

ИЗМЕРИТЕЛЬ ВНУТРЕННЕЙ КВАНТОВОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДА© 2023 г. В. А. Сергеев^{а,*}, О. А. Радаев^а, И. В. Фролов^а^аУльяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

*e-mail: sva@ulstu.ru

Поступила в редакцию 23.03.2023 г.

После доработки 21.05.2023 г.

Принята к публикации 15.06.2023 г.

Приведены описание и характеристики разработанного измерителя внутренней квантовой эффективности (ВКЭ) InGaN-светодиодов. Измеритель позволяет определять ВКЭ светодиодов в диапазоне токов до 25 мА путем измерения ватт-амперной характеристики и решения системы уравнений, связывающих значения мощности излучения светодиода при двух токах с аппроксимирующей функцией, полученной на основе ABC-модели (модели рекомбинации носителей заряда в светоизлучающей гетероструктуре, где А, В и С – коэффициенты безызлучательной, излучательной и ожереккомбинации соответственно). В отличие от известных российских и зарубежных аналогов, измеритель ВКЭ характеризуется простотой аппаратной реализации и позволяет определять ВКЭ светодиодов при комнатной температуре. Работа измерителя апробирована на примере измерения ВКЭ коммерческих InGaN-светодиодов зеленого и синего свечения. Измеритель может быть использован в научных лабораториях, а также во входном контроле предприятий – изготовителей светодиодной продукции.

DOI: 10.31857/S0032816223060071, EDN: WWTKVO

1. ВВЕДЕНИЕ

Внутренняя квантовая эффективность (ВКЭ) – важнейшая характеристика светодиода, определяющая эффективность преобразования электрического тока в оптическое излучение. ВКЭ светодиода определяется как отношение числа фотонов, рожденных в активной области светодиода в единицу времени, к числу инжектированных в эту область электронов [1]. ВКЭ является безразмерной величиной, принимающей значения в диапазоне от 0 до 1. Эта характеристика используется при оценке качества изготовления светоизлучающих гетероструктур, их энергетической эффективности, а также при исследовании механизмов спада эффективности излучения при больших токах и механизмов деградации светодиодов в процессе их испытаний. Сложности измерений ВКЭ связаны с тем, что не все фотоны, образованные в активной области, излучаются светодиодом: часть фотонов может поглощаться подложкой, защитным покрытием или материалом линзы, поэтому ВКЭ нельзя измерить прямым неразрушающим методом. Для измерений ВКЭ используются разные косвенные методы, которые имеют свои допущения и ограничения.

Известны методы, основанные на измерении температурной зависимости фотолюминесцен-

ции [2–5]. Такие методы предполагают, что при температуре порядка единиц кельвинов все носители заряда в активной области светодиода рекомбинируют с образованием света и ВКЭ равна единице. В работе [5] для измерений использовалась установка, в которой исследуемый светодиод помещался в гелиевый криостат замкнутого цикла с возможностью регулировки температуры от 10 до 300 К. Фотолюминесценция светодиода возбуждалась лазерным диодом с длиной волны 405 нм, выходная мощность которого могла варьироваться от 0 до 250 мВт. Излучение лазера фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 30 см. Излучение фотолюминесценции светодиода фокусировалось на входе монохроматора. Интенсивность различных спектральных составляющих на выходе монохроматора определялась фотоэлектронным умножителем, который был подключен к компьютеру для сбора данных. Для определения ВКЭ измерялись зависимости интенсивности фотолюминесценции от мощности возбуждающего лазерного излучения при разных температурах в диапазоне от 10 до 300 К и нормировались на характеристику, измеренную при температуре 10 К.

Существует метод, основанный на измерении ВКЭ по параметрам катодолюминесценции све-

тоизлучающих гетероструктур [6]. Способ заключается в возбуждении катодoluminesценции светоизлучающих гетероструктур путем облучения пучком электронов в импульсном режиме с длительностью импульса от 10 до 400 нс с энергией электронов преимущественно 18 кэВ и выше. Электронный пучок, попадая на образец, проникает в глубь светоизлучающих гетероструктур, вызывая генерацию свободных носителей заряда. Межзонная рекомбинация носителей заряда в активной области приводит к излучению светоизлучающих гетероструктур, интенсивность которого измеряется в импульсном режиме при помощи спектрометрической системы на базе монохроматора, фотоэлектронного умножителя и осциллографа. Поскольку ионизационные потери не зависят от координаты, абсолютное значение ВКЭ тестируемых светоизлучающих гетероструктур определяется при помощи эталонного образца путем нормирования интенсивности излучения исследуемой светоизлучающей гетероструктуры на интенсивность излучения эталонного образца с известным абсолютным значением ВКЭ.

Указанные методы измерений характеризуются сложностью аппаратной реализации или необходимостью наличия эталонного образца, что затрудняет их применение для определения ВКЭ светодиода в нормальных условиях.

Существуют способы измерения ВКЭ, основанные на определении параметров общепринятой АВС-модели рекомбинации носителей заряда в светоизлучающих гетероструктурах (где А, В и С – коэффициенты безызлучательной, излучательной и оже-рекомбинации соответственно) на основе нитридов III группы и определении ВКЭ по функциональным зависимостям, связывающим рекомбинационные параметры АВС-модели с параметрами электролюминесценции светодиода [7–12]. Например, способ, представленный в работах [8, 9], состоит в том, что через светодиод пропускается постоянный электрический ток для возбуждения электролюминесценции и при двух значениях тока, соответствующих диапазону роста токовой зависимости ВКЭ светодиода, измеряются полные мощности оптического излучения светодиода, затем при каждом из этих значений тока через светодиод дополнительно пропускается переменный гармонический ток малой амплитуды и измеряются значения граничной частоты электролюминесценции и по полученным значениям полных мощностей излучения и граничных частот электролюминесценции рассчитывается значение ВКЭ светодиода. Недостатками этого способа являются значительные аппаратные затраты и погрешности, связанные с измерениями граничных частот при малых уровнях сигнала.

Способ, представленный в работе [10], основан на измерении зависимости от тока I сигнала

фотоприемника L_{ext} , который пропорционален мощности излучения, вычислении внешней квантовой эффективности $\eta_{ext}(I) \sim qL_{ext}(I)/I$ в относительных единицах и аппроксимации зависимости $\eta_{ext}^{-1}(I) - L_{ext}(I)^{-1/2}$ в диапазоне малых токов линейной функцией вида $\eta_{ext}^{-1}(I) = \eta_{ext}^{-1} + SI L_{ext}(I)^{-1/2}$, где η_{ext} – коэффициент оптического вывода излучения, SI – крутизна аппроксимирующей функции. ВКЭ $\eta_{IQE}(I)$ рассчитывается по формуле $\eta_{IQE}(I) = \eta_{ext} \times \eta_{ext}(I)$.

Способ, предложенный авторами работы [11], состоит в измерении ватт-амперной характеристики светодиода $P-I$, определении тока I_p , при котором внешняя квантовая эффективность достигает максимального значения, вычислении параметров $Y = I/I_p$ и $X = (P(I)/P(I_p))^{0.5}$, аппроксимации зависимости $Y(X)$ функцией вида $Y(X) = a_1 X + a_2 X^2$, определении тока I_{ref} , при котором коэффициент a_2 принимает минимальное значение, и расчете ВКЭ по формуле $\eta_{IQE}(I) = \eta_{IQE}(I_{ref}) \times \eta_{EQE}(I)/\eta_{EQE}(I_{ref})$. Точность измерения ВКЭ зависит не только от точности измерения ватт-амперной характеристики, но и от точности определения экстремумов аппроксимирующих функций.

В настоящей работе представлено описание измерителя ВКЭ светодиодов, реализующего способ определения ВКЭ по результатам измерений ватт-амперной характеристики светодиода [12].

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Способ измерений ВКЭ, представленный в работе [12], основан на общепринятой АВС-модели рекомбинации носителей заряда в светоизлучающих гетероструктурах с множественными квантовыми InGaN/GaN-ямами [13]. Согласно АВС-модели, существует три основных канала рекомбинации носителей заряда, инжектированных в активную область светоизлучающих гетероструктур: канал безызлучательной рекомбинации Шокли–Рида–Холла, канал излучательной межзонной рекомбинации и канал безызлучательной оже-рекомбинации. При малых токах, соответствующих диапазону роста зависимости ВКЭ от тока, при отсутствии утечки носителей заряда из активной области светоизлучающих гетероструктур скорость безызлучательной рекомбинации Шокли–Рида–Холла и излучательной межзонной рекомбинации существенно [14] преобладают над скоростью безызлучательной оже-рекомбинации. Соответственно, при малых токах оже-рекомбинацией можно пренебречь, а ватт-амперную характеристику светодиода можно аппроксимировать функцией [15]

$$P(I) = m(1 - \sqrt{1 + 2qI} + qI) = \frac{m}{2}(\sqrt{1 + 2qI} - 1)^2, \quad (1)$$

в которой коэффициенты m и q связаны с параметрами светоизлучающих гетероструктур выражениями:

$$m = \eta_{\text{extr}} V \frac{hc A^2}{\lambda 2B}, \quad (2)$$

$$q = \frac{\eta_{\text{inj}} 2B}{eV A^2}, \quad (3)$$

где η_{extr} – коэффициент оптического вывода излучения, V – объем активной области гетероструктуры, h – постоянная Планка, c – скорость света; λ – длина волны излучения, A и B – коэффициенты безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли–Рида–Холла и излучательной рекомбинации соответственно, η_{inj} – коэффициент инжекции носителей заряда в активную область, e – элементарный заряд.

ВКЭ определяется выражением

$$\eta_{\text{IQE}}(I) = \frac{e\lambda}{hc\eta_{\text{extr}}} \frac{P(I)}{I} = \frac{\sqrt{1 + 2qI} - 1}{\sqrt{1 + 2qI} + 1}. \quad (4)$$

Параметр q может быть определен путем измерения мощности излучения светодиода $P(I_1)$ и $P(I_2)$ при двух малых токах I_1 и I_2 ($I_1 < I_2$) и решения системы уравнений:

$$\begin{cases} P(I_1) = \frac{m}{2}(\sqrt{1 + 2qI_1} - 1)^2, \\ P(I_2) = \frac{m}{2}(\sqrt{1 + 2qI_2} - 1)^2. \end{cases} \quad (5)$$

Окончательное выражение для определения ВКЭ светодиода по результатам измерений его ватт-амперной характеристики имеет вид

$$\eta_{\text{IQE}}(I) = \frac{I_1\sqrt{P(I_2)} - I_2\sqrt{P(I_1)}}{P(I_1)\sqrt{P(I_2)} - P(I_2)\sqrt{P(I_1)}} \frac{P(I)}{I}. \quad (6)$$

Ток I_2 выбирается из диапазона значений, при которых ВКЭ возрастает, и действием оже-рекомбинационной составляющей можно пренебречь. В работе [16] показано, что для выполнения этого условия ток I_2 должен быть примерно в 5 раз меньше, чем ток I_{max} , при котором достигается максимум ВКЭ. При этом составляющая погрешности, обусловленная приближением модели, не превышает 1%. Максимальное значение эффективности современных InGaN-светодиодов достигается при плотностях тока порядка 1–10 А/см². Выбор значения тока I_1 для измерения мощности излучения $P(I_1)$ определяется точноностью ваттметра, используемого для измерения ватт-амперной характеристики светодиода, поэтому ток I_1 выбирается наименьшим, при котором обеспечивается заданный уровень точности.

Выражение (6) получено, исходя из предположения, согласно которому ток утечки носителей заряда пренебрежимо мал по сравнению с рекомбинационной составляющей тока. В работах [17, 18] показано, что при малых плотностях тока (приблизительно до 10 А/см²), при которых рассчитывается коэффициент вывода излучения

$$(I_1\sqrt{P(I_2)} - I_2\sqrt{P(I_1)}) / (P(I_1)\sqrt{P(I_2)} - P(I_2)\sqrt{P(I_1)}),$$

ток утечки составляет доли процента от полного тока светодиода. В связи с этим значение систематической погрешности, возникающей из-за пренебрежения током утечки, составляет доли процента.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ

На рис. 1 представлена структурная схема измерителя ВКЭ светодиодов. Управление аппаратной частью осуществляется компьютером через UART-интерфейс. При запуске цикла измерения микроконтроллер AT91SAM7X256 выдает код на 16-разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) AD5542, который формирует опорное напряжение для источника тока на операционном усилителе (ОУ) AD820 в диапазоне 0–3 В. Источник тока устанавливает такое значение выходного тока, при котором падение напряжения на токосъемном резисторе, включенном последовательно с исследуемым светодиодом, равно величине управляющего напряжения. Мультиплексор предназначен для переключения нагрузочных прецизионных резисторов, с помощью которых задается ток через исследуемый светодиод.

Исследуемый светодиод и фотодиод фотоприемника закрепляются соосно с помощью адаптера, обеспечивающего защиту от внешней засветки.

Излучение исследуемого светодиода попадает на фотодиод SFH203. Малошумящий трансимпедансный усилитель на ОУ ОРА192 преобразует фототок фотодиода, пропорциональный мощности излучения светодиода, в электрический сигнал. Напряжение на выходе фотоприемника, регистрирующего оптическое излучение светодиода, прямо пропорционально мощности излучения светодиода при токе I :

$$U(I) = kP(I), \quad (7)$$

где k – коэффициент, имеющий размерность [В/Вт], значение которого определяется чувствительностью фотоприемника, коэффициентом усиления, а также диаграммами направленности светодиода и фотодиода.

Поскольку коэффициент k не зависит от тока, согласно формулам (6) и (7) ВКЭ определяется по формуле

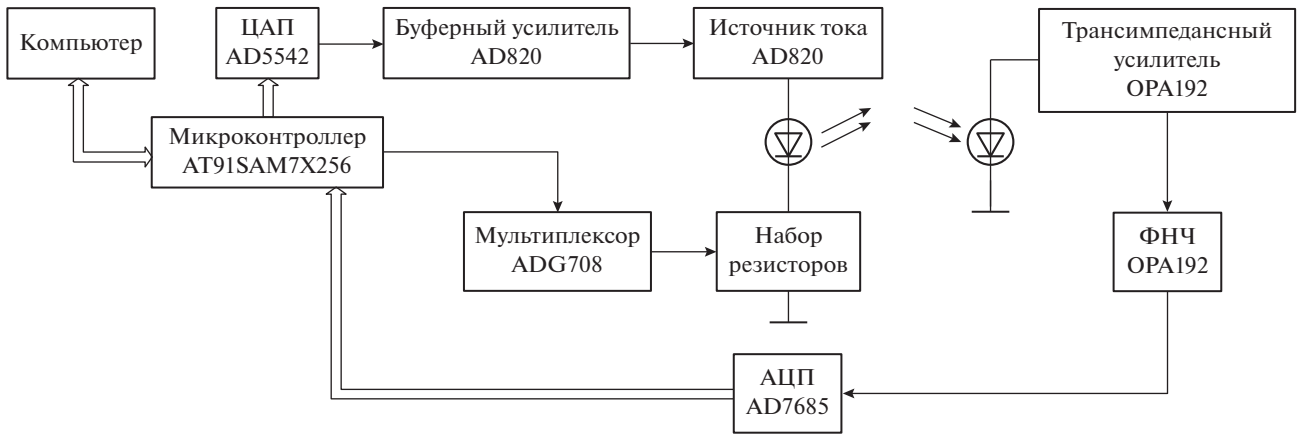


Рис. 1. Структурная схема измерителя ВКЭ светодиодов.

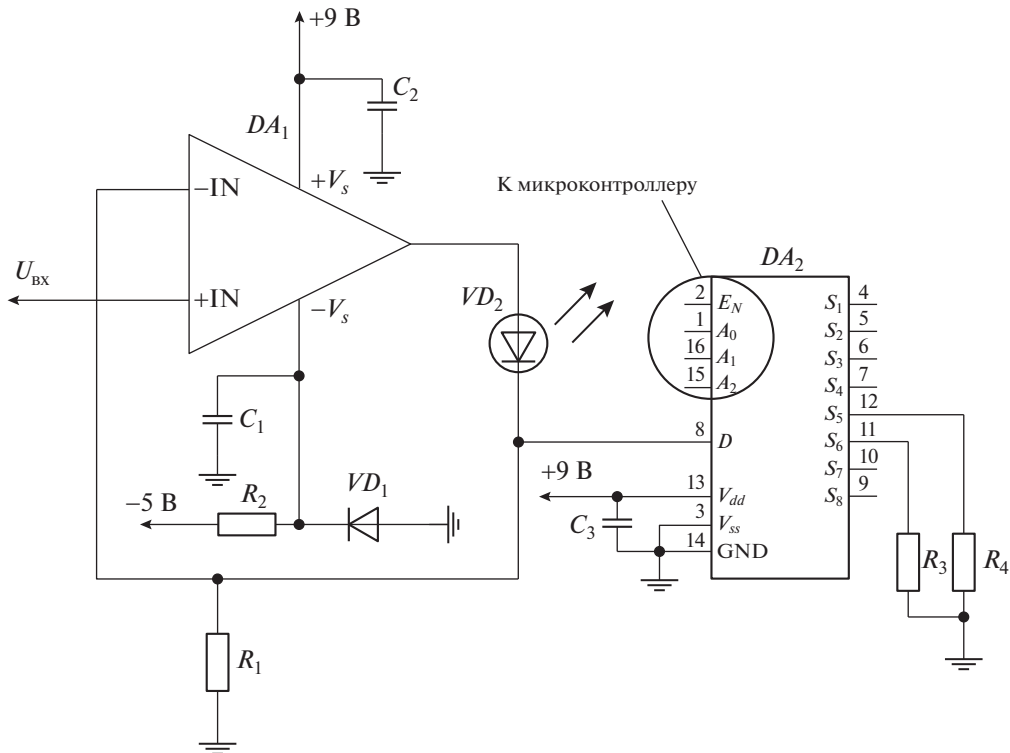


Рис. 2. Схема источника тока.

$$\eta_{IQE}(I) = \frac{I_1 \sqrt{U(I_2)} - I_2 \sqrt{U(I_1)}}{U(I_1) \sqrt{U(I_2)} - U(I_2) \sqrt{U(I_1)}} \frac{U(I)}{I} \quad (8)$$

После сглаживания фильтром нижних частот (ФНЧ) сигнал фотоприемника $U(I)$ преобразуется 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) AD7685 в числовой код и через микроконтроллер передается в компьютер. Схема источника тока представлена на рис. 2.

Схема реализована на ОУ AD820, предназначена для генерации стабильного тока для свето-

диода и позволяет точно отслеживать изменения тока в нагрузке. ОУ AD820 имеет низкие значения напряжения и тока смещения и стабильные характеристики, что позволяет формировать значение рабочего тока светодиода с погрешностью установки не более $\pm 0.1\%$. Ток, протекающий через нагрузку, создает падение напряжения на токозадающем резисторе, которое сравнивается с опорным напряжением от ЦАП. Путем подключения к резистору R_1 резисторов R_3 или R_4 изменяется диапазон устанавливаемого тока через

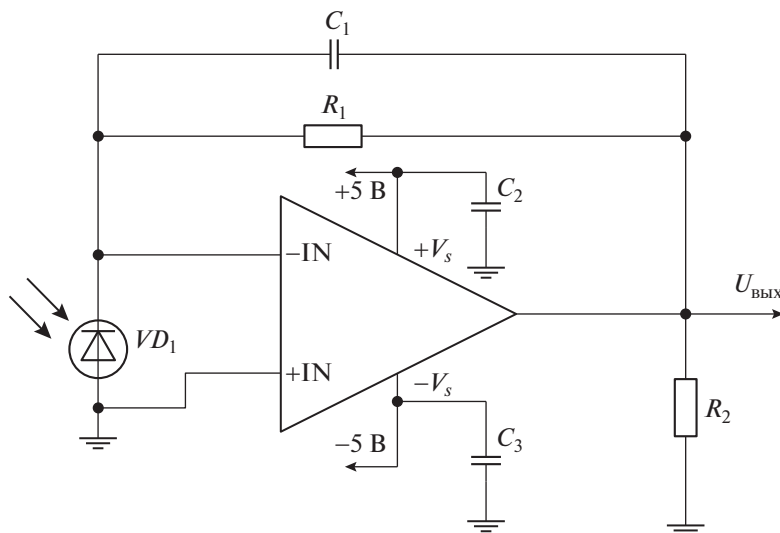


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема трансимпедансного усилителя.

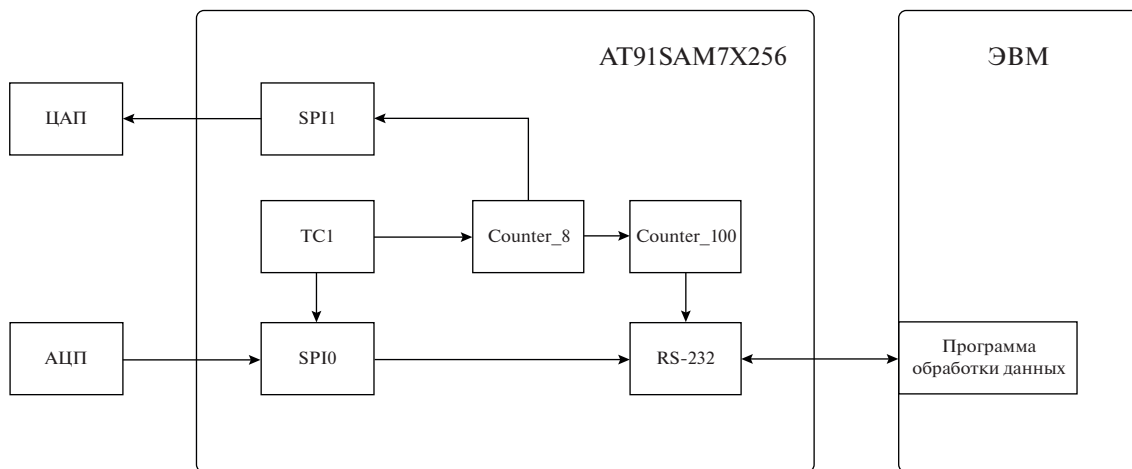


Рис. 4. Структурная схема управляющей программы.

светодиод: 0–60 мкА, 0–1 мА, 0–25 мА. Резисторы переключаются мультиплексором ADG708, который управляется микроконтроллером.

Схема трансимпедансного усилителя, реализованного на ОУ ОРА192 и используемого в составе фотоприемного устройства, приведена на рис. 3. Фотодиод SFH203 включен в фотогальваническом режиме. В таком режиме фотодиод имеет малый уровень темнового тока. Верхний предел измеряемого фототока ограничивается максимально допустимым выходным током ОУ (30 мА), а нижний предел определяется входными токами смещения ОУ и их дрейфами.

В качестве ФНЧ использовался фильтр Баттерворта четвертого порядка на ОУ ОРА192.

Синхронизация устройства осуществлялась с помощью таймера – счетчика TC1 (рис. 4). По пе-

реднему фронту импульса таймера запускалось прерывание. В обработчике прерывания по SPI0 осуществлялся прием данных от АЦП. При каждом значении тока светодиода сигнал фотоприемника для уменьшения случайных погрешностей измерялся восемь раз и усреднялся с сохранением в массив данных. Затем SPI1 увеличивал на выбранный шаг значение задающего тока светодиода. После формирования массива из ста усредненных значений осуществлялась его передача по интерфейсу RS232 в ЭВМ.

Программа для обработки данных написана в среде разработки VisualStudio. Программа позволяет установить диапазон изменения тока светодиода, строит график зависимости $U(I)$ сигнала фотоприемника от тока светодиода в процессе измерения, а по окончании измерения рассчиты-

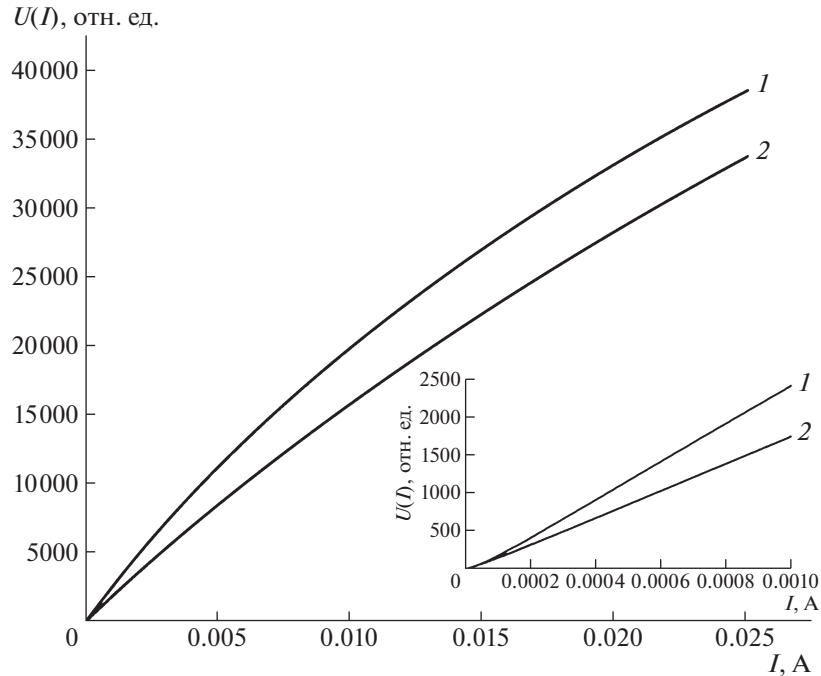


Рис. 5. Ватт-амперные характеристики светодиодов двух типов: 1 – КИПД40У20-Л5-П7; 2 – КИПД40Т20-С1-П7.

вает и выводит на экран график ВКЭ. Программа позволяет осуществлять прием данных и их сохранение в текстовом файле для дальнейшего анализа и обработки.

Расчет ВКЭ проводился следующим образом. Рассчитывалась функция $f(I) = U(I)/I$. Путем дифференцирования функции $f(I)$ и решения уравнения вида $\frac{d}{dI} f(I) = 0$ определялся ток I_{\max} , при котором функция $f(I)$ достигала максимального значения. Затем определялись значения токов I_1 и I_2 ($I_1 < I_2$). Ток I_2 задавался равным $0.2I_{\max}$. Чтобы снизить влияние погрешности измерения сигнала фотоприемника $U(I_1)$ на результат расчета ВКЭ, ток I_1 необходимо выбирать таким образом, чтобы значение $U(I_2)$ существенно превышало $U(I_1)$. Однако при измерении сигнала фотоприемника при малом токе светодиода возрастает составляющая погрешности, обусловленная влиянием шума фотоприемника. Поэтому ток I_1 выбирался из условия $I_1 \approx 0.5I_2 = 0.1I_{\max}$.

Основные технические характеристики измерителя таковы: диапазоны изменения тока через светодиод 0–60 мкА, 0–1 мА, 0–25 мА; минимальный шаг изменения тока определяется разрядностью ЦАП и для 16-битного AD5542 составляет 0.92 нА для диапазона тока 0–60 мкА; скорость нарастания тока светодиода зависит от шага изменения тока и может изменяться в диапазоне 3 мА/с – 10 А/с.

Апробация измерителя проведена на коммерческих светодиодах двух типов: КИПД40У20-Л5-П7 зеленого свечения и КИПД40Т20-С1-П7 синего свечения. Рабочий ток светодиодов обоих типов составляет 20 мА. Ватт-амперные характеристики светодиодов были измерены в диапазоне токов от 10 мкА до 20 мА (рис. 5). Время измерения составило примерно 1 мин. На вставке рис. 5

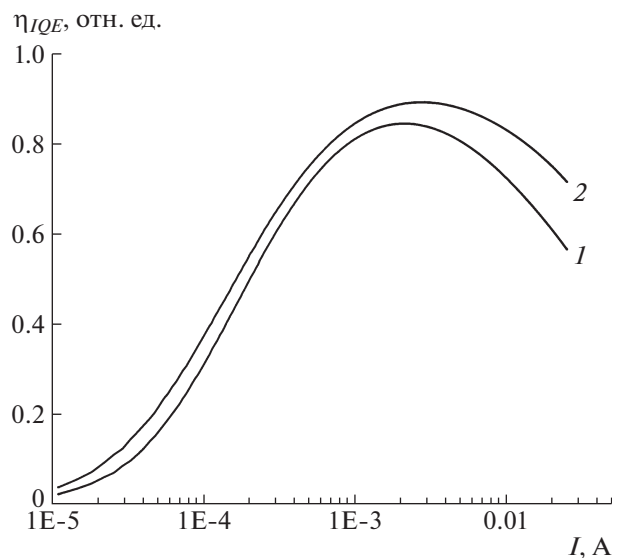


Рис. 6. ВКЭ светодиодов двух типов: 1 – КИПД40У20-Л5-П7; 2 – КИПД40Т20-С1-П7.

Таблица 1. Результаты измерений ВКЭ синего светодиода при токе $I_{\max} = 2.75$ мА

I_1 , мкА	I_2 , мкА		
	392	552	683
145	0.883	0.889	0.896
276	0.902	0.903	0.910
421	0.900	0.905	0.916

приведены ватт-амперные характеристики в диапазоне малых токов. На рис. 5 видно, что кривизна графиков при малых токах (меньше тока I_{\max}) и больших токах (больше тока I_{\max}) различается: при малых токах характер ватт-амперной характеристики “суперлинейный”, а при больших токах – “сублинейный”.

Графики ВКЭ двух образцов исследованных светодиодов представлены на рис. 6. На рисунках видно, что при увеличении тока значение ВКЭ светодиодов возрастает, достигает максимума (у зеленого светодиода при токе 2.14 мА, у синего – при токе 2.75 мА), и убывает. Значения токов, использованные в расчетах, для зеленого светодиода принимались равными $I_1 = 214$ мкА и $I_2 = 428$ мкА, а для синего – $I_1 = 276$ мкА и $I_2 = 552$ мкА. В табл. 1 приведены результаты определения максимального значения ВКЭ синего светодиода, рассчитанные по значениям ватт-амперной характеристики, взятым при различных токах I_1 и I_2 .

Согласно результатам табл. 1, среднее значение ВКЭ синего светодиода при токе $I_{\max} = 2.75$ мА составляет 0.900, а граница доверительного интервала случайной погрешности при доверительной вероятности 0.95 составляет $\pm 0.9\%$.

Выполнено сравнение результатов измерения ВКЭ, полученных представленным способом и способами, описанными в работах [10, 11], при двух токах: при токе I_{\max} и при рабочем токе 20 мА. Результаты приведены в табл. 2, 3.

Наибольшая относительная разница между результатами измерений, полученными предложенным способом и известными способами, составляет 3.2%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен способ и описан измеритель ВКЭ излучения InGaN-светодиода в диапазоне рабочих токов. Способ состоит в измерении ватт-амперной характеристики светодиода в диапазоне рабочих токов, в аппроксимации этой характеристики на основе ABC-модели рекомбинации носителей заряда в гетероструктуре светодиода простой функцией с учетом малости оже-рекомбинации, в определении параметров аппроксимирующей функции по результатам измерения ватт-амперной характеристики при двух значениях тока, соответствующих диапазону роста токовой зависимости ВКЭ светодиода, при которых влиянием оже-рекомбинации можно пренебречь, и в последующем расчете ВКЭ для всего рабочего диапазона токов.

Описанный в статье измеритель реализует предложенный способ в автоматическом режиме с передачей данных в компьютер и с расчетом значений ВКЭ во всем рабочем диапазоне токов по результатам измерения ватт-амперной характеристики светодиода. Работа измерителя апробирована на примере измерения ВКЭ коммерческих InGaN-светодиодов зеленого и синего свечения. Полученные зависимости ВКЭ хорошо соответствуют характеристикам, приведенным в технической документации на типы исследованных светодиодов.

Таблица 2. Значения ВКЭ зеленого светодиода КИПД40У20-Л5-П7

I , мА	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ предложенным способом	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в работе [10]	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в работе [11]
2.14	0.811	0.812	0.815
20	0.558	0.559	0.561

Таблица 3. Значения ВКЭ синего светодиода КИПД40Т20-С1-П7

I , мА	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ предложенным способом	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в работе [10]	Результат измерения $\eta_{IQE}(I)$ способом, представленным в работе [11]
2.75	0.900	0.872	0.885
20	0.708	0.704	0.714

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / Под ред. А.Э. Юновича, Москва: Физматлит, 2008.
2. Shim J.-I., Shin D.-S. // *Nanophotonics*. 2018. V. 7 (10). P. 1601.
<https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0094>
3. Marcinkevicius S., Yapparov R., Chow Y.C., Lynsky C., Nakamura S., DenBaars S.P., Speck J.S. // *Appl. Phys. Lett.* 2021. V. 119. P. 071102.
<https://doi.org/10.1063/5.0063237>
4. Wang L., Jin J., Mi C., Hao Z., Luo Y., Sun C., Han Y., Xiong B., Wang J., Li H. // *Materials*. 2017. V. 10. P. 1233.
<https://doi.org/10.3390/ma10111233>
5. Lu B., Wang L., Hao Z., Luo Y., Sun C., Han Y., Xiong B., Wang J., Li H., Chen K., Zhuo X., Li J., Kang J. // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. P. 383.
<https://doi.org/10.3390/app9030383>
6. Прудаев И.А., Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Толбанов О.П., Ивонин И.В. Патент № 2503024 РФ.
7. Han D.-P., Yamamoto K., Ishimoto S., Iwaya M., Takeuchi T., Kamiyama S., Akasaki I. // *Appl. Phys. Express*. 2019. V. 12. P. 032006.
<https://doi.org/10.7567/1882-0786/aafca2>
8. Фролов И.В., Сергеев В.А., Радаев О.А. // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. С. 1264.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.08.51102.54-21>
9. Сергеев В.А., Фролов И.В. Патент № 2740433 РФ.
10. Van Opdorp C., 't Hooft G.W. // *J. Appl. Phys.* 1981. V. 52. P. 3827.
<https://doi.org/10.1063/1.329845>
11. Shim J.-I., Han D.-P., Oh C.-H., Jung H., Shin D.-S. // *IEEE J. Quant. Electron.* 2018. V. 54. № 2. Art. № 8000106.
<https://doi.org/10.1109/JQE.2018.2795044>
12. Фролов И.В., Сергеев В.А. Патент № 2789118 РФ.
13. Карпов С. // *Opt. Quantum Electron.* 2015. V. 47. P. 1293.
<https://doi.org/10.1007/s11082-014-0042-9>
14. David A., Young N.G., Lund C., Craven M.D. // *ECS J. Sol. State Sci. Technol.* 2020. V. 9. P. 016021.
<https://doi.org/10.1149/2.0372001JSS>
15. Фролов И.В., Сергеев В.А. Диагностический контроль качества светодиодов по локальным параметрам электролюминесценции и фототока. Москва: СОЛОН-Пресс, 2023.
16. Радаев О.А., Фролов И.В., Сергеев В.А. Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. Ульяновск: УлГТУ, 2021. С. 116.
17. Onwukaeme C., Lee B. and Ryu H.-Y. // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. P. 2405.
<https://doi.org/10.3390/nano12142405>
18. Meyaard D.S., Lin G.-B., Cho J., Schubert E.F. *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs): Materials, Technologies and Applications*. 2014. P. 279.