

06.2;06.3;07;12

ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГОЛУБЫХ И ЗЕЛЕННЫХ InGaN/AlGaIn/GaN СВЕТОДИОДОВ С ПОМОЩЬЮ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

© А.Н.Туркин, А.Э.Юнович

Предложена методика измерений мощности и внешнего квантового выхода излучения голубых и зеленых светодиодов (СД) с помощью фотопреобразователей (ФП) из аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$).

1. Известно, что мощность P и внешний квантовый выход η_e излучения светодиодов (СД) удобно измерять с помощью согласованных по спектру полупроводниковых фотопреобразователей (ФП). Методика измерений P и η_0 для СД на основе GaAs и GaP с помощью ФП из Si, описанная в [4], дает большие погрешности для голубых и зеленых СД вследствие падения чувствительности ФП из монокристаллического Si в коротковолновой области спектра. Поскольку ширина запрещенной зоны аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$) значительно больше, чем у монокристаллического Si, применение многокаскадных ФП из $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{H}$ позволило создать эффективные ФП с большой фоточувствительностью во всей видимой области спектра ([5] и ссылки там же). В связи с разработками голубых и зеленых СД из гетероструктур на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ [1-3,6] возникла задача измерений P и η_e для этих СД с помощью ФП из $a\text{-Si:H}$.

2. На рис. 1 представлен спектр квантового выхода $Q_e(\lambda)$ (электронов на фотон) для двухкаскадного ФП из $a\text{-Si:H}$, аналогичного описанным в [5] ФП, но без третьего каскада из $a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{H}$. На этом же рисунке показаны нормированные к максимуму спектры СД $I(\lambda)d(\lambda)$ из гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ [2,3,6]. В спектральной области, соответствующей голубым и зеленым СД, величина $Q_e(\lambda)$ изменяется в небольших пределах, от 0.65 до 0.8.

Оценки, сделанные численным интегрированием, показывают, что величина тока короткого замыкания ФП J_{ph} может быть связана с падающим от СД потоком квантов $\Phi = \Phi_{\max} \int I(\lambda)d(\lambda)$ некоторым средним коэффициентом

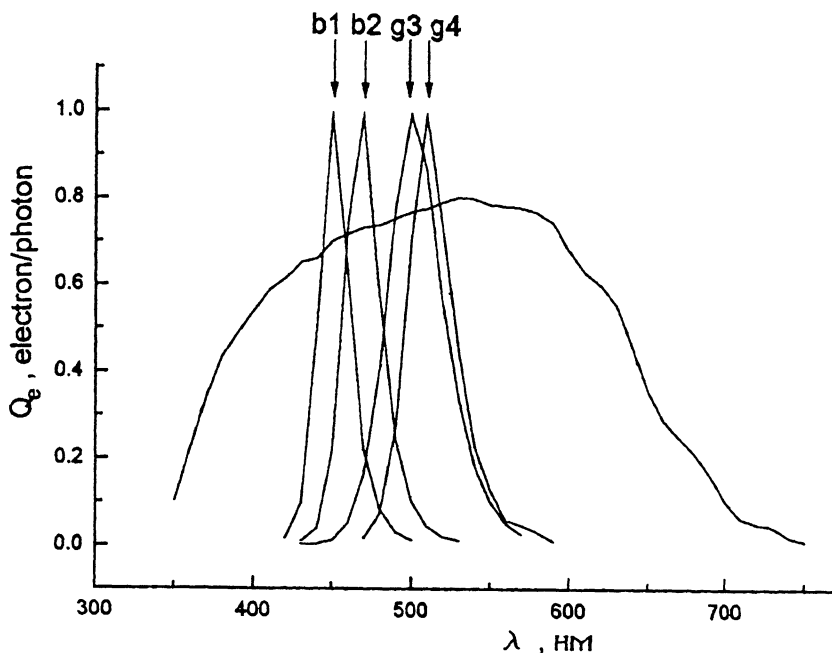


Рис. 1. Спектральная зависимость квантового выхода двухкаскадного фотоприемника из $a\text{-Si:H}$ в сравнении с нормированными спектрами электролюминесценции светодиодов на основе гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ (цифры — номера диодов в таблице).

$Q_e^*(\lambda_{\max})$ с погрешностью не более 1%:

$$\begin{aligned}
 J_{ph} &= eQ_e^*\Phi = eQ_e^*(\lambda_{\max})\Phi_{\max} \int I(\lambda)d(\lambda) = \\
 &= e\Phi_{\max} \int Q_e(\lambda)I(\lambda)d(\lambda). \quad (1)
 \end{aligned}$$

Измерения зависели от фокусировки потока излучения СД на ФП и от отношений площади ФП ($0.3\text{--}7\text{ см}^2$) к площади светового пучка в его плоскости. Наибольшие коэффициенты передачи по току в паре СД-ФП достигались измерениями, при которых СД ставился вплотную перпендикулярно поверхности ФП.

На рис. 2 показана зависимость тока ФП J_{ph} от тока J через СД для двух СД — голубого и зеленого. Величина J_{ph}/J изменяется при изменении тока для разных диодов в пределах $(2.5\text{--}25) \cdot 10^{-3}$. Она имеет максимум в области токов $J = 0.1\text{--}1\text{ мА}$, различной для разных диодов. Очевидно,

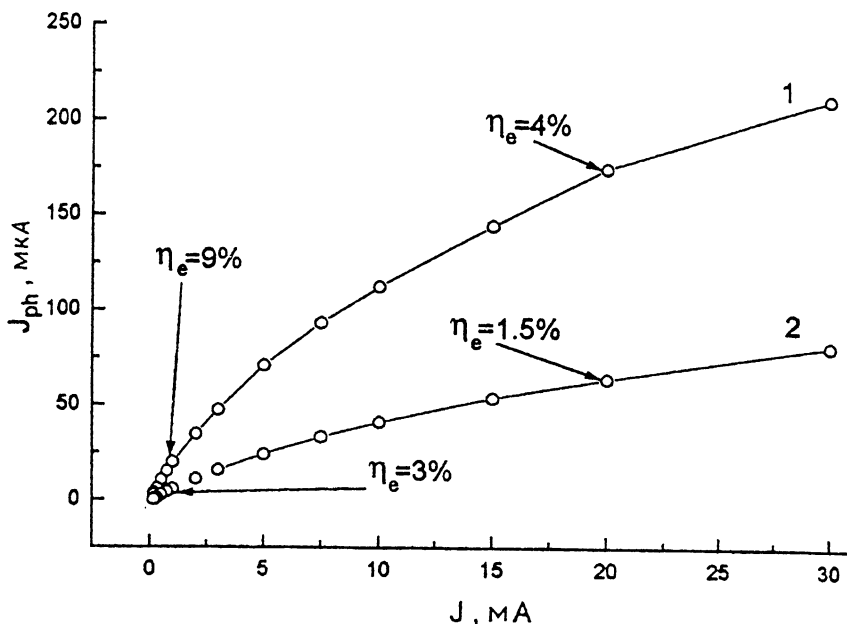


Рис. 2. Зависимость тока фотоприемника из α -Si:H от тока через светодиод при измерениях "встык": а — голубой светодиод; б — зеленый светодиод. Цифрами указаны значения внешнего квантового выхода излучения светодиодов в разной области токов, (ϕ -лы (2), (3) при $k = 0.3$).

что эффективность СД в области этого максимума существенно больше, чем в рабочей области токов $J = 10-30$ мА.

Абсолютные измерения мощности зависели от геометрического коэффициента сбора излучения, который давал наибольшую погрешность и был оценен для разных ФП. Он имел значения в пределах $k = (0.2-0.7) \pm 25\%$.

$$\Phi_{LED} = \Phi/k = J_{ph}/kQ_e^* \quad (2)$$

3. В таблице представлены значения потока излучения Φ_{LED} [фотонов/с] и определенные из него значения внешнего квантового выхода η_e мощности излучения P и коэффициента полезного действия η_P для характерных голубых и зеленых СД фирмы Ничия [1-3]:

$$\eta_e = \Phi_{LED}/(J/e)[\text{фотонов/электрон}];$$

$$P = \hbar\omega_{\max}\Phi_{LED}[\text{Вт}]; \quad \eta_P = P/JV. \quad (3)$$

Световой поток Φ_{LED} , внешний квантовый выход η_e , мощность P и коэффициент полезного действия η_P светодиодов из гетероструктур на основе $In_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N/GaN$ при комнатной температуре

$\hbar\omega_{max}$, эВ	Q_e^* , электрон фотон	J , мА	V , В	Φ_{LED} , 10^{15} с^{-1}	P , мВт	η_e , %	η_P , %	η_P , % калорим.
2.705	0.719	20	3.320	1.1	0.47	0.86	0.7	0.9
2.654	0.726	20	3.298	1.3	0.57	1.1	0.86	0.8
2.459	0.772	20	3.620	5.0	2.0	4.0	2.7	1.7
2.453	0.775	20	3.590	5.1	2.0	4.1	2.8	2.1

Данные в таблице приведены при комнатной температуре и токе через СД $J = 20$ мА, в ней также указаны значения напряжения на диодах V . Для сравнения там же приведены измерения, проведенные измерителем мощности фирмы Spectraphysics, которые согласуются с фотоэлектрическими измерениями с точностью около 25-30%.

4. На рис. 3 показана зависимость мощности излучения P от тока J для двух СД — голубого и зеленого, цифрами

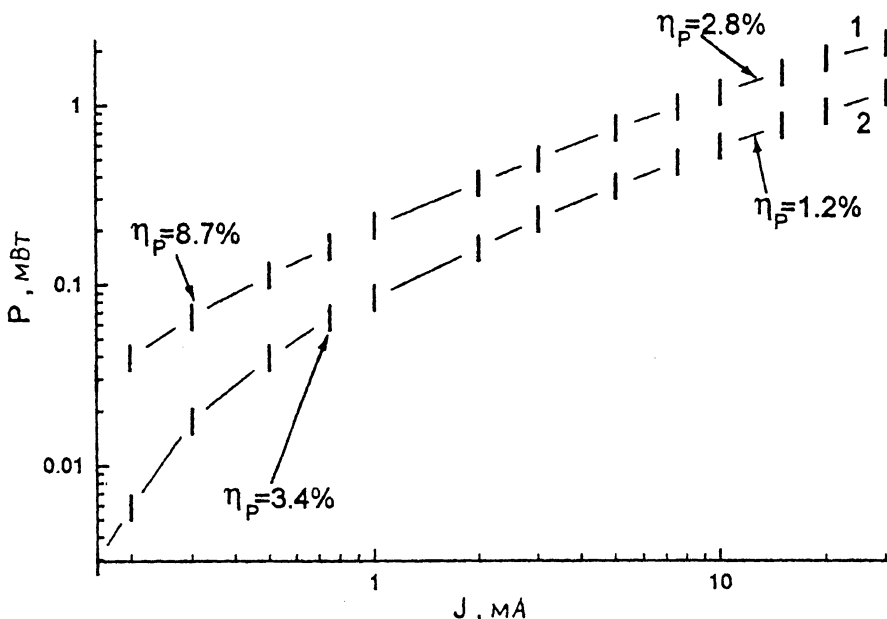


Рис. 3. Мощность излучения светодиодов в зависимости от тока: а — голубой светодиод; б — зеленый светодиод. Цифрами указаны значения коэффициента полезного действия в разной области токов (ф-лы (2, 3) при $k = 0.3$).

показаны значения η_P . При малых токах мощность зависит от тока по степенному закону: $P \sim JP$, затем растет с током линейно, $P \sim J$, а с дальнейшим ростом тока — сублинейно, вследствие разогрева диода. Соответственно η_P имеет максимум в зависимости от тока (см. также [3]).

5. Таким образом, показано, что спектральные характеристики двухкаскадных ФП из $a\text{-Si:H}$ согласованы со спектрами электролюминесценции голубых и зеленых СД и могут быть применены для измерений мощности и квантового выхода их излучения.

Наибольшую погрешность в абсолютные измерения вносит фокусировка излучения и геометрическое соответствие площадей фотоприемника и светового пятна; эта погрешность может быть в дальнейшем уменьшена. СД на основе GaN и ФП из $a\text{-Si:H}$ образуют согласованные оптоэлектронные пары, которые могут найти применения, аналогичные оптронам GaAs/Si. Калиброванные по мощности СД могут служить для контроля чувствительности ФП.

Авторы благодарны К.Г. Золиной и В.Е. Кудряшову за помощь в работе, А.А. Полисану за консультации, Е.А. Еремину за помощь в калориметрических измерениях, О.А. Шустину — в измерениях прибором фирмы Spectraphysics.

Список литературы

- [1] Nakamura S., Senoh M., Iwasa N., Nagahama S. // Jpn. J. Appl. Phys. V. 34. (July 1995). Part. 2. N 7A. P. L797-799.
- [2] Nakamura S., Senoh M., Iwasa N., Nagahama S., Yamada T., Mukai T. // Jpn. J. Appl. Phys. V. 34 (Oct.1995). Part 2. N 10B. P. L1332-L1335.
- [3] Zolina K.G., Kudryashov V.E., Turkin A.N., Yunovich A.E., Nakamura S. // Abstr. of the First Eur. GaN Workshop, Rigi Switzerland. June 1996. P. 47.
- [4] Ангелова Л.А., Вавилов В.С., Выборны З., Юнович А.Э. // ПиТЭ. 1968. В. 1. С. 168-169.
- [5] Надорев В.П., Полисан А.А. // Цветн. металлы. 1995. N 8. С. 48-52.
- [6] Юнович А.Э. // Светотехника. 1996. N 5/6. С. 2-7.

Московский
государственный
университет
им. М.В. Ломоносова
Физический факультет

Поступило в Редакцию
2 октября 1996 г.