

Измерительный комплекс для диагностики качества светоизлучающих гетероструктур по фотоэлектрическому и оптическому откликам при локальном фотовозбуждении

В. А. СЕРГЕЕВ, С. В. ВАСИН, И. В. ФРОЛОВ, О. А. РАДАЕВ

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия, e-mail: ufire@mv.ru

Представлен автоматизированный измерительный комплекс для диагностики латеральной однородности полупроводниковых гетероструктур путём измерения и анализа фотоэлектрического и оптического откликов при их локальном фотовозбуждении в статическом и динамическом режимах. Электронно-механическая и оптическая системы позиционирования обеспечивают засветку локальной области исследуемой структуры с минимальным диаметром пятна 14 мкм, с точностью позиционирования 10 мкм. Показано, что разработанный измерительный комплекс можно использовать для диагностики качества светоизлучающих гетероструктур, транзисторов, солнечных элементов, фотодиодов.

Ключевые слова: светоизлучающие гетероструктуры, диагностика качества, автоматизированная установка, латеральная неоднородность, локальное фотовозбуждение, фотоэлектрический отклик.

We present a measuring complex for lateral homogeneity diagnostics of semiconductor heterostructures by measuring and analyzing the photoelectric and optical response at local photoexcitation in static and dynamic modes. Electronic-mechanical and optical positioning systems provide illumination of the local region of the investigated structure with a minimum spot diameter of 14 μm and a positioning accuracy of $\pm 10 \mu\text{m}$. The developed measuring system can be used for quality diagnostic of light emitting heterostructure, transistors, solar cells, photodiodes.

Key words: light-emitting heterostructures, quality diagnostics, the automated installation, lateral heterogeneity, local photoexcitement, photo-electric response.

Для диагностики светоизлучающих гетероструктур широко применяют различные оптические, электронные и фотоэлектронные методы: спектроскопия оптического поглощения, фото- и катодолюминесценция, шумовая и импедансная спектроскопия, регистрация пороговых токов и т. д. [1–3]. Информативными и легко реализуемыми являются методы и средства фотоэлектрической диагностики, основанные на регистрации интегрального фотоэлектрического отклика структуры на квазистационарное фотовозбуждение [4–7]. Указанные методы, однако, не позволяют оценить локальные динамические параметры и структурное несовершенство исследуемых объектов.

В настоящей работе представлен измерительный комплекс, позволяющий диагностировать качество светоизлучающих гетероструктур по фотоэлектрическому и оптическому откликам при локальном фотовозбуждении полупроводника в динамическом и статическом режимах. Комплекс позволяет получать значительную часть информации при использовании методов фотоэлектрической диагностики и спектроскопии фотолюминесценции, причём в более удобных и простых условиях (комнатная температура, невысокий уровень фотовозбуждения, простота регистрации фотоотклика) с возможностью автоматического сканирования по по-

верхности, управления параметрами фотовозбуждения и регистрации сигнала фотоотклика.

Структурная схема аппаратной части комплекса представлена на рис. 1. Исследуемый образец закрепляется на XYZ-позиционере, который даёт возможность перемещать

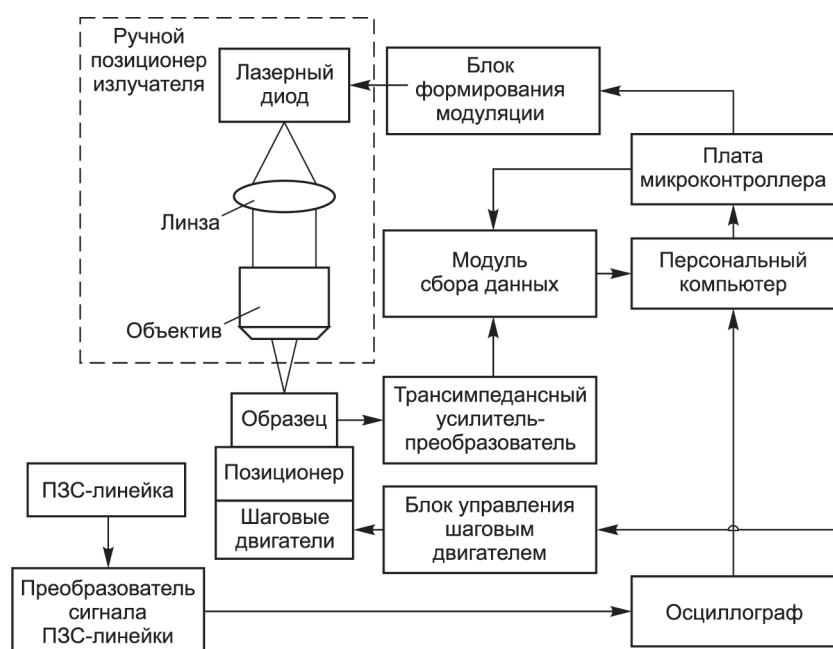


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного измерительного комплекса

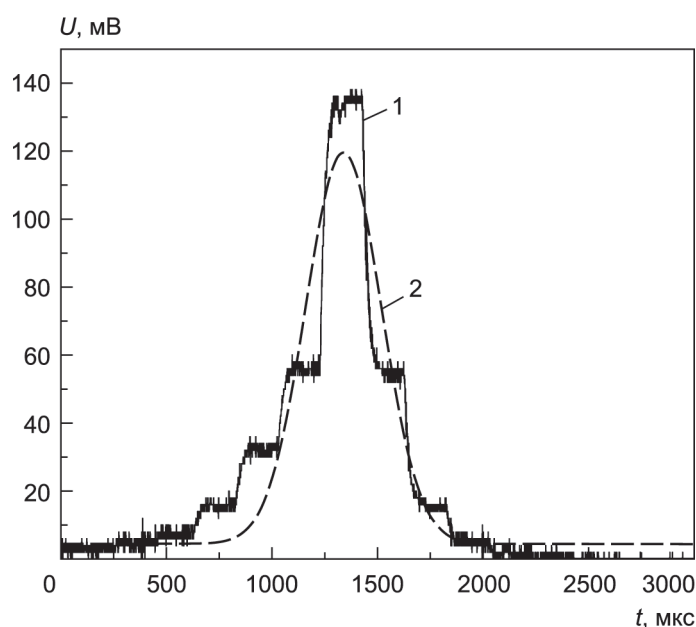


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы выходного сигнала фотоприёмной линейки при засветке сфокусированным пучком лазерного излучения (1) и её аппроксимация функцией Гаусса (2)

изучаемый объект в плоскости XY в диапазоне 10×10 мм. Перемещение осуществляется с помощью управляемых микроконтроллером шаговых двигателей со встроенным редуктором, обеспечивающим минимальный угол поворота $0,6^\circ/\text{шаг}$,

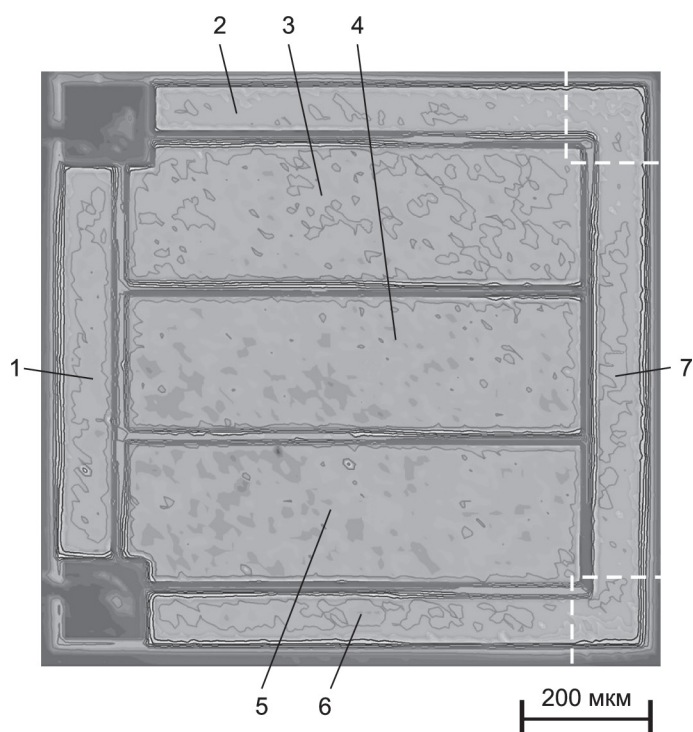


Рис. 3. Профиль распределения значения фототока по поверхности кристалла светодиода XREGRN-L1-0000-00P01: 1–7 – условные области на поверхности кристалла

что в сочетании с микрометрическими винтами позиционера позволяет добиться минимального шага перемещения 10 мкм. В зависимости от исследуемого объекта для фотовозбуждения могут применяться сменные лазерные диоды, излучающие на длинах волн 405, 450 или 515 нм. Излучение лазерного диода фокусируется на поверхность исследуемого образца линзой и объективом. Точная подстройка фокусного расстояния осуществляется перемещением XYZ-позиционера по оси Z. Диаметр пучка лазерного излучения контролируется с помощью фотоприёмной ПЗС-линейки ILX511 (Sony, Япония), содержащей 2048 пикселей [8].

На рис. 2 приведён фрагмент осциллограммы выходного сигнала фотоприёмной линейки, формируемого при последовательном опросе её пикселей. Горизонтальный размер каждой ступеньки на представленной осциллограмме (сплошная линия) соответствует линейному размеру одного пикселя фотоприёмной линейки, составляющему 8 мкм. Если принять, что распределение плотности мощности излучения в сечении лазерного пучка близко к гауссовому, то, аппроксимировав исходную осциллограмму функцией Гаусса (пунктирная линия), можно оценить минимальный диаметр лазерного пучка по уровню половинной мощности. Для задействованных в настоящей работе источников излучения и схемы фокусировки минимальный диаметр пучка составляет порядка 14 мкм.

Стационарный режим. При измерениях профиля распределения фототока по поверхности кристалла для питания лазерного диода в стационарном режиме вместо блока формирования модуляции используется стабилизированный источник тока. Питание на лазерный диод подаётся через специально разработанный драйвер, который позволяет поддерживать постоянную мощность оптического излучения. Для этого необходим сигнал фотодиода, интегрированного в единый корпус с лазером. В качестве блоков преобразователя фототок – напряжение и усилителя фотоЭДС применяется цифровой мультиметр DMM4040 (Tektronix, США). Данный прибор позволяет измерять фототок в диапазоне 10^{-4} – 10^{-1} А с разрешением до 100 пА. Измеренные значения фототока передаются в управляющий компьютер по USB-интерфейсу. Компьютерная программа использует полученные данные о координатах и фототоке и преобразует их в изображение трёхмерного распределения фотоэлектрического отклика по поверхности кристалла исследуемого образца.

Комплекс апробирован на кристаллах серийных мощных светодиодов XREGRN-L1-0000-00P01 (Cree, США) с гетероструктурой InGaN/GaN размерами 980×980 мкм на подложке SiC и центральной длиной волны излучения 475 нм. На рис. 3 представлен профиль распределения фототока по поверхности кристалла одного из образцов. Для оценки латеральной однородности гетероструктуры поверхность кристалла условно разбили на семь областей, отмеченных цифрами 1–7. В каждой области измеряли средние значения фототока I_{cp} и среднее квадратическое отклонение σ среднего значения фототока. В таблице представлены полученные значения для выборки из четырёх светодиодов. Отметим, что для указанных светодиодов характерные

Результаты измерения фототока в различных областях поверхности кристалла

Номер светодиода	Измеряемые величины	Номер области кристалла светодиода							Усреднённые значения измеряемых величин по всей площади
		1	2	3	4	5	6	7	
1	I_{cp} , мкА	28,300	28,600	29,900	30,000	30,600	30,000	30,400	29,900
	σ , мкА	1,300	1,360	0,760	0,690	1,040	1,450	1,700	1,300
	σ/I_{cp}	0,046	0,048	0,026	0,023	0,034	0,049	0,056	0,044
2	I_{cp} , мкА	31,600	31,900	32,600	32,700	32,300	31,400	31,400	32,200
	σ , мкА	0,640	0,650	0,650	0,590	0,750	0,640	0,830	0,870
	σ/I_{cp}	0,020	0,020	0,020	0,018	0,023	0,020	0,026	0,027
3	I_{cp} , мкА	39,500	40,300	41,100	41,300	40,700	39,800	39,900	40,800
	σ , мкА	1,260	1,640	0,750	0,760	0,970	0,930	1,010	1,100
	σ/I_{cp}	0,032	0,041	0,018	0,019	0,024	0,023	0,025	0,027
4	I_{cp} , мкА	30,500	31,000	31,800	31,900	31,200	30,000	30,600	31,300
	σ , мкА	0,630	0,710	0,660	0,630	1,150	0,620	0,620	0,980
	σ/I_{cp}	0,021	0,023	0,021	0,020	0,037	0,021	0,020	0,031

значения фототока не превышают 100 мкА. При таких значениях фототока предельно допустимая относительная погрешность мультиметра составляет $\pm 0,075\%$. В качестве количественной меры оценки латеральной однородности гетероструктуры светодиода авторы приняли относительную неравномерность распределения уровня сигнала фототока по площади структуры, определяемую отношением σ/I_{cp} .

Из таблицы следует, что значение относительной неравномерности σ/I_{cp} на несколько порядков превышает погрешность, вносимую измерительным прибором. Вероятно, относительная неравномерность связана со структурным несовершенством светоизлучающих гетероструктур. Таким образом, наличие неоднородностей в распределении фотоэлектрического отклика по поверхности кристалла светодиода позволяет оценивать структурное несовершенство светоизлучающих гетероструктур: чем разброс сигнала фототока меньше, тем светодиодная структура однороднее.

Гармонический и импульсный режимы. При измерениях динамических параметров фотоотклика гетероструктуры (граничной частоты модуляции в гармоническом режиме фотовозбуждения и длительностей нарастания и спада фронтов импульса фототока в импульсном режиме) в качестве блока модуляции интенсивности излучения лазера выступает программно-управляемый генератор DG1022 (Rigol, Китай) (см. рис. 1). Генератор позволяет проводить гармоническую модуляцию в диапазоне частот $1 \cdot 10^3$ – $20 \cdot 10^6$ Гц в режиме непрерывной перестройки частоты с логарифмическим шагом в течение установленного времени свипирования. В режиме импульсной модуляции длительность импульсов устанавливается в диапазоне 10^{-4} – 10^{-3} с со скважностью от 2 до 10 в зависимости от частотных свойств исследуемого объекта. Длительность фронта и спада импульса генератора составляет 20 нс.

Для регистрации переменного сигнала фототока применяется трансимпедансный усилитель-преобразователь, построенный на операционном усилителе OPA656. Это широкополосный усилитель «Rail-to-Rail» (Texas Instruments, США)

с полосой единичного усиления 230 МГц. Усилитель имеет переключаемый коэффициент усиления, реализованный на микросхеме ADG408 и позволяющий расширять динамический диапазон преобразования. При запуске измерительного цикла микроконтроллер формирует импульсы синхронизации, которые поступают на цифровой вход генератора. При поступлении синхронизирующего сигнала с выхода микроконтроллера модуль сбора данных ЛА-n1USB (ЗАО «Руднев–Шилиев», Россия) осуществляет аналого-цифровое преобразование напряжения, подаваемого с выхода трансимпедансного усилителя-преобразователя, и передаёт данные в оперативную память персонального компьютера. По полученным данным компьютерная программа строит изображение трёхмерного распределения динамических параметров фотоэлектрического отклика по поверхности кристалла исследуемого образца. С учётом интегральной и дифференциальной нелинейностей, а также из-за погрешности квантования 8-битного аналого-цифрового преобразователя модуля сбора данных ЛА-n1USB, относительная погрешность измерения динамических параметров составляет около 1 %.

Экспериментальная апробация комплекса в импульсном и гармоническом режимах фотовозбуждения выполнена на промышленных светодиодах двух типов: XREBLU-L1-0000-00K01 и XREGN-L1-0000-00P01 голубого и зелёного свечения, соответственно (Cree, США). Для оценки динамических параметров фотоэлектрического отклика гетероструктуры измеряли граничные частоты модуляции фототока $f_{зdB}$ при гармонической модуляции интенсивности фотовозбуждения. Режим изменения частоты модуляции был задан линейный, логарифмический. На рис. 4 представлен профиль распределения значений граничной частоты модуляции фототока по поверхности кристалла голубого светодиода. Вблизи границ кристалла среднее значение граничной частоты модуляции фототока составляет 1,320 МГц, что примерно на 3 % больше, чем в центре кристалла, где она равна 1,280 МГц. Погрешность измерения составляет 1 %, поэтому данный

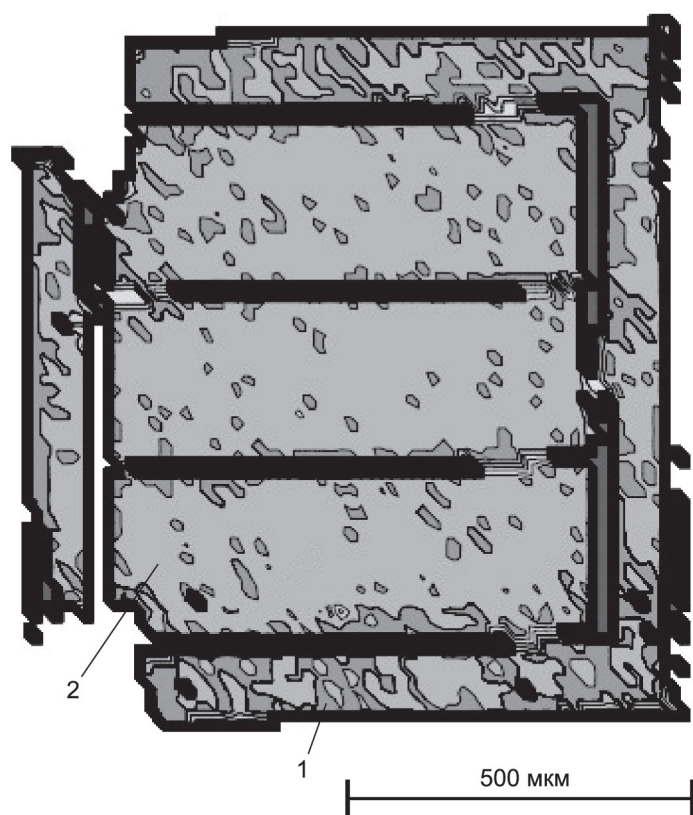


Рис. 4. Профиль распределения граничной частоты модуляции фототока по поверхности кристалла светодиода XREBLU-L1-0000-00K01:
1, 2 – $f_{3дБ}$ = 1,320; 1,280 МГц, соответственно

режим менее чувствителен к структурному несовершенству исследуемых структур по сравнению со статическим режимом.

Аналогичное распределение было получено при апробации комплекса в импульсном режиме фотовозбуждения. Импульсы фототока светодиодов в различных областях кристалла различаются как по амплитуде, так и по длительности спада. Результаты измерения динамической характеристики фототока при импульсном фотовозбуждении светодиодов указанных типов согласуются с результатами измерения частотной зависимости при гармоническом фотовозбуждении, полученными в работе [9].

Измерение спектров фотолюминесценции. Ещё одной возможностью разработанного измерительного комплекса является измерение спектральных характеристик фотолюминесценции в различных областях исследуемого образца. Для этого в состав комплекса введён спектрометр USB2000 (Ocean Optics, США). Данный прибор позволяет измерять спектры фотолюминесценции в диапазоне длин волн 350–1100 нм с оптическим разрешением 1,5 нм. Для регистрации сигнала фотолюминесценции используется оптическое волокно, которое закреплено вблизи контролируемого объекта. Перед волокном устанавливаются светофильтры, подавляющие оптический сигнал на длине волны излучения лазерного диода. В качестве интегральной характеристики

фотолюминесценции, характеризующей неоднородность исследуемого объекта, была выбрана центральная длина волны спектра фотолюминесценции. Центральную длину волны спектра фотолюминесценции вычисляют центроид-методом [10]:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_i [\lambda_i u(\lambda_i)]}{\sum_i u(\lambda_i)},$$

где $\lambda_{\max}$ – длина волны, соответствующая максимуму спектра фотолюминесценции; λ_i – длина волны, соответствующая середине i -го пиксела фотоприёмника; $u(\lambda_i)$ – амплитуда сигнала с i -го пиксела.

Результаты измерений для промышленных светодиодов фирмы Cree не выявили неоднородности распределения центральной длины волны спектра фотолюминесценции по площади кристалла, существенно превышающей оптическое разрешение применяемого спектрометра. Ниже приведены основные метрологические характеристики разработанного измерительного комплекса.

Метрологические характеристики измерительного комплекса

Система позиционирования

Диапазон перемещения исследуемого объекта в плоскости XY	10 мм
Минимальный шаг перемещения объекта в плоскости XY	10 мкм
Максимальная абсолютная погрешность позиционирования объекта в плоскости XY	±1 мкм

Источник лазерного излучения

Длины волн сменных лазерных модулей	(405±5); (450±10); (515±50) нм
Выходная мощность	20 мВт
Стабильность выходной мощности (RMS, после четырёх часов)	<1 %
Минимальный диаметр сфокусированного пучка на объекте исследования	14 мкм±5 %

Стационарный режим

Диапазон измерения фототока	$100 \cdot 10^{-6}$ – $100 \cdot 10^{-3}$ А
Минимальное значение измеряемого фототока	100 пА
Погрешность измерения фототока	0,075 %

Гармонический режим

Частота модуляции излучения лазера с шагом от 1 Гц	$1 \cdot 10^3$ – $20 \cdot 10^6$ Гц
Диапазон измерения фототока (RMS)	10^{-4} – 10^{-3} А
Минимальное значение измеряемого фототока (RMS)	1 мкА
Погрешность измерения фототока (RMS)	<1 %

Импульсный режим

Длительность импульсов модуляции излучения лазера	10^{-4} – 10^{-3} с
Скважность	2–10

Минимальная длительность фронта и спада импульса	>20 нс
Диапазон измерения фототока	10^{-4} – 10^{-3} А
Минимальное значение измеряемого фототока.....	5 мкА
Погрешность измерения фототока, менее.....	<3 %

Измерение спектра фотолюминесценции

Диапазон длин волн	350–1100 нм
Оптическое разрешение.....	1,5 нм

Заключение. В отличие от известных установок фотоэлектрической диагностики, регистрирующих интегральный фотоэлектрический отклик при фотовозбуждении всей поверхности структуры, представленный измерительный комплекс позволяет регистрировать и визуализировать фотоэлектрический отклик при локальном динамическом фотовозбуждении и различных видах модуляции его интенсивности. По пространственной разрешающей способности и чувствительности комплекс не уступает лучшим зарубежным образцам.

Результаты апробации комплекса на InGaN/GaN светодиодах в статическом и динамическом режимах фотовозбуждения подтверждают наличие неоднородностей в распределении фотоэлектрического отклика по поверхности кристалла светодиода. Разработанный измерительный комплекс можно использовать для диагностики качества как светоизлучающих гетероструктур, так и других классов полупроводниковых приборов с p – n -переходами: транзисторов, солнечных элементов, фотодиодов и т. д.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732159 р_офи_м.

Л и т е р а т у р а

1. **Авакянц Л. П., Бадгутдинов М. Л., Боков П. Ю. и др.** Спектры электроотражения гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaIn/GaN // ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 9. С. 1078–1084.
2. **Li Q., Wang S., Gong Z.-N. et al.** Time-resolved photoluminescence studies of InGaN/GaN multi-quantum-wells blue and green light-emitting diodes at room temperature // Optik-International J. Light and Electron Optics. 2016. V. 127.

No. 4. P. 1809–1813.

3. **Liu L., Wang W., Huang J.-L., Hu X., Chen P., Huang J.-J., Feng Z. C.** Time-Resolved and Temperature-Varied Photoluminescence Studies of InGaN/GaN Multiple Quantum Well Structures // 12th Intern. Conf. Solid State Lighting and 4th Intern. Conf. on White LEDs and Solid State Lighting. Proc. of SPIE. 2012. V. 8484. P. 848412.

4. **Барановский М. В., Глинский Г. Ф.** Экспресс-диагностика светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN фотоэлектрическим методом // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 10. С. 22–28.

5. **Карпович И. А.** Фотоэлектрическая спектроскопия квантоворазмерных гетеронаноструктур In(Ga)As/GaAs, выращенных газовой фазой эпитаксией // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 5(2). С. 233–242.

6. **Павлова Е. Д., Горшков А. П., Бобров А. И., Малехонова Н. В., Звонков Б. Н.** Исследование гетероструктур с комбинированным слоем квантовых точек/квантовой ямы In(Ga)As/GaAs и delta-слоем Mn // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. Вып. 12. С. 1617–1620.

7. **Сергеев В. А., Васин С. В., Радаев О. А., Фролов И. В.** Автоматизированная установка диагностики качества светоизлучающих гетероструктур методом динамического фотоэлектрического отклика // Автоматизация процессов управления. 2017. № 2. С. 92–97.

8. **Лушников Д. Е., Черторийский А. А.** Измерение деформации упругого элемента с использованием фотоприёмной линейки // INTERMATIC–2016: Материалы междунар. науч.-техн. конф. Москва, 21–25 ноября 2016 г. С. 179–181.

9. **Sergeev V. A., Vasin S. V., Radaev O. A., Frolov I. V.** Measuring complex for registering photoelectric response of LED heterostructures under local photoexcitation // Proc. of the Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. MWENT–2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337210.

10. **Черторийский А. А., Веснин В. Л., Беринцев А. В.** Особенности корреляционной обработки сигналов датчиков на основе волоконно-оптических брэгговских решёток // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2011. С. 193–198.

Дата принятия: 27.07.2018.