

УДК 621.382.088

СТОЙКОСТЬ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ПРИБОРА К ВОЗДЕЙСТВИЮ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Л. Веснин¹, В. А. Сергеев^{1,2}, А. М. Ходаков¹, И. В. Фролов¹

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова д.48/2

²Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

Статья поступила в редакцию 2 августа 2018 г.

Аннотация. Рассматривается методика и схема экспериментальной установки для проведения исследований стойкости современных гетеропереходных светоизлучающих полупроводниковых приборов к воздействию интенсивного СВЧ излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения оптической мощности современных InGaN/GaN светоизлучающих диодов в результате воздействия СВЧ излучения, выполненных на установке, включающей в себя генератор квазинепрерывных СВЧ колебаний.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, СВЧ излучение, СВЧ тракт, импульсный модулятор, снижение оптической мощности.

Abstract. The purpose of the work was to develop a scheme for the experimental setup and the methodology for conducting studies to assess the stability of modern heterojunction light-emitting semiconductor devices to the effect of intense microwave radiation. A quantitative evaluation of the device's resistance to external microwave radiation was made based on the values of the minimum power density of the external electromagnetic field, under which either a decrease in the quality of the device's functioning occurs or the device becomes inoperable. The installation scheme was developed taking into account the results of computational studies of the influence of the irradiation time and the pulse parameters (duration, frequency) on the temperature regime of the heterojunction light-emitting structure, obtained using the previously developed thermoelectric model. A project of an experimental setup for

studying the effect of high-power microwave radiation on the characteristics of a heterojunction light-emitting structure, possible modulator circuits for a three-centimeter pulsed magnetron and a microwave path is presented. Preliminary estimates of the durability of devices with heterojunction light-emitting structures (modern LEDs were chosen) to the effect of intense electromagnetic radiation were carried out in an experimental setup that included a generator of quasi-continuous high-frequency oscillations. Dependences of the decrease in the radiation power of modern LEDs on the number of cycles of exposure to microwave radiation measured at different currents are obtained.

Key words: light-emitting diode, microwave power, microwave path, pulse modulator, reduction of the optical power.

1. Введение

При воздействии мощных импульсов СВЧ излучения на гетеропереходный светоизлучающий полупроводниковый прибор (ГСП) основной причиной его деградации либо катастрофического отказа является тепловое поражение элементов структуры [1–5]. Под действием электрического тока и внешнего электромагнитного поля (ЭМП) в гетероструктуре происходят необратимые микроскопические изменения: перераспределение примеси; движение центров рекомбинации, вакансий и дислокаций; разрушение материалов контактных соединений и т. п. Повышение стойкости ГСП к воздействию СВЧ излучения становится особенно актуальным в связи с последними разработками мощных источников электромагнитного излучения. Критерием стойкости полупроводникового прибора с гетеропереходной светоизлучающей структурой к СВЧ излучению является качество его функционирования.

В соответствии со стандартом [1] полупроводниковый прибор в результате воздействия на него электромагнитного излучения может находиться в одном из следующих состояний: А – нормальное функционирование в соответствии с установленными требованиями; В – временное ухудшение или потеря функции или работоспособности с самовосстановлением; С – временное ухудшение или

потеря функции или работоспособности, которые требуют вмешательства оператора или перезапуска системы; D – ухудшение или потеря функции, которая не может быть восстановлена из-за повреждения оборудования (компонентов) или программного обеспечения, или потери данных.

Требования по стойкости ГСП к электромагнитному излучению должны учитываться при конструировании приборов с гетеропереходной светоизлучающей структурой. Обычно количественная оценка стойкости ГСП производится исходя из величины минимального значения плотности мощности (плотности энергии) внешнего электромагнитного поля, при которой происходит снижение качества функционирования или потеря функций работоспособности прибора в результате его повреждения внешним ЭМП [2].

Анализ исследований по рассматриваемому вопросу показал [3–5], что еще недостаточно изучены механизмы воздействия на ГСП импульса мощного СВЧ излучения, отсутствуют методики и экспериментальные данные, позволяющие установить какие-либо функциональные зависимости и оценить области параметров излучения, при которых обеспечивается работоспособность прибора в целом. Поэтому является необходимым проведение экспериментальных исследований стойкости приборов с гетеропереходной светоизлучающей структурой, при воздействии на них интенсивного ЭМП. Целью настоящей работы является разработка схемы экспериментальной установки и методики для проведения исследований по оценке стойкости современных ГСП к воздействию интенсивного излучения СВЧ излучения, с учетом ранее полученных с помощью теплоэлектрического моделирования [2, 3] результатов расчетных исследований влияния времени облучения и параметров импульса (длительности, частоты) на температурный режим гетеропереходной светоизлучающей структуры.

2. Проект экспериментальной установки для исследования влияния СВЧ излучения на характеристики ГСП

Экспериментальную установку для исследования стойкости ГСП к воздействию интенсивного излучения СВЧ излучения целесообразно создавать

на основе импульсного магнетрона трёхсантиметрового диапазона. Предполагается, что минимальная длительность генерируемого установкой радиоимпульса составит 100 нс, максимальная – порядка 1 мкс. При работе в периодическом режиме скважность будет составлять порядка 1000...10000. Возможна также генерация одиночных импульсов. Возможность реализации генерации пачки из нескольких или из нескольких десятков импульсов, разделённых паузами, требует проведения дополнительных оценок, а также экспериментальных исследований на готовой установке. С большой вероятностью можно предполагать, что такой режим окажется легко реализуемым, если суммарная длительность импульсов в пачке не превысит 1...2 мкс, а частота следования пачек будет не более десятков герц. Возможность реализации такого режима при более жёстких условиях пока не очевидна. Большинство импульсных магнетронов обеспечивают минимальную длительность импульса порядка 500 нс и более. Таким образом, особым требованием к применяемому в этой установке магнетрону является возможность генерации импульсов с длительностью порядка 100 нс (и, желательно, несколько менее – для обеспечения запаса по быстродействию).

В настоящее время существуют два типа магнетронов – «классические» магнетроны с накаливаемым термоэмиссионным катодом и безнакальные магнетроны. Магнетроны с термоэмиссионным катодом дешевле, однако, накальный трансформатор для таких магнетронов должен выдерживать межобмоточное напряжение, равное полному напряжению питания магнетрона (плюс необходимый запас электрической прочности). Это требование обусловлено тем, что магнетрон должен работать с заземлённым анодным блоком и, как следствие, отрицательное высокое напряжение должно быть подано на катод. К тому же накальные цепи усложнят конструкцию и, как следствие, приведут к некоторому увеличению индуктивности разрядного контура (накопительный конденсатор – модуляторная лампа – магнетрон), что затруднит получение коротких импульсов питающего напряжения с «крутыми» фронтами. Также накальные цепи (несмотря на то, что цепи накала будут

«развязаны» высокочастотными дросселями) могут внести некоторую паразитную ёмкость, что также негативно скажется на быстродействии.

Таким образом, хотя реализация подобной экспериментальной установки на основе магнетрона с термоэмиссионным катодом возможна, такую схему нельзя признать наиболее оптимальной. Более оптимальным представляется применение в такой установке безнакального магнетрона. Практически единственным недостатком безнакального магнетрона является его более высокая цена. В качестве предлагаемых к использованию магнетронов можно рассмотреть следующие:

Магнетрон с термоэмиссионным катодом МИ-296Б

Диапазон частот	9,405-9,455 ГГц
Выходная мощность	16 кВт
Напряжение накала	5,3-6,3 В
Ток накала	1,4-1,6 А
Напряжение анода	6,8-7,5 кВ
КСВН, не более	1,1
Длительность импульса	0,05-1,0 мкс
Масса	1,55 кг

Безнакальный магнетрон МИ-454

Диапазон частот	9,40-9,46 ГГц
Выходная мощность	12,5 кВт
Напряжение анода	5,7-7,2 кВ
Ток анода	4,5-5,5-6,5 А
Время готовности	< 0,5 с
Скважность	> 500
КСВН	< 1,35
Длительность импульса	0,05-1,0 мкс
Долговечность	2000 ч
Габариты	68x75x107 мм
Масса	1,2 кг

Возможная схема модулятора для магнетрона представлена на рисунке 1.

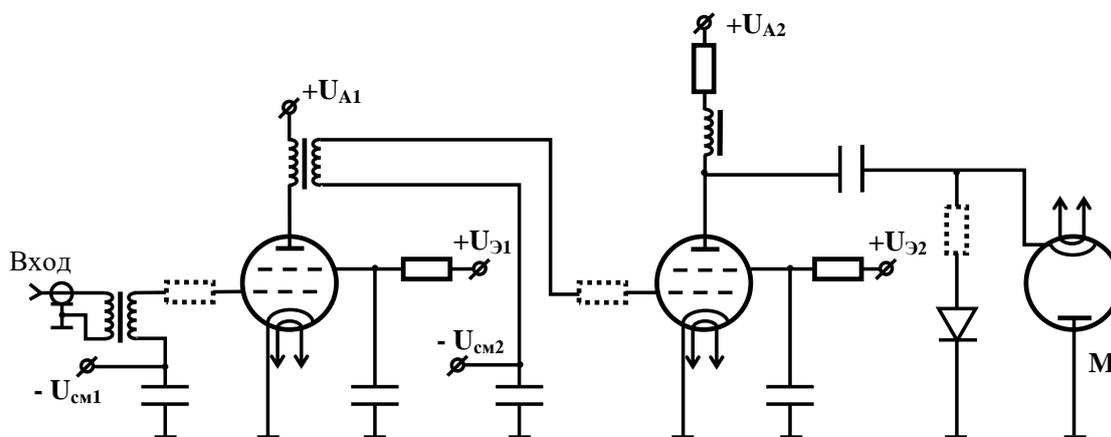


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного модулятора

В качестве модуляторной лампы может быть использована лампа ГМИ-5, однако, целесообразнее ориентироваться на применение более современной и

более мощной лампы ГМИ-24Б. Следует отметить, что обе эти лампы предназначены для работы при длительности импульса 1...5 мкс. Возможность обеспечения с их помощью импульса длительностью 100 нс с длительностью фронта менее 10 нс не очевидна; требуется проведение экспериментальных исследований. Тип лампы для предварительного каскада модулятора предполагается выбрать после проведения этих экспериментов. При этом не исключается возможность применения транзисторного предварительного каскада. При возникновении необходимости повышения мощности радиоимпульса до сотен киловатт, при создании модулятора имеет смысл ориентироваться на применение существенно более мощной лампы ГМИ-14Б. Если же мощность порядка 10 кВт представляется достаточной даже в перспективе, то ориентироваться на применение столь мощной лампы нецелесообразно.

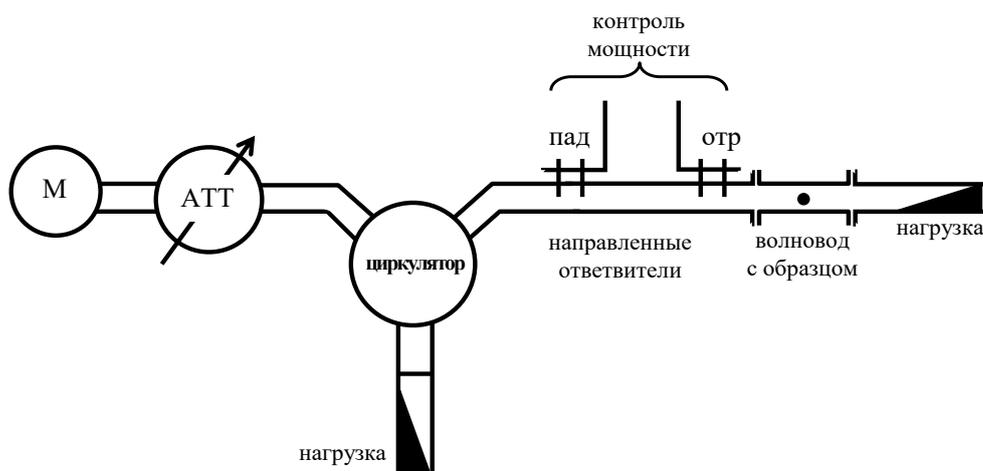


Рис. 2. Схема СВЧ тракта установки

Исследуемые ГСП предполагается размещать непосредственно в волноводе, что позволит реализовать большую плотность мощности СВЧ излучения, но ограничивает размеры испытываемых микросэлектронных изделий (порядка 1 см). При необходимости исследования более крупногабаритных изделий необходимо будет обеспечить излучение электромагнитной волны из волновода в свободное пространство. На основе описанного выше генератора может быть создана экспериментальная

установка, аналогичная описанной в работе [6]. Плотность мощности СВЧ излучения в этом случае будет существенно ниже, однако, ограничения на размеры испытываемых приборов уже не будут обуславливаться размерами волновода.

3. Экспериментальная установка с квазинепрерывным СВЧ излучением

Описанная в предыдущем разделе экспериментальная установка требует значительных финансовых затрат, поэтому необходимость в более дешевых установках, с одновременным сохранением идентичности получаемых результатов, приводит к поиску других средств для проведения испытаний, одним из которых является экспериментальная установка с квазинепрерывным излучением. Предварительные оценки стойкости приборов с гетеропереходными светоизлучающими структурами, в качестве которых были выбраны современные светодиоды, к воздействию интенсивного СВЧ излучения были проведены на экспериментальной установке (рис. 3), которая включала в себя генератор квазинепрерывных высокочастотных колебаний Г, волноводный тракт с измерительной ячейкой ИЯ и антенну А, излучающая прошедшую через измерительную ячейку электромагнитную волну в пространство и создающую в волноводном тракте режим, близкий к режиму бегущей волны.

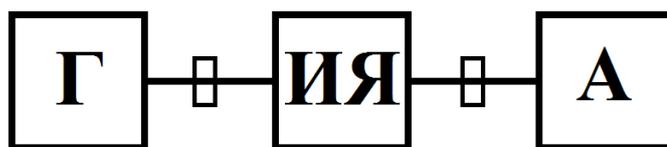


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

В генераторе высокочастотных колебаний в качестве генераторного элемента используется магнетрон, работающий на частоте 2,45 ГГц с выходной мощностью 600 Вт. Волноводный тракт реализован на прямоугольном волноводе размером 94 x 49 мм.

Измерительная ячейка (рис. 4) включает отрезок прямоугольного волновода со вставкой из пенополистирола – *1*, на которой закрепляется

исследуемый светодиод (СИД) – 2. Прибор может быть ориентирован в любом заданном положении на любом заданном расстоянии от стенок волновода.

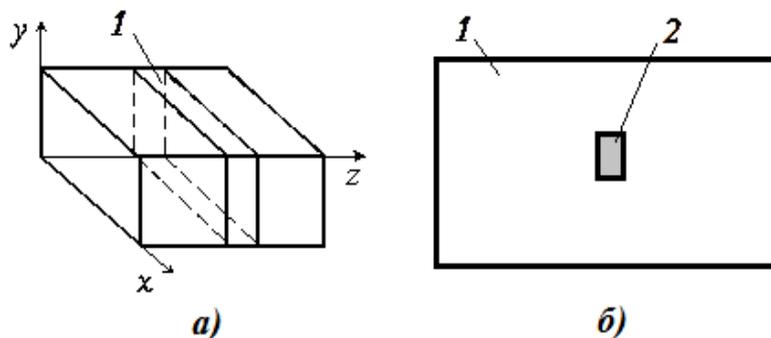


Рис. 4. Конструкция измерительной ячейки: а – расположение вставки 1 в волноводе; б – расположение исследуемого СИД 2 на вставке 1

Антенна для более эффективного излучения состоит из двух антенн: антенны вытекающей волны и открытого конца волновода с элементами рупорного типа, обеспечивающими лучшее согласование открытого конца волновода с пространством. Исследуемый СИД размещался на вставке из пенополистирола на одинаковом расстоянии как от верхней и нижней стенок, так и на одинаковом расстоянии от боковых стенок, то есть, в центре вставки. Таким образом, СИД располагался в максимуме напряженности электрического поля так, что линия, соединяющая его контакты, была ориентирована вдоль силовых линий электрического поля. Между контактами светодиода возникала разность потенциалов U , равная $U = E_0 \cdot l$, где l – расстояние между контактами СИД. Разность потенциалов между точками, соответствующими контактам изменялась в соответствии с изменением напряженности электрического поля, то есть, с частотой 2,45 ГГц.

4. Результаты экспериментальных исследований

При исследовании белого индикаторного СИД в чип-корпусе с рабочим током 20 мА максимальная разность потенциалов между точками, соответствующими внешним координатам контактов чип-диода, составляла 96 В. Время одной экспозиции составило 4 минуты.

При исследованиях мощного InGaN/GaN СИД типа Cree XREROY-L1-

0000-00801 с рабочим током 300 мА СИД ориентировался так, что его линза была повернута к источнику электромагнитной волны (магнетрону). Максимальная разность потенциалов между точками, соответствующими внешним координатам контактов диода 2 составляла 144 В, а время одной экспозиции 10 секунд. СИД подвергали нескольким циклам воздействия поля с проверкой характеристик после каждой экспозиции.

На рисунках 5 и 6 представлены изменение оптической мощности излучения исследованных СИД, измеренные при различных токах, в зависимости от числа циклов воздействия СВЧ-излучения.

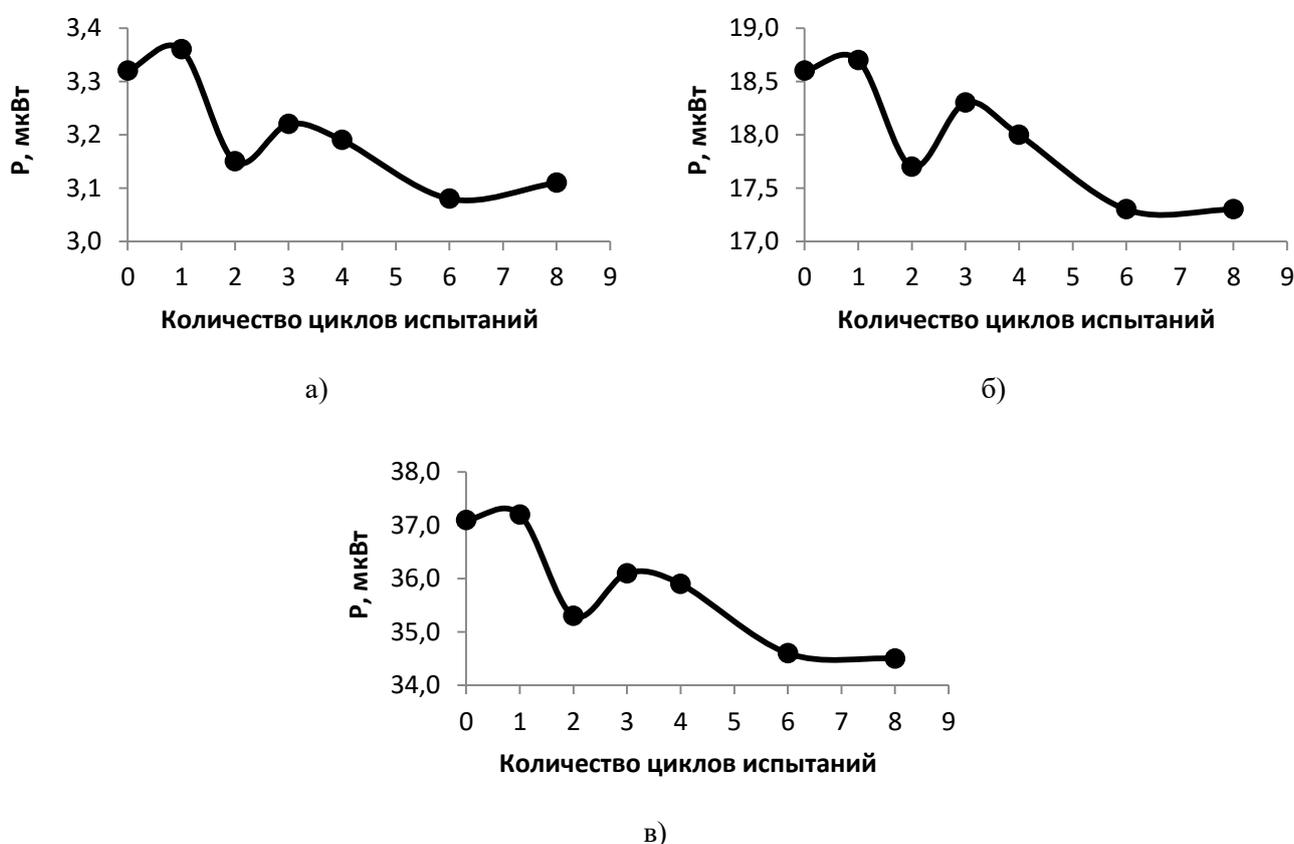


Рисунок 5. Зависимость мощности излучения белого СИД в чип-корпусе от количества циклов воздействия СВЧ излучения, измеренной при различных токах: а) 1 мА; б) 5 мА; в) 10 мА

Мощность излучения индикаторного СИД после первого цикла СВЧ-облучения незначительно возрастает (рис. 5), а затем спадает с ростом числа циклов воздействия, при всех исследованных токах и уменьшается примерно на 6 % от начального значения после 8 циклов воздействий. Такой характер измерения мощности излучения объясняется на наш взгляд ростом числа

дефектов в объемных слоях светоизлучающей гетероструктуры и увеличением числа центров безизлучательной рекомбинации под воздействием СВЧ-облучения.

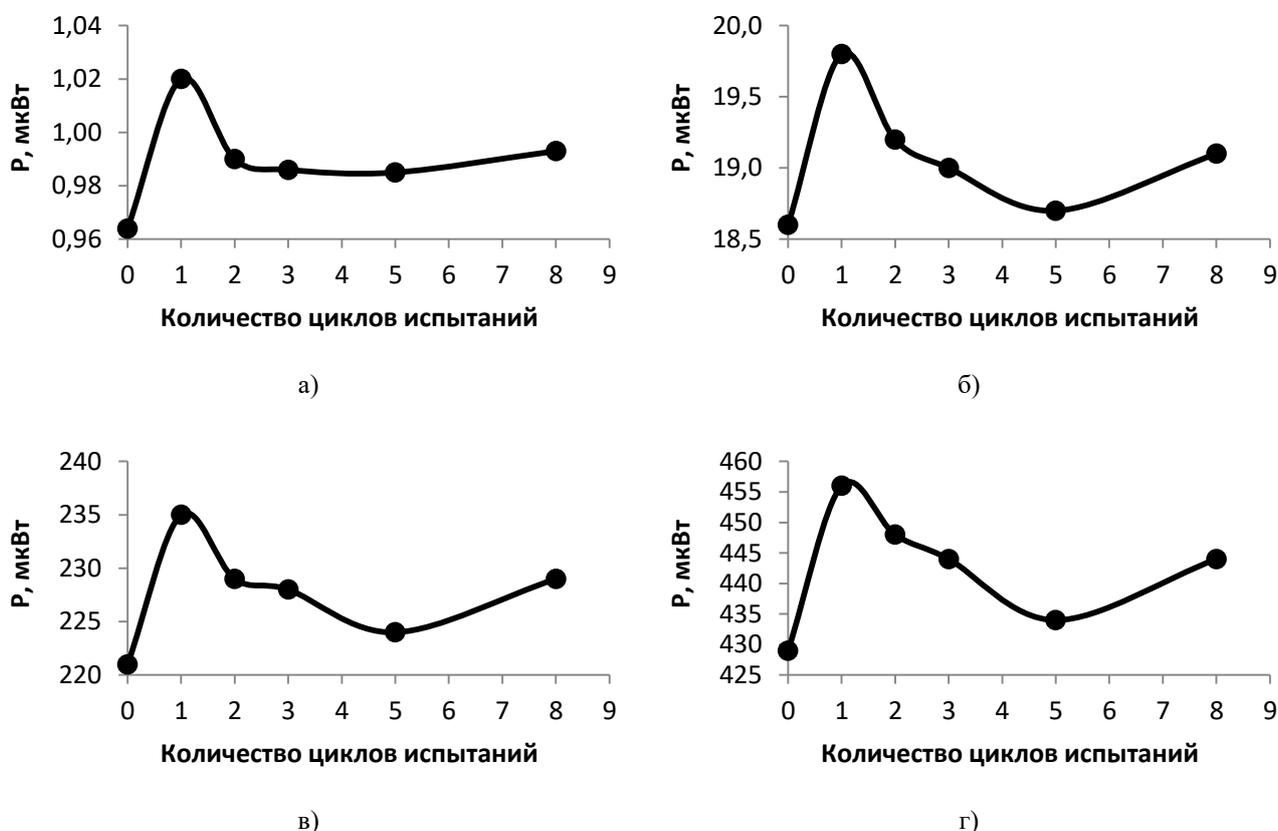


Рис. 6. Зависимость мощности излучения светодиода Cree XREROY-L1-0000-00801 от количества циклов испытаний на СВЧ воздействие, измеренной при различных токах: а) 1 мА; б) 10 мА; в) 100 мА; г) 200 мА

Изменение мощности излучения СИД типа Cree XREROY-L1-0000-00801 (рис. 6), измеренные при разных токах, с увеличением числа циклов СВЧ-воздействий до 5 имеет примерно такой же характер, как у маломощного индикаторного СИД. С дальнейшим с увеличением числа циклов СВЧ-воздействий наблюдается увеличение некоторой мощности излучения. Механизм этого увеличения требует дополнительных исследований.

Литература

1. ГОСТ Р 51317.4.4-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний. М: ГОССТАНДАРТ РОССИИ, 1999.

2. Ходаков А. М., Сергеев В. А. Оценка в рамках теплоэлектрической модели стойкости светодиода к воздействию периодической последовательности СВЧ импульсов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/7/text.pdf>
3. Ходаков А. М., Сергеев В. А., Гавриков А. А. Теплоэлектрические процессы в гетеропереходном светоизлучающем диоде при воздействии на него мощного импульсного СВЧ излучения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar17/6/text.pdf>
4. Усыченко В. Г., Сорокин Д. Н. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. М: Радиотехника 2017.
5. Демаков А. В., Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Обзор исследований в области разработки и применения реверберационных камер для испытаний на электромагнитную совместимость // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 151–190. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/09-Demakov.pdf>
6. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Исследование стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. // Радиотехника и электроника, 2011, том 56, № 3, с. 370–374.

Для цитирования:

В. Л. Веснин, В. А. Сергеев, А. М. Ходаков, И. В. Фролов. Стойкость гетеропереходного светоизлучающего прибора к воздействию СВЧ излучения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/20/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.20