

К. ф.-м. н. В. П. ВЕЛЕЩУК, д. ф.-м. н. А. И. ВЛАСЕНКО, к. ф.-м. н. З. К. ВЛАСЕНКО, к. ф.-м. н. В. В. ШИНКАРЕНКО, к. т. н. Я. Я. КУДРИК, П. О. САЙ, к. ф.-м. н. В. В. БОРЩ*

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

E-mail: vvvit@ukr.net

ВЛИЯНИЕ РАЗБРОСА ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ RGB-СВЕТОДИОДОВ НА ОДНОРОДНОСТЬ СВЕЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ЭКРАНОВ ПРИ МИНИМАЛЬНОЙ ГРАДАЦИИ ЯРКОСТИ

Рассмотрены проблемы неоднородности свечения светодиодных RGB-экранов при низких, минимальных градациях яркости, вызванные неоднородностью свечения светодиодов. Установлено, что наибольший разброс значений электрических параметров отдельных RGB-светодиодов (FM-Z3535RGBW) имеют структуры синего цвета излучения $In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN$. Подтвержден технический предел улучшения качества светодиодных экранов — возможность уменьшения длительности нагрузок до 6–8 нс на светодиод.

Ключевые слова: RGB-светодиод, электрические параметры, неоднородность свечения, $InGaN/GaN$.

Светодиоды и изделия на их основе нашли широкое применение в повседневной жизни, пройдя путь от индикации процессов к передаче цветов и оттенков. В настоящее время промышленно изготавливаются светодиодные экраны различных типов, качественная работа которых зависит от однородности передачи цветов целого массива светодиодов (СД).

Одной из проблем производства СД-экранов является достижение однородности свечения отдельных СД для всего диапазона яркости и для всех цветов [1], а также достижение максимально большого соотношения «минимальная/максимальная яркость» для всего цветового диапазона. Установлено, что при низких (минимальных) градациях яркости проявляется хаотичная неоднородность свечения, которая увеличивается с уменьшением яркости и наблюдается для структур синего цвета излучения (рис. 1, 2). Причиной этого эффекта не может быть разброс значений тока I с выводов драйверов, поскольку величина разброса тока от канала к каналу драйвера составляет $\pm 1\%$ (typ) ... $\pm 3\%$ (max), от драйвера к драйверу — $\pm 1\%$ (typ) ... $\pm 2\%$ (max) [2], и если бы это влияло на однородность свечения, то СД-экраны содержали бы темные полосы, в то время как в нашем случае неоднородность хаотичная.

Существуют различные виды и, соответственно, причины возникновения неоднородности изображений СД-экранов по яркости. Самая рас-

пространенная — неодинаковость (разброс) яркости отдельных СД. В нашем же случае неоднородность обусловлена тем, что часть синих светодиодов не включена, поскольку через них

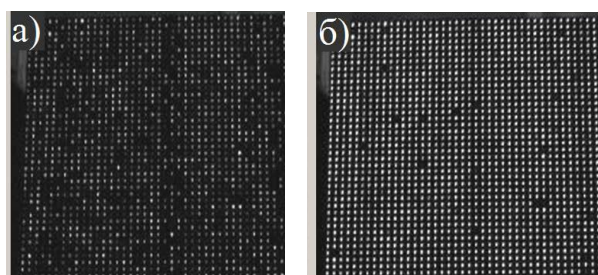


Рис. 1. Фотография части светодиодного экрана при низких градациях свечения синих структур (а — 50-я, б — 80-я градация из $2^{16} = 65536$ возможных), полученная сразу после изготовления светодиодного экрана во время испытаний

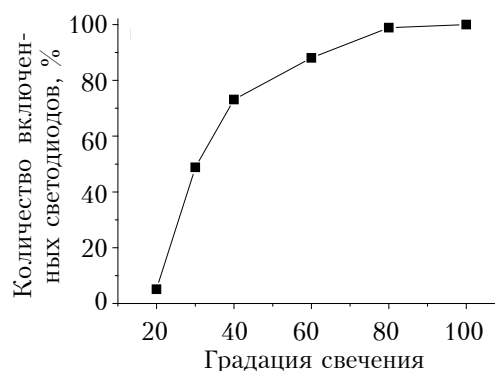


Рис. 2. Зависимость количества включенных светодиодов (нормированного к общему количеству, равному 4096) от градации свечения синих структур

Публикация содержит результаты исследований, проведенных при грантовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (№ заявки 32472 конкурса Ф76).

не протекает ток, достаточный для появления излучения.

Причиной неоднородности может быть разброс электрических и световых параметров отдельных RGB-структур светодиодов ввиду особенностей технологии их изготовления [3]. В настоящей работе исследовался разброс значений параметров вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик промышленно изготавливаемых RGB-структур светодиодов, а также время нарастания/спада импульса электролюминесценции структур синего излучения.

Условия проведения эксперимента

Изучались типичные промышленно изготавливаемые RGB-светодиоды FM-Z3535RGBW до введения их в эксплуатацию. Согласно документации производителя, структуры изготовлены из таких полупроводников: красный цвет излучения — AlGaInP, зеленый — $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{GaN}$, синий — $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$. Номинальный рабочий ток для всех структур составляет 20 мА.

Вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики при постоянном напряжении и импульсы электролюминесценции (ЭЛ) при длительности импульса тока 40, 100, 300 нс были получены при комнатной температуре. Дискретность установления постоянного напряжения — от 2,5 мВ, диапазон измерения емкости — от 10^{-15} до 10^{-7} Ф. Поскольку данные светодиоды в экранах для трансляции видео работают в импульсном режиме тока (широотно-импульсная модуляция) с высокими частотами обновления изображения, измерение ВФХ происходило при модулированном сигнале частотой 1 МГц.

Вольт-амперные характеристики структур

Механизмы токопрохождения и функциональная зависимость «ток — напряжение» в гетероструктурах $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$ (рис. 3, а, б) в целом известны (см., например, [4, 5]). При напряжении 1,2–2,25 В ток $I \sim \exp(eU/E_i)$, где показатель экспоненты E_i очень слабо зависит от температуры, т. е. ВАХ в полулогарифмическом масштабе имеет участок, близкий к линейному с постоянным наклоном. При напряжении $U > 2,6$ В (напряжение включения ЭЛ) преобладает инжекционная компонента тока, $I = I_0 \exp(eU/(nkT))$, наблюдается резкий экспоненциальный рост при инжекции в активную область (в квантовую яму $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$). В полулогарифмическом масштабе ВАХ также близка к прямой, но с другим наклоном. При больших токах протекания (свыше 10^{-3} А) из-за последовательного сопротивления R_s омических контактов происходит термический разогрев, в результате чего наблюдаются отклонения от линейности в полулогарифмических координатах [4, 5].

Видно, что для синих структур ВАХ групп А и Б отличается от другой совокупности ВАХ, которые хорошо сгруппированы — кривые А имеют меньший ток в диапазоне изменения напряжения от 2,5 до 3 В. Это согласуется с ВФХ, приведенными далее: диффузная емкость структур группы А на рис. 3, б самая низкая среди всех десяти. ВАХ структур группы Б имеют больший туннельный ток. Мы предполагаем, что указанные отклонения поведения вольт-амперных характеристик группы А на рис. 3 (а, б) приводят к нелинейности свечения, которая может быть скомпенсирована аппаратным способом (см., например, [2]). Поведение ВАХ группы Б при малых токах соответствует безызлучательной рекомбинации, которая и приводит к отсутствию свечения при малой градации яркости, которая не может быть исправлена аппаратными методами. Исправление подобного разброса может быть проведено с помощью дополнительной отбраковки светодиодов, оценка результативности которой проводилась в [6].

Что касается структур зеленого и красного излучения, их ВАХ хорошо сгруппированы, в полулогарифмическом масштабе зависимость практически прямая, что указывает на удовлетворительную технологическую однородность структур.

В процессе исследований установлено, что все значения напряжения при номинальных значениях тока попадают в интервал согласно спецификации данных светодиодов. Значит, для использования подобных светодиодов в изготовлении высококачественных экранов с большим контрастом необходимо либо ужесточение спецификации, либо создание внутренней линии сортировки.

Вольт-фарадные характеристики структур

Барьерная емкость $C_{\text{БАР}}$ в резком переходе (в $p^+ - n^-$ или $p - n^+$ -переходе, когда один из контактирующих полупроводников имеет существенно высшую концентрацию основных носителей заряда) описывается как

$$C_{\text{БАР}} = \sqrt{\frac{e\epsilon_s N_B}{2} \frac{1}{U_{bi} \pm U - 2kT/e}},$$

где e — заряд электрона;

ϵ_s — диэлектрическая постоянная полупроводника;

N_B — концентрация носителей в менее легированном полупроводнике;

U_{bi} — напряжение, обусловленное высотой барьера на $p - n^-$ -переходе;

k — постоянная Больцмана;

T — температура.

При расчете $C_{\text{БАР}}$ знак «+» или «-» при U выбирается в зависимости от направления смещения.

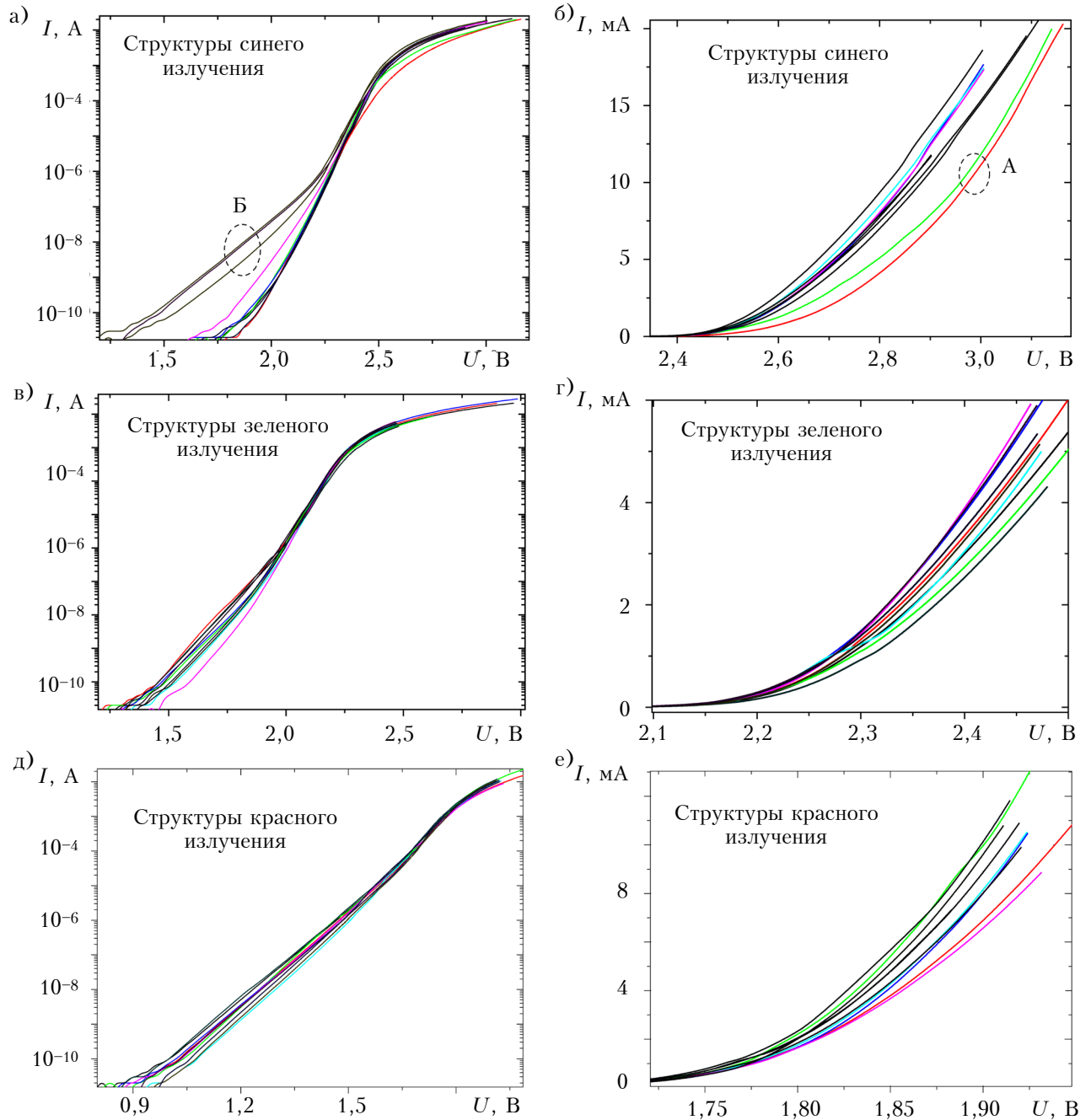


Рис 3. ВАХ десяти исследованных структур синего (а, б), зеленого (в, г) и красного (д, е) цвета излучения RGB-светодиода, представленные в полулогарифмическом (слева) и линейном (справа) масштабе

Диффузная емкость $C_{\text{диф}}$ связана с протеканием прямого (диффузного) тока I и пропорциональна ему и времени жизни τ неосновных носителей заряда:

$$C_{\text{диф}} = \frac{e}{nkT} \tau I = \frac{e}{nkT} \tau I_0 \exp \frac{eU}{nkT}.$$

Общая емкость $C = C_{\text{бар}} + C_{\text{диф}}$, где при прямом падении напряжения (рис. 4) доминирует $C_{\text{диф}}$.

Из рис. 4, а видно, что емкость «синих» структур колеблется от 72,9 до 180,2 пФ при напряже-

нии 3 В. Меньшую диффузную емкость имеют структуры 2 и 3 (группа А на рис. 3, б). Также видно, что ВФХ структур 7, 8, 9 (группа Б на рис. 3, а) с увеличенными туннельными токами (от 10^{-10} до 10^{-6} А на ВАХ) более пологие — туннельный ток влияет на диффузионную емкость.

Наклоны ВФХ большинства структур близки к линейным и монотонно возрастают в диапазоне изменения напряжения от 1,5 до 2 В, что указывает на однородность легирования в области перехода. Параллельность кривых (оди-

наковый наклон) в этом диапазоне для структур 5, 10 является показателем того, что это очень качественные структуры. Образцы 2 и 3 имеют худший профиль легирования и меньшую емкость, а также требуют большего напряжения при рабочем токе (см. рис. 3, б), что и может быть причиной рассогласования при работе в массиве с другими СД.

Наклон ВФХ структур 7, 8, 9 существенно отличается от ВФХ тех же структур 5 и 10 в диапазоне $U = 1 - 2$ В, что указывает на различия в профиле легирования их $p-n$ -перехода и его

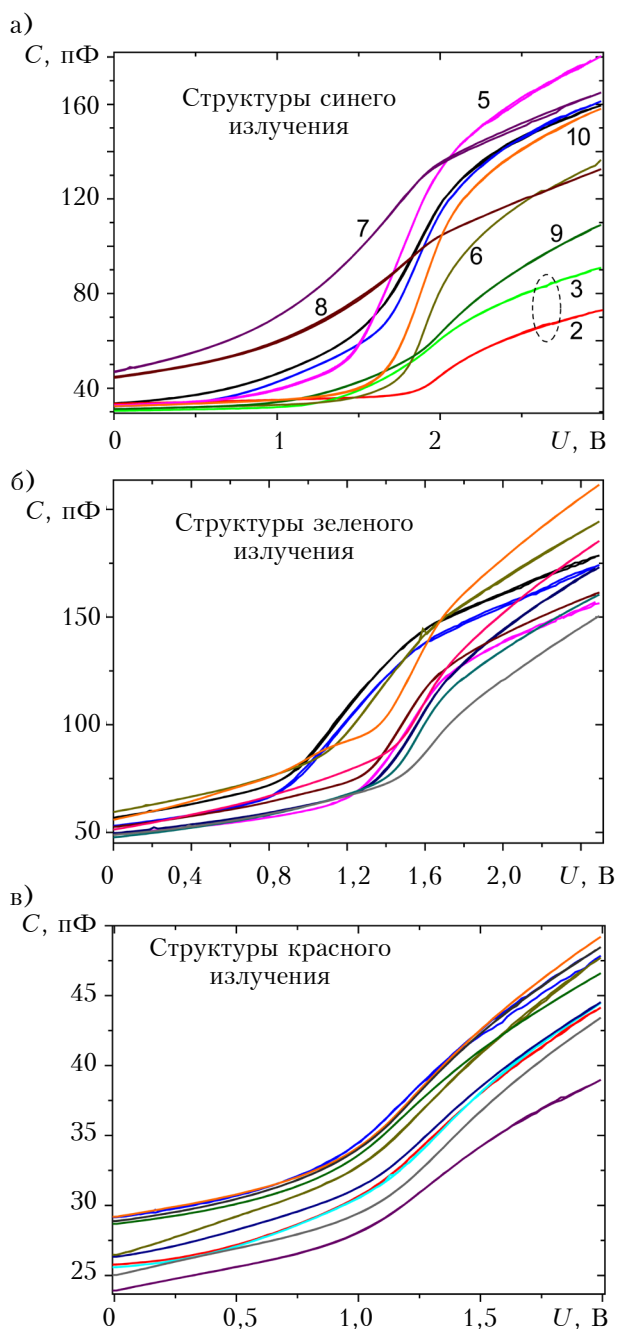


Рис. 4. ВФХ десяти исследованных структур синего (а), зеленого (б) и красного (в) цвета излучения RGB-светодиода

размытость. Этот недостаток может возникать в процессе технологического отжига или при перегреве и фактически не может быть исправлен после появления.

Среди «зеленых» структур имеется три, ВФХ которых отличаются следующей особенностью: включение их диффузионной емкости начинается уже при 0,9 В, то есть «горбы» сдвинуты в область низких значений напряжения (рис. 4, б). Это не является критическим и характерно для таких структур зеленого цвета излучения, а обусловлено, вероятно, высокопроводящими областями с увеличенным содержанием индия в слое структуры $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$.

ВФХ «красных» структур в области от 0 до 2 В (рис. 4, в) практически одинаковы, а разброс значений их емкости небольшой (10 пФ).

Обсуждение результатов

Известно, что разброс электрических и световых параметров светодиодных структур, изготовленных в одном технологическом цикле на общей пластине-подложке, обусловлен сугубо технологическими причинами, возникающими при их эпитаксии, формировании омических контактов и технологических обработках [3]. Большую роль здесь играет однородность по площади состава квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, ее толщины (около 3 нм) и резкость профилей гетерограниц $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$, а также вариация сопротивления омических контактов.

Для «синих» кристаллов распределение по напряжению включения в области 2,5 В (где ток мал и последовательное сопротивление R_s имеет минимальное влияние) связано с неоднородностью активной области через флуктуации реагентов при МOCVD-эпитаксии, а различия значений прямого напряжения при рабочем токе порядка 10 мА (большой ток и последовательное сопротивление R_s имеет значительное влияние) — с разбросом величины удельного контактного сопротивления контактов к n - и p -слоям.

Установлено, что разброс значений напряжения при фиксированном токе 5 мА составляет 0,15 В для синих структур, 0,08 В для зеленых и 0,034 В для красных. Такой постоянный ток, с нашей точки зрения, должен коррелировать с работой светодиодов при импульсных нагрузках субмикросекундной длительности. Разброс значений емкости при фиксированном напряжении составляет $180 - 73 = 107$ пФ при напряжении 3 В для синих структур, $210 - 150 = 60$ пФ при 2,5 В для зеленых и $49 - 39 = 10$ пФ при 2 В для красных, что в пересчете на потребляемую мощность, которая влияет на интенсивность свечения, составит 0,75; 0,4 и 0,17 мВт соответственно. Как видно, наибольший разброс параметров наблюдается у структур синего излучения.

Еще одним существенным фактором, который влияет на неоднородность свечения массива светодиодов, может быть максимальная частота переключения (срабатывания) светодиодов,

которая в импульсном режиме будет ограничена временем нарастания и спада импульса тока и, соответственно, электролюминесценции [7].

Минимальная длительность импульса тока в современных СД-экранах, принцип действия которых основан на широтно-импульсной модуляции, достигает 40 — 60 нс. Частота передачи данных специальных драйверов импульсного тока СД-экранов составляет 33 МГц [1]. Поэтому нами было измерено время нарастания/спада импульса ЭЛ структур синего излучения (рис. 5). Для этого был использован генератор наносекундных импульсов Г 5-48, электролюминесценция регистрировалась кремниевым $p-i-n$ -фотодиодом SFH 203 P и осциллографом Tektronix TDS 2022. Установлено, что фронт нарастания/спада импульса ЭЛ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ -структур исследуемых RGB-СД составляет 6 — 8 нс, что является типичным для светодиодов на основе нитрида галлия [7]. Как видно из рис. 5, данные светодиоды хорошо срабатывают при длительности импульса тока выше сотни наносекунд, а временная зависимость их интенсивности свечения близка к прямоугольной. При меньших значениях длительности сигнал приобретает треугольную форму, что приводит к нелинейной зависимости интегральной по времени интенсивности от длительности импульса, что должно приниматься во внимание при необходимости повышения контрастности СД-экранов.

Выводы

Проведенные исследования RGB-светодиодов (FM-Z3535RGBW) показали, что наибольший разброс электрических характеристик имеют структуры синего цвета излучения. Анализ электрических характеристик (ВАХ, ВФХ) показал наличие неоднородных полупроводниковых переходов и омических контактов в синих светодиодах (в частности, участки ВАХ, которые могут соответствовать безызлучательным рекомбинационным переходам), что возможно является источником конечной неоднородности свечения в СД-экранах при минимальных градациях яркости.

Измерения импульсной электролюминесценции позволили подтвердить технический предел улучшения качества светодиодных экранов, а именно возможность уменьшения длительности нагрузок до 6 — 8 нс, при которых уже проявляется нелинейность зависимости интенсивности свечения светодиодов от времени свечения. Такая информация необходима, в первую очередь, производителям СД-экранов, поскольку величина контраста (соотношение «минимальная/максимальная яркость») выступает основным показателем качества экрана и, как следствие, влияет на его цену и конкурентоспособность.

Для повышения качества работы СД-экранов рекомендуется несколько сузить интервал допустимого разброса ВАХ при сортировке светодиодов для получения меньшего интервала разброса напряжения при рабочем токе. Такая допол-

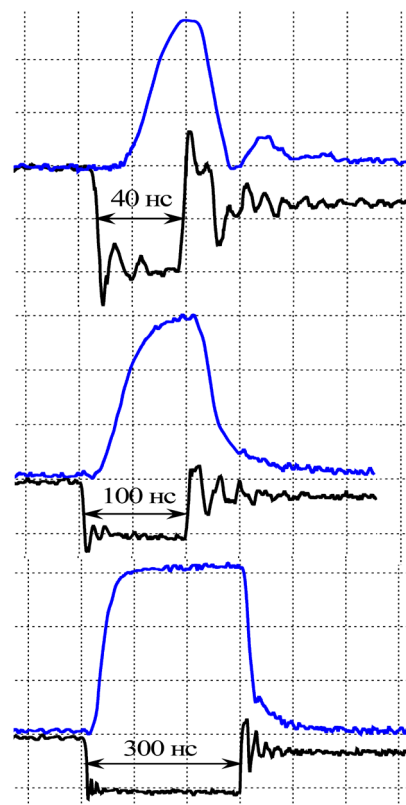


Рис. 5. Импульсы электролюминесценции и тока разной длительности для структур синего излучения RGB-СД

нительная сортировка СД, конечно же, снизит процент выбранных из общего числа светодиодов, но может улучшить качество передачи изображения за счет возможности использования более низких градаций яркости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. LED Fine Pitch Display Possible Problems and Driver IC Solutions. Macroblock 2015 [<http://www.mblock.com.tw/support.php?Type=dl&KindID=3>]
2. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc5957.pdf>
3. III-Nitride Devices and Nanoengineering // Ed. by Z.C. Feng. — UK, London: Imperial College Press, 2008.
4. Lee S.W., Oh D.C., Goto H. et al. Origin of forward leakage current in GaN-based light-emitting devices // Appl. Phys. Lett. — 2006. — Vol. 89. — P. 132117(3). — <http://dx.doi.org/10.1063/1.2357930>.
5. Прудаев И.А., Гольгин И.Ю., Ширапов С.Б. и др. Влияние температуры на механизм инжекции носителей в светодиодах на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN // ФТП. — 2013. — Т. 47, вып. 10. — С. 1391—1395.
6. Sorokin V.M., Kudryk Ya.Ya., Shynkarenko V.V. Degradation processes in LED modules // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2016. — Vol. 19, N 3. — P. 248—254. — <http://dx.doi.org/10.15407/spqeo19.03.248>.
7. Pei Y., Zhu S., Yang H. et al. LED modulation characteristics in a visible-light communication system // Optics and Photonics Journal. — 2013. — N 3. — P. 139—142. — <http://dx.doi.org/10.4236/opj.2013.32B034>.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.02 2017 г.

В. П. ВЕЛЕЩУК, О. І. ВЛАСЕНКО, З. К. ВЛАСЕНКО, В. В. ШИНКАРЕНКО,
Я. Я. КУДРИК, П. О. САЙ, В. В. БОРЩ*

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ,
*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
E-mail: vvvit@ukr.net

ВПЛИВ РОЗКИДУ ЗНАЧЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ RGB-СВІТЛОДІОДІВ НА ОДНОРІДНІСТЬ СВІЩЕННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ЕКРАНІВ ПРИ МІНІМАЛЬНІЙ ГРАДАЦІЇ ЯСКРАВОСТІ

Розглянуто проблеми неоднорідності свічення світлодіодних RGB-екранів при низьких, мінімальних градаціях яскравості, що спричинені неоднорідністю свічення світлодіодів. Встановлено, що найбільший розкид електричних параметрів окремих RGB-світлодіодів (FM-Z3535RGBW) мають структури синього кольору випромінювання $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$. Вивчено розкид електричних параметрів окремих структур RGB-світлодіодів. Підтверджено технічну межу покращення якості світлодіодних екранів – можливість зниження тривалості навантажень до 6–8 нс на світлодіод.

Ключові слова: RGB-світлодіод, електричні параметри, неоднорідність свічення, $\text{InGaN} / \text{GaN}$.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.30
UDC 621.383:621.381.2

V. P. VELESCHUK, O. I. VLASENKO,
Z. K. VLASENKO, V. V. SHYNKARENKO,
Ya. Ya. KUDRYK, P. O. SAI, V. V. BORSHCH*

Ukraine, Kyiv, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine;
*Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
E-mail: vvvit@ukr.net

INFLUENCE OF VARIATION OF ELECTRICAL PARAMETERS VALUES OF RGB LEDs ON THE RADIATION UNIFORMITY OF LED DISPLAYS AT MINIMAL LUMINOSITY GRADE

The emission uniformity of LED chips in the entire range of brightness and colors is the problem in LED displays manufacture process. It was approved that at lowering brightness gradations appearing the radiation nonuniformity between LED chips, and the higher disorders will be seen on the lesser emission levels. The RGB LED chips, observed by us, were based on AlGaInP (red), $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ (green), and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ (blue) and had nominal working current 20 mA. Analysis of the current-voltage characteristics and capacitance-voltage characteristics showed the presence of inhomogeneous semiconductor junctions and ohmic contacts in blue LEDs structures that are the source of possible irregularities in the final emission of LED displays. The variation of voltages (at current 10 mA) were 2.81–2.98 V for blue structures, and 1.9–2.0 V for red ones. Some of the blue structures had additional parasite current-flow mechanism at low current. Rise time and fall time of electroluminescence pulse of blue structures were measured. The shortest LED pulse time in LED displays is limited by duration of 6–8 ns. The quality of LED displays may be improved by implementating the preliminary control of LED chips in a narrower range of voltage variation at operating currents, or more narrow interval of $I-V$ variation. This additional LEDs sorting will of course reduce the percentage of the total amount of light-emitting diodes, but may improve the image (video, photo) quality at translations by using a lower brightness gradations.

Key words: RGB LED, $I-V$ curves, InGaN/GaN .

REFERENCES

1. LED Fine Pitch Display Possible Problems and Driver IC Solutions. Macroblock 2015 [http://www.mblock.com.tw/support.php?Type=dl&KindID=3]
2. http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc5957.pdf
3. *III-Nitride Devices and Nanoengineering*. Ed. by Z.C. Feng. UK, London: Imperial College Press, 2008, 476 p.
4. Lee S.W., Oh D.C., Goto H., Ha J.S., Lee H.J., Hanada T., Cho M. W., Yao T., Hong S.K., Lee H.Y., Cho S.R., Choi J.W., Choi J.H., Jang J.H., Shin J.E., Lee J.S. Origin of forward leakage current in GaN-based light-emitting devices. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, p. 132117(3). http://dx.doi.org/10.1063/1.2357930.
5. Prudaev I.A., Golygin I.Yu., Shirapov S.B., Romanov I.S., Khludkov O.P. Tolbanov. Influence of temperature on the

mechanism of carrier injection in light-emitting diodes based on InGaN/GaN multiple quantum wells. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no 10, pp. 1382-1386. http://dx.doi.org/10.1134/S1063782613100230.

6. Sorokin V.M., Kudryk Ya.Ya., Shynkarenko V.V., Kudryk R.Ya., Sai P.O. Degradation processes in LED modules. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2016, vol. 19, no 3, pp. 248-254. http://dx.doi.org/10.15407/spqe019.03.248.

7. Pei Y., Zhu S., Yang H., Zhao L., Yi X., Wang J., Li J. LED modulation characteristics in a visible-light communication system. *Optics and Photonics Journal*, 2013, no 3, pp. 139-142. http://dx.doi.org/10.4236/opj.2013.32B034.