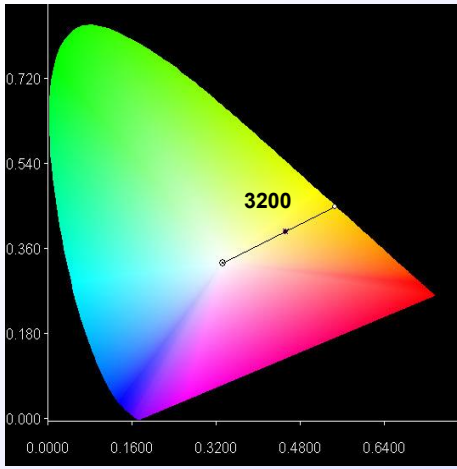



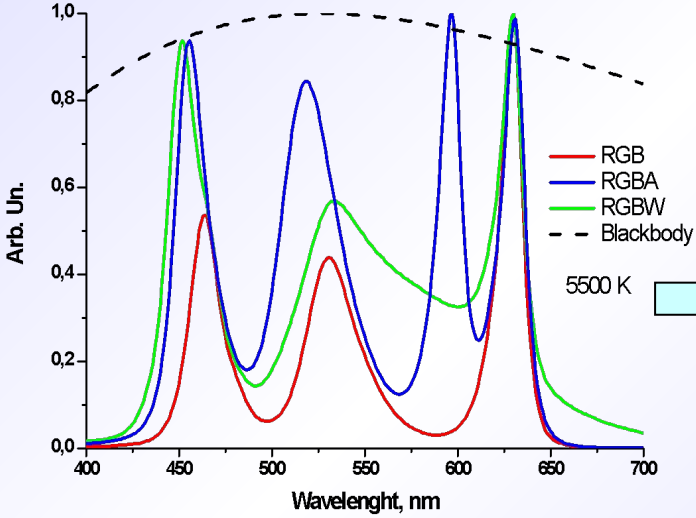



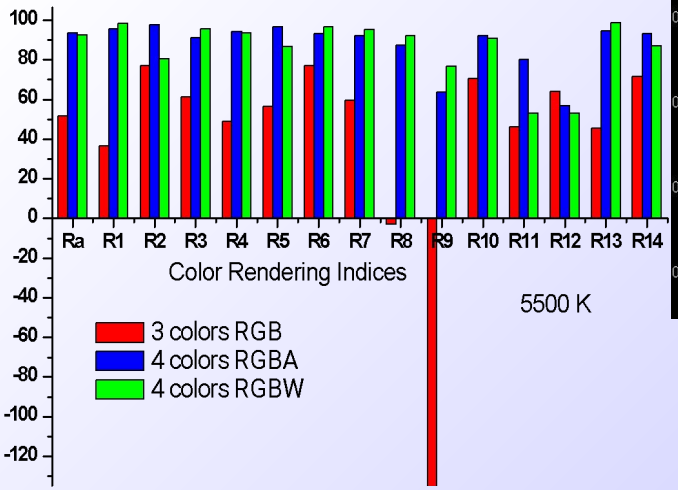
# Примеры: спектральные распределения, индексы цветопередачи, координаты цветности и цветовая температура для RGB, RGBA и RGBW светодиодов

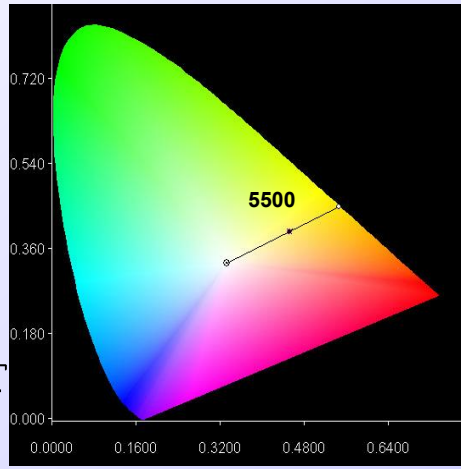


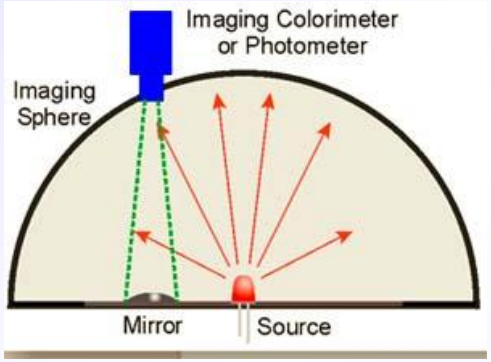
# II. Пространственное распределение силы света, координат цветности, цветовой температуры: $I(\alpha,\theta)$; $x,y(\alpha,\theta)$; $T_c(\alpha,\theta)$

либо

**Гониоспектрорадиометр**

**Недостатки метода:**

- Механическое вращение;
- Сложности при ассиметричных диаграммах светораспределения;
- Длительные времена измерений и их обработки.



**Отображающая сфера - измерительная система “IS-LI™ Luminous Intensity Measurement System”**

**Преимущества метода:**

- Полная пространственная картина I; x,y; $T_c$ в угле $2\pi$ за одно измерение ;
- Время измерения единицы – десятки секунд.

**Недостаток: цена >$80.000**

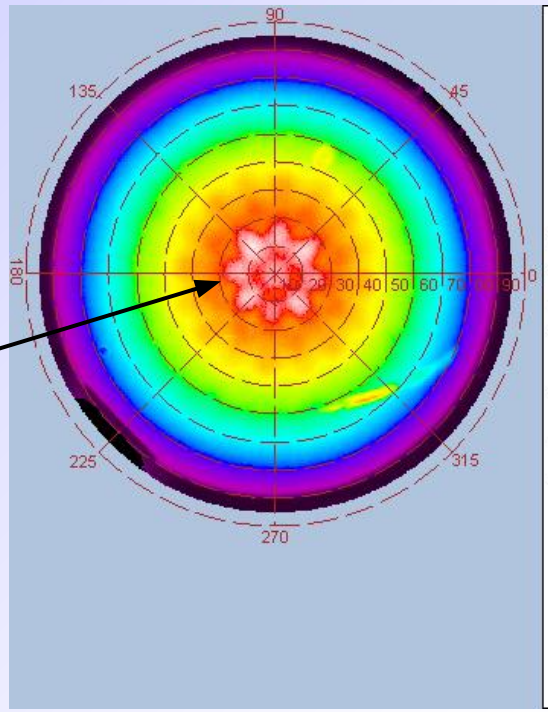
СВИДЕТЕЛЬСТВО
об аттестации МВИ № 09

Методика выполнения измерений пространственных характеристик излучения полупроводниковых светоизлучающих диодов

**Разрешение: ±0.5град**
**x= 0.17…0.75;**
**y= 0.005…0.84**
**$T_c$ = 2500…10000 K**

# Примеры

*Наглядно виден модовый состав*



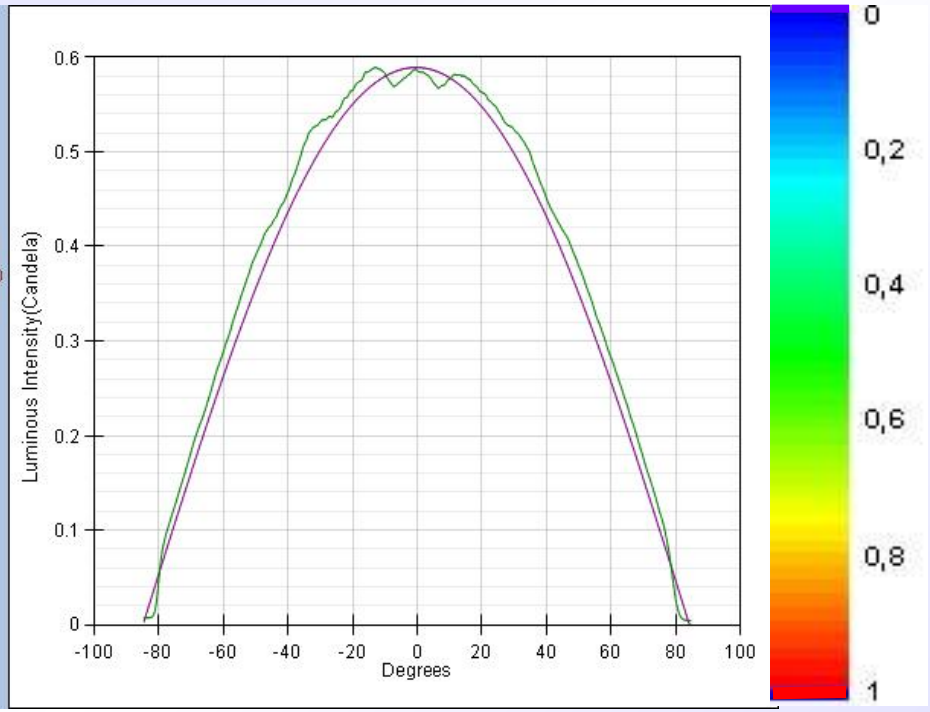
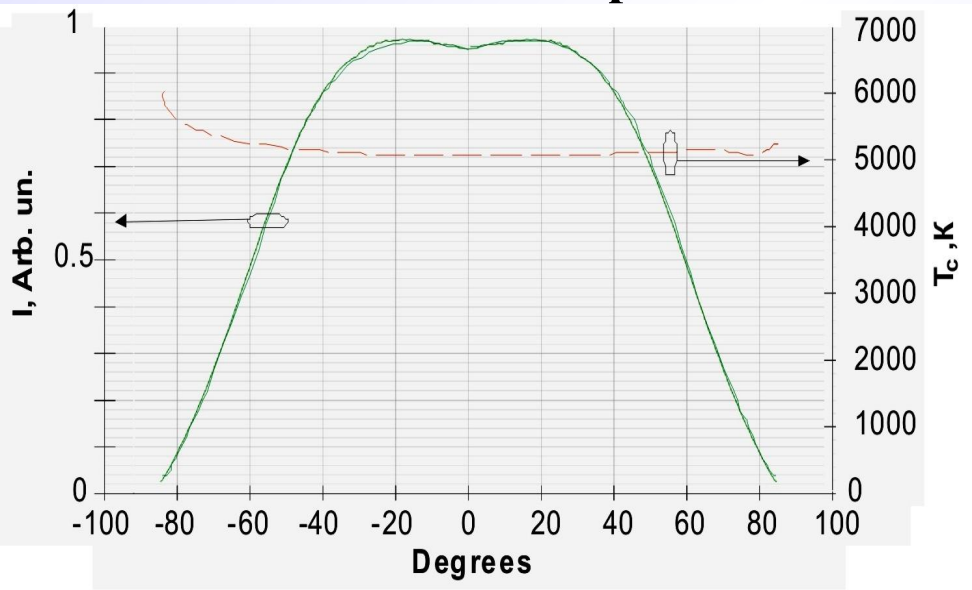




**Диаграмма светораспрелеления для светодиода на основе фотонного кристалла CBM 380(Luminus)**

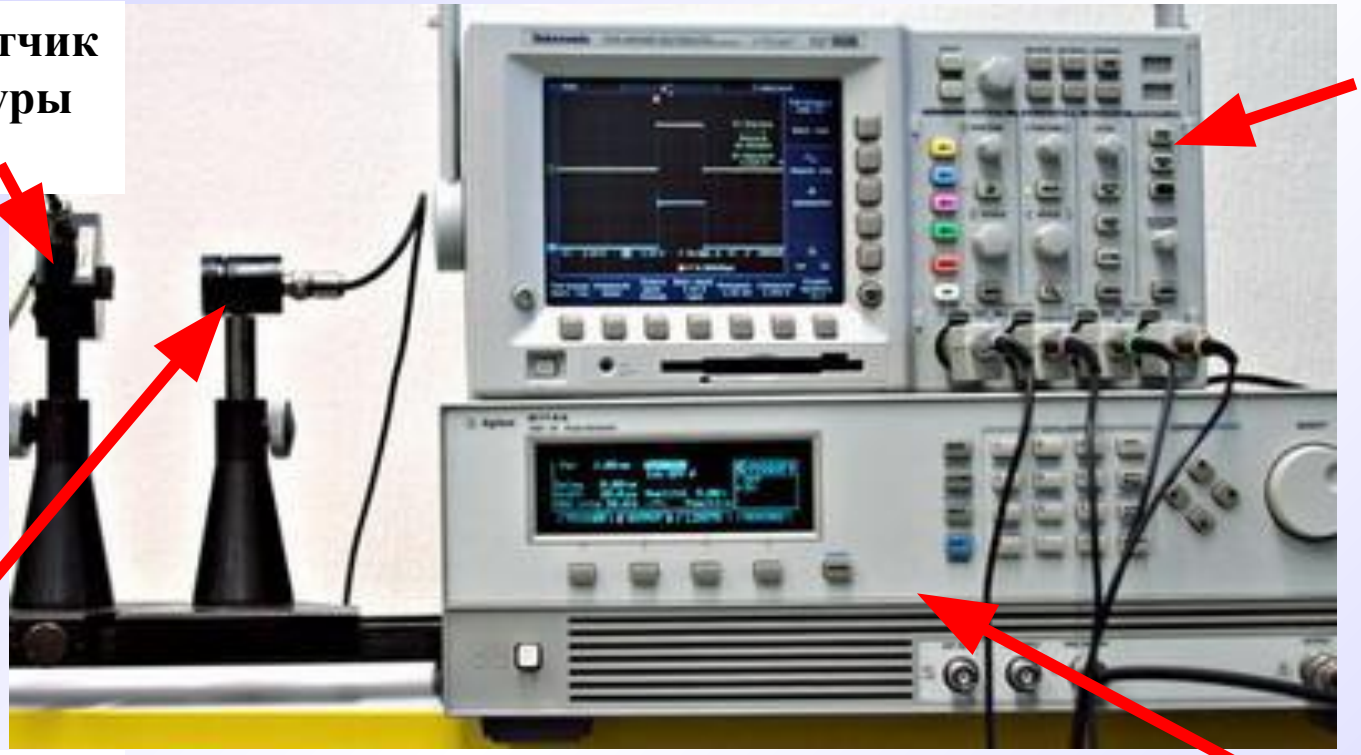



**Угловое распределение силы света и цветовой температуры для белого светодиода IRS-100 (Svetlana)**

# Импульсные измерения с заданием температуры p-n-перехода внешним нагревателем/холодильником

**III.**

СД + задатчик температуры 0-140 $^0$C



Осциллограф Tektronix TDS 3044B F=400MHz

Быстро-действующий фотоприемник

Генератор Agilent 8114A $I_{pulse}$ = 0-2A

Режим измерений $\tau$=1-5ms, Q>100 позволяет избежать саморазогрева и имитировать любой токовый режим при заданной температуре p-n-перехода
Например, 55±2$^0$C; 85±2$^0$C (Стандарт LM-80)

# Организация метрологического сервиса

*(помимо фирм производителей)*

**США:**

**1. NIST's Optical Technology Division *(высшая инстанция)***

**2. Orb Optronix LED Measurement Lab: Electro-Thermal-Optical LED Characterization Services *(все виды измерений, аккредитована Environmental Protection Agency -EPA как независимый эксперт)***

**3. CALiPER - The DOE Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting – *сеть аккредитованных лабораторий***

- **Integrating Sphere Testing**:

**1) Independent Testing Laboratories Inc. – Boulder**
**2) Intertec - Cortland, NY**
**3) Luminaire Testing Laboratory Inc.**
**4) Aurora International Testing Laboratory**
**etc.**

**Goniophotometry Testing**

1) **Independent Testing Laboratories Inc. – Boulder**
2) **Intertec - Cortland, NY**
3) **Luminaire Testing Laboratory Inc.**
4) **Lighting Sciences Inc.**

**РОССИЯ:**

1. **ФГУП «ВНИИОФИ»**
2. **ФЦП «Развитие информационно-аналитической составляющей наноиндустрии»**

# Выводы

**Светодиодная наноиндустрия развивается в России высокими темпами,**

**НО**

- **Отсутствуют стандарты на методы измерения функциональных характеристик СД изделий, оценке надежности, срока службы и других потребительских качеств;**
- **Отсутствует отечественная измерительная аппаратура, специализированная под СД и источники света на основе СД;**
- **Отсутствует сеть сертификационных центров по проверке и подтверждению параметров СД, модулей СД и систем твердотельного освещения.**

# Предложения в дорожную карту

**Ввести в раздел «Технологическое развитие» цветных и белых светодиодов:**

**Создание сети сертифицированных независимых испытательных центров (под эгидой РОСНАНО, РОСТЕХРЕГУЛИРОВАНИЯ), специализирующихся на измерении всех (или отдельных параметров) СД и СД-продукции. Центры должны быть доступны для потребителей и производителей, публиковать периодические отчеты, обмениваться информацией и калибровочными образцами.**

Thank you for your attention!