

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА
НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ**

© 2025 В.П. Кузьменко

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 15.04.2025

В работе предложена математическая модель прогнозирования деградации светодиодных источников света, основанная на фрактальном анализе температурных полей и генеративном моделировании вероятностных флуктуаций. Температурные поля рассматриваются как фрактальные поверхности с выраженной самоподобной структурой, возникающей вследствие технологических отклонений и локальных тепловых эффектов. В качестве диагностического признака используется фрактальный показатель Хёрста, рассчитываемый на основе метода подсчёта ячеек (box-counting). Для генерации реалистичных температурных карт применяется модифицированный алгоритм случайных смещений (diamond-square), а также обобщённый фрактальный ряд Вейерштрасса. Предложенная модель учитывает влияние фрактальной неоднородности на скорость термической деградации и позволяет построить карту прогнозируемого времени до снижения светового потока до заданного уровня. Полученные результаты демонстрируют высокую точность при сравнении с экспериментальными данными (среднее отклонение менее 2 °С). Модель может быть использована в системах автоматизированного контроля на производственной стадии, включая термографическую диагностику, адаптивное тестирование и сортировку изделий по критерию стабильности параметров.

Ключевые слова: светодиодные источники света; фрактальный анализ; температурное поле; модель деградации; генеративное моделирование; самоподобие; термографическая диагностика.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-99-109

EDN: PACXOM

ВВЕДЕНИЕ

Светодиодные источники света (СИС) являются основой современных энергоэффективных систем освещения, включая как бытовое применение, так и авиационную, космическую, транспортную и промышленную отрасли. Повышение требований к эксплуатационной надёжности и стабильности их характеристик актуализирует задачи контроля и управления качеством как на этапе производства, так и в процессе длительной эксплуатации осветительных приборов с СИС.

Под действием термоэлектрической нагрузки на СИС со временем происходят изменения во внутренней структуре материалов кристалла и люминофорных покрытий, что в свою очередь оказывает влияние на параметры излучения СИС, которые могут носить стохастический характер, проявляясь с различной выраженностью в зависимости от продолжительности воздействия и локализации процессов в структуре материалов СИС.

В области управления качеством СИС на протяжении последних лет применяются различные методы прогнозирования надёжности и основных световых параметров, а также методы оценки качества, среди которых можно отметить традиционные статистические подходы (например, контроль световых параметров по ГОСТ- или IES-стандартам), методы термопрофилирования, а также оценку деградации люминофора СИС по кривым изменения светового потока во времени. Все эти методы основываются главным образом на предположении о медленном и монотонном снижении светового потока по мере износа полупроводникового кристалла или люминофорного слоя.

Однако исследования показывают, что процессы деградации в СИС (особенно при повышенных рабочих температурах или при воздействии импульсных режимов) могут носить нелинейный и флуктуирующий характер [1, 2]. В этом случае параметры излучения – в том числе спектр, цветовая температура, индекс цветопередачи, а также интегральный световой поток – способны претерпевать кратковременные отклонения, которые затем могут либо исчезать, либо усугубляться по мере возрастания совокупной термоэлектрической нагрузки.

При этом широко используемые методики оценки срока службы типа L_{70} или L_{80} (стандарты IES LM-80, TM-21 и IES 62717) определяют момент, когда световой поток падает до 70 % либо 80 % от

исходного уровня, но не описывают в деталях «мелкомасштабные» флуктуации и ранние локальные дефекты из-за того, что подобная линейно-экспоненциальная аппроксимация не учитывает фактический характер деградации, который может быть нелинейным, с локальными скачками и стохастической природой изменения параметров. Кроме того, стандартные подходы игнорируют физические механизмы образования дефектов, различие в условиях эксплуатации и мультишкальное распределение повреждений внутри материала. В этой связи представляют интерес альтернативные методы, способные описывать деградацию индивидуальных образцов с учетом их уникальных траекторий [3,4].

Еще одним распространенным методом контроля параметров СИС является контроль температуры p - n -перехода (junction temperature) кристалла светодиода и оценка тепловых сопротивлений его контактов для прогнозирования надежности СИС, однако в таких моделях как правило не учитываются локальные перегревы в кристалле и флуктуационные эффекты [5, 6].

Также, достаточно часто встречается визуальный (в некоторых случаях спектральный) контроль СИС, при котором проверяется целостность люминофорного покрытия, цветовая температура, индекс цветопередачи. Однако оценка обычно проводится периодически и при относительно стационарных условиях, что может пропускать кратковременные и нестационарные аномалии [7].

При всем многообразии известных методов контроля и прогнозирования параметров СИС, в ряде работ указывается, что неоднородность в структуре материалов СИС (например, толщина люминофорного слоя, параметрах теплопереноса и т.д) приводит к тому, что одни участки гетероструктуры стареют быстрее других, а традиционные модели не позволяют вычленить эти локальные аномалии, ограничиваясь «усредненным» показателем снижения светового потока [8-10]. В частности, процессы деградации излучательных характеристик, возникающие на ранних стадиях эксплуатации, а также их стохастическая природа и масштабная зависимость слабо интегрированы в существующие методики оценки соответствия продукции требованиям надежности и стабильности [11]. В этой связи представляют интерес альтернативные методы, способные описывать деградацию индивидуальных образцов с учетом их уникальных траекторий [12].

В итоге, для своевременной диагностики таких «неоднородных» отклонений в СИС необходим учет многоуровневых (так называемых мультишкальных) процессов, когда локальные дефекты (на уровне микротрещин в люминофоре, очагов перегрева в гетероструктуре и т. п.) способны вызывать заметные изменения на макроуровне (вплоть до скачкообразного снижения светового потока) [13, 14].

Фрактальные модели помогают решать эту задачу за счет выявления структурных неоднородностей и описания объектов, чьи характеристики меняются при переходе от мелкого масштаба наблюдения к крупному. В случае СИС это означает, что мелкие поначалу нарушения в материалах могут приводить к «рваным», нелинейным траекториям деградации, не всегда улавливаемым линейными прогнозами.

Несмотря на наличие работ, в которых фрактальные модели успешно применялись к анализу поверхностей и тепловых полей в инженерных системах, подходы подобного типа до настоящего времени практически не используются при решении задач контроля и управления качеством светодиодных источников света [15].

Таким образом, проблема заключается в недостаточной чувствительности и информативности существующих методов контроля, в том числе по причине многоуровневого характера происходящих процессов. Под многоуровневым характером в данном случае подразумевается наличие деградационных явлений, протекающих на различных временных и пространственных уровнях: от наноразмерных дефектов в кристалле СИС до макроскопических изменений светового потока за счет деградаций люминофорного слоя и дискретности питающего тока. Использование единых линейных метрик без учета иерархии масштабов многоуровневого характера приводит к потере части информации, важной для ранней диагностики полупроводниковых изделий как СИС.

В то же время, при производстве и эксплуатации СИС накапливаются большие объемы данных: измерения спектральных характеристик, температурных профилей, статистики отказов и т.д. Анализ этих данных с использованием нелинейных методов, в частности фрактального моделирования, может позволить более точно описывать закономерности деградации материалов и световых характеристик, а также выделять скрытые аномалии. Дополнительно, задействование генеративных методов машинного обучения открывает возможность синтеза «реалистичных» сценариев деградации, что полезно для прогнозирования работы СИС в широком диапазоне условий эксплуатации.

Настоящая работа направлена на формализацию этих процессов с использованием аппарата фрактальной геометрии и генеративных моделей машинного обучения. Целью является построение новых диагностических признаков, чувствительных к скрытым отклонениям параметров качества, возникающим как на производственной стадии, так и при длительной эксплуатации. Таким

образом, актуальность исследования определяется необходимостью повышения точности и скорости обнаружения ранних нарушений параметров СИС, учёта нелинейных и мультишкальных эффектов в их деградации.

1. ПОСТАНОВКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ОПИСАНИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЕГРАДАЦИИ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Как отмечалось выше, современные методы контроля и прогнозирования параметров СИС в основном основаны на аппроксимации временных зависимостей светового потока и спектральных характеристик с использованием линейных или экспоненциальных моделей. Однако результаты экспериментальных исследований показывают, что реальные траектории деградации излучательных характеристик СИС могут обладать сложной нелинейной структурой, включающей стохастические флуктуации, аномалии кратковременного характера и мультишкальные проявления.

С практической точки зрения это приводит к недостаточной чувствительности существующих методик к ранним и локальным отклонениям параметров, возникающим в результате микродефектов, неравномерного теплоотвода, деградации люминофорных покрытий или изменения режимов электропитания. Таким образом, возникает необходимость разработки моделей, способных выявлять и описывать стохастические и самоподобные закономерности, характерные для процессов деградации и неоднородных микроизменений в структуре материалов СИС.

В качестве основного объекта моделирования в настоящем исследовании рассматриваются временные ряды, описывающие изменение светового потока, спектральной плотности излучения и цветовых параметров при длительной эксплуатации СИС. Однако, чтобы учесть неоднородность и мультишкальный характер процессов (см. выше), модель должна допускать фрактальную структуру.

Основным допущением здесь принимается ситуация, при которой локальные (микроуровневые) дефекты структуры кристалла, люминофора или термоинтерфейсных материалов СИС способны генерировать «рваные» изменения, проявляющиеся на более высоких уровнях – вплоть до изменения параметров излучения на макроуровне.

Постановка задачи включает:

- формализацию наблюдаемых временных рядов светового потока $\Phi(t)$, и двумерных полей температурного распределения по поверхности $\Theta(x, y)$, как фрактальных сигналов с самоподобием;
- построение генеративной модели, способной воспроизводить реалистичные сценарии деградации (включая нелинейные скачки) на основе эмпирических и синтетических данных;

Поставленная задача решается с применением методов фрактального анализа и генеративных нейросетевых алгоритмов, реализуемых в среде Python, с дальнейшей оценкой эффективности предложенного подхода на основе сравнения с классическими методами.

Чтобы формализовать подобную нелинейную и стохастическую динамику, рассматривается идея фрактального моделирования, предполагающая, что временной ряд, описывающий ключевой параметр СИС (световой поток $\Phi(t)$, спектральная плотность $S(\lambda, t)$ или цветовая температура), может обладать свойством самоподобия.

То, если предположить, что $X(t)$ является реализацией *стохастического фрактального процесса*, то в простейшем случае для одномерного временного ряда вводится показатель Хёрста $0 < H < 1$, определяющий характер нестационарных флуктуаций. Классическое условие самоподобия можно записать в форме:

$$E = [(X(t + \tau) - X(t))^2] \sim \tau^{2H}, 0 < H < 1,$$

где τ – приращение по времени, (часы или секунды) в зависимости от масштаба наблюдений;

H (безразмерная величина) указывает на «шероховатость» временного ряда:

- при $H = 0,5$ наблюдается динамика, близкая к броуновскому движению;
- при $H < 0,5$ процесс характеризуется резкими сменами тенденции, когда рост быстро сменяется падением и наоборот;
- при $H > 0,5$ проявляется долгосрочная корреляция, когда процесс «запоминает» своё предыдущее направление изменения.

Это позволит количественно характеризовать степень пространственной неоднородности для ключевых параметров температурного поля $\Theta(x, y)$, °С, и не только, так как аналогично можно описать и неоднородность люминофорного покрытия, описав его как люминофорное поле $\Phi_{\text{люм}}(x, y)$, через его относительную толщину или эффективность люминофорного покрытия в долях от номинала (безразмерная величина, как правило, в диапазоне 0,95–1,05 или по указанию производителя).

Смоделированные примеры двумерных и трёхмерных фрактальных распределений для полей температуры и люминофора приведены на рисунке 1.

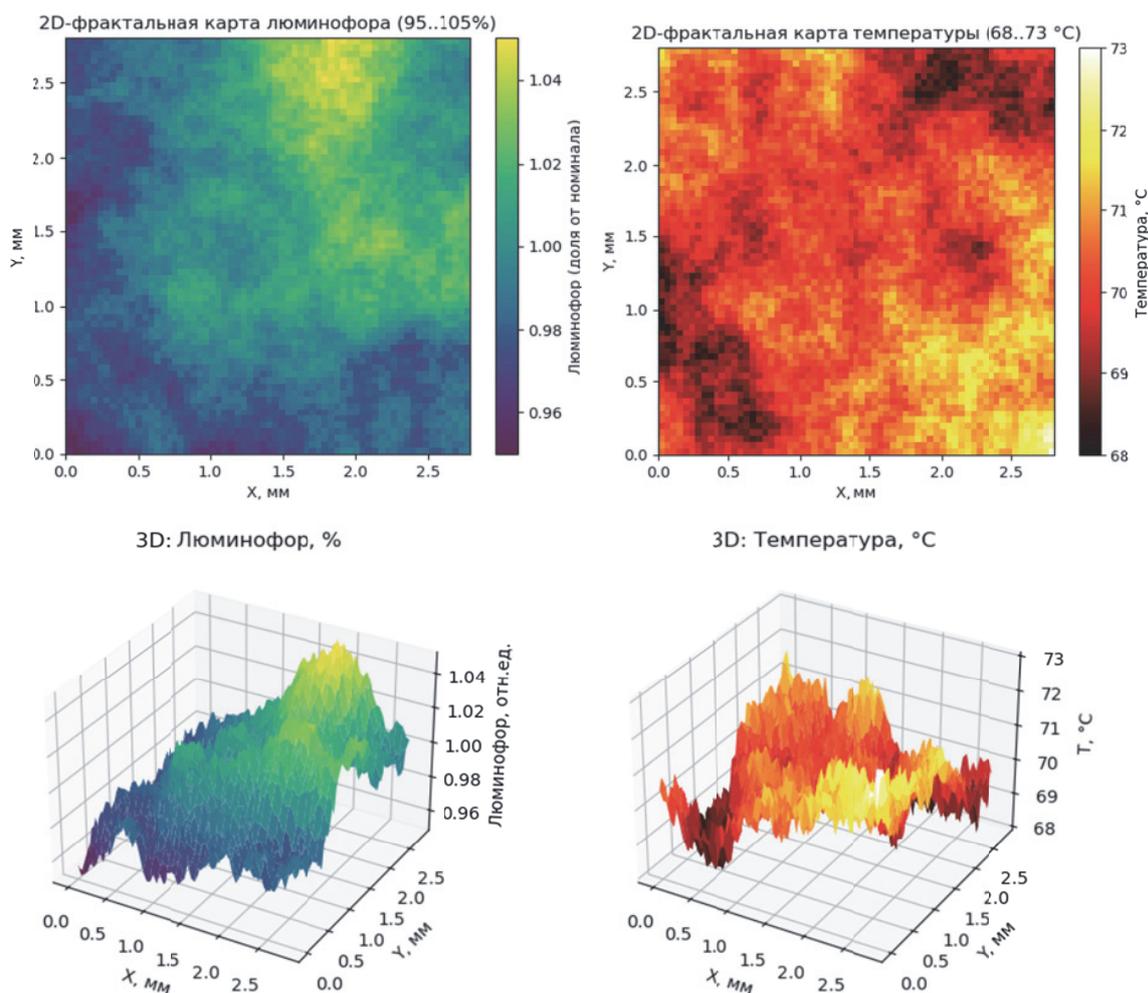


Рис. 1. Двумерные (сверху) и трёхмерные (снизу) представления фрактальных полей: слева – распределение люминофорного покрытия в долях от номинального значения; справа – температурное поле в диапазоне 68–73 °C для моделируемого СИС

Представленные на рис. 1 смоделированные данные демонстрируют типичную пространственную неоднородность, возникающую в результате технологических флуктуаций и/или локальных изменений теплопереноса. Формирование таких карт может быть полезным для моделирования локальных зон деградации.

На практике для аппроксимации и синтетического построения двумерных фрактальных структур часто используется алгоритм «алмаз-квадрат» (diamond-square), реализующий поэтапную генерацию поверхности с самоподобной шероховатостью. Значение показателя Хёрста H , характеризующего степень фрактальности, может быть определено экспериментально на основе реальных данных — например, с использованием метода подсчёта ячеек (box-counting). Этот метод применяется к данным инфракрасной термографии (для температурных распределений) или изображениям, полученным методом микроскопического сканирования (для карт распределения люминофора).

Таким образом, полученные экспериментальные распределения аппроксимируются фрактальными поверхностями:

$$\Theta(x, y) \in [\Theta_{\min}, \Theta_{\max}], \Phi_{\text{люм}}(x, y) \in [\Phi_{\min}, \Phi_{\max}],$$

где интервалы значений температурного и люминофорного полей определяются экспериментально или согласно производственному процессу и характеризуют допустимый технологический разброс измеренных значений.

Для аналитического задания фрактального сигнала используется обобщённый ряд Вейерштрасса – сумма масштабных компонент с экспоненциально убывающей амплитудой, где каждая компонента представляет собой локальные колебания с независимой фазой [16]:

$$X_W(t) = A \sum_{n=n_1}^{n_2} k_n^{-H} \cos(2\pi k_n t + \varphi_n),$$

где A (лм, или иная единица измерения) – масштабный коэффициент, определяющий максимальный уровень флуктуаций;

k_n – убывающая или возрастающая последовательность, выбираемая обычно в виде:

$$k_n = k_n^0,$$

где $k^0 > 1$ – безразмерный множитель;

ϕ_n – случайные фазы, равномерно распределённые в $[0, 2\pi)$;

n_1 и n_2 – индексы, задающие нижний и верхний предел суммирования, выбранные так, чтобы учесть диапазон частот (масштабов) от крупных «медленных» изменений до «мелких» быстрых колебаний;

Для СИС данный ряд $X_w(t)$ можно интерпретировать как наложение множества масштабных флуктуаций, каждая из которых ассоциируется с определёнными микропроцессами деградации (локальные скачки в люминофоре, изменения в кристалле под воздействием тепла и т. д.). Благодаря «дробному» значению H , итоговая функция приобретает повышенную «шероховатость», подобную реально регистрируемым временным рядам с шумами и резкими скачками.

В условиях, когда необходимо учесть распределённый характер параметров (например, поле температуры или распределение люминофорного слоя на поверхности кристалла), рассматривают двумерное самоподобие. Тогда вводится 2D-координата $r = (x, y)$, а фрактальная размерность D для поверхности в пространстве (x, y, X) вычисляется по формуле:

$$D = 3 - H,$$

если $H \approx 0,5$ имеем $D \approx 2,5$, что указывает на очень «неровную» поверхность.

2. ЛОКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ С УЧЁТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Предлагаемая модель основана на двух основных величинах, которые можно легко измерить для готового изделия:

- температурное поле поверхности СИС $\Theta(x, y)$, измеряемое инфракрасной термографией, °С.

- поле локальной яркости (светимости) $L(x, y)$, измеряемое фотометрической камерой, лм/мм².

При этом деградация светового потока полупроводниковых устройств хорошо описывается законом Аррениуса, в котором скорость деградации экспоненциально зависит от локальной температуры [17]. Однако в реальных условиях локальная деградация определяется не только абсолютным значением температуры, но и пространственной неоднородностью полей температуры и светимости [18].

Таким образом, локальная скорость деградации светового потока (через неоднородность поля яркости) предлагается в виде:

$$\frac{dL(x, y, t)}{dt} = -L(x, y, t) \cdot A_0 e^{\left(\frac{E_a}{k_B(\Theta(x, y) + 273,15)}\right)} \left(\frac{L(x, y, 0)}{L(0)}\right)^{2(H_\Theta - 0,5)},$$

где $L(x, y, t)$ – локальный световой поток, лм/мм², в момент времени t .

$L(x, y, 0)$ – начальный локальный световой поток, лм/мм².

$L(0)$ – средний начальный световой поток по всему изделию, лм/мм², вычисляется по измеренному полю $L(x, y, 0)$.

A_0 – предэкспоненциальный множитель (ч⁻¹), фундаментальный параметр материала (известен из паспортных данных, не требует дополнительного подбора).

E_a – энергия активации деградации (Дж);

k_B – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

$\Theta(x, y)$ – локальная температура поверхности, °С;

H_Θ – фрактальный показатель неоднородности температурного поля, рассчитываемый из экспериментальных данных.

Важнейшая особенность предлагаемой модели – наличие чёткой зависимости от фрактальной характеристики (H_Θ). Это означает, что при однородном температурном поле ($H_\Theta = 0,5$), второй множитель равен 1 и модель переходит в классическую модель Аррениуса, однако чем выше неоднородность ($H_\Theta > 0,5$), тем выше локальная скорость деградации, особенно для участков с повышенной начальной яркостью $L(x, y, 0)$. Это отражает реальный физический процесс ускоренного износа локальных перегретых или дефектных участков.

С помощью инфракрасной (ИК)-камеры снимается двумерное температурное поле поверхности СИС:

$$\Theta(x, y), x = 1, \dots, M, y = 1, \dots, N$$

где M, N – число пикселей измерения по осям x и y . Типичное разрешение современных камер составляет от 128×128 до 1024×1024 пикселей, чего достаточно для достоверного фрактального анализа.

Измеренное температурное поле нормируется по максимальному и минимальному значениям для получения безразмерного поля с диапазоном [0,1]:

$$\Theta_{\text{норм}}(x, y) = \frac{\Theta(x, y) - \Theta_{\text{min}}}{\Theta_{\text{max}} - \Theta_{\text{min}}},$$

где $\Theta(x, y)$ – температура в точке (x, y) , °C;

Θ_{max} и Θ_{min} определяются как максимальное и минимальное значение температуры в пределах анализируемой области изображения, °C.

Далее исходное нормированное температурное поле покрывается квадратной сеткой с размером ячейки ε . Например, для изображения 512×512 пикселей ε может изменяться от 1 до 256 пикселей, как степени двойки: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256.

Для каждой ячейки проверяется, есть ли в ней существенное изменение температуры. Критерий существенного изменения обычно устанавливают как превышение некоторого порога (например, разница температур внутри ячейки превышает заранее заданный минимальный порог, например, 0,1 от нормированной шкалы).

Далее считается количество ячеек $N(\varepsilon)$, где есть изменения (т.е. не однородных ячеек). Повторяется для всех выбранных масштабов ε .

В итоге получается зависимость:

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D},$$

где D – фрактальная размерность множества.

Значения $N(\varepsilon)$ логарифмируются и строится график:

$$N(\varepsilon) = -D \cdot \ln(\varepsilon) + C,$$

где D – та же самая фрактальная размерность множества, отражающая в данном случае наклон прямой на графике;

C – константа, представляет собой сдвиг (интерцепт) графика на оси $\ln N$ при $n(\varepsilon) = 0$. При анализе в данном случае представляет интерес именно наклон линии (который равен $-D$), поскольку он определяет фрактальную размерность. Значение C зависит от начальных условий и масштабирования, но не влияет на вычисление D , поэтому для дальнейших расчётов его можно не учитывать.

Фрактальная размерность определяется из графика методом линейной регрессии как наклон построенной прямой на двойном логарифмическом масштабе:

$$D = - \frac{\Delta \ln(N(\varepsilon))}{\Delta \ln(\varepsilon)},$$

Интегральный световой поток изделия рассчитывается путём интегрирования локальной яркости по всей площади (Ω) изделия:

$$\Phi_{\text{полн}} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} L(x, y, t) dx dy,$$

где $[x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$ – координатные границы активной зоны излучения Ω ;

$L(x, y, t)$ – локальный световой поток, лм/мм²;

$\Phi_{\text{полн}}(t)$ – интегральный световой поток, лм.

Время достижения критического уровня (L_{70} – снижение до 70 % начального уровня) определяется численно:

$$\Phi_{\text{полн}}(t_{L70}) = 0,7 \cdot \Phi_{\text{полн}}(0),$$

где $\Phi_{\text{полн}}(0)$ – исходный (начальный) интегральный световой поток, лм;

t_{L70} – момент времени, при котором световой поток снижается до 70 % от начального уровня, час.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА

С целью проверки применимости предложенного подхода была реализована модель фрактального распределения температуры и люминофорного слоя с последующим численным расчётом показателя Хёрста, карт деградации, локальных L_{70} и интегральных метрик надёжности. Расчёты проводились в среде Python с использованием экспериментальных термограмм, а также синтетически сгенерированных фрактальных полей.

Для оценки качества и достоверности моделирования выполнено сравнение прогнозных карт температуры, светового потока и распределений L_{70} с реальными экспериментальными данными. Ниже представлены полученные результаты в форме визуализаций и аналитических графиков.

Для демонстрации возможностей предложенного подхода была проведена оценка текущего состояния и прогноза деградации светодиодного источника света на базе светодиода типа AR5050. Светодиод имеет заявленные в технической документации характеристики: номинальный рабочий

ток 60 мА, световой поток до 26 лм, эффективность до 145 лм/Вт, а также предельную рабочую температуру $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$

На момент исследования образец отработал 5500 часов в условиях штатной эксплуатации. С помощью инфракрасной термографии была получена актуальная термограмма, представленная на рис. 2 (а) и прогнозная температурная карта, полученная на основе фрактальной модели, формирующей реалистичный сценарий распределения температуры с учётом пространственной неоднородности (рис. 2.(б)). Из анализа видно, что температурные значения на поверхности СИС превышают предельно допустимую рабочую температуру устройства, установленную в $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зафиксированная максимальная температура составила $91,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о существенном перегреве и потенциально ускоренной деградации структуры. Измерения производились после выхода источника света на устоявшийся режим.

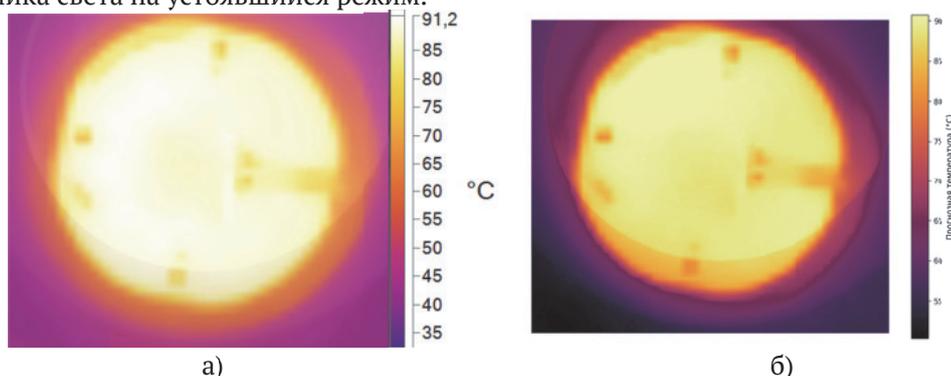


Рис. 2. а) Термограмма светодиода AR5050 после 5500 часов работы;
б) Прогнозная температурная карта, полученная на основе фрактальной модели, формирующей реалистичный сценарий распределения температуры с учётом пространственной неоднородности

Построенная карта отражает вероятное распределение температур в системе с учётом мультишкальных неоднородностей, включая локальные аномалии и скрытые зоны перегрева. Это позволяет улучшить точность дальнейшего прогноза деградации светового потока. Сравнение реального и смоделированного температурных полей показало хорошее соответствие. По результатам количественного анализа, среднее отклонение прогнозной карты от реальных данных составило $1,94\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальное отклонение – $3,50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а стандартное отклонение – $0,70\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о высокой точности применённого подхода.

Для более детального анализа пространственного распределения температуры, построенного на основе разработанной фрактальной модели, дополнительно выполнена его трёхмерная визуализация (рис. 3). В отличие от традиционной двумерной карты, данный рельеф позволяет наглядно выделить локальные провалы и перегретые участки, а также увидеть характерные флуктуации, соответствующие микронеоднородностям на уровне материалов и теплового контакта.

Такие особенности, визуально малозаметные при плоском отображении, играют критическую роль в локальной деградации и преждевременном снижении светового потока. Именно поэтому учёт пространственной структуры поля и его фрактальной природы является важным элементом при построении моделей надёжности.

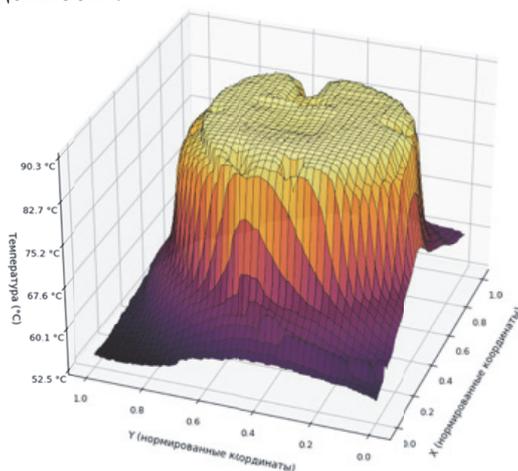


Рис. 3. 3D-рельеф температурного поля, построенного по фрактальной модели

Для количественной оценки степени самоподобия температурного поля проведён фрактальный анализ методом подсчёта ячеек (box-counting), результаты которого представлены на рис. 4.

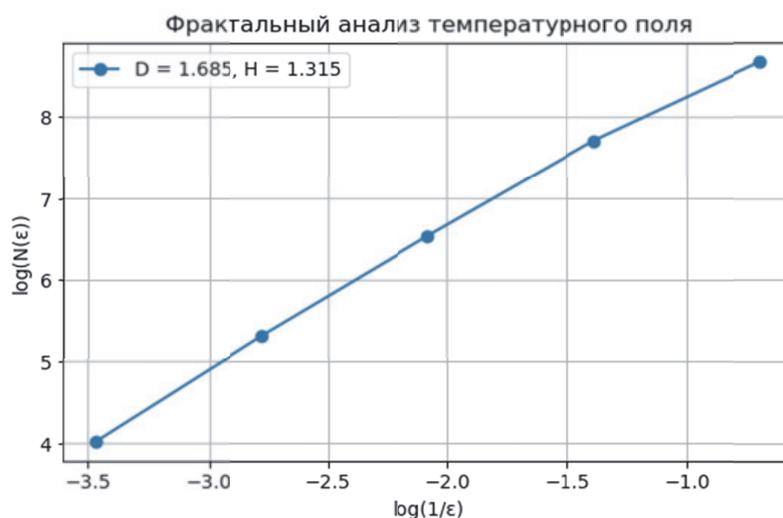


Рис. 4. Результат фрактального анализа (метод подсчёта ячеек) с расчётом D и H

Построенная логарифмическая зависимость позволила оценить фрактальную размерность поля как $D = 1,685$, что соответствует показателю Хёрста $H = 1,315$. Полученное значение подтверждает наличие выраженной фрактальной структуры и коррелирует с наблюдаемой температурной «шероховатостью» поверхности.

На рисунке 5 представлена карта прогнозируемого времени до снижения светового потока до 70 % (L_{70}), построенная на основе температурного поля с учётом фрактальной неоднородности. Расчёт выполнен по физической модели, включающей температурную чувствительность и локальные флуктуации.

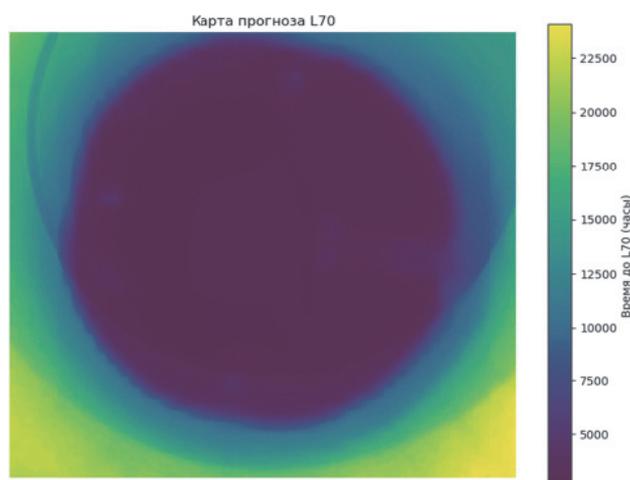


Рис. 5. Карта расчётного времени до порога L_{70} на основе фрактально-модифицированного температурного поля

В центральной (активной) зоне источника света на рис. 5 наблюдаются наиболее низкие значения времени до L_{70} – менее 5000 часов, что указывает на высокую степень термической деградации и с учетом рабочего состояния, отработанного времени и повышенной рабочей температуры говорит об адекватности прогноза. Области по краям, где значения превышают 20 000 часов, относятся к неактивной части конструкции (корпус и фон) и в анализе не учитываются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном исследовании разработана математическая модель прогнозирования деградации светодиодных источников света, основанная на фрактальном представлении температурных полей и их влиянии на долговечность излучающих структур. В отличие от традиционных

экспоненциальных моделей, предполагающих равномерное и монотонное снижение светового потока, предложенный подход позволяет учитывать реальную пространственную неоднородность температуры и динамику локальных перегревов, что обеспечивает более достоверную оценку остаточного ресурса.

Фрактальный анализ температурных распределений, выполненный на основе инфракрасных термограмм, подтвердил наличие выраженной мультишкальной структуры, связанной с неоднородностью теплоотвода, технологическим разбросом параметров и микроразрушениями в люминофорном слое. Вычисленные значения фрактальной размерности и показателя Хёрста свидетельствуют о статистической самоподобности поля, что и было положено в основу генеративного прогнозирования.

Построенная прогнозная карта температуры, уточнённая за счёт моделирования вероятностных флуктуаций, показала хорошее согласие с экспериментальными данными, при этом среднеквадратичное отклонение от реальной термограммы составило менее двух градусов Цельсия.

С практической точки зрения, предложенный подход может быть интегрирован в контур системы управления качеством светодиодных изделий на различных этапах жизненного цикла. На производственной стадии модель может использоваться при автоматизированной проверке термограммы каждого изделия в составе системы оптического и теплового контроля. Анализ полученного температурного поля с последующим фрактальным разложением позволяет не только фиксировать превышение абсолютных значений температуры, но и количественно оценивать степень неоднородности теплового рельефа. Вычисленный фрактальный показатель может служить дополнительным диагностическим признаком при сортировке продукции и принятии решений о допуске, доработке или браковке светодиодных модулей, особенно в случае массового производства.

Таким образом, внедрение фрактальной модели в систему контроля качества светодиодных источников света позволяет не только повысить достоверность прогнозов долговечности, но и существенно улучшить чувствительность диагностических процедур за счёт учёта нелинейных, стохастических и локальных эффектов, характерных для реальных условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rocchetta, R., Zhan, Z., Van Driel, W., & Di Bucchianico, A. (2024). Uncertainty analysis and interval prediction of LEDs lifetimes. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 242, 109715. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109715>.
2. Manyakhin, F., Varlamov, D., Kuksa, V., & Mokretsova, L. (2024). Mechanism and Regularity for Luminous Flux Decreasing of Efficient Small Powered LEDs Based on GaN/InGaN Structures at High Current Density. *Light & Engineering*. <https://doi.org/10.33383/2023-027>.
3. Вострецова, Л.Н. Дegradация структур на основе ingan/gan под действием γ -облучения / Л.Н. Вострецова, М.Ю. Махмуд-Ахунов, А.А. Чулакова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки, – 2022 – № 3 (63). – С 72-84.
4. Cai Wenting, Li Sheng, Meng Qinghui, Huang Haisong. Lifetime prediction method of LED light-emitting device based on approximate analysis. *E3S Web of Conferences* 271, 01031 (2021). DOI: 10.1051/e3sconf/202127101031
5. Zhao, Xinyu, Honglin Gong, Lihong Zhu, Zhenyao Zheng, and Yijun Lu. 2024. "LED Junction Temperature Measurement: From Steady State to Transient State" *Sensors* 24, no. 10: 2974. <https://doi.org/10.3390/s24102974>
6. Lee, Dongjun & Choi, Hyunjin & Jeong, Sihun & Jeon, Chang & Lee, Daehoon & Lim, Jiseok & Byon, Chan & Choi, Jungwook. (2018). A study on the measurement and prediction of LED junction temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 127. 1243-1252. 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.091.
7. A. A. R. M. A. Ebayyeh and A. Mousavi, "A Review and Analysis of Automatic Optical Inspection and Quality Monitoring Methods in Electronics Industry," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183192-183271, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029127.
8. Dong Y, Zhou Z, Dai H, Liu K. Reliability Evaluation of LED Lamp Beads Considering Multi-Stage Wiener Degradation Process Under Generalized Coupled Accelerated Stress. *Electronics*. 2024; 13(23):4724. <https://doi.org/10.3390/electronics13234724>
9. Qu, Xiaohui & Liu, Qing & Wang, Huai & Blaabjerg, F. (2018). System-Level Lifetime Prediction for LED Lighting Applications Considering Thermal Coupling Between LED Sources and Drivers. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. PP. 1-1. 10.1109/JESTPE.2018.2850845.
10. Zhao, F., Chen, J., Wu, H., Zeng, Y., Dong, G., Yang, G., Shieh, B., & Lee, S. (2022). Lifetime and Failure Analysis of LEDs Driven by the Constant-Amplitude Current with Pulse Width Modulation. 2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICEPT56209.2022.9873146>.
11. Truong, M.T., Do, F., Mendizabal, L., & Iung, B. (2022). An improved accelerated degradation model for LED reliability assessment with self-heating impacts. *Microelectronics Reliability*. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114428>.
12. Осинцева, Е.А. Оптимальное планирование эксперимента на основе винеровской деградиционной модели с ковариатами с использованием условной информационной матрицы Фишера / Е.А. Осинцева, Е.В. Чимитова // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 67. – С 83-93.

13. *Ходаков, А.М.* Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в светодиодных матрицах / А.М. Ходаков, В.А. Сергеев, И.В. Фролов, О.А. Радаев, С.А. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2024. – Т. 29. – № 6. – С. 752–762. DOI: 10.24151/1561-5405-2024-29-6-752-762
14. *Solyonyj, S., Rabin, A., Solenaya, O., Kuzmenko, V., Rysin, A.* (2020). Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 734. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012197>.
15. Jian Chen, Di Liu, Chenglong Wang, Wangyang Zhang, Linbo Zhu, A fractal contact model of rough surfaces considering detailed multi-scale effects, *Tribology International*, Volume 176, 2022, 107920, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107920>.
16. *Сосенушкин, Е.Н.* Применение методов искусственного интеллекта для компьютерного моделирования фрактальных поверхностей / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.С. Желнов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 1 (117). – С. 109–115. – DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-109-115.
17. *Кузьменко, В.П.* Управление качеством светодиодных осветительных приборов: монография / В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, О.Я. Солёная. – СПб.: ГУАП, 2024. – 184 с.
18. *Вострецова, Л.Н.* Деградация структур на основе InGaN/GaN под действием γ -облучения / Л.Н. Вострецова, М.Ю. Махмуд-Ахунув, А.А. Чулакова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2022. – № 3 (63). – С. 72–84.

QUALITY CONTROL OF LED LIGHT SOURCES BASED ON FRACTAL MODELING OF TEMPERATURE FIELDS

© 2025 V.P. Kuzmenko

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

This paper presents a mathematical model for predicting the degradation of LED light sources, based on fractal analysis of temperature fields and generative modeling of probabilistic fluctuations. Temperature fields are treated as fractal surfaces with a pronounced self-similar structure, arising from technological deviations and local thermal effects. The Hurst exponent, calculated using the box-counting method, is employed as a diagnostic feature. To generate realistic temperature maps, a modified random displacement algorithm (diamond-square) and a generalized fractal Weierstrass series are used. The proposed model accounts for the influence of fractal inhomogeneity on the rate of thermal degradation and allows for the construction of a predictive map of the time remaining until luminous flux drops to a specified level. The results demonstrate high accuracy when compared with experimental data (mean deviation less than 2 °C). The model can be implemented in automated quality control systems at the manufacturing stage, including thermographic diagnostics, adaptive testing, and sorting of products based on parameter stability criteria.

Keywords: LED light sources; fractal analysis; temperature field; degradation model; generative modeling; self-similarity; thermographic diagnostics.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-99-109

EDN: PACXOM

REFERENCES

1. *Rocchetta, R., Zhan, Z., Van Driel, W., & Di Bucchianico, A.* (2024). Uncertainty analysis and interval prediction of LEDs lifetimes. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 242, 109715. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109715>.
2. *Manyakhin, F., Varlamov, D., Kuksa, V., & Mokretsova, L.* (2024). Mechanism and Regularity for Luminous Flux Decreasing of Efficient Small Powered LEDs Based on GaN/InGaN Structures at High Current Density. *Light & Engineering*. <https://doi.org/10.33383/2023-027>.
3. *Vostrecova, L.N.* Деградация структур на основе инган/ган под действием γ -облучения / Л.Н. Вострецова, М.Ю. Махмуд-Ахунув, А.А. Чулакова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки, – 2022 – № 3 (63). – С. 72–84.
4. *Cai Wenting, Li Sheng, Meng Qinghui, Huang Haisong.* Lifetime prediction method of LED light-emitting device based on approximate analysis. *E3S Web of Conferences* 271, 01031 (2021). DOI: 10.1051/e3sconf/202127101031
5. *Zhao, Xinyu, Honglin Gong, Lihong Zhu, Zhenyao Zheng, and Yijun Lu.* 2024. "LED Junction Temperature Measurement: From Steady State to Transient State" *Sensors* 24, no. 10: 2974. <https://doi.org/10.3390/s24102974>
6. *Lee, Dongjun & Choi, Hyunjin & Jeong, Sihun & Jeon, Chang & Lee, Daehoon & Lim, Jiseok & Byon, Chan & Choi, Jungwook.* (2018). A study on the measurement and prediction of LED junction temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 127. 1243-1252. [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.091](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.091).
7. *A. A. R. M. A. Ebayyeh and A. Mousavi,* "A Review and Analysis of Automatic Optical Inspection and Quality Monitoring Methods in Electronics Industry," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183192-183271, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029127.
8. *Dong Y, Zhou Z, Dai H, Liu K.* Reliability Evaluation of LED Lamp Beads Considering Multi-Stage Wiener Degradation Process Under Generalized Coupled Accelerated Stress. *Electronics*. 2024; 13(23):4724. <https://doi.org/10.3390/electronics13234724>

9. Qu, Xiaohui & Liu, Qing & Wang, Huai & Blaabjerg, F. (2018). System-Level Lifetime Prediction for LED Lighting Applications Considering Thermal Coupling Between LED Sources and Drivers. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. PP. 1-1. 10.1109/JESTPE.2018.2850845.
10. Zhao, F., Chen, J., Wu, H., Zeng, Y., Dong, G., Yang, G., Shieh, B., & Lee, S. (2022). Lifetime and Failure Analysis of LEDs Driven by the Constant-Amplitude Current with Pulse Width Modulation. 2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICEPT56209.2022.9873146>.
11. Truong, M.T., Do, F., Mendizabal, L., & Iung, B. (2022). An improved accelerated degradation model for LED reliability assessment with self-heating impacts. Microelectronics Reliability. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114428>.
12. Osinceva, E.A. Optimal'noe planirovanie eksperimenta na osnove vinerovskoj degradacionnoj modeli s kovariatami s ispol'zovaniem uslovnoj informacionnoj matricy Fishera / E.A. Osinceva, E.V. Chimitova // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2024. – № 67. – S 83-93.
13. Hodakov, A.M. Modelirovanie i issledovanie teploelektricheskikh processov v svetodiodnykh matricah / A.M. Hodakov, V.A. Sergeev, I.V. Frolov, O.A. Radaev, S.A. Zajcev // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Elektronika. 2024. – T. 29. – № 6. – S. 752–762. DOI: 10.24151/1561-5405-2024-29-6-752-762
14. Solyonyj, S., Rabin, A., Solenaya, O., Kuzmenko, V., Rysin, A. (2020). Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 734. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012197>.
15. Jian Chen, Di Liu, Chenglong Wang, Wangyang Zhang, Linbo Zhu, A fractal contact model of rough surfaces considering detailed multi-scale effects, Tribology International, Volume 176, 2022, 107920, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107920>.
16. Sosenushkin, E.N. Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta dlya komp'yuternogo modelirovaniya fraktal'nykh poverhnostej / E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.S. Zhelnov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2024. – T. 26, № 1 (117). – S. 109–115. – DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-109-115.
17. Kuz'menko, V.P. Upravlenie kachestvom svetodiodnykh osvetitel'nykh priborov: monografiya / V.P. Kuz'menko, S.V. Solyonyj, O.Ya. Solyonaya. – SPb.: GUAP, 2024. – 184 s.
18. Vostrecova, L.N. Degradaciya struktur na osnove InGaN/GaN pod dejstviem γ -oblucheniya / L.N. Vostrecova, M.Yu. Mahmud-Ahunov, A.A. Chulakova // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Fiziko-matematicheskie nauki. – 2022. – № 3 (63). – S. 72–84.