

УДК 621.315.592:535.37

## КОНТРОЛЬ «ЖЕЛТОЙ» ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaIn/GaN

© 2015 г. Н. Б. Гладышева<sup>1</sup>, В. В. Груздов<sup>1</sup>, М. Е. Гусев<sup>1</sup>, Ю. В. Колковский<sup>1,2</sup>, Ю. А. Концевой<sup>1,2</sup>, Е. Ф. Певцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПП «Пульсар»,  
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

<sup>2</sup>МГТУ «МИРЭА»,  
просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия

Фотолюминесценция с максимумом, соответствующим желтому цвету свечения видимого спектра (так называемая желтая люминесценция), определяется глубокими уровнями в буферном слое GaN гетероструктур и зависит от условий роста гетероструктур. В свою очередь, глубокие уровни влияют на сопротивление омических контактов СВЧ–транзисторов, изготовленных на таких гетероструктурах. Это обуславливает надежность работы СВЧ–транзисторов на основе GaN.

Разработаны два типа установок для контроля фотолюминесценции с максимумом в желтой части видимого спектра, предназначенные для характеристики качества гетероструктур AlGaIn/GaN/SiC и AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Одна из представленных установок позволяет проводить «экспресс–контроль» желтой фотолюминесценции, а другая — снимать «карты» фотолюминесценции по площади пластин с гетероструктурами. Приведены примеры «карт» фотолюминесценции для структур, выращенных на различных подложках.

**Ключевые слова:** «желтая» фотолюминесценция гетероструктур AlGaIn/GaN, «экспресс–контроль» фотолюминесценции, построение «карт» фотолюминесценции, гетероструктуры AlGaIn/GaN/SiC и AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Введение

Качество широкозонных материалов и структур можно эффективно контролировать методами фотолюминесценции [1–3].

Фотолюминесценция (ФЛ) с максимумом, соответствующим желтому цвету свечения видимого спектра (так называемая желтая ФЛ), соответствует диапазону энергий 2,0–2,5 эВ ( $\Delta\lambda = 496\div 620$  нм).

В работе [1] идентификацию мелких фоновых примесей и определение относительной концентрации дефектов в выращенных пленках проводили методом низкотемпературной ФЛ. Спектры ФЛ снимали для слоев GaN, выращенных в установке молекулярно–лучевой эпитаксии без заливки жидкого азота в криопанели и в установке с криопанелями, заполненными жидким азотом. В спектрах ФЛ наблюдали линии, обусловленные двумя видами рекомбинаций:

- с участием примесей (группа линий с максимумом в области 3,29 эВ);
- через уровни дефектов (линия с максимумом в области 2,3 эВ).

Одним из акцепторов, создающих глубокие уровни, может быть

примесь марганца в GaN. В работе [1] было отмечено, что отношение интенсивностей линий краевой и «дефектной» ФЛ в спектре пленок GaN может служить критерием их совершенства. В спектре ФЛ слоя, выращенного без заливки жидкого азота в криопанели, при прочих одинаковых условиях интенсивность линий, связанных с дефектами (и, следовательно, концентрация дефектов), по крайней мере на порядок величины была больше, чем в спектре слоя, выращенного в установке с криопанелями, заполненными жидким азотом.

В работе [2] было показано, что в эпитаксиальных слоях GaN–HEMT возникает сильная «желтая» люминесценция. Она концентрируется в GaN–буфере эпитаксиальных слоев GaN–HEMT и связана с вакансиями Ga и примесями углерода, которые способствуют образованию глубоких ловушек для электронов.

Ниже рассмотрены результаты, полученные на образцах, выращенных при изменении условий роста эпитаксиальных слоев. Это привело к уменьшению желтой ФЛ и, следовательно, к росту быстродействия GaN–HEMT.

**Гладышева Надежда Борисовна**<sup>1</sup>; **Груздов Вадим Владимирович**<sup>1</sup> — кандидат экон. наук, профессор, генеральный директор; **Гусев Михаил Евгеньевич**<sup>1</sup> — инженер–электроник 1–й категории; **Колковский Юрий Владимирович**<sup>1,2</sup> — доктор техн. наук, профессор, зам. генерального директора по научной работе; **Концевой Юлий Абрамович**<sup>1,2</sup> — доктор техн. наук, профессор, e–mail: kontsevov@pulsarnpp.ru; **Певцов Евгений Филиппович**<sup>2</sup> — кандидат техн. наук, доцент, директор Центра проектирования интегральных схем, устройств нанoeлектроники и микросистем, e–mail: pevtsov@mirea.ru

Как указано в работе [3], наличие желтой ФЛ непосредственно связано с уменьшением надежности СВЧ-транзисторов на основе GaN.

Таким образом, необходимо создание аппаратуры для контроля «желтой» ФЛ.

**Аппаратура для контроля «желтой» фотолюминесценции**

**Аппаратура для «экспресс-контроля» сигнала желтой фотолюминесценции гетероструктур.** Схема установки для входного контроля желтой ФЛ гетероструктур представлена на рис. 1.

Исследования ФЛ при возбуждении импульсами светодиода с длиной волны 280 нм показали, что интенсивность сигнала падает при увеличении частоты ее возбуждения. Поэтому для входного контроля ФЛ контролировали на постоянном токе. Интенсивность ФЛ сильно уменьшается при нагреве образца, и ФЛ практически исчезает при нагреве образца до 200 °С.

Исследования показали, что сигнал, связанный с желтой ФЛ, сильно изменяется по площади образцов. В качестве примера в таблице приведены данные измерений сигнала ФЛ для образцов AlGaIn/GaN/SiC и AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Следует отметить, что диаметр луча ультрафиолетового (УФ) светодиода, возбуждающего люминесценцию, составлял 4 мм.

Из данных таблицы видно, что образцы на подложках карбида кремния более неоднородны по уровню ФЛ по сравнению с образцами гетероструктур на сапфировых подложках. Кроме того, в большинстве случаев интенсивность ФЛ на краях образцов гетероструктур на подложках карбида кремния меньше, чем в центре образцов. Причина неоднородности ФЛ в образцах пока не установлена. Однако ее неоднородность свидетельствует о неоднородности свойств гетероструктур по их площади.

Интенсивность желтой ФЛ гетероструктур на сапфировых подложках при обработке была уменьшена в 2 раза, так как возбуждающие люминесценцию УФ-лучи проходят через сапфировую подложку, отражаются от зеркала 7 (см. рис. 1) и снова возбуждают ФЛ в нитридной гетероструктуре. Для гетероструктур, расположенных на SiC-подложке, УФ-лучи полностью поглощаются в слое карбида кремния, и двукратное возбуждение ФЛ не реализуется.

**Аппаратура для построения «карт» фотолюминесценции по площади образцов.** Блок-схема аппаратуры для снятия «карт» ФЛ приведена на рис. 2.

В установке предусмотрено программируемое сканирование, позволяющее проводить измерения в следующих режимах: 10 × 10, 25 × 25, 50 × 50 и 100 × 100 точек. Кроме того, при измерении каждой последующей точки после бо-

**Разброс уровня сигнала желтой фотолюминесценции по площади исследованных гетероструктур**  
[Scatter of Yellow Photoluminescence Signal Across the Area of Test Heterostructures]

№ партии	Подложка	Фотолюминесценция, усл. ед		$(V_{\max} - V_{\min}) / V_{\text{ср}}, \%$
		в центре	на краях	
V-1983-3	C 2850-11*	58	68, 75, 49, 58	12,8
V-1913-3	A 3317-12*	50	16, 75, 62, 42	120
V-1913-6	C 2769-15*	43	18, 72, 45, 29	130
V-1913-5	C 2776-14*	40	17, 65, 32, 24	134
V-2196-3	C-3092-12*	67	36, 42, 56, 90	93
V-2225-3	A -3512-15*	57	38, 74, 40, 47	70
V-2226-2	C-3028-12*	56	57, 38, 38, 72	65
V-2226-5	C-3058-12*	58	53, 45, 56, 63	34
HT2Z00679	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43	51, 51, 53, 59	31
HT2Z00690	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42	47, 52, 51, 47	21
HT2Z00678	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43	50, 53, 54, 59	32

\* Подложка SiC; V — фотолюминесценция.

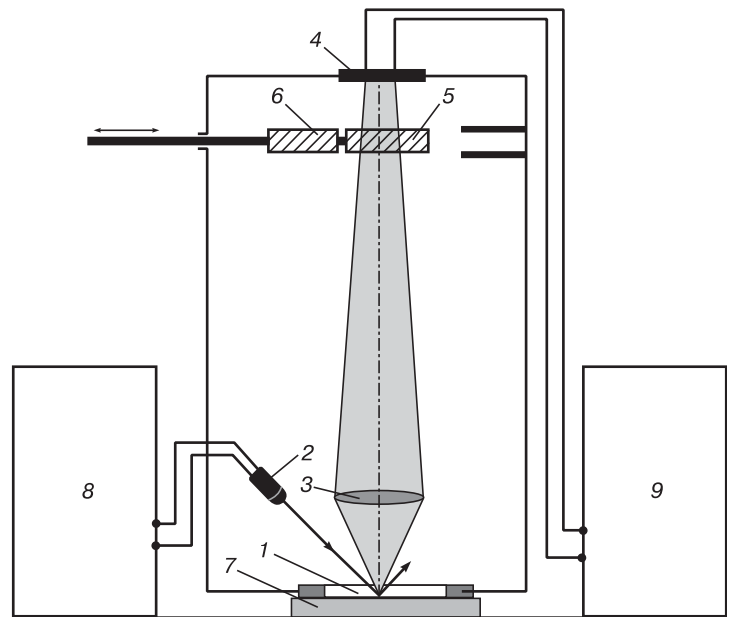


Рис. 1. Схема аппаратуры для входного контроля желтой ФЛ гетероструктур: 1 — исследуемый образец гетероструктуры; 2 — УФ-светодиод с фокусирующей системой; 3 — стеклянная линза, фокусирующая ФЛ-излучение исследуемого образца на фотодиод; 4 — кремниевый фотодиод; 5, 6 — два сменных фильтра, пропускающих ФЛ-излучение при длинах волн в диапазоне 530—550 и 340—360 нм соответственно; 7 — зеркало, расположенное за обратной стороной исследуемого образца и отражающее идущее к обратной стороне образца гетероструктуры ФЛ-излучение к линзе 3 и фотодиоду 4; 8 — система питания УФ светодиода; 9 — система, регистрирующая сигнал ФЛ-приемника 4

Fig. 1. Instrument for Input Control of PL Heterostructures: (1) Test Heterostructure Specimen, (2) UV LED with Focusing System, (3) Glass Lens Focusing PL Radiation of Sample to Photocell, (4) Silicon Photocell, (5) and (6) Two Changeable Filters Transmitting PL Radiation, (7) Mirror at the Back Side of the Test Specimen for Reflecting PL Radiation Emitted Towards the Back Side of the Heterostructure Specimen to Lens 3 and Photocell 4, (8) UV LED Power Unit and (9) System Detecting Signal of PL Receiver 4

лее быстрого перемещения каретка с пластиной останавливается примерно на 100 мс (за это время реализуется режим измерения тока фотодиода, при котором достигается сигнал, соответствующий сигналу измерения ФЛ при стационарных условиях).

На рис. 3 (см. третью стр. обложки) приведены «карты» желтой ФЛ для двух образцов, выращенных на подложках сапфира и карбида кремния. Измерения проведены в 2500 точках.

Из рис. 3 видно, что для образца гетероструктуры на сапфировой подложке сигнал ФЛ в центре достаточно однородный и по величине меньше, чем сигнал на краю пластины. Вместе с тем для образца, выращенного на подложке карбида кремния, повышенная величина сигнала ФЛ наблюдается в левой половине образца (базовый срез находится внизу рис. 3, а).

### Заключение

Разработано два вида аппаратуры для входного контроля гетероструктур AlGaIn/GaN/SiC и AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Проведены измерения «желтой» ФЛ гетероструктур, выращенных на указанных подложках. В дальнейшем предполагается сопоставлять величину и однородность «желтой» ФЛ с технологией роста

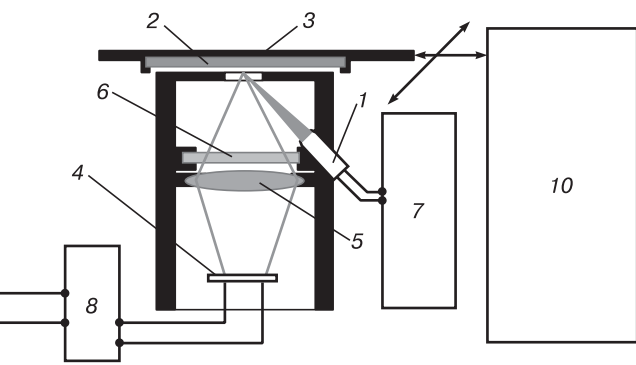


Рис. 2. Блок-схема аппаратуры для построения «карт» желтой фотолюминесценции гетероструктур AlGaIn/GaN:

1 — УФ-светодиод; 2 — исследуемая пластина с гетероструктурой AlGaIn/GaN; 3 — зеркало; 4 — кремниевый фотодиод; 5 — стеклянная линза; 6 — светофильтр, выделяющий диапазон длин волн, соответствующий «желтой» ФЛ; 7 — блок питания УФ-светодиода; 8 — усилитель тока фотодиода; 9 — компьютер; 10 — блок X–Y-сканирования

Fig. 2. Unit Diagram of Instrument for Mapping of Photoluminescence of AlGaIn/GaN Heterostructures: (1) UV LED, (2) Test Plate with AlGaIn/GaN Heterostructure, (3) Mirror, (4) Silicon Photocell, (5) Glass Lens, (6) Filter Separating Wavelengths Corresponding to Yellow PL, (7) UV LED Power Unit, (8) Photocell Current Amplifier, (9) PC and (10) X–Y Scanning Unit

гетероструктур и с параметрами СВЧ-транзисторов, изготовленных на гетероструктурах с различными подложками.

### Библиографический список

1. Suski, T. Mechanism of yellow luminescence in GaN / T. Suski, P. Perlin, H. Teisseyre, M. Leszczyński, I. Grzegory, J. Jun, M. Boćkowski, S. Porowski, T. D. Moustakas // *Appl. Phys. Lett.* – 1995. – V. 67, N 15. – С. 2188–2190.
2. Kikkawa, T. High performance and high reliability AlGaIn/GaN HEMTs / T. Kikkawa, K. Makiyama, T. Ohki, M. Kanamura, K. Imanishi, N. Hara, K. Joshin // *Phys. status solidi (a)*. – 2009. – V. 206, Iss. 6, P. 1135–1144. DOI: 10.1002/pssa.200880983
3. Jessen, G. H. Ohmic contact characterization of AlGaIn/GaN device layers with spatially localized LEEN spectroscopy / G. H. Jessen, B. D. White, S. T. Bradley, P. E. Smith, L. J. Brillson, J. E. van Nostrand, R. Fitch, G. D. Via, J. K. Gillespie, R. W. Dettmer, J. S. Sewell // *Solid-State Electronics*. – 2002. – V. 46, Iss. 9. – P. 1427–1431. DOI: 10.1016/S0038-1101(02)00075-8

Статья поступила в редакцию 28 мая 2015 г.

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2015, vol. 18, no. 2, pp. 146–148.

### Control of Yellow Photoluminescence in AlGaIn/GaN Heterostructures

Nadezhda B. Gladysheva<sup>1</sup>; Vadim V. Gruzdov<sup>1</sup> — Cand. Sci (Econ.), Professor, Director General; Mikhail E. Gusev<sup>1</sup> — electronics engineer; Yurii V. Kolkovskii<sup>1,2</sup> — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director General for Research; Yulii A. Kontsevoi<sup>1,2</sup> — Dr. Sci. (Eng.), Professor (kontsevoi@pulsarnpp.ru); Evgenii F. Pevtsov<sup>2</sup> — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor (pevtsov@mirea.ru).

<sup>1</sup>JSC «S&PE «Pulsar»,  
27 Okruzhnoi proezd, Moscow 105187, Russia

<sup>2</sup>Moscow Technological University (MIREA)  
78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russia

**Abstract.** Photoluminescence with the peak corresponding to yellow light in the visible spectrum (the so-called yellow luminescence) is generated by deep levels in the buffer GaN layer of the heterostructures and depends on heterostructure growth conditions. In turn, the deep levels affect the resistivity of the ohmic contacts of RF transistors based on these heterostructures. This determines the reliability of GaN HF transistor operation. Two types of instruments have been developed for controlling photoluminescence with the peak in the yellow spectral region for characterizing the quality of AlGaIn/GaN/SiC and AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterostructures. One of them provides for rapid control of yellow photoluminescence and the other allows mapping

of photoluminescence across the heterostructure area. Examples of photoluminescence maps for experimental structures grown on different substrates have been given.

**Keywords:** yellow photoluminescence of AlGaIn/GaN heterostructures, rapid photoluminescence control, photoluminescence mapping, AlGaIn/GaN/SiC and AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterostructures.

### References

1. Suski T., Perlin P., Teisseyre H., Leszczyński M., Grzegory I., Jun J., Boćkowski M., Porowski S., Moustakas T. D. Mechanism of yellow luminescence in GaN. *Appl. Phys. Lett.* 1995, vol. 67, no. 15, pp. 2188–2190.
2. Kikkawa T., Makiyama K., Ohki T., Kanamura M., Imanishi K., Hara N., Joshin K. High performance and high reliability AlGaIn/GaN HEMTs. *Phys. Status Solidi (a)*. 2009, vol. 206, no. 6, pp. 1135–1144. DOI: 10.1002/pssa.200880983
3. Jessen G. H., White B. D., Bradley S. T., Smith P. E., Brillson L. J., van Nostrand J. E., Fitch R., Via G. D., Gillespie J. K., Dettmer R. W., Sewell J. S. Ohmic contact characterization of AlGaIn/GaN device layers with spatially localized LEEN spectroscopy. *Solid-State Electronics*. 2002, vol. 46, no. 9, pp. 1427–1431. DOI: 10.1016/S0038-1101(02)00075-8.

Received May 28, 2015