

УДК 621.304.9

## ТОКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ СВЕТОДИОДА

*Викулин И.М., Коробицын Б.В., Криськив С.К.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[kriskiv2@yandex.ua](mailto:kriskiv2@yandex.ua)*

## СТРУМОВЕ КЕРУВАННЯ СПЕКТРОМ СВІТЛОДІОДА

*Вікулін І.М., Коробіцин Б.В., Криськів С.К.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[kriskiv2@yandex.ua](mailto:kriskiv2@yandex.ua)*

## CURRENT CONTROL RANGE OF THE LED

*Vikulin I.M., Korobitsin B.V., Kryskiv S.K.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunication,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[kriskiv2@yandex.ua](mailto:kriskiv2@yandex.ua)*

**Аннотация.** Проведен краткий обзор существующих типов светодиодов с управляемым спектром излучения. Предложена конструкция светодиода на арсениде галлия с асимметричным профилем легирования типа  $p^+-n$ -структуры. Для получения реального разделения спектральных полос использовано легирование  $p^+$ -области кремнием, который создает акцепторный уровень с энергией активации 100 мэВ. Описан способ создания  $p^+-n$ -структуры. Показано, что светодиод излучает в двух полосах спектра с энергиями максимумов 1,33 эВ и 1,42 эВ. Соотношение интенсивностей спектральных полос изменяется в 7 раз при изменении плотности импульсного тока от 80 А/см<sup>2</sup> до 500 А/см<sup>2</sup>. Рассмотрен физический механизм, приводящий к таким свойствам светодиода.

**Ключевые слова:** светодиод, спектральные полосы, токовое управления.

**Анотація.** Проведено короткий огляд існуючих типів світлодіодів з керованим спектром випромінювання. Запропонована конструкція світлодіода на арсеніді галія з асиметричним профілем легування типу  $p^+-n$ -структури. Для отримання реального розділення спектральних смуг використано легування  $p^+$ -області кремнієм, який створює акцепторний рівень з енергією активації 100 меВ. Описаний спосіб створення  $p^+-n$ -структури. Показано, що світлодіод випромінює у двох смугах спектра з енергіями максимумів 1,33 еВ та 1,42 еВ. Співвідношення інтенсивностей спектральних смуг змінюється у 7 разів при зміні густини імпульсного струму від 80А/см<sup>2</sup> до 500А/см<sup>2</sup>. Розглянуто фізичний механізм, який приводить до таких властивостей світлодіода.

**Ключові слова:** світлодіод, спектральна смуга, струмове керування.

**Abstract.** The brief review of existing types of LEDs with controllable emission spectrum. The proposed design of the led on the gallium arsenide with an asymmetric doping profile of  $p^+-n$  structure. To obtain a real separation of the spectral bands used, the doping of  $p^+$ -region silicon that creates an acceptor level with an activation energy of 100 MeV. The described method of creating a  $p^+-n$  structures.

It is shown that the led emits in two bands of the spectrum with energies of highs of 1,33 eV and 1,42 eV. The ratio of intensities of spectral bands is changed to 7 when the density of pulse current 80 A/cm<sup>2</sup> from 500 A/cm<sup>2</sup>. The physical mechanism leading to such properties of the led.

**Key words:** led, spectral band, current control.

Светодиоды осуществляют прямое преобразование электрической энергии в световую в ближней инфракрасной и видимой областях спектра. Обычно они излучают в

фиксированном спектре. Для реализации некоторых целей функциональной оптоэлектроники возникает необходимость в управлении спектром излучения тем или иным способом.

Был создан светодиод на фосфиде галлия, содержащий два *p-n*-перехода, излучающих по отдельности в зеленой и красной областях спектра [1]. Изменяя токи через *p-n*-переходы, можно добиться изменения видимого цвета свечения от зеленого через желтый и оранжевый до красного. Ранее [2] сообщалось о магнитном управлении спектром излучения варизонного светодиода в ближней инфракрасной области. Также была показана возможность токового управления спектром излучения арсенид-галлиевого *p<sup>+</sup>-n*-светодиода, легированного донором-теллуrom и мелким акцептором-цинком. Светодиод излучал в двух спектральных полосах с максимумами при 1,38 эВ и 1,42 эВ. Отношение интенсивностей полос регулировалось величиной тока. Недостатком такого светодиода было небольшое разделение максимумов полос электролюминесценции – около 30 мэВ.

**Целью статьи** является разработка и создание светодиода на одном *p-n*-переходе с токовым управлением спектром излучения при достаточном спектральном разделении полос.

Светодиод был создан на основе арсенида галлия. *N*-областью служил материал с концентрацией электронов  $10^{16} \text{см}^{-3}$ . *P*-область была получена жидкостной эпитаксией с одновременным легированием кремнием при начальной температуре 750 °С. Это обеспечило внедрение кремния вместо мышьяка в качестве акцептора в концентрации  $10^{18} \text{см}^{-3}$ . Начальная толщина *p*-области была около 30 мкм. Затем она травлением доводилась до 2...3 мкм. Это позволило выводить излучение через *p*-область практически без искажения вследствие самопоглощения. Площадь *p-n*-перехода была около 10...2 см<sup>2</sup>. Легирование кремнием в указанных условиях создало акцепторные уровни-центры рекомбинации глубиной около 100 мэВ.

Рекомбинационное излучение механически модулировалось диском, направлялось на спектрограф ИСП-51, затем на фотоумножитель ФЭУ-62. Сигнал от фотоумножителя усиливался селективным усилителем на основе биквадратного фильтра, выпрямлялся синхронным детектором и записывался в непрерывном режиме электронным пишущим потенциометром ЭНДИМ.

Для учета взаимного влияния спектральных полос применялась методика графического разделения в три этапа, изложенная нами ранее [4]. Светодиод питался постоянным током до 30 мА, а при больших токах импульсами длительностью 10 мкс от генератора Г5-15, усиленными импульсным транзисторным усилителем. Средний ток через светодиод контролировался миллиамперметром постоянного тока в цепи питания импульсного усилителя. Частота следования импульсов подбиралась такой, чтобы средний ток через светодиод был всегда равен 30 мА при любой амплитуде импульсов. Амплитуда импульсов измерялась по падению напряжения на эталонном резисторе методом сравнения на экране осциллографа.

Спектры электролюминесценции показаны на рис. 1 для трех значений плотности тока в импульсе. Вид спектра на постоянном токе 30 мА и менее соответствовал спектру 1 при импульсном токе 80 А/см<sup>2</sup>. Это означает, что в этих условиях соблюдается режим слабой инжекции как для *p<sup>+</sup>*-области, так и для *n*-области. Разделение максимумов спектральных полос составляет 90 мэВ. Это соответствует генерации низкоэнергетической полосы С в *p<sup>+</sup>*-области по каналу донор-акцептор, а высокоэнергетической полосы В – в *n*-области по каналу донор-валентная зона.

После разделения спектра электролюминесценции на полосы можно увидеть следующее: при увеличении плотности тока в импульсе от 80 А/см<sup>2</sup> до 500 А/см<sup>2</sup> при постоянстве среднего тока интенсивность полосы В увеличивается в 1,15 раз, а интенсивность полосы С увеличивается в 8 раз.

Полоса В генерируется в *n*-области вследствие рекомбинации инжектированных дырок с электронами (равновесными и неравновесными), и ее столь слабое увеличение свидетельствует об очень малом увеличении дырочной составляющей тока. Сильное

увеличение интенсивности полосы С, которая генерируется в  $p$ -области вследствие рекомбинации инжектированных электронов с равновесными дырками, приводит к выводу, что электронная составляющая общего тока в импульсе при сохранении его среднего значения увеличивается в 8 раз. Это соответствует увеличению полной концентрации электронов в  $n$ -области также в 8 раз, включая равновесные и инжектированные электроны. Это происходит тогда, когда концентрация инжектированных дырок становится соизмеримой, равной и больше концентрации равновесных электронов. Для сохранения электронейтральности в  $n$ -области происходит дополнительное увеличение концентрации электронов в виде их инжекции из омического контакта. Наступает режим сильной инжекции в  $n$ -области. Это вызывает встречную инжекцию электронов в  $p$ -область и, соответственно, рост интенсивности полосы С, вызванной рекомбинацией электронов через акцепторные уровни кремния.

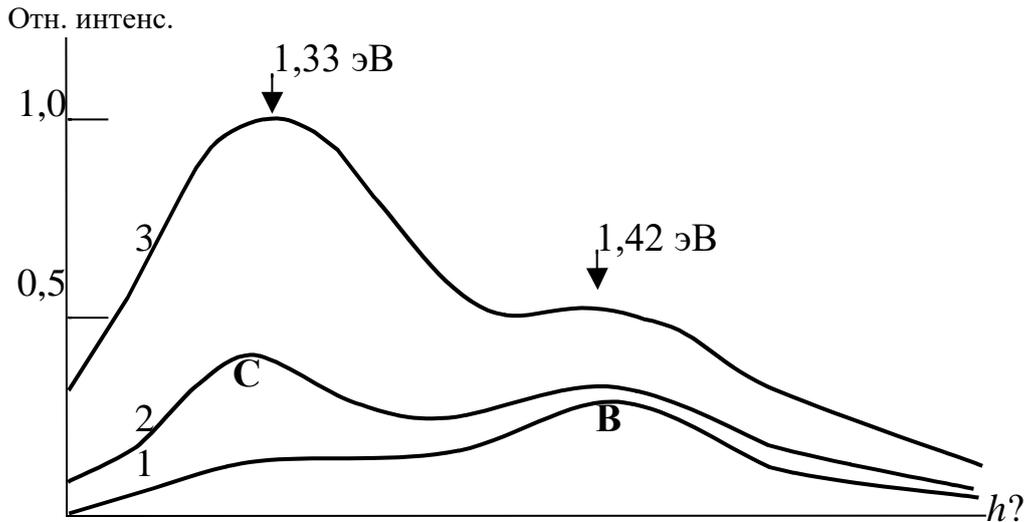


Рисунок 1 – Спектры электролюминесценции для трех значений плотности тока в импульсе: 1 – плотность тока  $80 \text{ A/cm}^2$ ; 2 – плотность тока  $200 \text{ A/cm}^2$ ; 3 – плотность тока  $500 \text{ A/cm}^2$

Изменение соотношения дырочной и электронной составляющих общего тока при сильной инжекции описано в [5] и наблюдалось нами [3] в электролюминесценции. Такое явление в транзисторах приводит к сильному уменьшению коэффициента усиления, а в светодиодах – к новому интересному эффекту в виде изменения конфигурации спектров электролюминесценции при достижении критического значения тока, т.е. к возможности токового управления спектром светодиода.

Ранее [3] приводилась формула, определяющая соотношение интенсивностей спектральных полос В и С:

$$\frac{\Phi_B}{\Phi_C} = \frac{\eta_n \mu_p L_n p}{\eta_p \mu_n L_p n}, \quad (1)$$

где  $\eta_p$  и  $\eta_n$  – квантовые эффективности рекомбинации в  $p$ - и  $n$ -областях;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок;  $L_n$  и  $L_p$  – диффузионные длины электронов и дырок;  $n$  и  $p$  – концентрации электронов и дырок.

В первом приближении считая, что все величины, кроме концентраций в формуле (1), постоянные. Тогда

$$\frac{\Phi_B}{\Phi_C} = A \frac{p}{n},$$

где  $A$  – константа.

В  $p^+-n$ -переходе ток переносится в основном дырками. В  $n$ -области при сильной инжекции дырок возникает встречная инжекция электронов в  $p$ -область и, соответственно, кратно общему току возрастает интенсивность полосы С рекомбинации в  $p$ -области.

Считая, что спектр 1 при плотности тока  $80 \text{ А/см}^2$  соответствует слабой инжекции, когда концентрация электронов в  $n$ -области близка к равновесной, оценим коэффициент В в формуле (2) как  $A = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Тогда спектру 2 при токе  $200 \text{ А/см}^2$  соответствует  $n = 2,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $\Delta n = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а спектру 3 при плотности тока  $500 \text{ А/см}^2$  соответствует  $n = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $\Delta n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Здесь  $\Delta n$  – концентрация неравновесных электронов.

При уменьшении уровня легирования  $n$ -области можно уменьшить плотность тока, при которой спектр излучения начинает зависеть от тока. Но при этом уменьшается квантовая эффективность рекомбинации в  $n$ -области, т. е. яркость светодиода. При увеличении уровня легирования  $n$ -области увеличивается начальная интенсивность полосы В, но увеличивается плотность тока, при которой возможно токовое управление спектром. Как и при решении других технических задач, здесь необходима оптимизация уровня легирования в соответствии со стоящими задачами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Воробьев В.Л. Двухпереходные GaP-светоизлучающие диоды с управляемым цветом свечения / В.Л. Воробьев, В.Н. Гришин, Л.М. Коган // Электронная техника. – (Серия 2: "Полупроводниковые приборы"). – 1977. – № 4.(114). – С. 33–36.
2. Викулин И.М. Перестройка спектра излучения светодиода магнитным полем / И.М. Викулин, И.В. Ирха, Б.В. Коробицын // Физика и техника полупроводников – 1989. – Т. 23. – Вып.6 – С.106–108.
3. Викулин И.М. Электролюминесценция в асимметричных  $p$ - $n$ -структурах / И.М. Викулин, В.Э. Горбачев, Б.В. Коробицын // Наукові праці УДАЗ ім. А.С.Попова. – 2000. – № 1. – С. 8–11.
4. Викулин И.М. Обработка и представление спектров оптоэлектронных приборов / И.М. Викулин, В.Э. Горбачев, Б.В. Коробицын, С.К. Криськив // Наукові праці ОНАЗ ім. А.С. Попова. – 2005.– № 1. – С. 99–103.
5. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов / Лебедев А.И. – М.: Физматлит, 2008. – 488 с.

#### REFERENCES:

1. Vorob'ev V. L. Dvuhterabaytnye GaP light emitting diodes with controlled color / Vorob'ev V. L., Grishin, V. N., Kogan, L. M., // Electronic technique. – (Ser.2.: "Semiconductor devices"). – 1977. – № 4.(114). – P. 33–36.
2. Vikulin I. M., the Restructuring of the emission spectrum of the led magnetic field / I. M. Vikulin, V. I. Irkha, V. Korobitsyn B. – Physics, 1989. – Vol. 23. – №.6. – P. 106–108.
3. Vikulin I. M. Electroluminescence in asymmetric  $p$ - $n$ -structures / I. M. Vikulin, V. E., Gorbachev B. V. Korobitsyn // Naukow Pratsi of UDAS im. A. S. Popova. – 2000. – No. 1. – P. 8–11.
4. Vikulin I. M. Processing and presentation of the spectra of optoelectronic devices / I. M. Vikulin, V. E. Gorbachev, B. V. Korobitsyn, S. K. Kaskiv // Naukow Pratsi, ONAZ im. A. S. Popov. – 2005. – No. 1. – P. 99–103.
5. Lebedev A. I. Physics of semiconductor devices / Lebedev A. I. – M.: Fizmatlit, 2008. – 488 p.