

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.6>

УДК: 621.382

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВЕТОДИОДОВ ПО ТЕПЛОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, О.А. Радаев<sup>1</sup>, И.В. Фролов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

Статья поступила в редакцию 18 мая 2022 г.

**Аннотация.** Представлены результаты выборочных измерений токовых зависимостей теплового сопротивления переход-корпус светодиодов различных типов и производителей. Определено, что тепловое сопротивление возрастает с увеличением тока, причем у многих образцов наблюдается заметный излом на токовой зависимости теплового сопротивления при токах, близких к номинальному. Экспериментально показано, что крутизна токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус может быть использована в качестве диагностического параметра, позволяющего оценивать степень неоднородности распределения температуры. По результатам испытаний красных маломощных светодиодов TLCR5800 под действием прямого тока в течение 8 000 ч установлена корреляционная связь между величиной спада мощности и крутизной токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус: коэффициент корреляции этих величин составил 0,538. Относительное изменение теплового сопротивления в процессе испытаний сильно коррелировано с абсолютным значением теплового сопротивления до испытаний: коэффициент корреляции составляет -0,685. На основании полученных экспериментальных результатов разработана методика контроля

качества светодиодов по крутизне токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус. Разработанные методики контроля качества светодиодов могут быть рекомендованы для использования на входном контроле предприятий - изготовителей светодиодной продукции.

**Ключевые слова:** светодиод, тепловое сопротивление, крутизна токовой зависимости, испытания, контроль характеристик.

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области, проект №19-47-730002 р-а.

**Автор для переписки:** Сергеев Вячеслав Андреевич, [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru)

## **Введение**

Температура активной области полупроводникового прибора и светодиода в частности является одним из основных факторов, определяющим его надежность и стабильность характеристик в процессе работы. Известно, что основной причиной постепенного спада (деградации) мощности оптического излучения светодиодов и лазерных диодов на основе полупроводниковых наногетероструктур под действием тока в процессе длительной эксплуатации является образование дефектов в активной области гетероструктуры. Скорость образования дефектов в существенной степени зависит от температуры, которая определяется режимом питания прибора и условиями теплоотвода [1, 2]. Ухудшение качества отвода тепла от кристалла прибора, обусловленное нарушением теплового контакта между кристаллом и теплоотводящей монтажной пластиной или дефектами монтажа прибора на радиатор, является причиной увеличения теплового сопротивления и повышения температуры активной области и, как следствие, снижения эффективности и ускоренной деградации его характеристик [3, 4]. Эффект неоднородного распределения плотности тока по площади кристалла, известный как «current crowding» эффект, вызывает неоднородное распределение температуры [5, 6]. Процесс неоднородного дефектообразования и эффект неоднородного распределения

температуры и плотности тока усиливают друг друга, тем самым ускоряя деградацию характеристик светодиода.

В результате саморазогрева гетероструктуры под действием протекающего тока температура активной области может повышаться на десятки градусов относительно температуры окружающей среды, вызывая термомеханические деформации кристалла, степень которых определяется относительным изменением температуры. Светодиоды, используемые в системах передачи информации, работают в импульсном режиме [7]. Работа светодиода в импульсном режиме вызывает разогрев кристалла в течение импульсов тока и его охлаждение в промежутках времени между импульсами и приводит к периодической деформации кристалла, следствием которой является постепенное разрушение контактного соединения кристалла с кристаллодержателем и ухудшение теплового контакта.

Таким образом, контроль тепловых характеристик светодиодов является важной задачей, решение которой направлено на повышение надежности светодиодных устройств и систем за счет отбраковки потенциально ненадежных приборов.

В работе [6] было показано, что с увеличением тока неоднородность распределения температуры повышается, что проявляется в увеличении теплового сопротивления переход-корпус. Следовательно, крутизна токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус может быть использована в качестве диагностического параметра, позволяющего оценивать степень неоднородности распределения температуры.

Цель настоящего исследования заключалась в разработке методики контроля качества светодиодов по параметрам токовых зависимостей теплового сопротивления переход-корпус.

## 1. Измерение теплового сопротивления переход-корпус светодиода

Измерения теплового сопротивления переход-корпус светодиодов проводились на аппаратно-программном комплексе для измерения теплового импеданса диодов [8] с применением широтно-импульсной модуляции греющей мощности по гармоническому закону, разработанном в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. В основе работы комплекса лежит процесс разогрева объекта импульсами греющего тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону, и измерении отклика на это воздействие – изменения температуры кристалла объекта. Температура кристалла объекта определяется на основе измерения температурочувствительного параметра, в качестве которого используется прямое падение напряжения на объекте при протекании через него измерительного тока. Измерение теплового сопротивления переход-корпус проводилось при частоте модуляции длительности импульсов греющего тока, равной 0,1 Гц. Диапазон токов, в котором измеряли тепловое сопротивление, определялся типом исследованных светодиодов и для маломощных светодиодов составлял – 20-150 мА, для светодиодов средней мощности – 100-400 мА, для мощных светодиодов – 50-550 мА.

## 2. Тепловые характеристики светодиодов с различными адгезивами

Исследована связь крутизны токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус светодиода с неоднородностью распределения плотности мощности и температуры в приборной структуре. Исследования проводились на мощных одноваттных светодиодах типа SvL-30 производства ОАО «Светлана LED» [9]. Кристаллы светодиодов размером  $1143 \times 1143$  мкм<sup>2</sup> с InGaN/GaN гетероструктурой на сапфировой подложке толщиной 150 мкм были смонтированы на печатных платах размером  $25 \times 25$  мм<sup>2</sup> с использованием различных материалов (адгезивов) контактных соединений двух типов, условно обозначенных как адгезив Н и адгезив О. Характеристики адгезивов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры адгезивов, используемых для монтажа кристаллов

Адгезив	Толщина (ориентировочно), мкм	Теплопроводность, Вт/(м×К)
Адгезив Н	10...15	3,25
Адгезив О	3...5	Около 0,2

Печатные платы состоят их слоя меди толщиной 35 мкм и слоя диэлектрика толщиной 100 мкм и теплопроводностью порядка 1 Вт/(м×К) на алюминиевом основании толщиной 1,5 мм. Номинальный ток светодиодов 350 мА, напряжение – 3,1 В. Объем исследованной выборки светодиодов составлял 8 шт.

Измерения модуля теплового импеданса светодиодов SvL-30 выполнены в диапазоне значений греющего тока от 90 мА до 400 мА. Согласно графикам на рис. 1 тепловое сопротивление переход-корпус светодиодов с адгезивами обоих типов линейно возрастает с увеличением рабочего тока в диапазоне 200-400 мА. Различие абсолютных значений теплового сопротивления светодиодов обусловлено различием теплопроводности адгезивов (табл. 1).

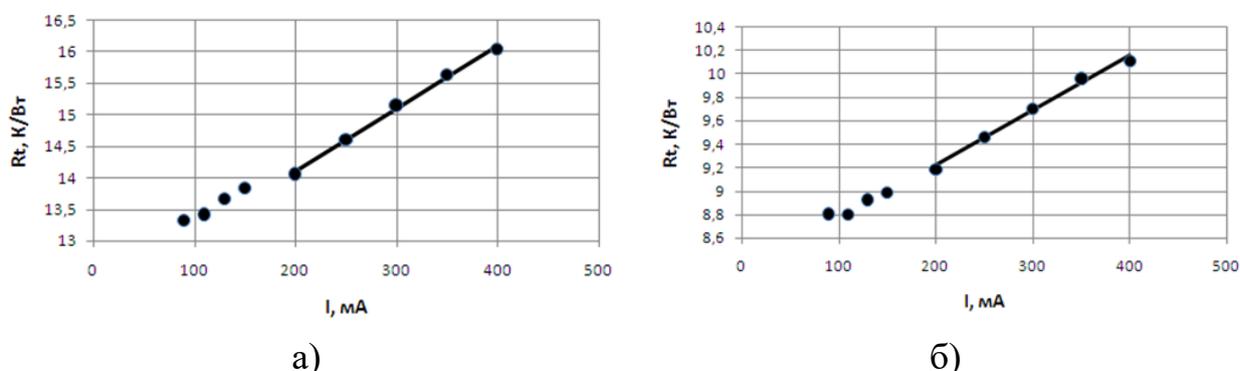


Рис. 1. Типичные токовые зависимости теплового сопротивления переход-корпус светодиодов SvL-30 с адгезивом О (а) и адгезивом Н (б)

Оценка степени неоднородности распределения плотности мощности и температуры в приборной структуре проводилась по крутизне токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус на основании теплоэлектрической модели, разработанной в пакете программ мультифизического моделирования тепловых режимов Comsol Multyphysics [10]. Неоднородность распределения плотности мощности рассчитывалась как отношение максимальной и средней

температуры перегрева активной области кристалла относительно температуры окружающей среды (теплоотвода). Результаты измерений и расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения крутизны теплового сопротивления переход-корпус и неоднородности распределения плотности мощности в приборной структуре светодиодов SvL-30 с разным типом адгезива

Тип адгезива	№ светодиода	Крутизна зависимости $ Z_T(I) $ , К/(Вт×А)	Неоднородность $\Theta$ , отн.ед.
О	1	14,1	1,37
	2	9,9	1,33
	3	10,0	1,33
	4	12,9	1,35
Н	1	5,1	1,295
	2	4,7	1,280
	3	4,7	1,280
	4	5,0	1,285

Как видно из таблицы, крутизна токовой зависимости и степень неоднородности температуры в гетероструктурах существенно выше у светодиодов с адгезивом О, имеющим на порядок меньший коэффициент теплопроводности. Значение показателя неоднородности  $\Theta=1,35$  означает, что приращение максимальной температуры на 35% больше приращения средней температуры гетероперехода; соответственно, отношение максимальной плотности тока к средней будет многократно больше.

### 3. Выборочные измерения тепловых характеристик серийных светодиодов

Исследованы коммерческие гетеропереходные красные светодиоды XRARED-R1-L2-M2-C1 фирмы Cree. Номинальное значение рабочего тока светодиодов 350 мА.

По результатам измерений токовых зависимостей теплового сопротивления переход-корпус установлено, что у всех светодиодов

наблюдается рост полного теплового сопротивления переход-корпус при увеличении рабочего тока. При этом у многих образцов есть заметный излом на токовой зависимости при токах, близких к номинальному, а крутизна токовой зависимости у большинства образцов уменьшается при больших токах.

На рис. 2 показаны типичные токовые зависимости теплового сопротивления светодиодов XRCRED-R1-L2-M2-C1, аппроксимированные линейной (рис. 2, а) и кусочно-линейной функциями (рис. 2, б).

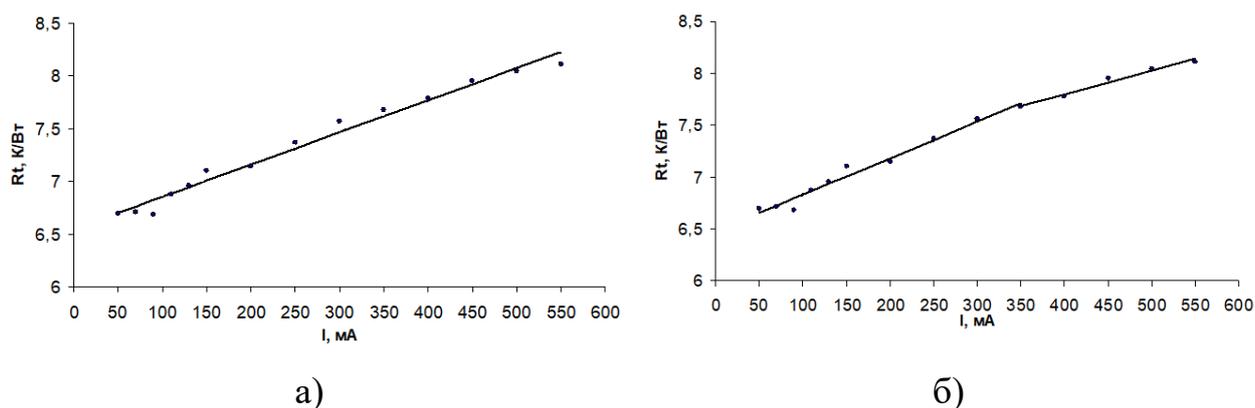


Рис. 2. Типичные токовые зависимости теплового сопротивления светодиодов XRCRED-R1-L2-M2-C1 с аппроксимацией линейной (а) и кусочно-линейной (б) функциями

Результаты измерений крутизны токовых зависимостей теплового сопротивления выборки из 30 штук светодиодов указанного типа представлены в таблице 3.

У большинства образцов наблюдается снижение крутизны с увеличением тока. Большое снижение крутизны и соответственно большое значение отношения  $S_1/S_2$  связано с повышенным тепловыделением в подложке прибора, то есть с уменьшением эффективности светодиода при больших токах, что подтверждается результатами численного моделирования [10].

У образцов №6, 16, 19, 20, 24, 27 и 30 наблюдалось увеличение крутизны с ростом тока, что обусловлено, по нашему мнению, наличием дефектов гетероструктуры и теплоотвода. Такие светодиоды подлежат отбраковке.

Следует отметить, что у образца №21 наблюдалось снижение теплового сопротивления с ростом тока, что мы связываем с аномально высоким тепловыделением в подложке.

Таблица 3. Значения крутизны токовой зависимости теплового сопротивления светодиодов XRCRED-R1-L2-M2-C1

№ светодиода	Крутизна $S$ , К/(Вт×А)	Крутизна $S_1$ , К/(Вт×А)	Крутизна $S_2$ , К/(Вт×А)	Нелинейность $S_1/S_2$ , отн. ед.
1	13,9	14,8	14,4	1,03
2	17,5	19,6	13,8	1,42
3	14,6	16,5	12,3	1,34
4	15,9	17,9	12,3	1,47
5	15,8	17,6	13,9	1,27
6	19,6	19,35	22,7	0,85
8	14,4	15,8	12,9	1,23
9	16,0	17,2	15,2	1,13
10	9,10	12,8	2,9	4,36
11	13,5	14,1	13,3	1,06
12	27,5	34,6	14,5	2,39
13	12,7	15,8	9,4	1,67
14	16,5	17,7	15,1	1,18
15	15,6	18,2	13,8	1,32
16	16,8	17,2	17,7	0,97
17	14,9	17,1	12,0	1,42
18	12,7	14,1	9,6	1,48
19	18,7	18,9	20,6	0,92
20	16,2	15,4	16,6	0,92
21	-1,91	4,1	- 9,7	-0,42
22	14,7	16,1	12,9	1,24
24	18,3	16,6	21,1	0,78
25	16,0	18,1	14,4	1,25
26	12,6	14,3	11,3	1,27
27	14,2	14,5	15,6	0,93
28	15,5	17,7	14,9	1,18
29	15,2	17,3	13,5	1,28
30	15,5	15,7	15,9	0,98

Результаты анализа показали, что отклонение крутизны от среднего значения в сторону уменьшения может служить диагностическим параметром неоднородного токораспределения в гетероструктуре, а в сторону увеличения – критерием снижения эффективности светодиодов. В качестве уровня отбраковки

предлагается использовать критерий  $t\sigma$ , где  $\sigma$  – стандартное отклонение, а значение  $t$  определяется задачами контроля; для стандартных задач  $t = 3$ .

#### 4. Изменение выборочных параметров светодиодов при испытаниях

Исследованы изменения электрооптических и теплых характеристик красных маломощных светодиодов TLCR5800 в процессе испытаний под действием прямого тока. Объем выборки светодиодов, подвергнутым испытаниям, составил 20 шт. В процессе испытаний контролировались ватт-амперные, вольт-амперные, вольт-фарадные характеристики и токовые зависимости теплового сопротивления переход-корпус. Испытания проводились в течение 10 000 ч при комнатной температуре под действием выпрямленного однополупериодного тока амплитудой 80 мА и частотой 50 Гц. В процессе испытаний происходило монотонное уменьшение мощности оптического излучения (рис. 3) и увеличение теплового сопротивления переход-корпус (рис. 4).

Вольт-амперные характеристики изменялись в диапазоне микротоков, а вольт-фарадные характеристики – в диапазоне больших обратных смещений [11].

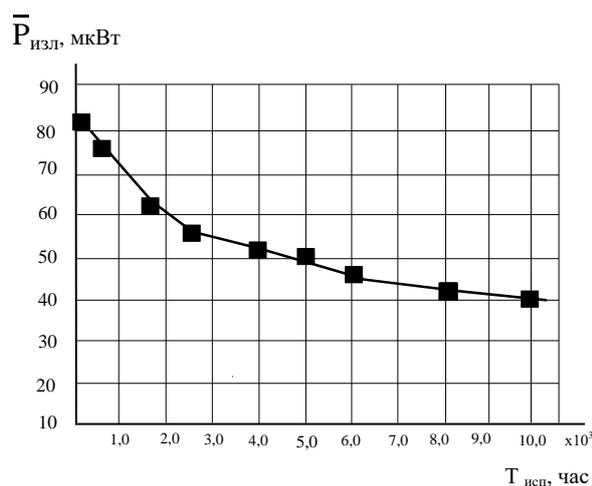


Рис. 3. Изменение средней выборочной мощности излучения светодиодов TLCR5800 при токе 20 мА в процессе испытаний

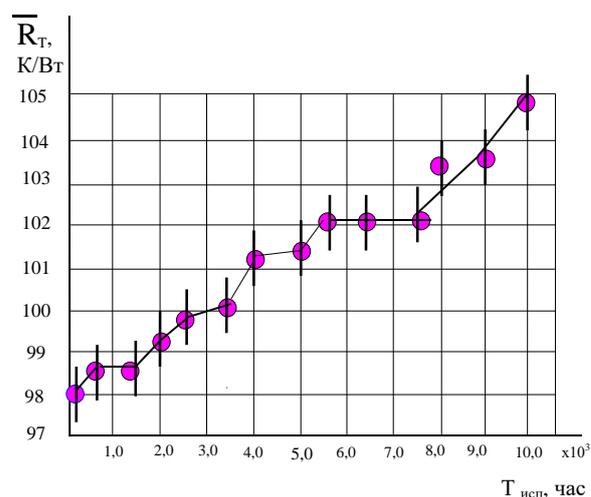


Рис. 4. Изменение выборочного среднего теплового сопротивления маломощных светодиодов в процессе испытаний

В таблице 4 приведены результаты измерений мощности излучения и теплового сопротивления переход-корпус до и после 8000 ч испытаний.

Таблица 4. Результаты изменений параметров светодиодов TLCR5800 до и после 8000 ч испытаний

№ светодиода	Мощность излучения при токе 20 мА			Тепловое сопротивление переход-корпус			Крутизна токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус в диапазоне токов 50-150 мА, К/(Вт×А)
	До испытаний, мкВт	После 8000 ч испытаний, мкВт	Относительный спад, %	До испытаний, К/Вт	После 8000 ч испытаний, К/Вт	Относительное увеличение, %	
3	75.2	42.1	44	93	101.2	8.8	36
4	84.8	44.1	48	104.2	107.7	3.4	76
5	82.9	47.3	43	103.5	105.1	1.5	75
6	82.3	46.1	44	101.6	105.6	3.9	70
7	63.5	34.9	45	102.9	105.8	2.8	163
8	74.8	38.1	49	98.3	99.3	1.0	50
11	87.4	40.2	54	102.6	104.8	2.1	333
12	75.3	39.2	48	99.4	102.1	2.7	351
13	84.6	34.7	59	94.7	98.9	4.4	300
14	85.5	47.9	44	103.8	105.3	1.4	301
16	85.4	33.3	61	93	95.2	2.4	158
17	73.4	32.3	56	101.6	105	3.3	102
18	78.2	33.6	57	99.6	104	4.4	308
21	80.2	28.1	65	98.5	103	4.6	557
22	73.8	31.7	57	107.8	111.3	3.2	390
24	80.6	33.0	59	95.7	102.3	6.9	314
30	89.3	34.8	61	101	103.4	2.4	355
31	87.2	34.0	61	89.5	96.5	7.8	254
33	91.1	50.1	45	90.8	97	6.8	291
40	87.3	38.4	56	102.2	105.9	3.6	70

Коэффициенты корреляции между относительным спадом мощности излучения через 8000 часов испытаний и крутизной токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус составляет 0,538, что свидетельствует

о довольно сильной связи крутизны токовой зависимости теплового сопротивления с механизмами деградации светодиодов.

Относительное изменение теплового сопротивления в процессе испытаний сильно коррелировано с абсолютным значением теплового сопротивления до испытаний: коэффициент корреляции составляет  $-0,685$ .

Полученные результаты подтверждают, что крутизна токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус является информативным параметром, который может быть использован для диагностики качества светодиодов и прогнозирования их надежности.

## **5. Методика контроля качества светодиодов по крутизне токовой зависимости теплового сопротивления**

Для реализации способа диагностики качества светодиодов по крутизне токовой зависимости теплового сопротивления необходимо составить таблицы результатов измерения токовых зависимостей теплового сопротивления в диапазоне токов от  $0,2-0,3I_{\max}$  до  $1,5-1,6I_{\max}$  и для каждого светодиода рассчитать два параметра: усредненную крутизну  $S$  токовой зависимости (на участке примерно от  $0,3I_{\max}$  до  $1,5I_{\max}$ ) и нелинейность токовой зависимости при токе  $I_{\max}$ .

Для вычисления нелинейности зависимости рекомендуется использовать отношение крутизны на разных участках токовой зависимости. Для более детального исследования характера токовой зависимости можно вычислять ее вторую производную. После вычисления указанных параметров для всех светодиодов в выборке необходимо определить средние (по каждой выборке) значения и средние квадратические отклонения (СКО) крутизны и нелинейности токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус. Для наглядности рекомендуется построить гистограммы распределения светодиодов по значениям крутизны и нелинейности токовой зависимости.

Для контроля качества светодиодов предлагается измерять тепловое сопротивление переход-корпус при трех значениях тока  $0,5 I_{\max}$ ,  $I_{\max}$  и  $1,5 I_{\max}$ :

$R_T(0,5I_{\max})$ ,  $R_T(I_{\max})$  и  $R_T(1,5I_{\max})$ . Далее для каждого светодиода вычисляются отношения:

$$S_{11} = R_T(I_{\max})/R_T(0,5I_{\max});$$

$$S_{12} = R_T(1,5I_{\max})/R_T(I_{\max});$$

$$S_{13} = R_T(1,5I_{\max})/R_T(0,5I_{\max})$$

и коэффициент нелинейности токовой зависимости теплового сопротивления:

$$S_{\text{нл}} = R_T^2(I_{\max})/(R_T(0,5I_{\max}) \cdot R_T(1,5I_{\max}))$$

На представительной выборке светодиодов (не менее 100 шт.) исследуемого типа по стандартным методикам вычисляются средние значения крутизны  $\bar{S}_{13}$  и нелинейности  $\bar{S}_{\text{нл}}$  токовой зависимости теплового сопротивления данного типа светодиодов, а также СКО указанных величин:  $\sigma_{\bar{S}_{13}}$  и  $\sigma_{\bar{S}_{\text{нл}}}$ . В зависимости от требований к качеству светодиодов в качестве критериев отбраковки рекомендуется использовать уровень отклонения крутизны и нелинейности токовой зависимости теплового сопротивления светодиодов величиной  $(2-3)\sigma_{\bar{S}_{13}}$  и  $(2-3)\sigma_{\bar{S}_{\text{нл}}}$  соответственно.

## Заключение

По результатам измерений токовых зависимостей теплового сопротивления переход-корпус светодиодов различных типов и производителей установлено, что тепловое сопротивление возрастает с увеличением тока. У многих образцов наблюдается заметный излом на токовой зависимости теплового сопротивления при токах, близких к номинальному. Отклонение крутизны от среднего значения в сторону уменьшения может служить диагностическим параметром неоднородного токораспределения в гетероструктуре, а в сторону увеличения – критерием снижения эффективности светодиода. По результатам испытаний красных маломощных коммерческих светодиодов установлена корреляционная связь крутизны токовой зависимости теплового сопротивления и величины спада мощности излучения светодиодов:

значение коэффициента корреляции между относительным спадом мощности излучения через 8000 часов испытаний и крутизной токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус составляет 0,538, что свидетельствует о довольно сильной связи крутизны токовой зависимости теплового сопротивления с механизмами деградации светодиодов. На основании полученных экспериментальных результатов разработана методика неразрушающей диагностики неоднородного распределения температуры в структурах светоизлучающих приборов по отклонению крутизны токовой зависимости теплового сопротивления переход-корпус от ее среднего выборочного значения для данного типа приборов. Разработанные методики контроля качества светодиодов могут быть рекомендованы для использования на входном контроле предприятий-изготовителей светодиодной продукции.

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области, проект №19-47-730002 р-а.

### Литература

- 1) He P., Zhou J., Yin L., Zhang J. The illuminance and temperature distribution degradation of high power GaN LED caused by detachment of multilayer electrode. *Optical and Quantum Electronics*. 2018. V.50. №458. <https://doi.org/10.1007/s11082-018-1706-7>
- 2) De Santi C., Meneghini M., Meneghesso G., Zanoni E. Degradation of InGaN laser diodes caused by temperature- and current-driven diffusion processes. *Microelectronics Reliability*. 2016. V.64. P.623-626. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.07.118>
- 3) Fu J., Zhao L., Cao H., Sun X., Sun B., Wang J., Li J. Degradation and corresponding failure mechanism for GaN-based LEDs. *AIP Advances*. 2016. V.6. P.055219. <https://doi.org/10.1063/1.4953056>

- 4) Huang J. *Optical degradation mechanisms and accelerated reliability evaluation for LEDs*. Doctoral thesis. Delft University of Technology. 2016. <https://doi.org/10.4233/uuid:299c48c9-5bc7-4c5a-aab8-1b82696fbb5b>
- 5) Lisik Z., Raj E. and Podgórski J. Numerical Model of Current Flow and Thermal Phenomena in Lateral GaN/InGaN LEDs. *Electronics*. 2021. V.10. P.3127. <https://doi.org/10.3390/electronics10243127>
- 6) Sergeev V.A., Khodakov A.M. Thermoelectric Models of High-Power Bipolar Semiconductor Devices. Part II. Nonlinear Model of LEDs. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2015. V.60. P.1328-1332. <https://doi.org/10.1134/S1064226915080161>
- 7) Ma Z., Cao H., Lin S., Li X., Xi X., Li J., Zhao L. Optical and frequency degradation behavior of GaN-based micro-LEDs for visible light communication. *Optical Express*. 2020. V.28. №.27. P.12795-12804 <https://doi.org/10.1364/OE.383867>
- 8) Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. Measurement of the Thermal Impedance of Light-Emitting Diodes and Light-Emitting Diode Matrices. *Measurement Techniques*. 2017. V.60. P.46-51. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1157-8>
- 9) *Разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса (ЭО АПК) с использованием широтно-импульсной модуляции греющей мощности для контроля и анализа тепловых характеристик мощных полупроводниковых излучателей: отчет о НИР (промежуточ.).* ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Ульяновский филиал), рук. - Сергеев В.А., исполн. - Смирнов В. И. и др. Ульяновск. 2015. №ГР115050610091. 156 с.
- 10) Сергеев В.А., Ходаков А.М. *Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов.* Ульяновск, УЛГТУ. 2012. 163 с.

11) Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А. Деграция красных AlInGaP/GaAs светодиодов в процессе испытаний при разных значениях питающего тока. *Материалы Международной научно-технической конференции, 1-5 декабря 2015 г. INTERMATIC-2015*. Москва. 2015. Ч.4. С.228-230.

**Для цитирования:**

Сергеев В.А., Радаев О.А., Фролов И.В. Диагностический контроль качества светодиодов по тепловым характеристикам. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.6>