

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СДВИГА СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ ПРИ ИХ ВКЛЮЧЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ФОТОПРИЕМНОЙ КМОП-МАТРИЦЫ

© 2021 г. В. А. Сергеев^{a,b,*,**}, А. В. Беринцев^c, С. Г. Новиков^c, И. В. Фролов^{a,b,**}

^a Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 432011, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

^b Ульяновский государственный технический университет
Россия, 432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

^c Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы
Ульяновского государственного университета
Россия, 432063, Ульяновск, Университетская набережная, 1, корпус 4

*e-mail: sva@ulstu.ru

**e-mail: ufire@mv.ru

Поступила в редакцию 01.07.2020 г.

После доработки 27.07.2020 г.

Принята к публикации 07.08.2020 г.

Исследована динамика температурной трансформации спектра излучения светодиодов с использованием режима “бегущего” затвора фотоприемной комплементарной металлооксидной полупроводниковой (КМОП) матрицы. Разработана установка для измерения параметров сдвига спектра светодиодов при их включении. В основе установки использована оптическая система спектрофотометра СФ-46 без выходной щели и с фокусирующей системой перед фотоприемной КМОП-матрицей SCMOS-00350KPA с фоточувствительной областью 480×640 пикселей и временем построчной регистрации 84 мкс. По быстродействию и разрешающей способности по длине волны (0.125 нм) установка существенно превосходит отечественные и зарубежные спектрометры IS3000-LED, Cary 100/300, Ocean Optic USB2000 и др. Экспериментально получены временные зависимости сдвига спектра красного SMD-светодиода FYLS-3528BURC в первые 40 мс после его включения при различных значениях рабочего тока. Полученные зависимости можно использовать для оценки тепловых параметров светодиодов.

DOI: 10.31857/S0032816221010122

ВВЕДЕНИЕ

По сдвигу спектра излучения светодиода или полупроводникового лазера после подачи тока накачки можно определить изменение температуры активной области светоизлучающей структуры [1–3] и оценить тепловые параметры светоизлучающего прибора.

Для исследования динамики изменения спектров оптического излучения в последнее время все чаще применяются многоэлементные фотоприемники на основе приборов с зарядовой связью и комплементарных металлооксидных полупроводниковых (КМОП) матриц [4, 5]. Современные спектрометры на основе многоэлементных фотоприемников (Cary 100/300, спектрометр IS3000-LED [6] и др.) имеют быстродействие порядка нескольких сотен миллисекунд, а разрешение по длине волны до 0.2 нм и не позволяют регистри-

ровать быстро изменяющиеся спектры излучения светоизлучающих приборов.

Для исследования динамики сдвига спектра излучения светодиодов при их включении разработана экспериментальная установка на основе оптической системы спектрофотометра СФ-46 без выходной щели и с дополнительной фокусирующей системой, расположенной перед фотоприемной КМОП-матрицей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В фотоприемных цифровых КМОП-камерах с “бегущим” затвором используется задержка считывания строк от начала записи кадра, при этом время задержки τ_{shift} однозначно связано с номером строки:

$$\tau_{shift} = \frac{N}{N-1} (\tau_{RST} + \tau_{px} M_{px}),$$

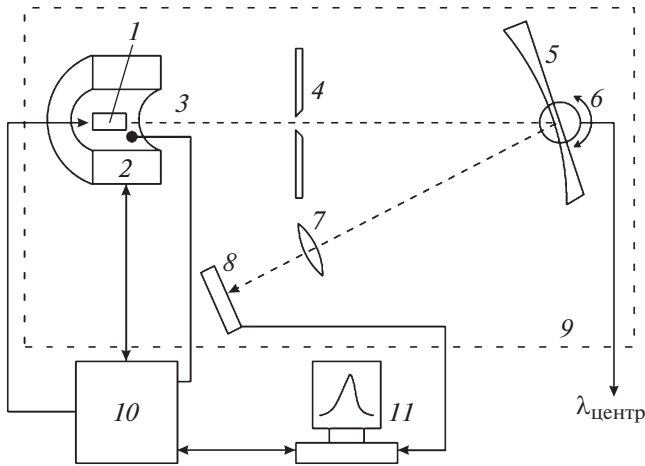


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения трансформации спектра излучения светодиода с помощью КМОП-матрицы. 1 – источник исследуемого излучения (светодиод); 2 – термостат; 3 – термопара; 4 – входная щель спектрофотометра; 5 – диспергирующая система; 6 – механическое поворотное устройство; 7 – фокусирующая система; 8 – фотоприемная КМОП-матрица; 9 – светонепроницаемый кожух; 10 – блок управления; 11 – компьютер.

где N – число строк в кадре; τ_{RST} – время сброса; τ_{px} – время считывания одного пикселя; M_{px} – количество пикселей в строке.

Существует круг задач, в которых необходимо, например, измерить одномерные распределения интенсивности оптического сигнала, и такое свойство КМОП-матриц, как временной сдвиг начала экспозиции строк, может оказаться полезным. Применение режима “бегущего” затвора КМОП-матриц позволяет использовать временную развертку для регистрации изменения спектра.

Этот эффект использован при исследовании переходных тепловых процессов в светодиодах по смещению спектра излучения [7]. Момент включения светодиода синхронизируют с началом считывания кадра, а изображения спектральных линий располагают перпендикулярно строкам КМОП-матрицы. В результате каждый пиксель матрицы изображения будет содержать информацию об интенсивности J излучения определенного спектрального участка в заданный момент времени:

$$J(y \rightarrow t, x \rightarrow \lambda),$$

где y – номер строки матрицы, t – время, x – номер столбца матрицы, λ – длина волны спектра.

Для матрицы IBIS5-B-1300 размером 1024×1280 пикселей типовое значение времени сдвига τ_{shift} равно 35.574 мкс, для камеры Cubeternet GL-UPC822 UVC – 61 мкс, а для Z-Star SCMOS-00350KPA – 84 мкс. Таким образом, с использованием режима “бегущего” затвора современных фотоприемных КМОП-матриц можно получить

графики изменения интенсивности различных спектральных составляющих излучения светодиода с высоким временным и спектральным разрешением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Структурная схема установки представлена на рис. 1. Установка состоит из источника 1 исследуемого излучения, размещенного внутри термостата 2. Температура в непосредственной близости от корпуса исследуемого светодиода измеряется с помощью термопары 3. Исследуемое излучение через прозрачное окно поступает на входную щель 4 и, далее, на диспергирующую систему 5, где происходит разложение светового потока в спектр. Положение центральной длины волны (максимума интенсивности излучения) на изображении спектра устанавливается механическим поворотным устройством 6.

Полученное спектральное распределение входного излучения через фокусирующую систему 7 формирует изображение на фотоприемной КМОП-матрице 8. Изображение спектра записывается и анализируется с помощью компьютера. Для исключения внешней засветки вся оптическая система помещена в светонепроницаемый кожух 9. Блок управления 10 по командам от персонального компьютера 11 задает ток или напряжение на светодиоде и поддерживает заданную температуру рабочей области. В установке использован поворотный механизм и часть оптической системы спектрофотометра СФ-46. Исследуемый светодиод фиксируется держателем в виде пинцета с изолированными игольчатыми контактами. Провода контактов выведены через теплоизоляционную пробку и подключены к блоку управления. Пробка плотно устанавливается в нагревательном элементе и дополнительно фиксируется прижимом.

Нагреватель позволяет верифицировать результаты измерений при различных значениях начальной температуры. Он изготовлен из двух алюминиевых цилиндров различного диаметра, между цилиндрами на изоляторах намотана нихромовая спираль и проложен теплоизоляционный материал. Выходное отверстие нагревателя закрыто кварцевым стеклом толщиной 1 мм.

Поворотный механизм дифракционной решетки позволяет установить положение центральной длины волны спектра и направить световой поток на фотоприемник через фокусирующую систему. Фокусирующая система состоит из коллиматора и длиннофокусного объектива и обеспечивает фокусировку изображения спектра входного излучения на фоточувствительную область КМОП-матрицы. Последняя представляет

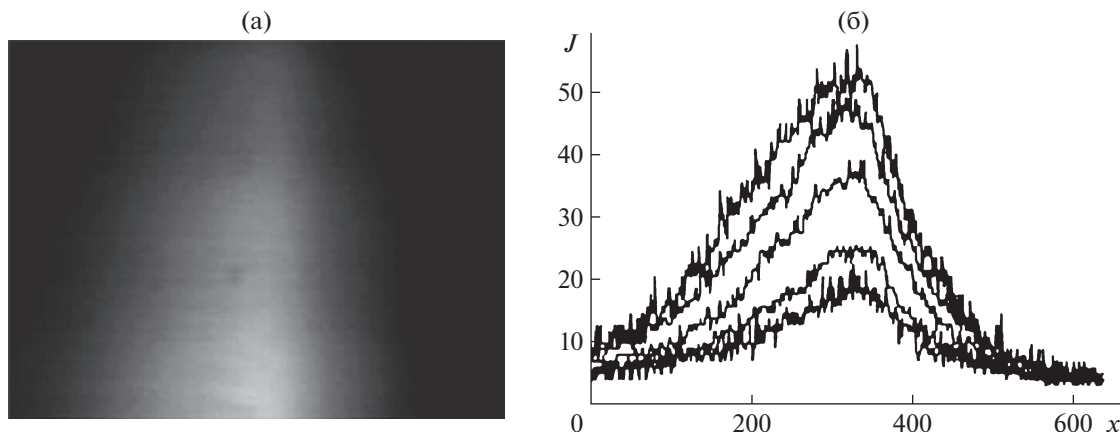


Рис. 2. Изображение спектра излучения SMD-светодиода FYLS-3528BURC красного свечения при величине прямого тока 8.58 мА (а) и распределения интенсивности J излучения светодиода по строкам через 120 строк (б). x – номер пиксела в строке.

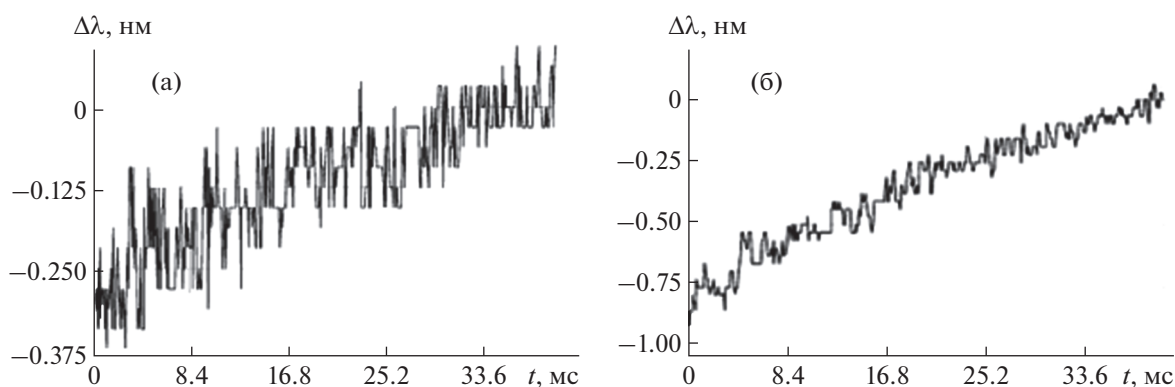


Рис. 3. Сдвиг спектра излучения при токе 5.9 мА (а) и 8.58 мА (б).

собой кристалл размером 2.4×1.8 мм (1/6"), содержащий 480 строк по 640 пикселей в строке.

С персонального компьютера устанавливается необходимый режим работы матрицы: время накопления, автоматический/ручной баланс белого, яркость, контрастность, цветность, насыщенность, гамма-коррекция. Блок управления поддерживает заданную температуру в нагревателе. На исследуемом образце поддерживается постоянное значение тока или напряжения. Передача измеренных данных в персональный компьютер и прием команд от компьютера осуществляются через USB-интерфейс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные на установке изображения спектра излучения SMD (Surface Mounted Device) светодиода FYLS-3528BURC красного свечения при значении прямого тока 8.58 мА приведены на рис. 2. В качестве фотоприемника использовалась КМОП-матрица камеры Z-Star SCMOS-00350KPA. Время

накопления составило 0.4 мс; ширина входной щели равна 1.0 мм. Положение камеры было выбрано так, что в 640 пикселях строки помещалась полоса 80 нм, соответственно шаг составил 0.125 нм/пиксель.

На рис. 3 приведены графики смещения максимума спектра при токах 5.90 мА (рис. 3а) и 8.58 мА (рис. 3б) относительно установившегося режима. Для этого строилась зависимость максимума корреляционной функции первого $R_1(y)$ и пятого $R_5(y)$ кадров (установившийся режим) от координаты y , затем находилась их разность: $\Delta x(y) = \max(R_1(y)) - \max(R_5(y))$, где номер строки y принимает значения от 1 до 480. Такой подход позволяет получить зависимость смещения длины волны в максимуме спектра от времени. Согласно графикам, скорость этого смещения зависит от величины тока. Среднее значение скорости смещения спектра при токе 5.9 мА составило 775 нм/с, а при токе 8.58 мА – 2170 нм/с.

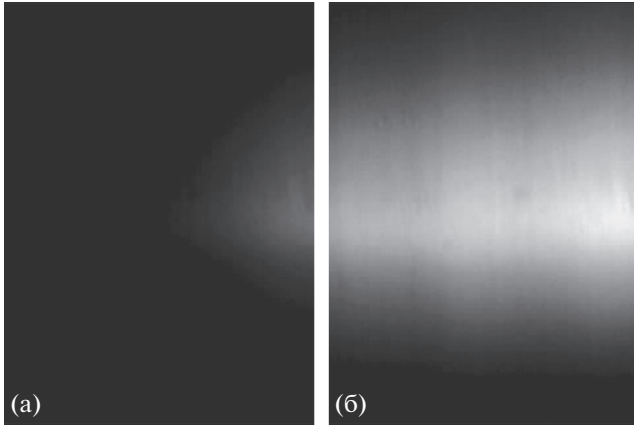


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения светодиода после его включения при токе 18.53 мА: **а** – первый кадр, **б** – второй кадр.

На рис. 4 показаны два последовательных кадра, полученные без синхронизации с моментом включения светодиода, при токе 18.53 мА. Небольшие неоднородности яркости на кадре обусловлены, на наш взгляд, неоднородностями зеркала оптической системы.

На рис. 5 штриховой линией показаны временные зависимости смещения максимума спектра. Средняя скорость смещения центральной длины волны спектра излучения для первого кадра составила 64.70 нм/с, для второго – 5.42 нм/с. Зависимость $\Delta\lambda(t)$ на рис. 5а аппроксимирована функцией $\Delta\lambda(t)$ [нм] = $0.338 - 1.685\exp(-t/9.84)$, а на рис. 5б – функцией $\Delta\lambda(t)$ [нм] = $0.0155 - 0.227\exp(-t/12.75)$, где t , мс – время.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеристики светодиода, которые можно комплексно определить по одному кадру (≈ 30 мс) изображения спектра, полученному на описан-

ной выше установке, при подаче на образец ступеньки тока, показаны на рис. 6.

Кривая I на рис. 6 – график изменения интенсивности излучения. На уровень сигнала интенсивности излучения оказывают влияние следующие факторы: величина прямого тока светодиода [7]; время накопления фотоприемника (помимо уровня интенсивности излучения, этот параметр определяет еще и дискретность развертки спектра по времени); ширина входной оптической щели спектрофотометра [4]; спектральная и пространственная чувствительность фотоприемника; температура [8].

Границы спектра излучения по уровню $0.1J_{\max}$ показаны на рис. 6 линией 2.

В результате саморазогрева гетероструктуры наблюдается расширение спектра со смещением его границ по уровню $0.1J_{\max}$ как в коротковолновую, так и в длинноволновую область [1, 9, 10]. При этом, поскольку ширина запрещенной зоны полупроводников уменьшается с повышением температуры, в результате саморазогрева гетероперехода светодиода наблюдается сдвиг Δ спектра в длинноволновую область. По сдвигу максимума спектра можно рассчитать изменение температуры перехода светодиода и оценить его тепловые параметры [11]. При задании импульсного рабочего тока через светодиод установка позволяет измерить тепловой импеданс светодиодов по способу, описанному в работе [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение режима “бегущего” затвора КМОП-матрицы позволяет регистрировать изменения интенсивности излучения, ширины и смещения центральной длины волны спектра излучения светодиода сразу же после его включения с временным разрешением порядка 40–100 мкс при разрешающей способности по длине волны 0.125 нм. При известном температурном коэффи-

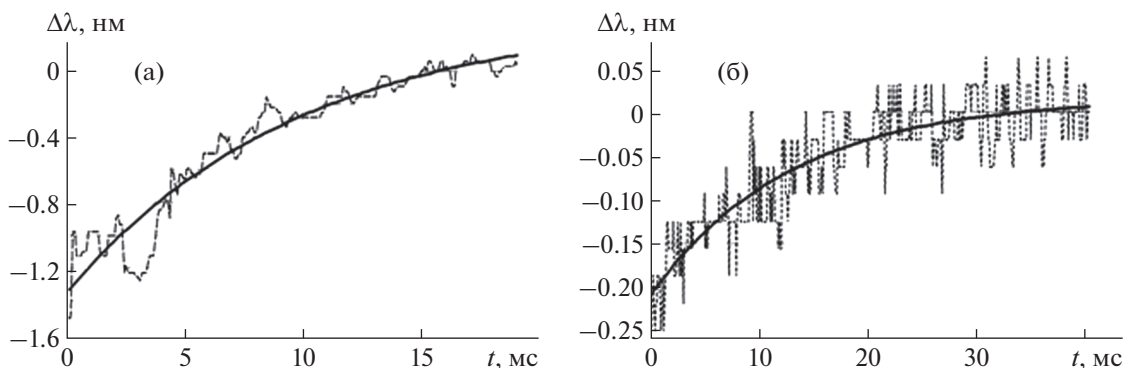


Рис. 5. Графики сдвига максимума спектра излучения светодиода (штриховая линия) при токе 18.53 мА в начале свечения и их аппроксимирующие функции (сплошная линия): **а** – первый кадр, **б** – второй кадр.

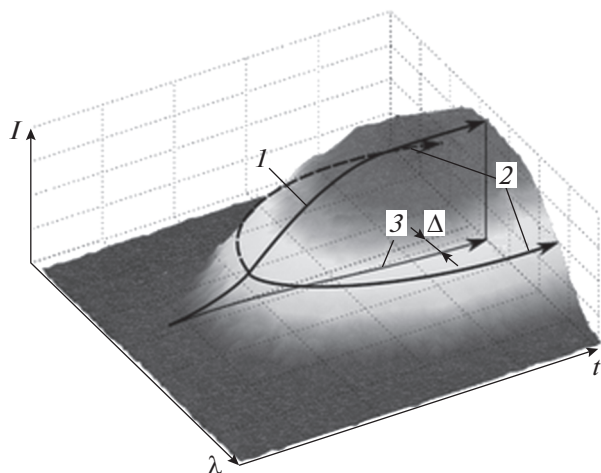


Рис. 6. Изменение параметров спектра излучения светодиода (схематично) при подаче на светодиод ступеньки тока. 1 – график изменения интенсивности излучения $J_{\max}(t)$ в максимуме спектра; 2 – граница спектра излучения по уровню $0.1J_{\max}$; 3 – линия смещения $\Delta(t)$ максимума спектра.

циенте центральной длины волны спектра излучения светодиода по сдвигу максимума спектра можно оперативно определить температуру перегрева гетероперехода светодиода при заданном рабочем токе и оценить тепловые параметры светодиода. Диапазон варьирования времен задержки определяется типом используемой фотоприемной КМОП-матрицы и не может задаваться произвольно, однако, учитывая простоту реализации, метод в ряде случаев является удобной альтернативой сложным инструментам для изучения динамики одномерных распределений оптической мощности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-07-00562 А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луценко Е. // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 2. С. 26.
2. Gu Y., Narendran N. // Third International Conference on Solid State Lighting. Proceedings of SPIE 5187. 2004. С. 107. <https://doi.org/10.1117/12.509752>
3. Тарасов С.А., Менькович Е.А., Пихтин А.Н. Патент на изобретение № 2473149 РФ // Бюл. № 2. Оpubл. 20.01.2013.
4. Перамент М.И. Методы исследований в экспериментальной физике: Учебное пособие. Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”, 2010.
5. Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Мясников М.И., Чиннов В.Ф. // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105. № 6. С. 918.
6. Ухнов А.А. Автореф. Дисс. ... д-ра. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), 2015.
7. Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В., Сергеев В.А. Патент на полезную модель № 154438 РФ // Бюл. № 24. Оpubл. 27.08.2015.
8. Шуберт Ф. Светодиоды / Под ред. А.Э. Юновича. М.: Физматлит, 2008.
9. Lee J.-C. // Optica Applicata. 2011. Т. XLI. № 4. Р. 911.
10. Смирнов С.В., Саврук Е.В., Гончарова Ю.С. // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2(24). Ч. 2. С. 55.
11. Сергеев В.А., Беринцев А.В., Черняков А.Е. Патент на изобретение № 2609815 РФ // Бюл. № 4. Оpubл. 06.02.2017.
12. Сергеев В.А., Ульянов А.В. Патент на изобретение № 2624406 РФ // Бюл. № 19. Оpubл. 03.07.2017.