

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***

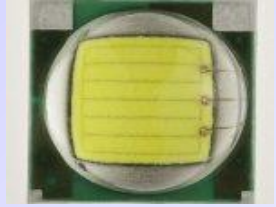
В докладе

- 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:

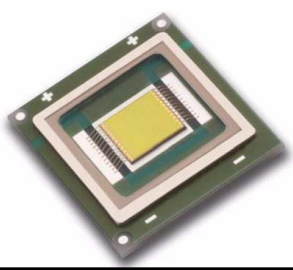
1. Рабочие токи (плотности токов) до 150 A/cm^2 □
2. Рабочие температуры $85\text{-}150^\circ\text{C}$ □
3. Площади единичных кристаллов до $> 10\text{mm}^2$ □



Cree:

XP-E, XP-G: $S_{ch} \sim 1\text{mm}^2$, $I_{max} = 1\text{-}1.5 \text{ A}$, $P_{diss} \sim 5\text{W}$, $R_{th} \sim 6\text{K/W}$, $\Phi \sim 400\text{lm}$
XM-L: $S_{ch} \sim 4\text{mm}^2$, $I_{max} = 3\text{A}$, $P_{diss} \sim 10\text{W}$, $R_{th} \sim 2.5\text{K/W}$, $\Phi \sim 900\text{lm}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$

└──────────────────┘
60W



Luminus:

SBT-90-W: $S_{ch} \sim 9\text{mm}^2$, $I_{max} = 10\text{A}$, $P_{diss} \sim 50\text{W}$, $R_{th} \sim 0.7\text{K/W}$, $\Phi \sim 2000\text{lm}$,
 $T_j = 25^\circ\text{C}$

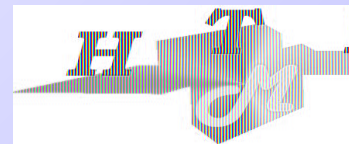
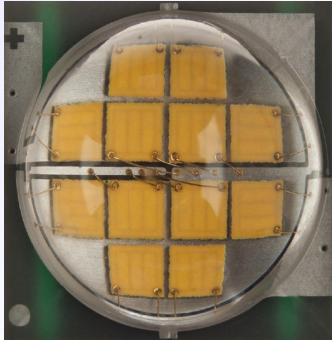


LedEngin :

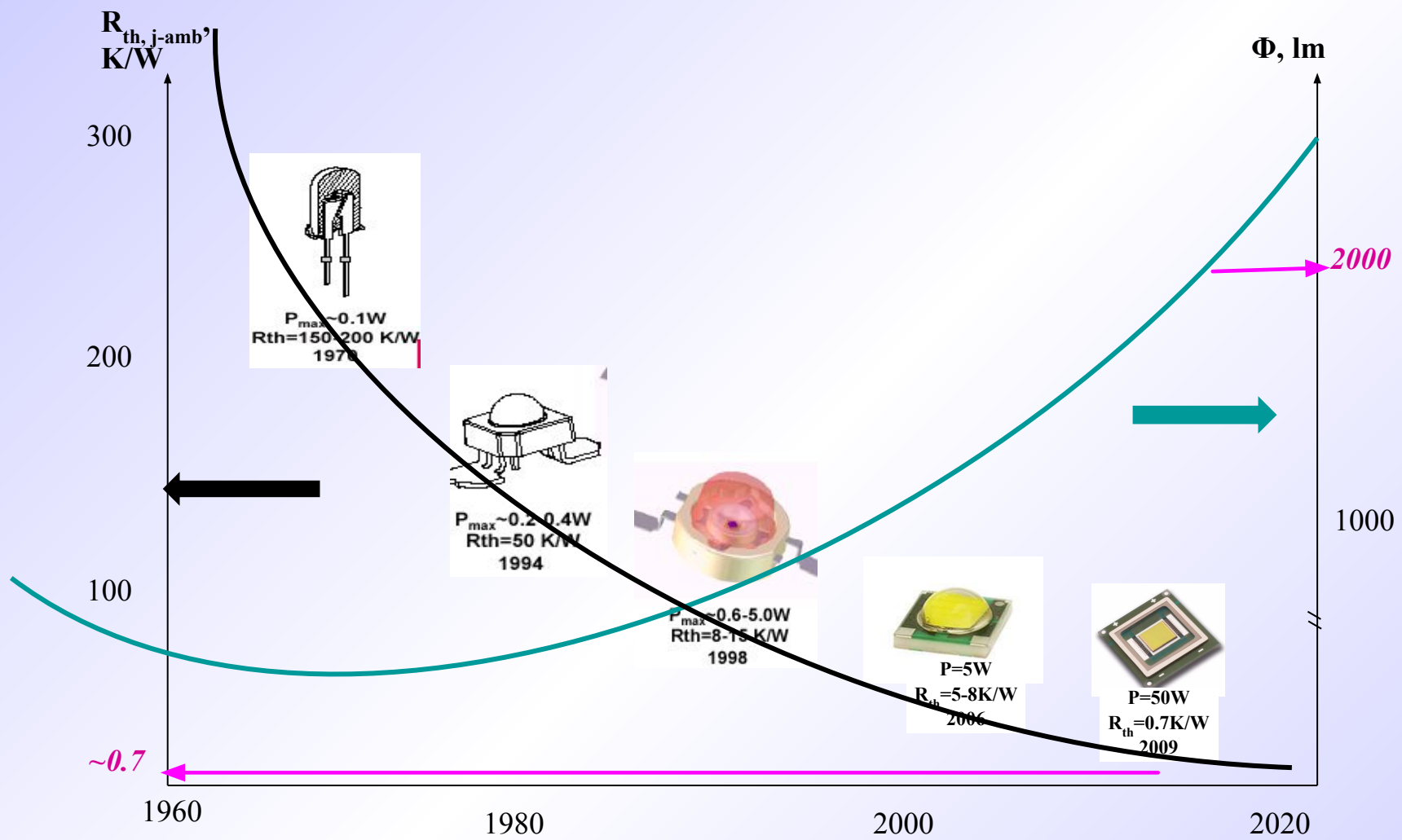
LZP-00CW00: $S_{ch} \sim 12*12\text{mm}^2$, $I_{max} = 4\text{A}$, $P_{diss} \sim 90\text{W}$, $R_{th} \sim 0.35\text{K/W}$,
 $\Phi \sim 5600\text{lm}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$

Cree:

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



Эволюция СД: тепловое сопротивление - световой поток

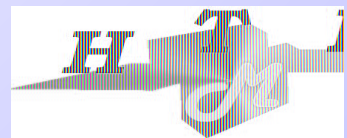


Разогрев активной области:

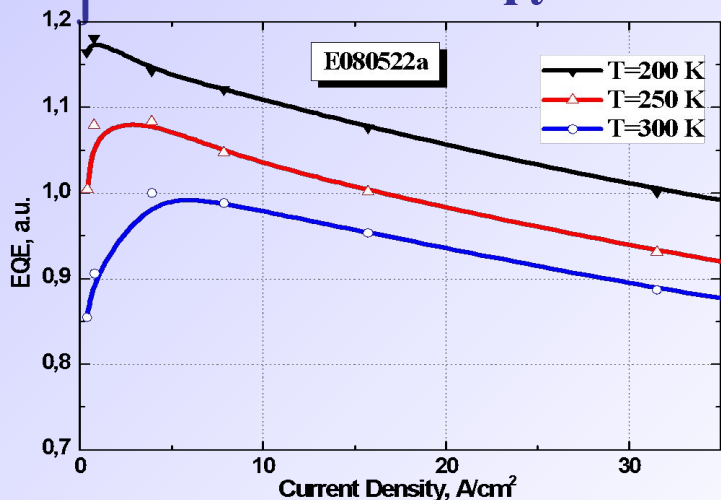
ограничивает предельные энергетические параметры и ресурс;

вносит неопределенность в характеристики:

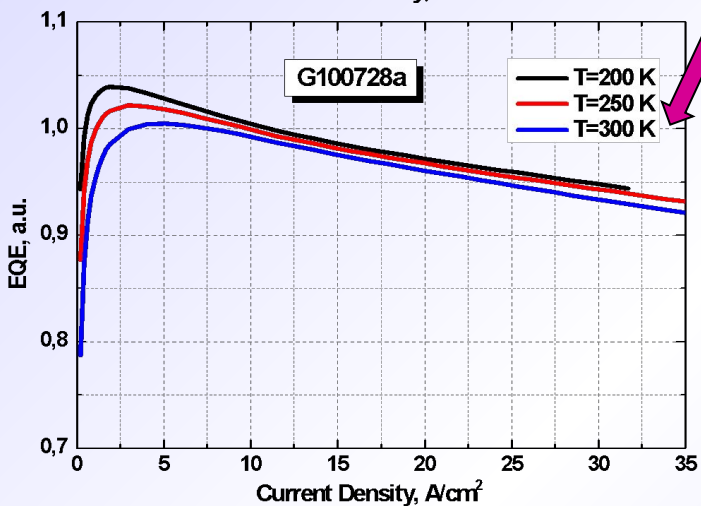
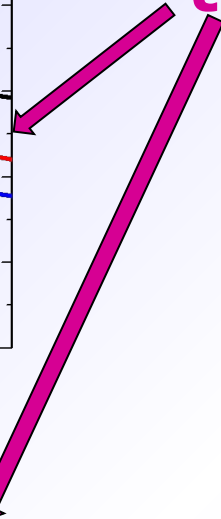
$$P_{out}, EQE, WPE, \lambda_{peak}, \lambda_{dom}, \Delta\lambda_{0.5}, x, y, T_{col}, etc. = f(T)$$



T_j влияет на функциональные характеристики и ресурс*

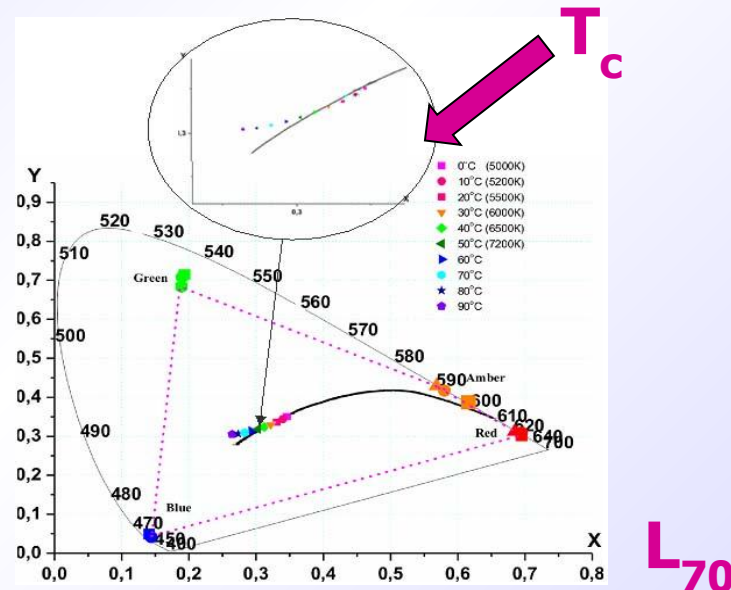


EQE



EQE, a.u.

Current Density, A/cm²

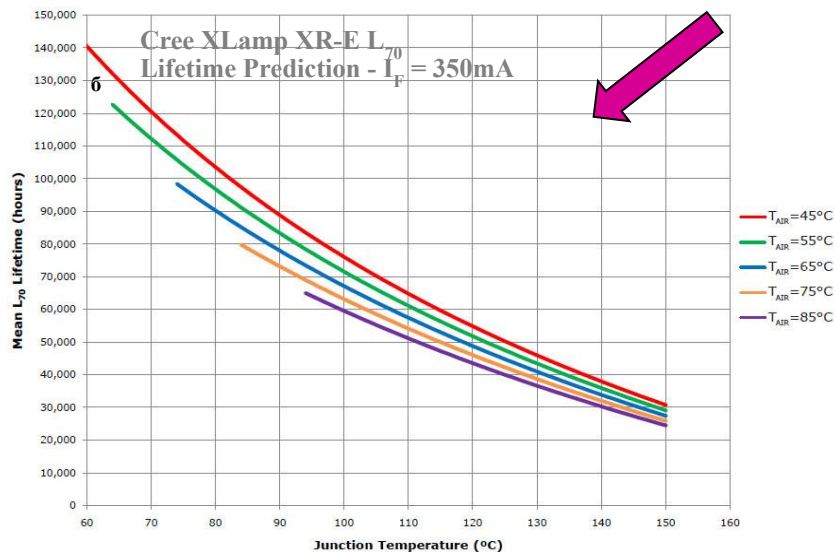


T_c

L_{70}

Надо знать:

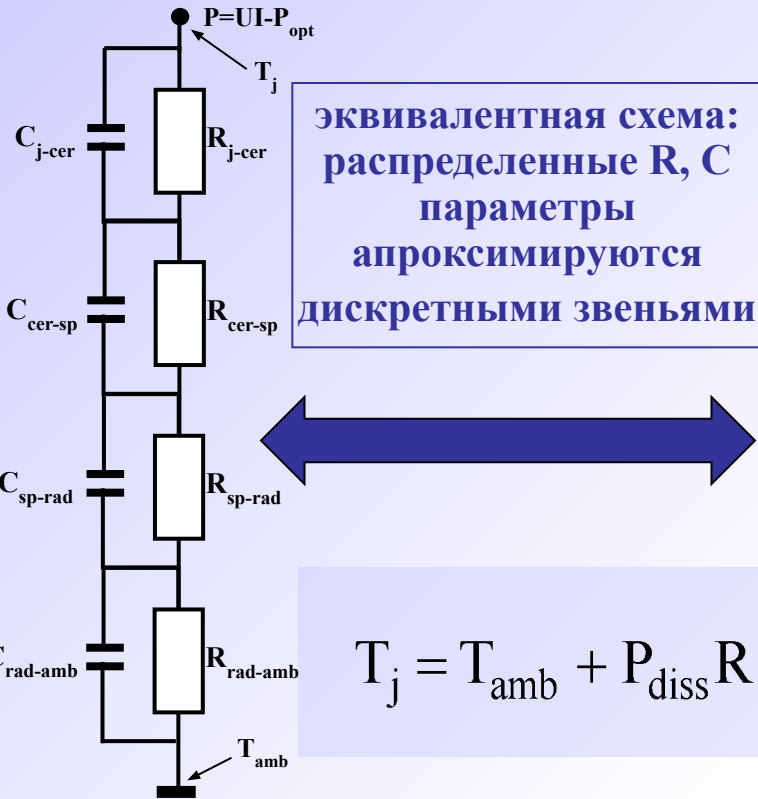
T_j при приемо-сдаточных испытаниях;
 T_j в реальном режиме эксплуатации;
 Температурные зависимости $EQE=f(T)$



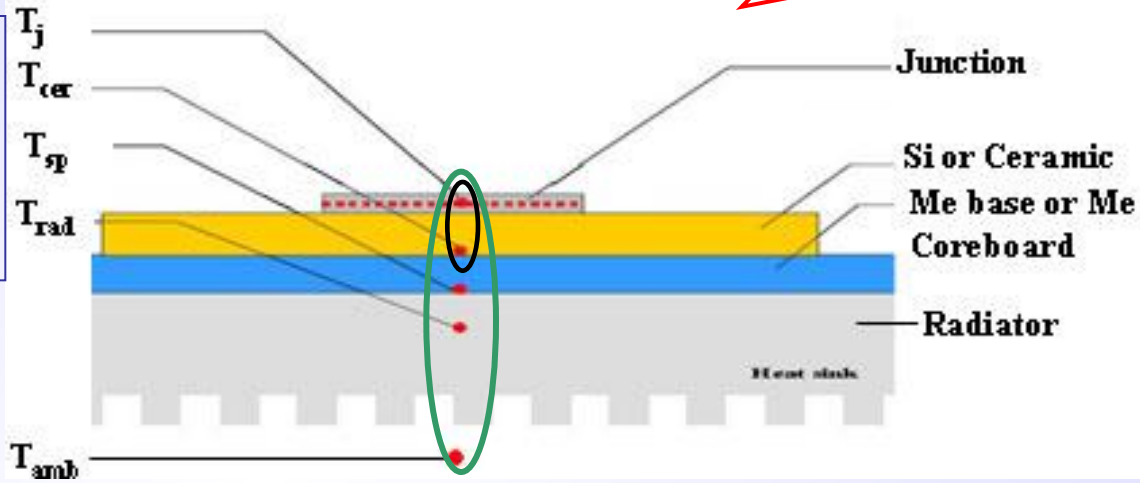
*Для InGaN/GaN гетероструктур температурные зависимости «индивидуальны»: конкретный изготовитель, дизайн наноструктуры и т.д.

Тепловая модель

$R_{th, j-sp}$ *есть в спецификациях*



эквивалентная схема: распределенные R, C параметры аппроксимируются дискретными звеньями

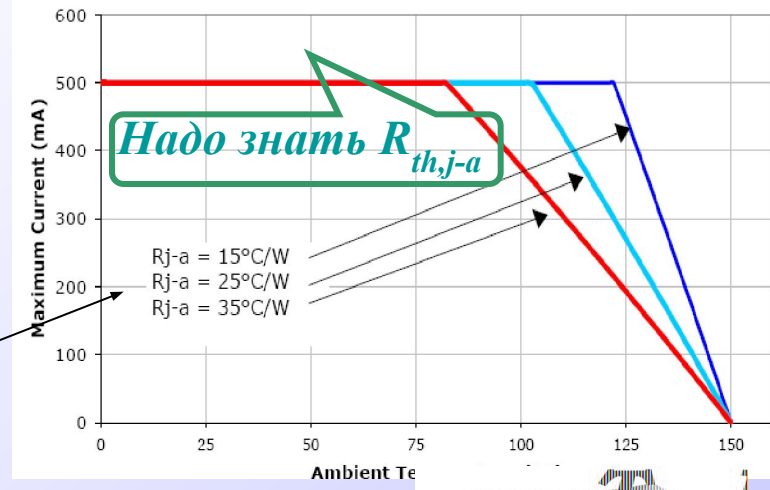


$$T_j = T_{amb} + P_{diss} R_{th, j-amb} = (UI - P_{opt}) R_{th, j-amb} = (UI - P_{opt}) \sum_{i=1}^{i=n} R_{th, i}$$

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

А надо знать:

- При применении как минимум $R_{th, j-amb}$
- При разработке все звенья цепи $R_{th, i}$

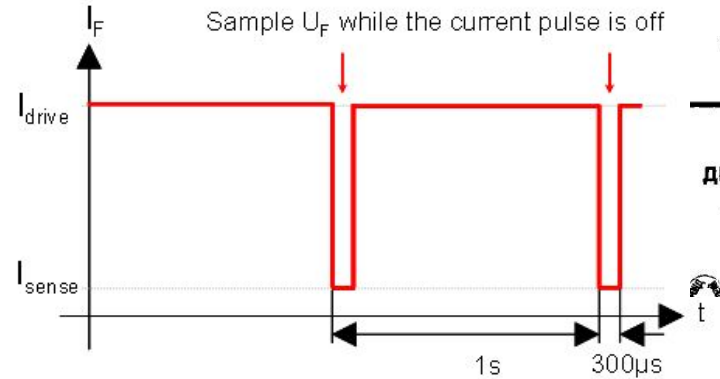
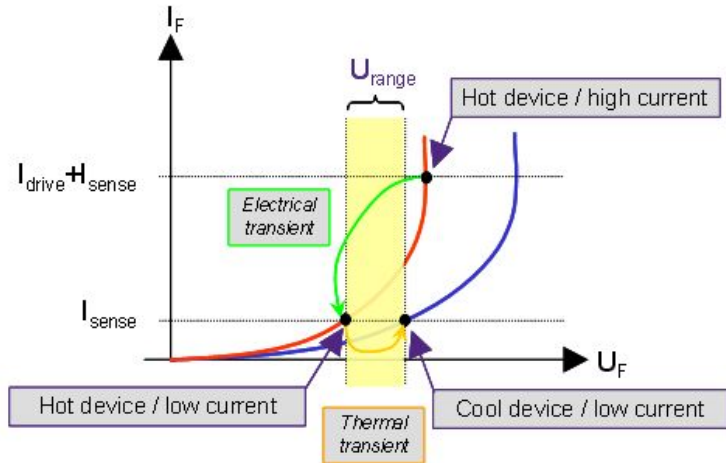


Как измерить $R_{th, j-amb}$ -? T_j - ?



Тепловые измерения: методы и аппаратура

I. По температуро-зависимым электрическим параметрам: U_f

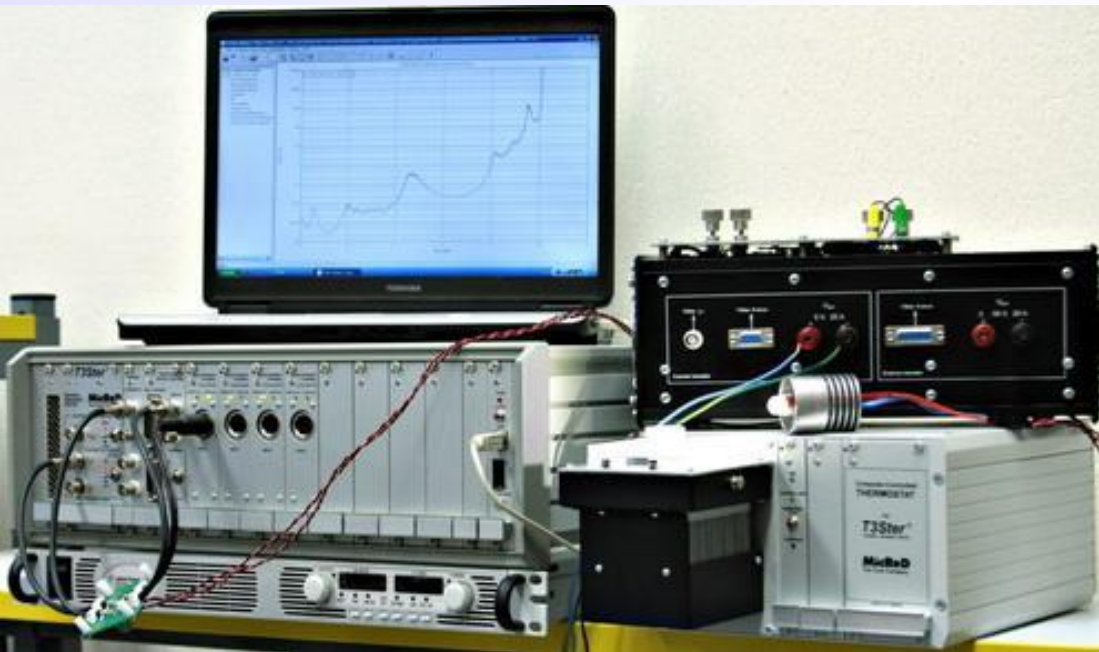


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
СОЮЗА ССР

ДИОДЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЧ

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПЕРЕХОД—КОРПУС И ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ

ГОСТ 19656.15-84



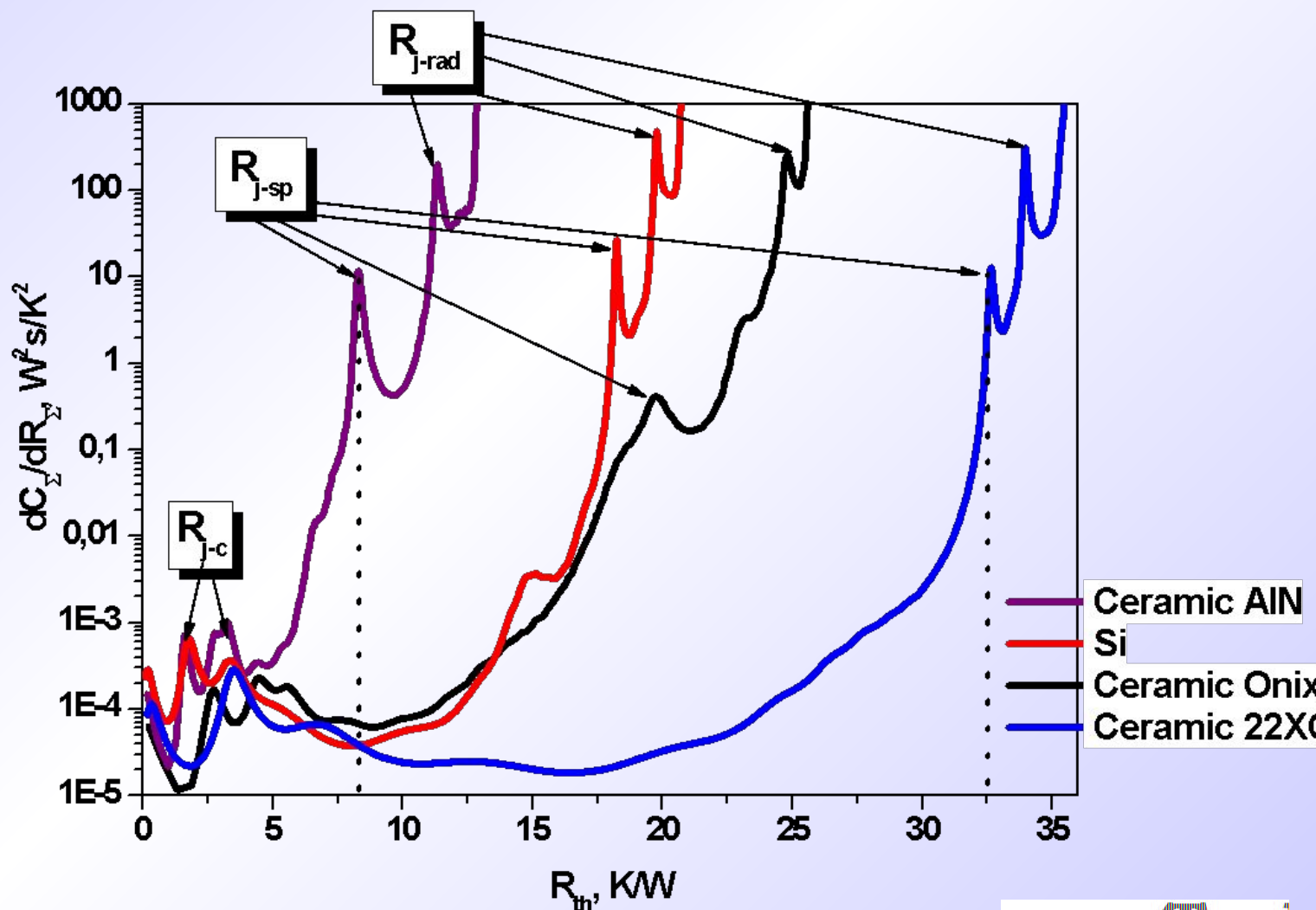
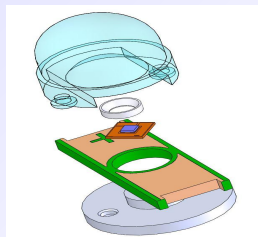
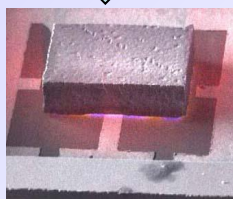
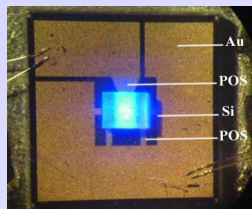
Практическая реализация: прибор Thermal tester T3Ster (MicRed Ltd.) с «бустером» для питания светодиодных модулей (200V/5A) и термостатом 10-95 °C. Мощное ПО позволяет детально анализировать тепловую цепь

(всем хорош, кроме цены >\$120.000)



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

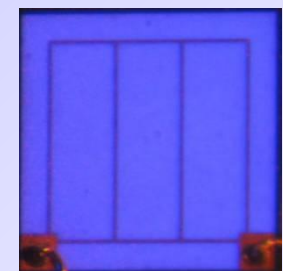
$R_{th, j-sp}$ изменяется в пределах 7-32 К/Вт



Пример II. Одна площадь чипа $\sim 1\text{mm}^2$, но разные конструкции:

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

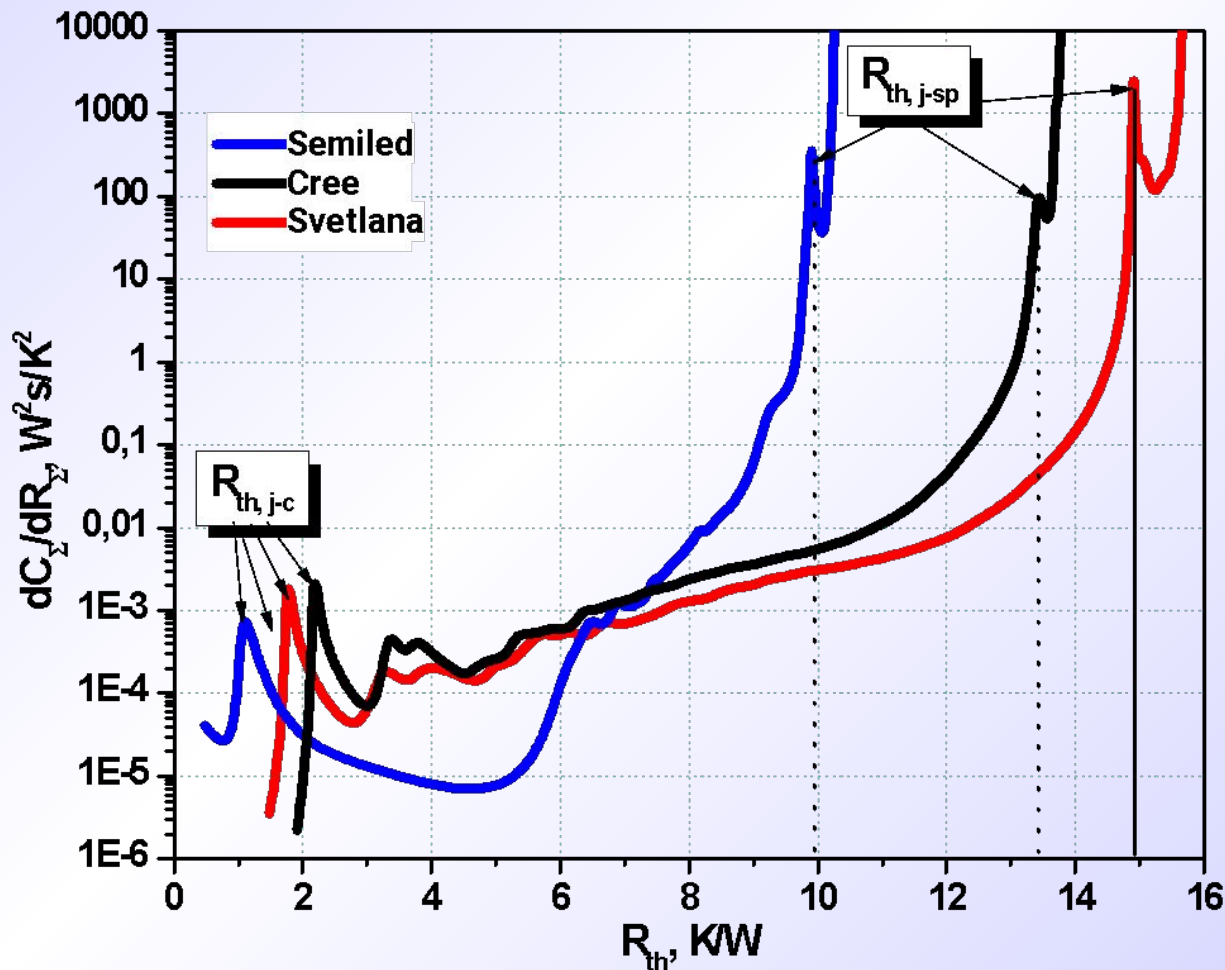
$R_{th, j-sp}$ изменяется в пределах 9-14K/W



Cree, Semiled



Svetlana



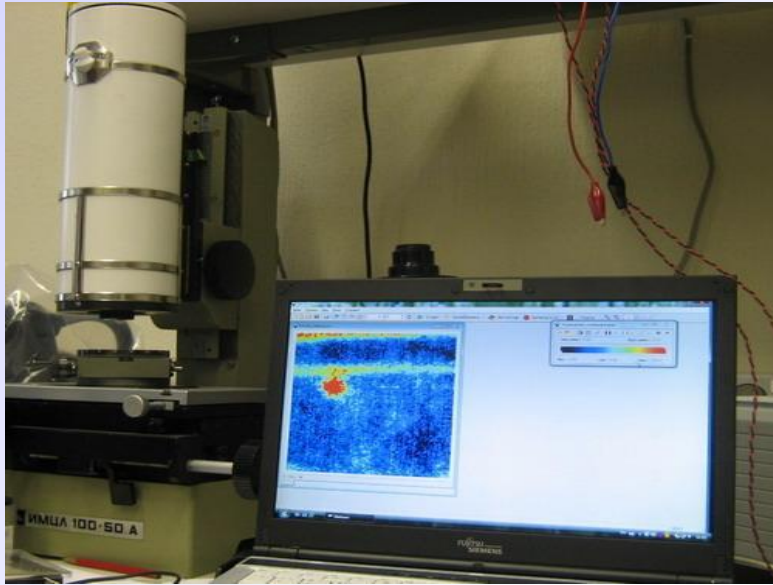
Недостатки:

- не позволяет непосредственно оценивать T_{j-i}
- нет разрешения по площади (температурного «мэппинга»)



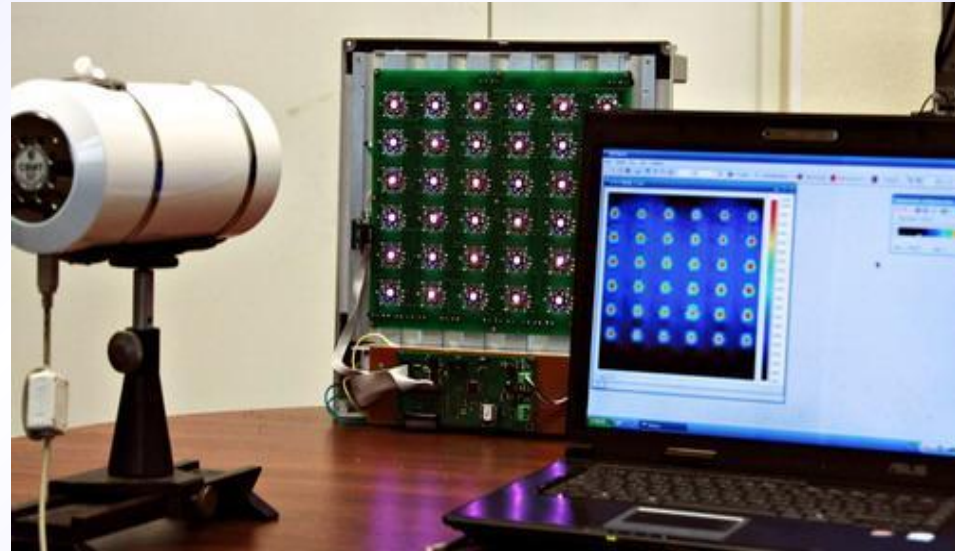
II. ИК-тепловизионный метод - непосредственное измерение T_j по интенсивности собственного теплового излучения.

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



ИК-МИКРОСКОП

Поле зрения: **400x400 ↔ 3000 x 3000 мкм**
Пространственное разрешение: **3-4 мкм**



ИК-ТЕПЛОВИЗОР

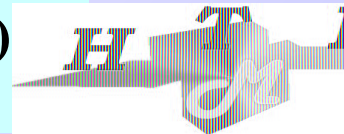
Поле зрения : до **10x10 см**
Пространственное разрешение: **0.8-1 мм**

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

Температурное разрешение по АЧТ:

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

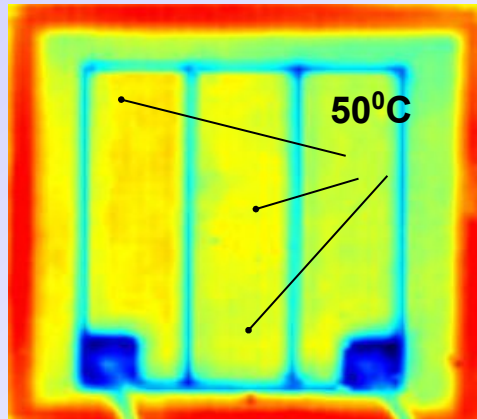
Реальное разрешение **~1-2°C**



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

Можно увидеть локальный перегрев, выявляющий:

I. Скрытые дефекты конструкции

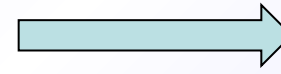


Semiled
SL-V-B40AC; Ток
 $I=1A$

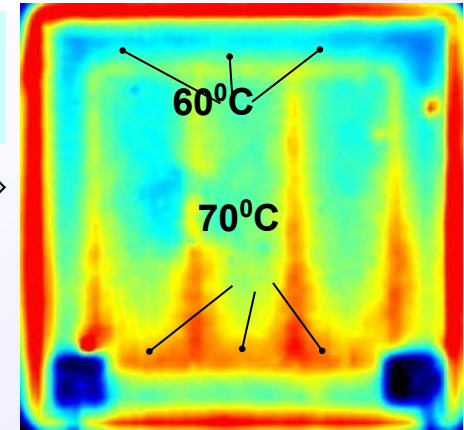
$I=1A$

Однородное
растекание
тока и разогрев

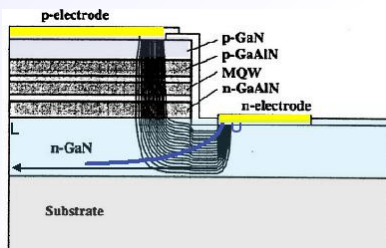
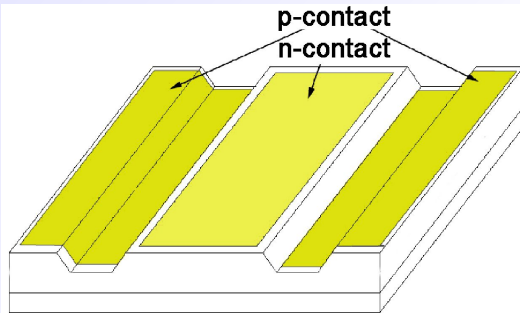
Cree EZ1000;
Ток $I=1A$



Дефект контактной
группы, локальный
перегрев



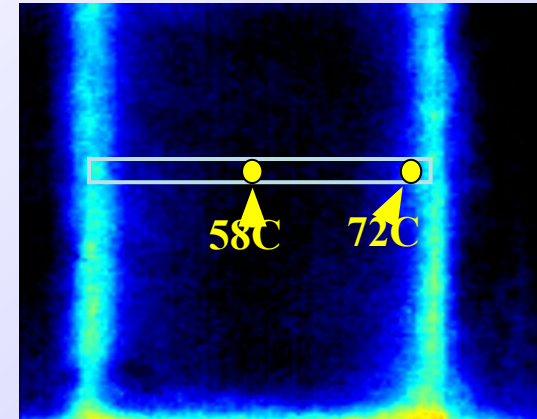
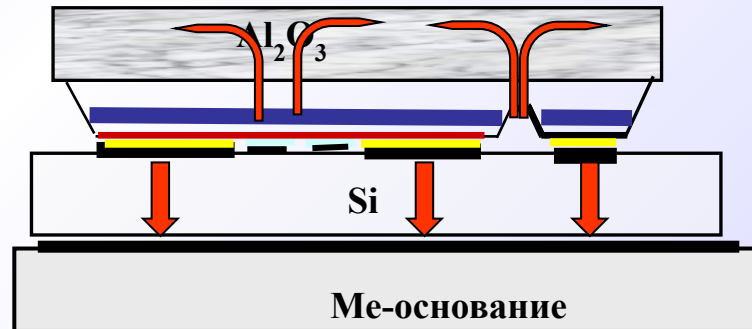
2. Скрытые дефекты монтажа (особенно для флип-чип конфигурации)



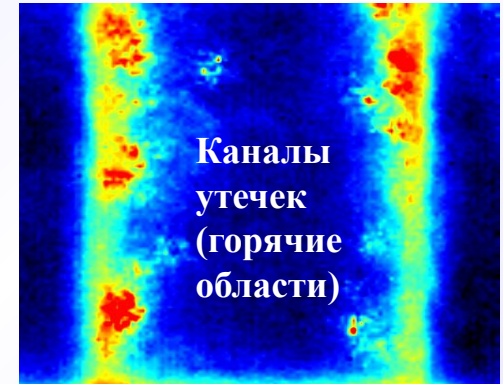
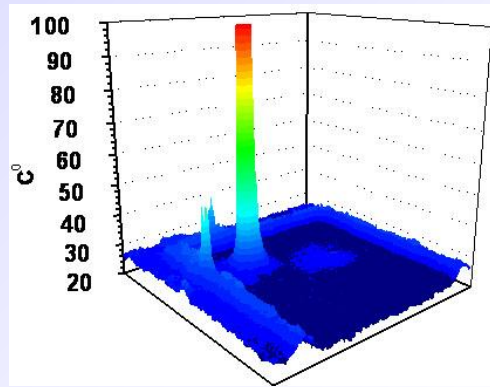
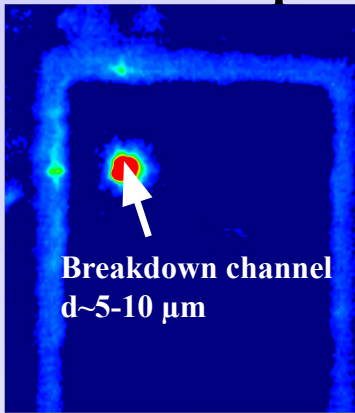
“Висячие”
мостики



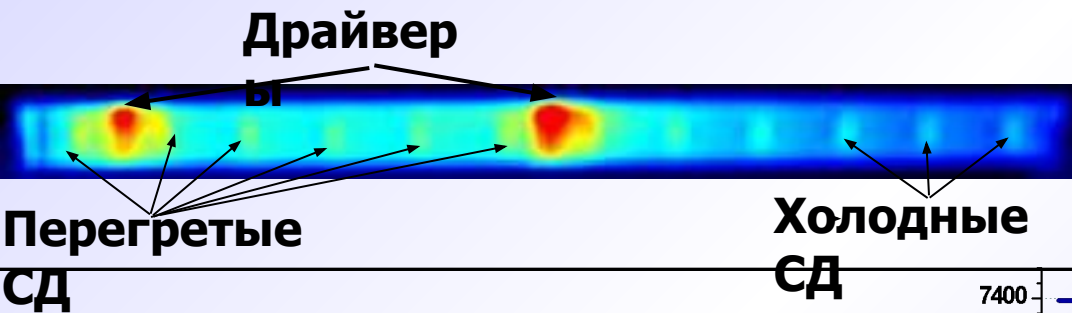
Локальный
перегрев



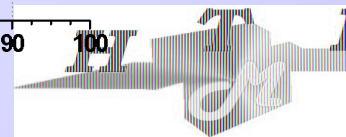
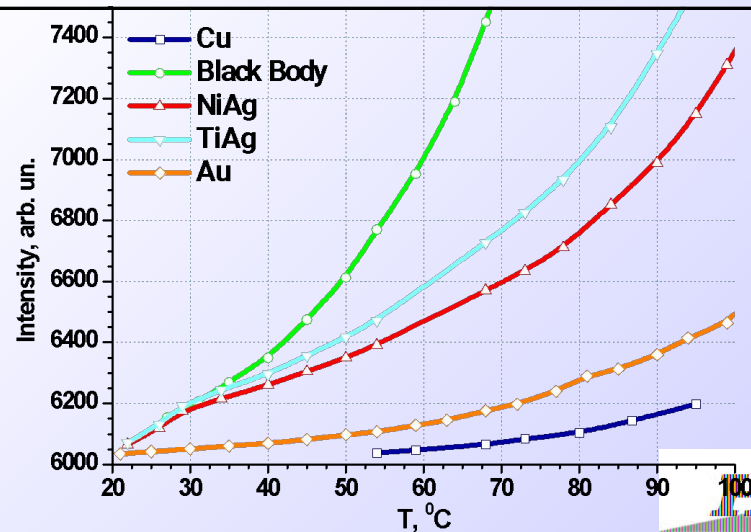
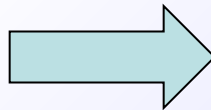
3. Развитие процессов деградации, каналы токовых утечек



4. Неправильное размещение элементов СД модуля



Основная сложность метода:
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 – 10Мрхs

Разрешение 2-3мкм

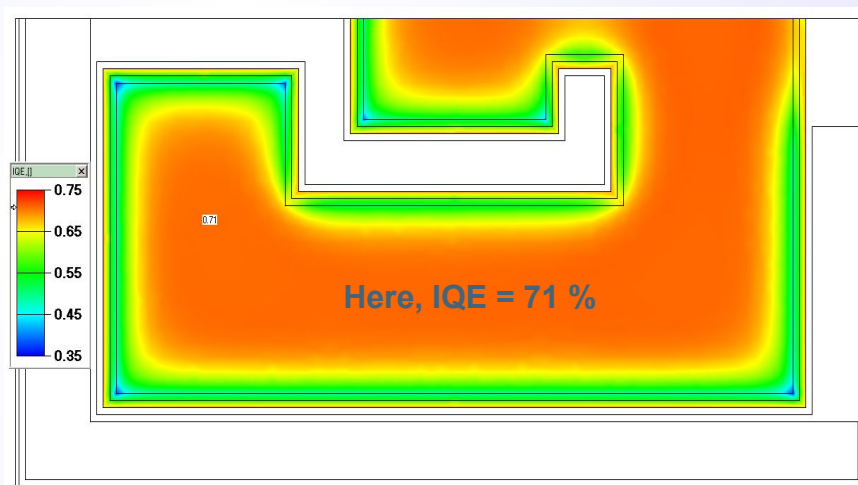
$$I_e \sim J \cdot IQE(j);$$

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

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



Локализация тока снижает квантовый выход примерно на 10%



$$IQE @ \langle j \rangle = 62 \%$$

$$\langle IQE \rangle = 52 \%$$

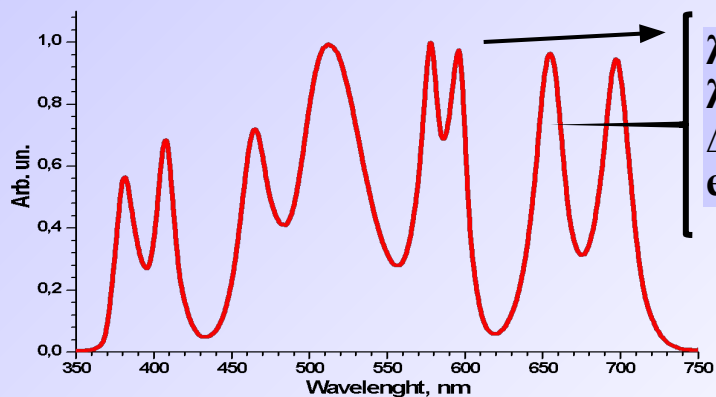
$$I = 1000 \text{ mA}$$

$$\langle j \rangle = I / S = 100 \text{ A/cm}^2$$

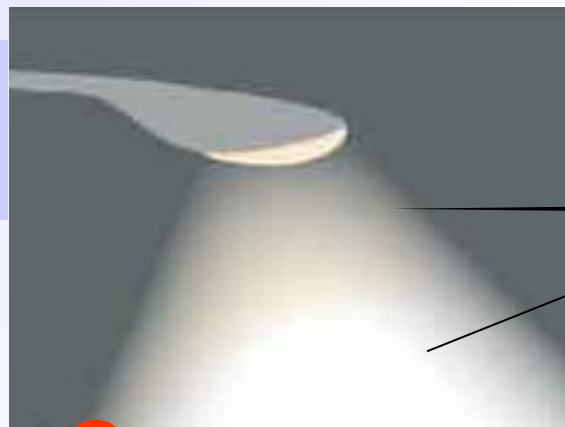
$$j_{\text{max}} = 2240 \text{ A/cm}^2$$



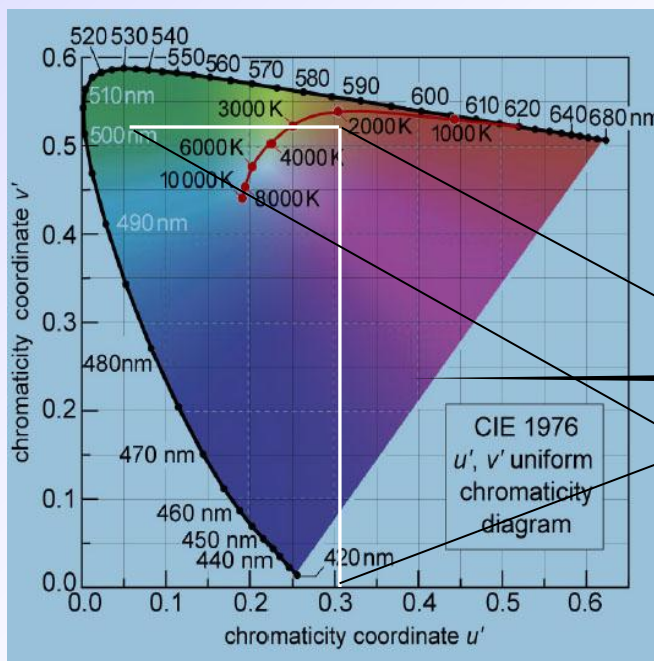
Спектрорадиометрия, фотометрия, колориметрия



1 **Спектральное распределение**

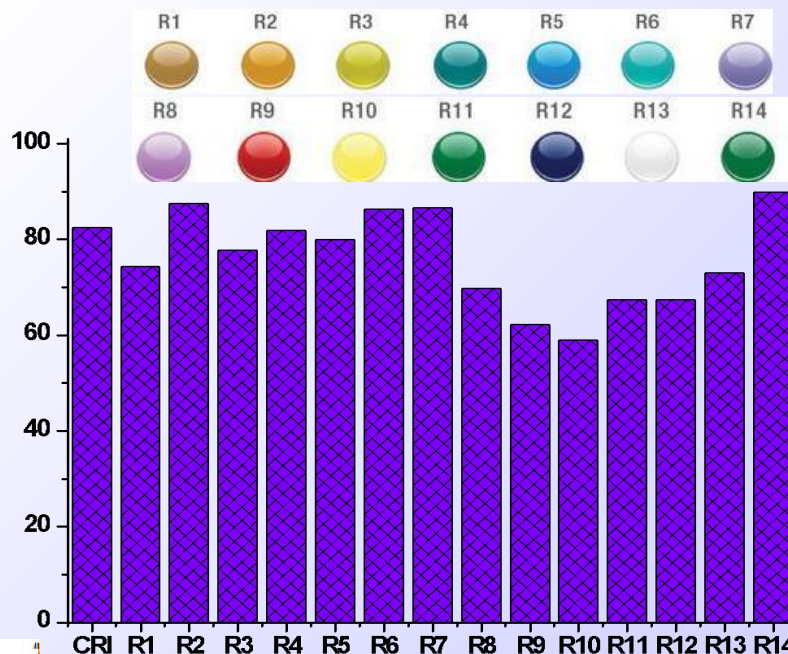


2 **Радио- и Фотометрия**

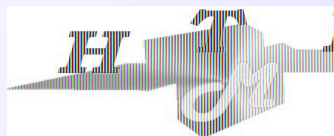


CCT
Chromatic coordinates:
 $x, y; u, v; u', v'$
 λ_{dom}

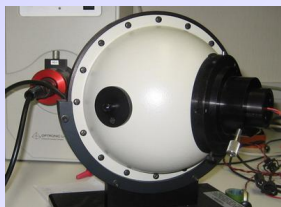
3 **Колориметрия**



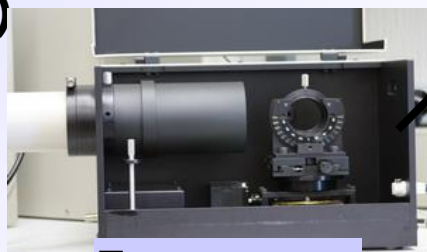
4 **Общий R_a и частные R_{1-14} индексы цветопередачи (для белого света)**



Базовый подход к построению универсального измерительного комплекса



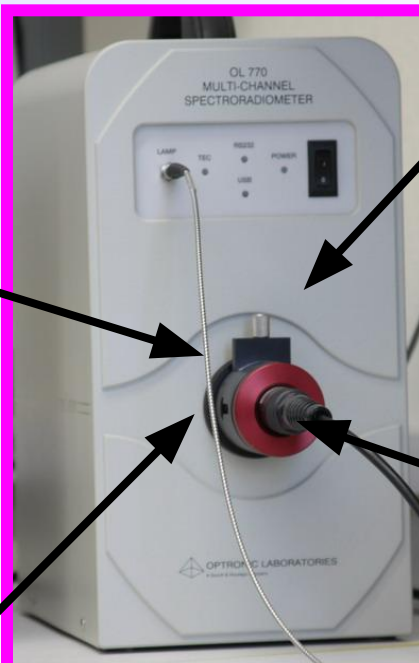
Набор сфер (интегрирующих)



Гониомет



Калибровочные и вспомогательные лампы



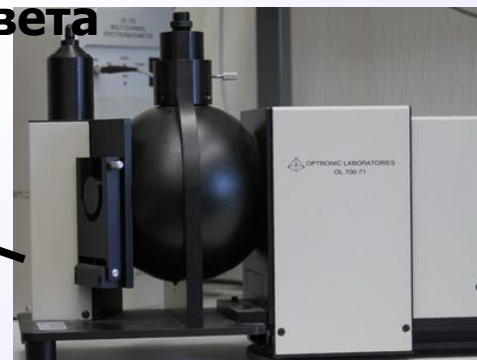
Блок UV/VIS/NIR спектро-радиометра с волоконным вводом, ПО, др.



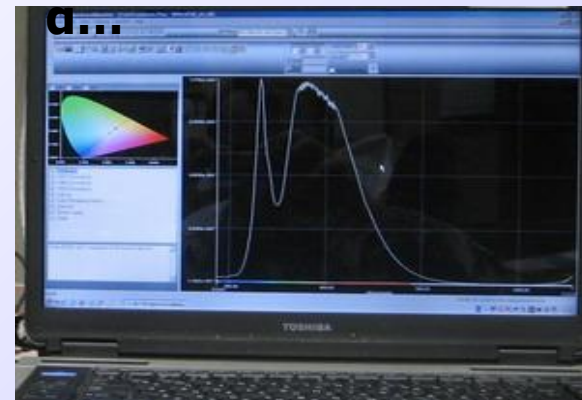
Электронные блоки



Блок осевой силы света



Специальные опт. блоки – изм. R, T, α...



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»

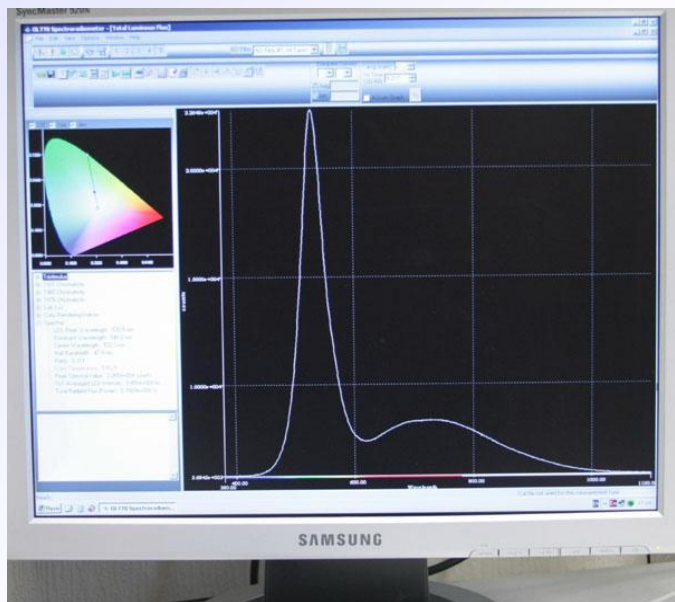
Измерительный комплекс НТЦ микроэлектроники РАН

I.



“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

Динамический диапазон:

$P = 0.001 \dots 10 \text{ Вт}$

$F = 0.005 \dots 3000 \text{ лм}$

$I_e = 0.001 - 20 \text{ Вт/ср}$

$I_v = 1 \dots 10000 \text{ кд}$

.....

$x, y; u, v: u'v'$;

CCT [K];

λ_{peak} [нм];

λ_{dom} [нм];

Purity;

R_a, R_{1-14} ;

P [Вт];

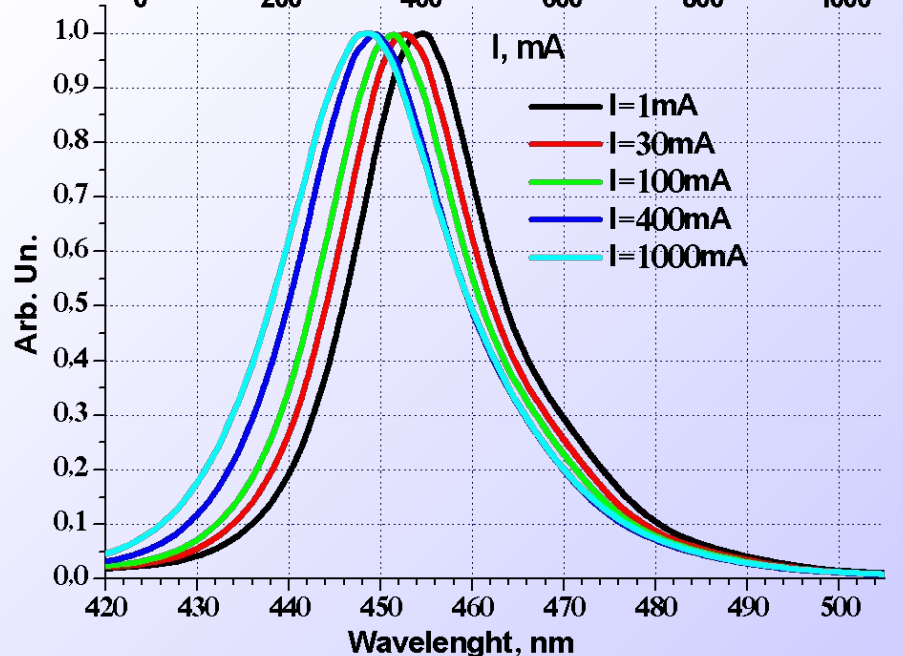
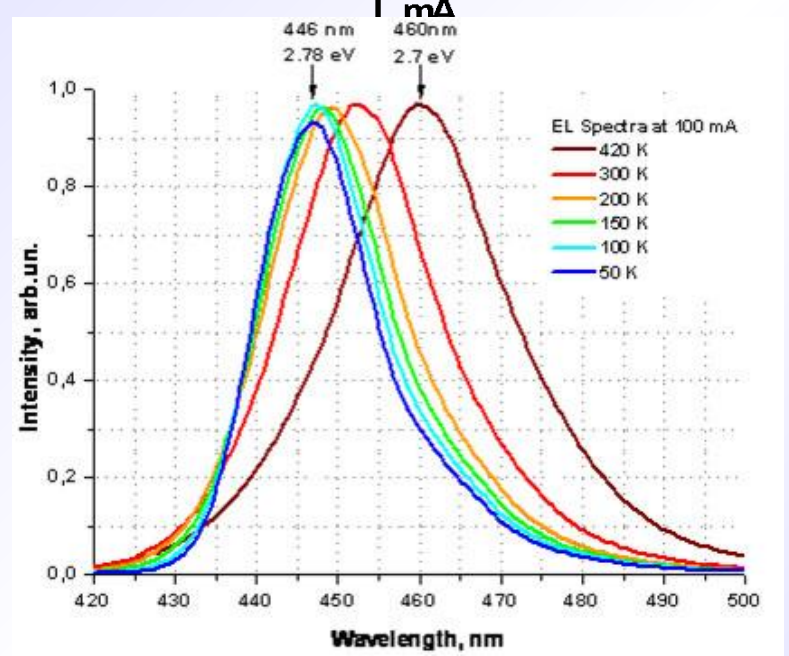
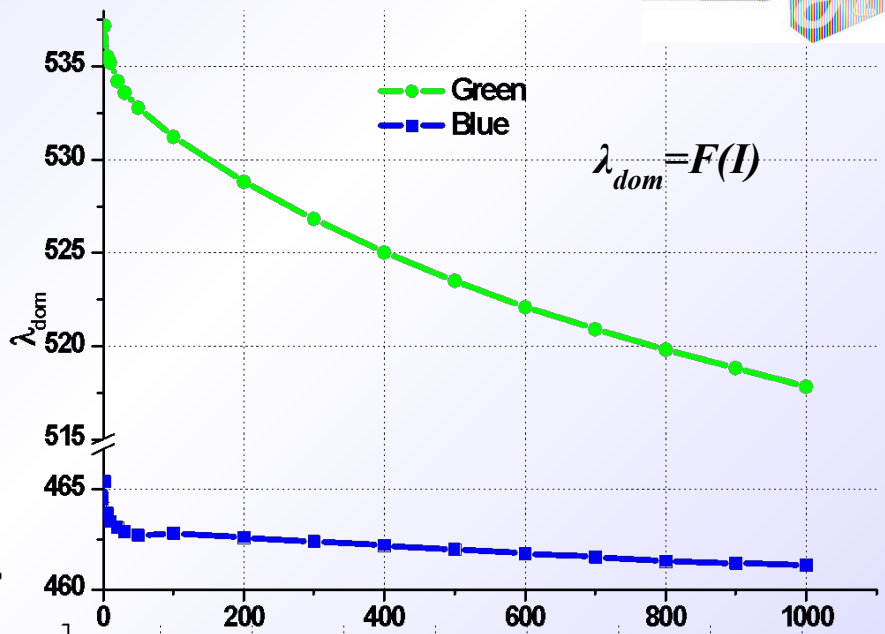
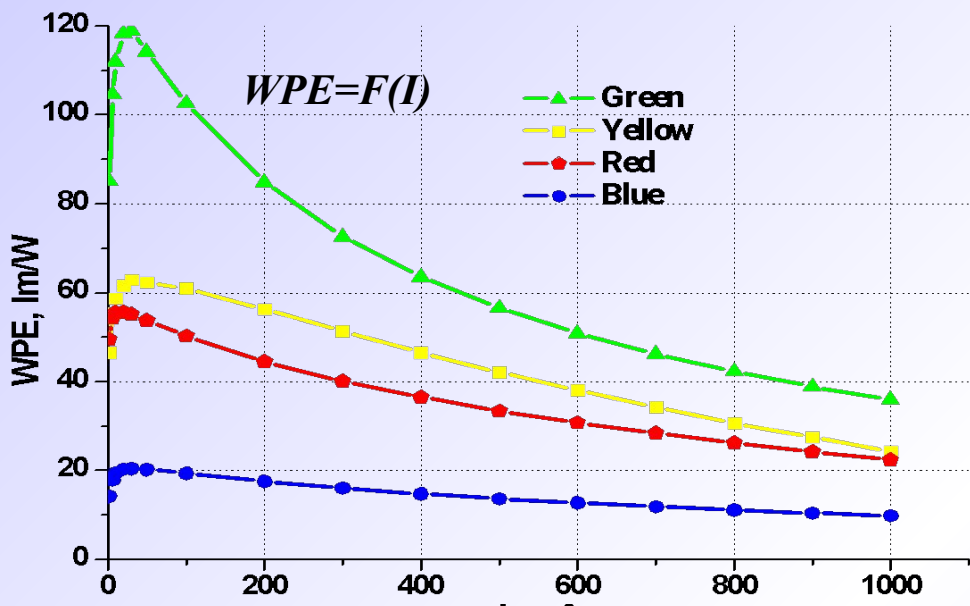
F [лм];

I [кд];

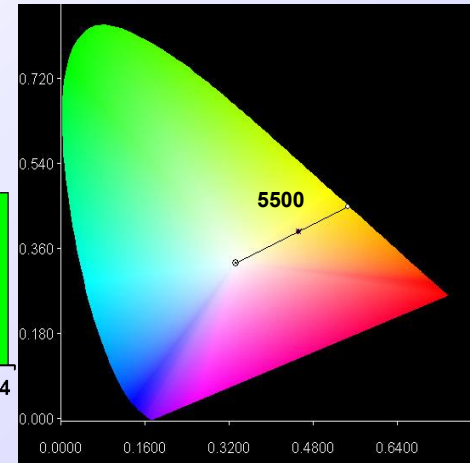
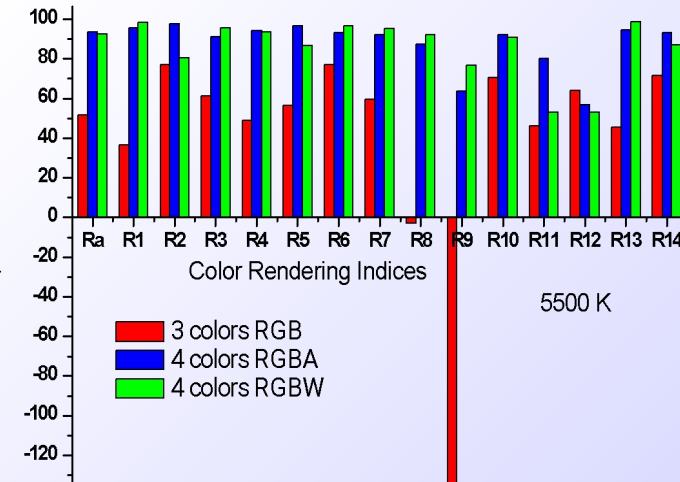
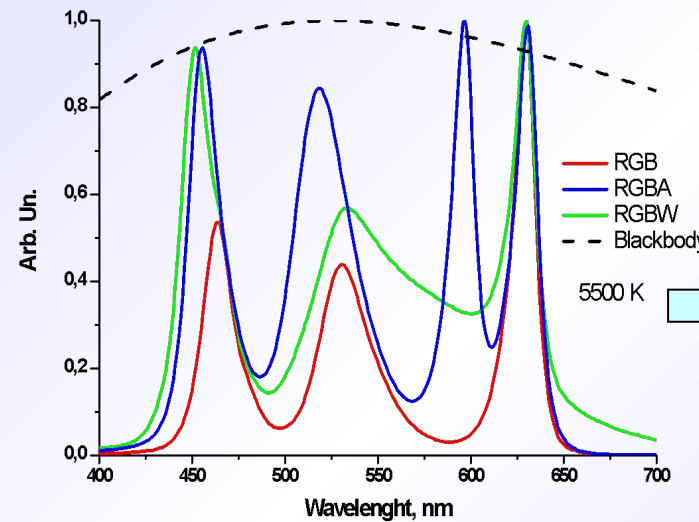
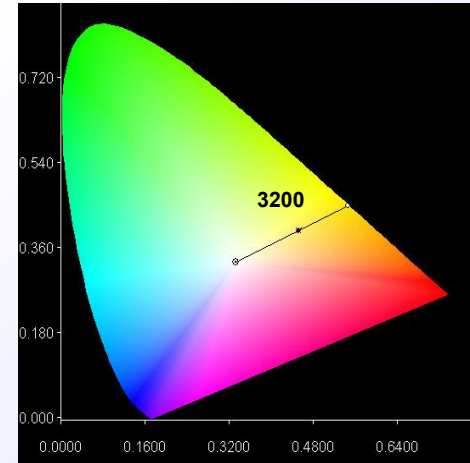
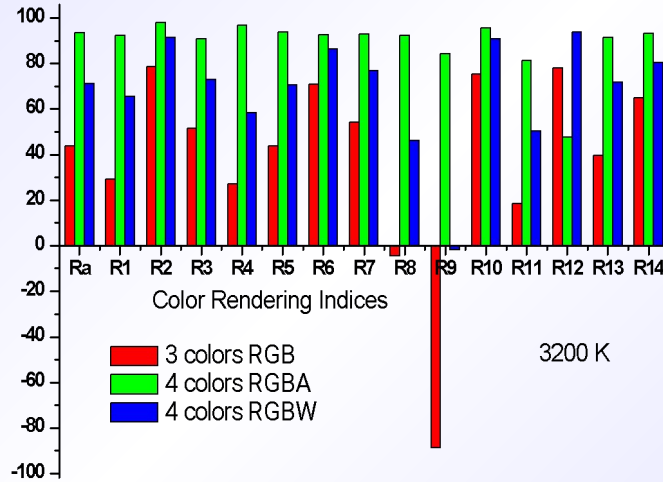
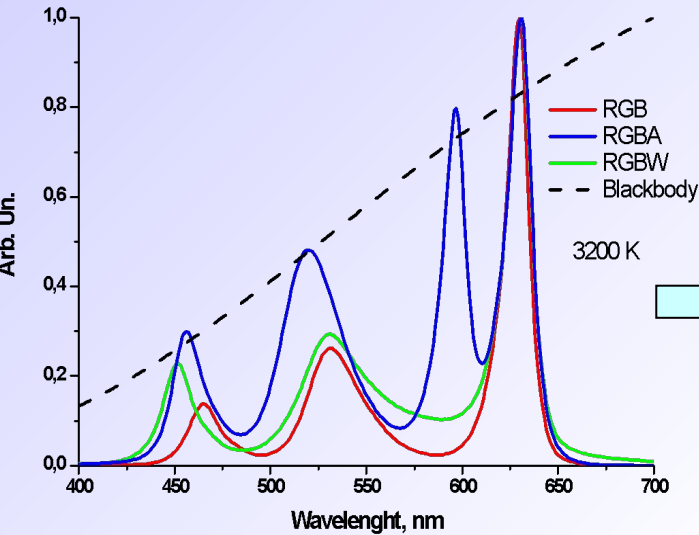
WPE [лм/Вт]



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

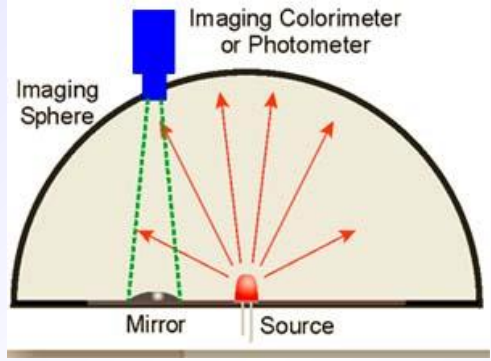
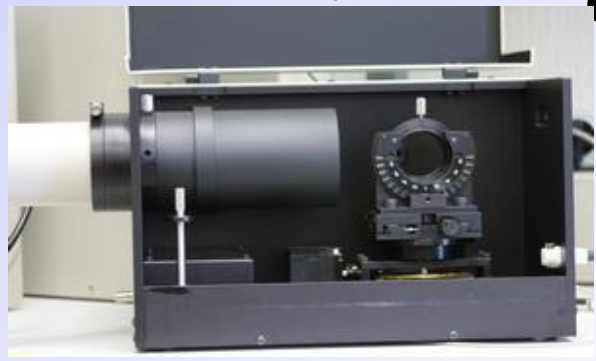
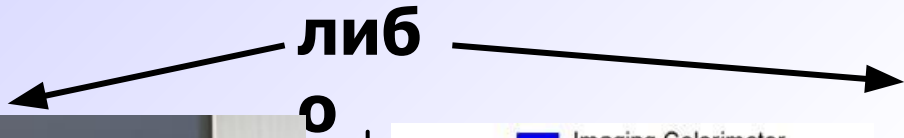


Примеры: спектральные распределения, индексы цветопередачи, координаты цветности и цветовая температура для RGB, RGBA и RGBW светодиодов



II.

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



Гониоспектрорадиометр

Недостатки метода:

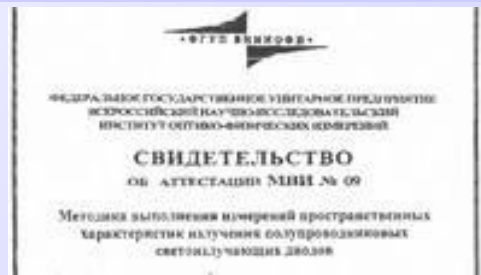
- Механическое вращение;
- Сложности при ассиметричных диаграммах светораспределения;
- Длительные времена измерений и их обработки.

Отображающая сфера - измерительная система "IS-LI™ Luminous Intensity Measurement System"

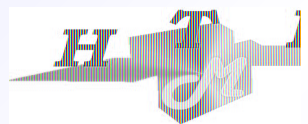
Преимущества метода:

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

Недостаток: цена >\$80.000



Разрешение: ± 0.5 град
 $x = 0.17 \dots 0.75$;
 $y = 0.005 \dots 0.84$
 $T_c = 2500 \dots 10000$ К



Примеры

Наглядно
виден
модовый
состав

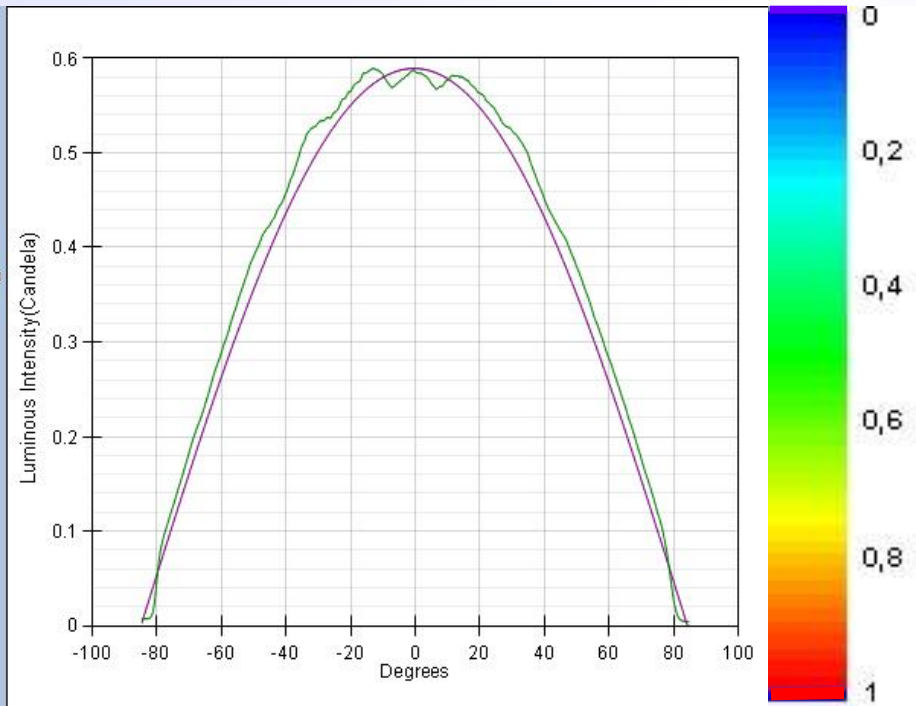
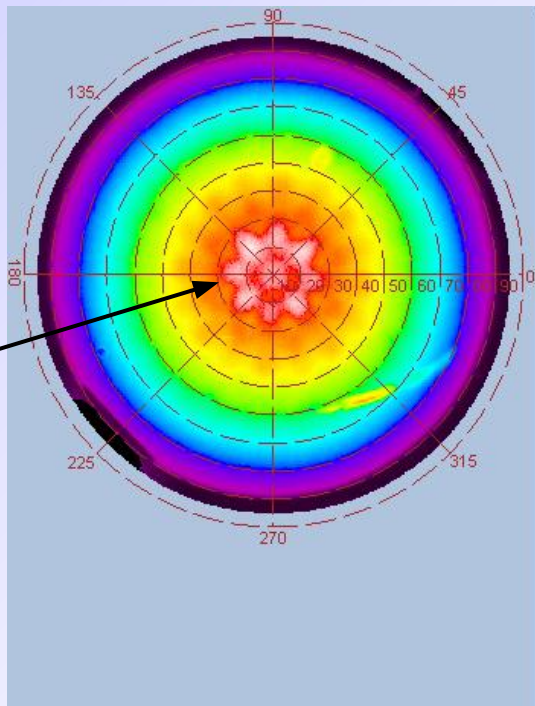
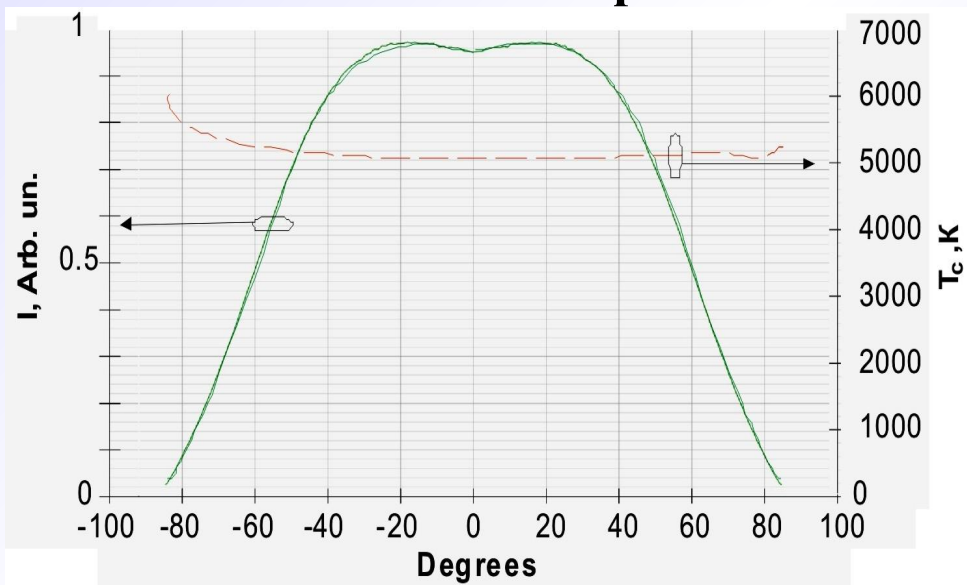


Диаграмма светораспределения для светодиода на основе фотонного кристалла СВМ 380(Luminus)



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



Импульсные измерения с заданием температуры р-п-перехода внешним нагревателем/холодильником

III.

СД + датчик температуры 0-140 °C



Осциллограф
Tektronix
TDS 3044B
F=400MHz

Быстродействующий фотоприемник

Режим измерений $\tau=1-5ms$, $Q>100$ позволяет избежать саморазогрева и имитировать любой токовый режим при заданной температуре р-п-перехода
Например, $55\pm 2^{\circ}C$; $85\pm 2^{\circ}C$ (Стандарт LM-80)

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



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 Laboratoryetc.

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 nanoиндустрии»



Светодиодная nanoиндустрия 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!