

*А.С. Шашкина¹, А.В. Кривошейкин¹,
Н.Н. Скворцов¹, М.В. Воротков²*

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
кино и телевидения;

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
г. Санкт-Петербург

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЛАВИННОГО ПРОБОЯ СВЕТОДИОДА

В статье анализируется существующая модель процессов, протекающих в ходе частичного лавинного пробоя $p-n$ -перехода. Установлено, что данные, полученные в результате экспериментов с обратносмещенными светодиодами, не описываются этой моделью. Обнаруженные фрактальные свойства микроплазменного шума служат основанием для проведения дальнейших исследований, которые должны объяснить характеристики пробоя реальных образцов светодиодов и откорректировать существующую модель лавинного пробоя $p-n$ -переходов.

ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ, МИКРОПЛАЗМА, $p-n$ -ПЕРЕХОД, ФРАКТАЛ, СВЕТОДИОД.

Введение

Для электронных компонентов, например стабилитронов, предназначенных для работы в режиме электрического пробоя, сам указанный режим не представляет опасности. Но и для других электронных компонентов, не предназначенных для работы в этом режиме, электрический пробой является в большинстве случаев обратимым. К таким компонентам относится светодиод, для которого при повторной подаче напряжения в прямом направлении сохраняется явление электролюминесценции.

Однако в стабилитронах может наблюдаться как туннельный, так и лавинный пробой. Необходимо определить вид пробоя и для светодиодов.

После экспериментального определения вида пробоя была проведена серия экспериментов, посвященных исследованию свойств микроплазменного шума, его

временных и спектральных характеристик. Далее в ходе экспериментов и математического моделирования были выявлены фрактальные свойства микроплазменного шума.

Сигналы, обладающие свойством фрактальности, в настоящее время применяются в радиотехнике, радиолокации, в физике конденсированного состояния, в наноструктурировании и других областях.

Вид пробоя светодиода

Электрические пробои делятся на две группы: туннельные и лавинные [1]. С ростом температуры напряжение лавинного пробоя увеличивается, а туннельного — уменьшается [2, 3]. Поэтому вид пробоя конкретного электронного компонента можно определить экспериментально по смещению вольтамперных характеристик (ВАХ) при нагреве. Для лавинного пробоя

характерно смещение кривой ВАХ в сторону высоких обратных напряжений при повышении температуры.

Характер пробоя конкретных промышленных светодиодов видимого спектра красного свечения (материалы: AlGaAs/AlGaAs (DH), GaP, AlInGaP/GaAs) был определен нами экспериментально с помощью нагрева в лабораторной печи. При анализе полученных ВАХ светодиодов было выявлено, что в них реализуется лавинный пробой [3].

Анализ существующих представлений

Как показано в книге [2], чаще всего пробой начинается вблизи дефектов кристалла – дислокаций, включений второй фазы, неоднородностей в распределении легирующих примесей. Вблизи дислокации имеются области сжатия и расширения кристаллической решетки, что влияет на ширину запрещенной зоны. Кроме того, дислокации имеют свойство окружать себя примесями. Концентрация примесей вблизи дислокации увеличивает число носителей заряда и уменьшает эффективную толщину обедненного слоя, что приводит к локальному снижению напряжения пробоя. Такие локальные области пробоя получили название микроплазм. Ток, протекающий через каждую микроплазму, носит характер коротких импульсов, появляющихся и исчезающих в случайные моменты времени [1 – 3]. Это можно объяснить случайным характером захвата и выброса носителей заряда в области дефектов кристалла (дислокаций).

Наибольший интерес представляет режим частичного лавинного пробоя, когда светодиод пробит не полностью, но небольшой (шумовой) ток в виде импульсов через $p-n$ -переход уже течет. При дальнейшем увеличении напряжения амплитуда импульсов растет в зависимости от количества включаемых микроплазм, а близко расположенные импульсы сливаются, паузы между ними сокращаются. Это продолжается до тех пор, пока не начинает течь практически постоянный ток, т. е. пока светодиод не перейдет в режим развитого лавинного пробоя.

Поведение микроплазмы, согласно существующей модели [2], описывается четырьмя параметрами: напряжением пробоя U_{\max} , последовательным сопротивлением R_s и вероятностями включения и выключения микроплазмы в единицу времени – P_{01} и P_{10} . Первые два параметра определяются из ВАХ, а вероятностные параметры рассчитываются из экспериментальных данных по формулам

$$P_{01} = \frac{\nu I_0}{I_0 - \langle I_0 \rangle};$$

$$P_{10} = \frac{\nu I_0}{\langle I_0 \rangle},$$

где ν – частота микроплазменных импульсов; I_0 , $\langle I_0 \rangle$ – амплитудное и среднее значения импульсного тока соответственно [2].

При анализе экспериментальных данных было выявлено, что вероятность включения микроплазмы и вероятность ее выключения не могут быть рассчитаны точно. Невозможно измерить частоту случайных импульсов, а среднее значение импульсного тока не является в данном случае информативной величиной. Осциллограмма микроплазменного шума, полученная на сопротивлении нагрузки (1 кОм), включенном последовательно со светодиодом BL-L813URC (материал AlGaAs/AlGaAs (DH)), представлена на рис. 1, из которого видно, что интервалы времени между импульсами могут существенно отличаться друг от друга.

Длительности пауз между импульсами на данном фрагменте отличаются примерно в 20 раз. Известно, что вероятность выключения зависит от размеров микроплазмы (или нескольких микроплазм) и уменьшается с ростом приложенного напряжения [2]. Существует возможность рассчитать вероятности включения и выключения микроплазмы, однако ошибка такого расчета будет достаточно велика.

Из рис. 1 также видно, что шум от одной микроплазмы представляет собой не непрерывный, а дискретный сигнал.

Согласно модели шумов частичного и развитого лавинного пробоя, основанной

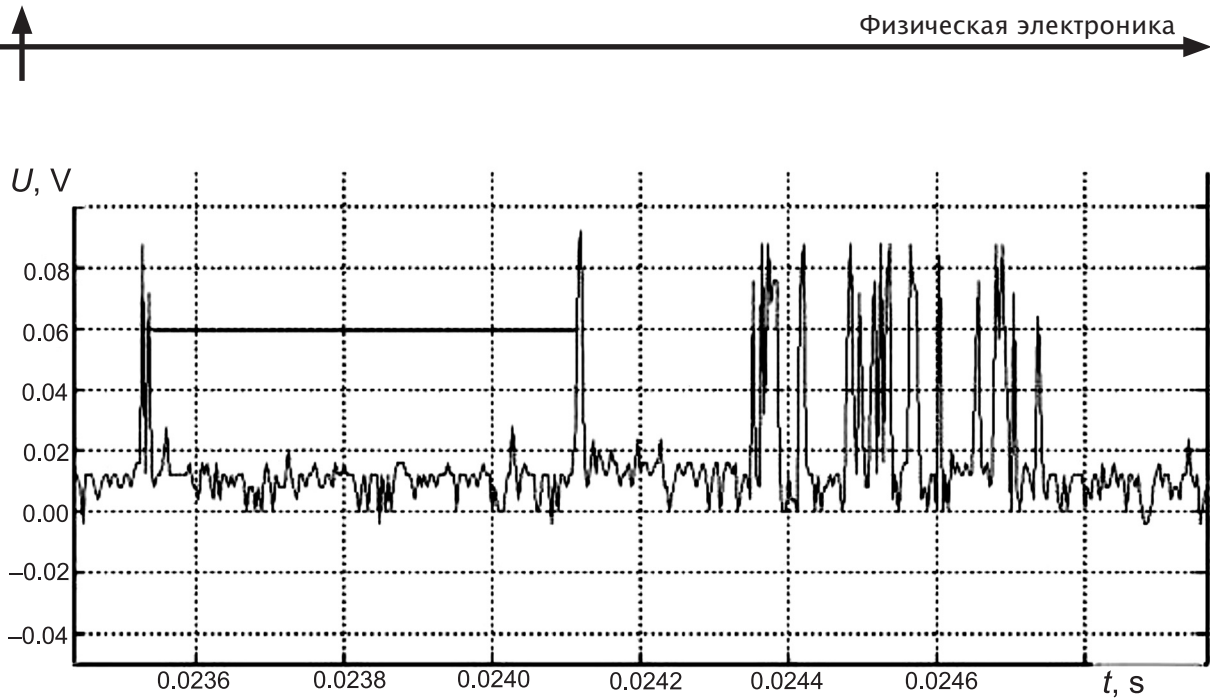


Рис. 1. Оциллограмма микроплазменного шума, полученная на сопротивлении нагрузки, включенном последовательно со светодиодом BL-L813URC. Длительности пауз между импульсами различны (выделена первая пауза)

на формуле Тагера и описанной в работах [4, 5], спектр шума лавинообразования определяется как

$$\langle i_{av}^2 \rangle_f = \frac{2q_e M^2 I}{1 + (f/f_{av})^2},$$

где q_e – заряд электрона; M – коэффициент лавинного умножения носителей; f_{av} – частота лавинообразования; I , f – мгновенные значения тока и частоты соответственно.

Выведем суть данных параметров применительно к промышленным светодиодам.

Коэффициент лавинного умножения при частичном лавинном пробое является постоянной величиной, т. е. $M = \text{const}$. Если $M \rightarrow \infty$, то происходит полный лавинный пробой образца, который может перейти в тепловой и привести к разрушению кристалла. В нашем случае речь идет о частичном пробое. Коэффициент лавинного умножения прямо связан с коэффициентом ионизации носителей заряда α , который равен числу электронно-дырочных пар, образуемых носителем заряда на единице пути в направлении электрического поля [5]:

$$M = \frac{1}{1 - \alpha L},$$

где L – длина однородного полупроводникового образца.

Для того чтобы определить величину коэффициента лавинного умножения, необходимо знать конкретные параметры p - n -перехода: площадь, концентрации примесей, профиль легирования, ширину области пространственного заряда (ОПЗ) при конкретной величине напряженности электрического поля и т. п. [1] Эти данные для промышленных электронных компонентов отсутствуют. Известны лишь аппроксимирующие выражения для коэффициентов ионизации и коэффициентов лавинного умножения, содержащие подгоночные параметры, которые близки к экспериментальным зависимостям для кремниевых и германиевых p - n -переходов [2, 4, 5]. Современные же светодиоды изготавливаются из более сложных материалов на основе гетеропереходов.

Вернемся к определению спектра шума лавинного пробоя. Частота лавинообразования определяется как

$$f_{av} = \frac{1}{2\pi(M-1)\frac{\tau}{2}}.$$

Величина $\tau/2$ определяет характерное время лавинообразования, равное полови-

не времени пролета носителей через ОПЗ $p-n$ -перехода. Эта величина также неизвестна. Ранее было отмечено, что частоту микроплазменных импульсов измерить невозможно. Следовательно, не представляется возможным и непосредственное измерение частоты лавинообразования.

Спектры мощности

Сравним спектры мощности сигналов, которые задает модель микроплазменного пробоя $p-n$ -перехода [2, 4, 5], и спектры, полученные в нашем эксперименте. Согласно теоретическим представлениям, длительности импульсов и пауз между импульсами случайны и подчиняются экспоненциальному распределению. Средняя частота импульсов, наблюдаемых при комнатной температуре, обычно составляет 10 – 100 кГц. Спектр такого сигнала представлен на рис. 2. Первый участок имеет форму плато и напоминает белый шум. На частотах, близких к 10^5 кГц, спектральная плотность распределяется по закону $f^{-\gamma}$ при $\gamma > 1$.

Однако спектр микроплазменного шума, полученного нами от светодиода марки АЛ1102АМ, имеет иной вид (рис. 3). Белый шум наблюдается на существенно более коротком участке до 1 кГц. Второй и третий участки соответствуют зависимостям $f^{-\gamma}$ с разными показателями: $\gamma_2 > \gamma_3$.

Отличается от теоретического и полученный нами вид эмпирических распределений плотности вероятности (гистограмм плотности вероятности) длительности интервалов между импульсами (рис. 4). В первом случае, исходя из существующих представлений [2, 4, 5], по результатам математического моделирования с использованием математического генератора случайных чисел строилась гистограмма. Во втором случае учитывалось количество временных интервалов n между импульсами микроплазменного шума, лежащих в соответствующих диапазонах по оси абсцисс: от $X(i)$ до $X(i) + dt$.

Все эти признаки указывают на то, что существующая модель процессов, протекающих в ходе частичного лавинного пробоя

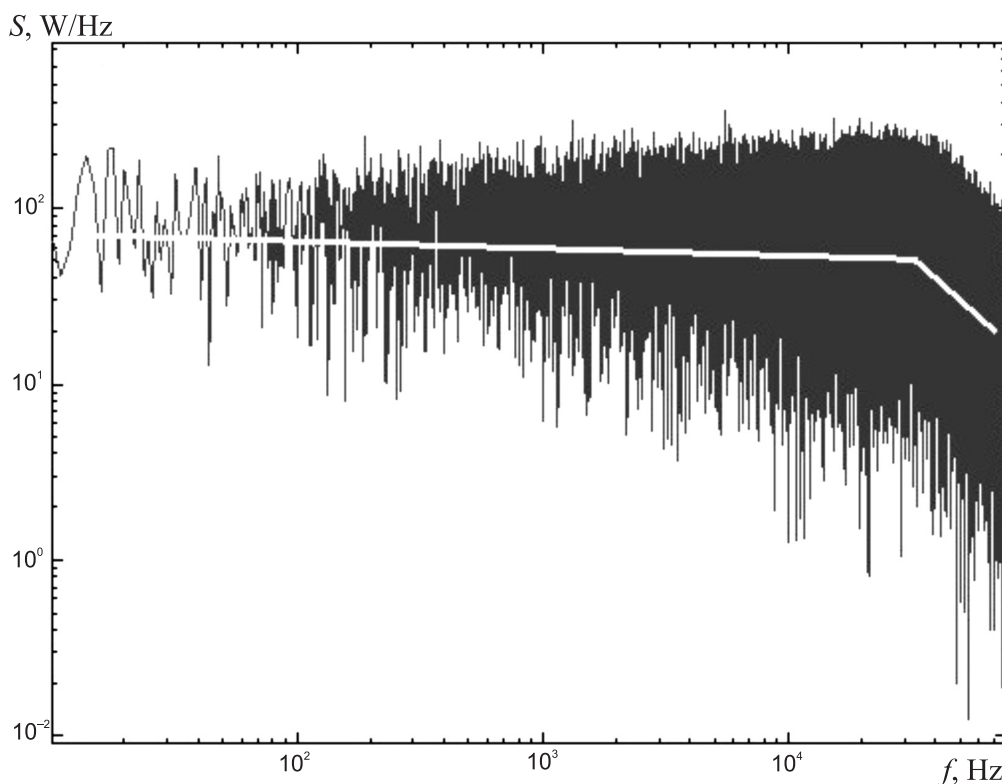


Рис. 2. Вид теоретического спектра микроплазменных импульсов

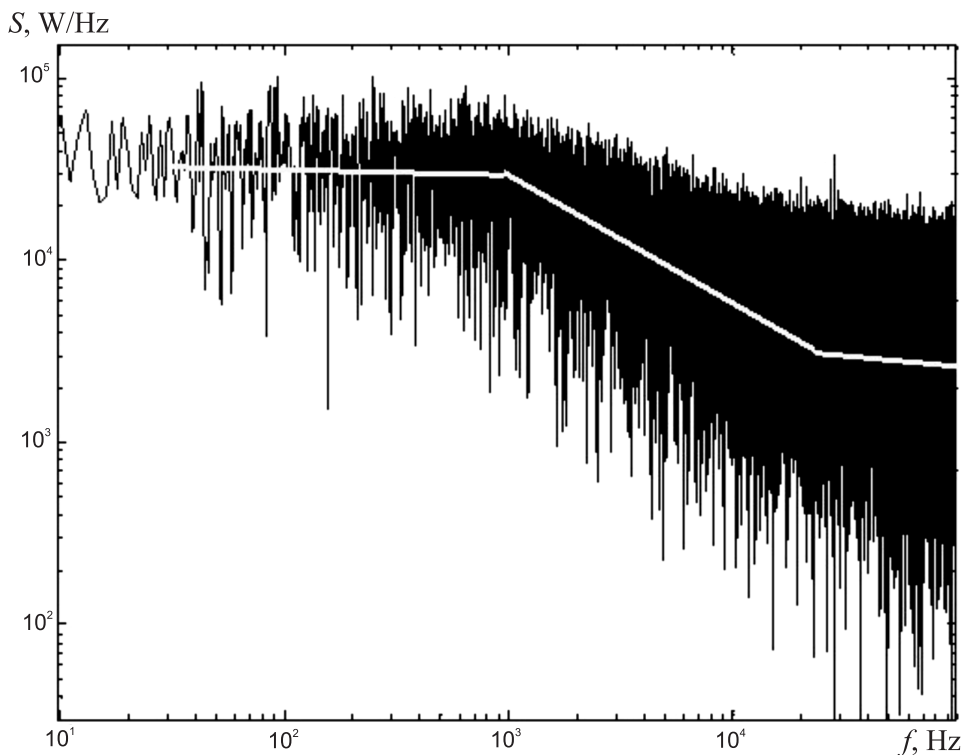


Рис. 3. Экспериментально полученный спектр микроплазменного шума промышленно выпускаемого светодиода марки АЛ1102АМ

$p-n$ -перехода, неприменима к промышленным образцам светодиодов.

Кроме того, практически все современные светодиоды создаются на основе гетероструктур или структур с квантовыми ямами. Поведение гетероструктур в случае приложения обратного напряжения имеет особенности по сравнению с гомогенными переходами [6]:

1. Концентрация носителей в активной области двойных гетероструктур намного превышает их концентрацию в гомогенных переходах.

2. Кристаллические структуры и постоянные решеток гетеропереходов почти одинаковы, однако их параметры не согласованы.

В силу первой из приведенных особенностей активную область обычно сильно не легируют [6]. Пониженные концентрации легирующих примесей ведут к уменьшению числа дефектов. Следовательно, по сравнению с гомогенными, локальных областей пробоя в гетероструктурах должно быть меньше.

Несоответствие параметров (вторая особенность) приводит к дислокациям несоответствия или оборванным связям, т. е. к дефектам, что увеличивает вероятность локального пробоя.

Какой из двух конкурирующих факторов будет преобладать, определяется материалом, из которого изготовлен светодиод. Но нами экспериментально установлено, что светодиоды на основе гетеропереходов AlGaAs/AlGaAs и AlInGaP/GaAs имеют напряжение пробоя выше, чем на основе гомогенных переходов (GaP:N – фосфид галлия, легированный азотом). Таким образом, в этом случае наиболее существенна первая особенность.

С целью исследования процессов, происходящих в обратносмещенном светодиоде, была сконструирована специальная установка, и в результате проведения измерений и анализа полученных данных сделаны следующие заключения [3]:

длительность интервалов между импульсами отличается в несколько десятков раз и имеет случайный характер;

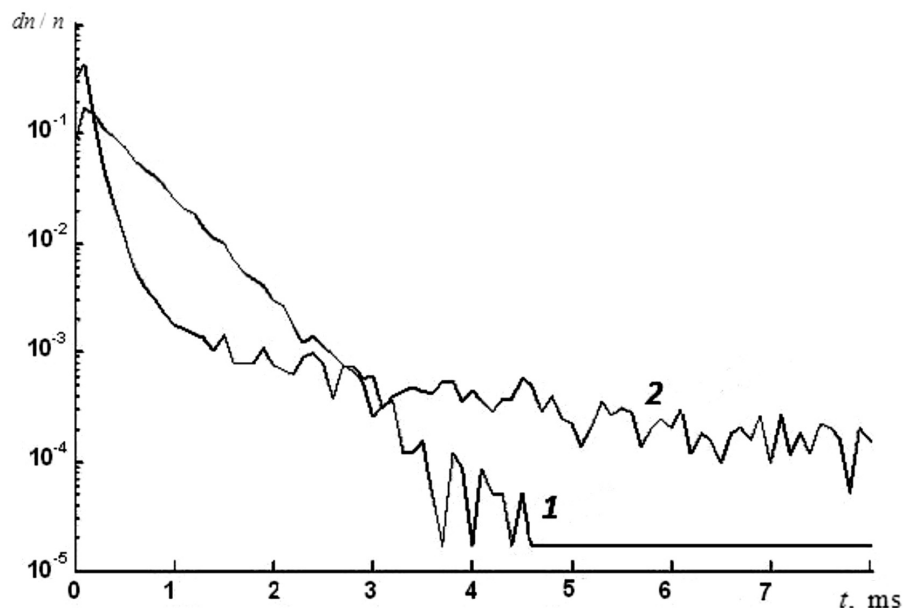


Рис. 4. Модельная (1) и экспериментально полученная (2) гистограммы плотности вероятности длительности интервалов между импульсами

ряды импульсов обладают свойством фрактальности.

Фрактальные свойства микроплазменного шума

Фракталами называют объекты, имеющие нерегулярную структуру и обладающие свойством самоподобия. Характерным проявлением самоподобия является масштабная инвариантность, т. е. неизменность структуры (формы) объекта при изменении масштаба фрагментов.

Фрактальность бывает пространственной и временной. Фрактальные временные ряды возникают, в частности, при измерениях различных естественных процессов: солнечной активности, уровней разлива рек, шумов электронных приборов, геофизической и геомагнитной активности, физиологических характеристик организма человека и т. п.

В качестве критерия оценки фрактальности исследуемого временного ряда нами было выбрано вычисление фрактальной размерности типа Хаусдорфа [7].

В среде Matlab был реализован специально разработанный алгоритм вычисления фрактальной размерности D по формуле

$$D = \lim_{dT \rightarrow 0} \frac{\ln i}{\ln \left(\frac{1}{dT} \right)},$$

где dT — длина вычлняемого отрезка исследуемого временного ряда, i — количество итераций.

По полученным значениям D построены соответствующие кривые для различных значений обратного напряжения (рис. 5). В таблице указаны значения обратного напряжения и соответствующие величины рассчитанной фрактальной размерности, соответствующие кривым на рис. 5.

На фрактальные свойства микроплазменного шума указывал и характер спектра, представленного на рис. 3. Фрактальная размерность D связана с показателем γ через скейлинговый параметр или постоянную Херста [8, 9]. На первом участке спектра на рис. 3 частота следования импульсов меньше, чем на остальных, $D \rightarrow 0$. На третьем участке частота велика, частичный пробой вырождается в полный лавинный пробой, $D \rightarrow 1$. На втором участке спектра величина $0 < D < 1$ и является пригодной для использования в приложениях.

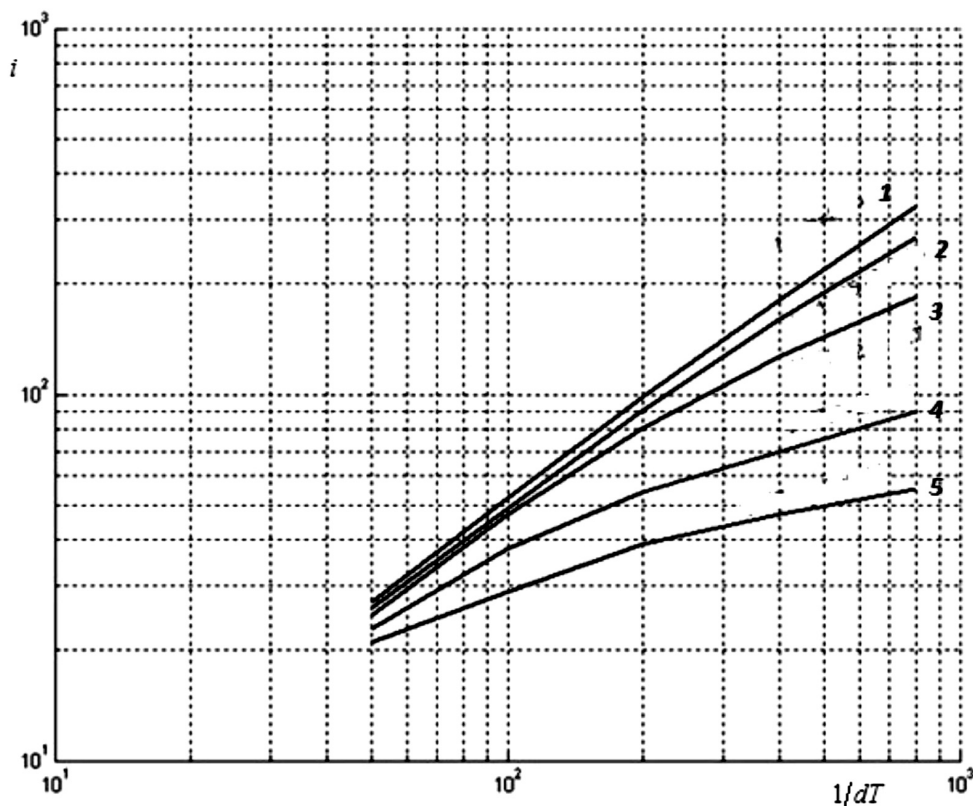


Рис. 5. Кривые фрактальной размерности для различных значений обратного напряжения (соответствующие параметры приведены в таблице)

Таблица
Результаты оценки фрактальности микроплазменного шума (см. рис. 5)

Номер кривой на рис. 5	V_{res} , В	D
1	17,40	0,85
2	17,35	0,78
3	17,32	0,72
4	17,30	0,54
5	17,25	0,44

Обозначения: V_{res} — обратное напряжение, D — фрактальная размерность

Таким образом, установлено, что микроплазменный шум обладает фрактальными свойствами, степень выраженности которых зависит от обратного напряжения [3].

Выводы

В настоящей работе проведен анализ существующей модели процессов, про-

текающих в ходе частичного лавинного пробоя $p-n$ -перехода в кремнии. Установлено, что данные, полученные в результате наших экспериментов, не описываются этой моделью. Обнаруженные фрактальные свойства микроплазменного шума позволят объяснить характеристики пробоя реальных образцов светодиодов и откорректировать существующую модель лавинного пробоя $p-n$ -переходов. Полученные результаты служат основанием для проведения дальнейших исследований.

В настоящее время фрактальные сигналы уже применяются в различных областях науки и техники, например в радиоизмерительной аппаратуре и в радиосистемах различного назначения. Предполагаемая область применения фрактального сигнала, полученного с помощью обратносмещенного светодиода, — это системы связи, в которых этот сигнал можно использовать для помехозащищенной конфиденциальной передачи сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Лебедев А.И.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Физмалит, 2008. 488 с.
- [2] **Грехов И.В., Сережкин Ю.Н.** Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980. 152 с.
- [3] **Воротков М.В., Скворцов Н.Н., Шашкина А.С.** Фрактальные свойства микроплазменного шума // Инновационные технологии в медиа-образовании. Материалы III Всерос. научно-практ. конф. 27–28 марта 2015. Вып. 3. СПб.: СПбГИКиТ, 2015. С. 65–71.
- [4] **Тагер А.С.** Лавинно-пролетный диод и его применение в технике СВЧ // Успехи физических наук. 1966. Т. 90. Вып. 12. С. 631–666.
- [5] **Якимов А.В.** Физика шумов и флуктуаций параметров. Эл. уч. пос. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. 85 с.
- [6] **Шуберт Ф.** Светодиоды. 2-е изд. М.: Физмалит, 2008. 496 с.
- [7] **Федер Е.** Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
- [8] **Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В.** Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования. Уч. пос. М.: Изд-во Моск. ун-та, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, 2004. 82 с.
- [9] **Хандурин А.В.** Сигналы с аддитивной фрактальной структурой. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2011. 216 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШАШКИНА Антонина Сергеевна – аспирантка кафедры радиотехники и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения.

191119, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Правды, 13.
shashkinaas@ya.ru

КРИВОШЕЙКИН Анатолий Валентинович – доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения.

191119, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Правды, 13.
krivav@ya.ru

СКВОРЦОВ Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры математики и физики Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения.

191119, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Правды, 13.
nnskvo@gmail.com

ВОРОТКОВ Михаил Владимирович – ведущий инженер лаборатории геодинамики Главной (Пулковская) астрономической обсерватории РАН.

196140, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65
biser_gao@mail.ru

Shashkina A.S., Krivosheikin A.V., Skvortsov N.N., Vorotkov M.V. FRACTAL PROPERTIES OF THE LED AVALANCHE BREAKDOWN.

The conventional model of processes occurring in the course of $p-n$ -junction's partial avalanche breakdown has been analyzed in this paper. Microplasma noise spectra of industrially produced LEDs were compared with those predicted by the model. The data obtained experimentally on the reverse-biased LEDs were established not to be described in terms of this model. The degree of pronouncedness of fractal properties was shown to be variable by changing the reverse voltage. Discovered fractal properties of microplasma noise can serve as the basis for further studies which are bound to explain the breakdown characteristics of real LEDs and to correct the conventional model of $p-n$ -junction's avalanche breakdown.

AVALANCHE BREAKDOWN, MICROPLASMA; $p-n$ -JUNCTION; FRACTAL, LED.

REFERENCES

- [1] **A.I. Lebedev**, Fizika poluprovodnikovykh priborov [Physics of semiconductor devices], Fizmalit, Moscow, 2008.
- [2] **I.V. Grekhov, Yu.N. Serezhkin**, Lavinnyy proboy $p-n$ -perekhoda v poluprovodnikakh [$p-n$ -junction avalanche breakdown in semiconductors], Leningrad, Energiya, 1980.
- [3] **M.V. Vorotkov, N.N. Skvortsov, A.S. Shashkina**, Fraktalnyye svoystva mikroplazmennogo shuma [Fractal properties of microplasma noise], Innovatsionnyye tekhnologii v mediaobrazovanii, Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 2015, March, 27-28, Iss. 3, St. Petersburg, SPbGKIIT, 2015.
- [4] **A.S. Tager**, Lavinno-proletnyy diod i yego primeneniye v tekhnike SVCh [Avalanche transit time diode and its application in microwave technology], Uspekhi fizicheskikh nauk. 90(12) (1966) 631–666.
- [5] **A.V. Yakimov**, Fizika шумов i fluktuatsiy parametrov [Physics of noises and parameter fluctuations]: Elektronnoye uchebnoye posobiye. Nizhniy Novgorod, Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2013.
- [6] **F. Schubert**, Light-emitting diodes, 2nd ed., Cambridge University Press, 2006.
- [7] **J. Feder**, Fraktals, Plenum Press, New York&London, 1988.
- [8] **P.V. Korolenko, M.S. Maganova, A.V. Mesnyankin**, Novatsionnyye metody analiza stokhasticheskikh protsessov i struktur v optike. Fraktalnyye i multifraktalnyye metody, veyvlet-preobrazovaniya [Novation methods of analyzing the stochastic processes and structures in optics. Fractal and multi-fractal methods, wavelet transformations], Uchebnoye posobiye, Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, Nauchno-issledovatel'skiy institut yadernoy fiziki im. D.V. Skobel'syna, 2004.
- [9] **A.V. Khandurin**, Signaly s additivnoy fraktalnoy strukturoy [Signals with additive fractal structure], Diss. ... kand. tekhn. nauk, Moscow, MEI, 2011.

THE AUTHORS

SHASHKINA Antonina S.

St. Petersburg State University of Film and Television
13 Pravdy St., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
shashkinaas@ya.ru

KRIVOSHEIKIN Anatoliy V.

St. Petersburg State University of Film and Television
13 Pravdy St., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
krivav@ya.ru

SKVORTSOV Nicolay N.

St. Petersburg State University of Film and Television
13 Pravdy St., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
nnskvo@gmail.com

VOROTKOV Mikhail V.

*The Central Astronomical Observatory
of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo*
65 Pulkovskoye HWY, St. Petersburg, 196140, Russian Federation
biser_gao@mail.ru