

М. Ю. Барабаненков, А. В. Ковальчук,  
Е. А. Полушкин, В. В. Сироткин,  
Ю. В. Холопова, С. Ю. Шаповал

## ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА С ПЕРИОДИЧЕСКИ СТРУКТУРИРОВАННЫМ КОНТАКТОМ

*Приведены результаты измерений электрических и оптических характеристик для  $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  светодиода с периодически структурированным  $p$ -контактом. Показано, что применение такого контакта увеличивает КПД светодиода как минимум на 8%, позволяет получить плоский фронт и изменять значение критического угла для выводимого излучения за счет приложенного к электроду-решетке напряжения. Показано, что применение дифракционной решетки в качестве  $p$ -контакта изменяет вольт-фарадную характеристику и значительно уменьшает значение выскочастотной емкости.*

**Ключевые слова:** люминесценция, дифракционная решетка, светодиод.

В настоящее время светодиоды на основе гетероэпитаксиальных структур широко применяются и рассматриваются в качестве источников освещения следующего поколения, которые заменят лампы накаливания и флуоресцентные лампы, как только будет получен световой поток не менее 150 лм/Вт [1].

Вывод генерируемого в  $p$ - $n$ -переходе излучения существенно ограничен следующими факторами: потерями на полное внутреннее отражение излучения, падающего на границу раздела под углом, большим критического; потерями на поглощение излучения в толще полупроводника и френелевским отражением излучения, выходящего под углом, меньшим критического.

Длительное время ведутся работы по нахождению способов увеличения доли выводимого излучения. Эти работы условно можно разделить на три направления: увеличение активной области светодиода, например, за счет создания слоя растекания тока [2]; развитие технологии прозрачной подложки [3, 4]; применение специальной геометрии светодиода [5, 6] или интегрирование структуры светодиода со случайными [7, 8] либо периодическими микроструктурами с известными оптическими свойствами. Например, изготовление брэгговского зеркала, представляющего собой одномерную периодическую систему с элементарной ячейкой в виде пары диэлектрических контрастных прозрачных или поглощающих слоев, увеличивает световую мощность светодиода [9]. Другой путь повышения яркости светоизлучающего диода (СИД) состоял в применении многослойных структур переменного состава [10], также позволяющих получать направленные

световые потоки и суженную диаграмму направленности излучения, или создание микрорезонатора в фотонной структуре, формируемой в активной области [11–14].

В работе [15] показано, что нанесение сетчатого контакта с параметрами решетки (период и ширина полосы) 150 и 25 мкм и площадью светоизлучающей поверхности диода  $500 \times 500$  мкм<sup>2</sup> позволяет получить бóльшую мощность излучения и обеспечивает равномерное распределение тока по площади излучающего слоя.

В настоящей работе исследованы свойства синего светодиода; на его излучающую поверхность в качестве *p*-контакта нанесена дифракционная решетка, параметры которой сравнимы с характерной длиной волны излучения СИД. Расстояние от активной области до границы раздела сред полупроводник–воздух составляет менее 200 нм, что значительно снижает потери в толще полупроводника по сравнению с теми СИД, в которых вывод света осуществляется через сапфировую подложку, где расстояние от активной области до поверхности более 200 мкм. В работе [16] приведены распределение плотности тока по излучающей поверхности для разных значений приложенного напряжения и зависимость коэффициента отражения от ширины щели дифракционной решетки и в соответствии с этими данными выбраны параметры решетки рассматриваемого контакта.

Цель настоящей работы — изучение влияния такого объекта, как дифракционная решетка на оптические и электрические характеристики СИД.

**Технология изготовления образца и методика эксперимента.** Пластина со светодиодными структурами выращивалась методом химического осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD) с травлением мезаструктуры плазмой в режиме электронного циклотронного резонанса.

На сапфировой подложке толщиной 200 мкм последовательно размещаются буферный слой (GaN); *n*<sup>+</sup>-слой (GaN:Si); *n*-слой (GaN:Mg); *n*<sup>+</sup>-слой (сверхрешетка AlGaIn/GaN); активная область с квантовыми ямами (InGaIn/GaN); *p*-слой (AlGaIn:Mg) и приконтактный *p*-слой (GaN:Mg). Сечение структуры приведено на рис. 1. Излучающая поверхность имеет симметричную форму подковы с внешним и внутренним диаметрами соответственно 50 и 30 мкм. Расстояние от активной области до границы раздела сред полупроводник–воздух составляет 198 нм, что значительно снижает потери на поглощение излучения внутри структуры.

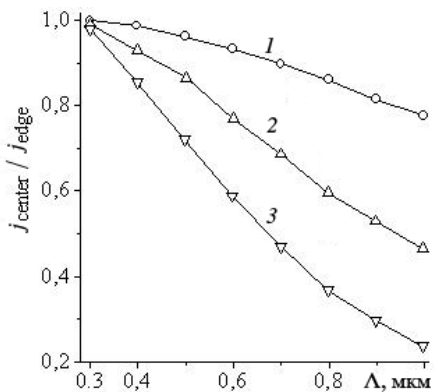
Формирование Au/Ni двумерной сетки над излучающей поверхностью производилось методом электронно-лучевой литографии с использованием позитивного резиста. Параметры решетки выбраны на основе моделирования ее частотных спектров отражения [16, 17].



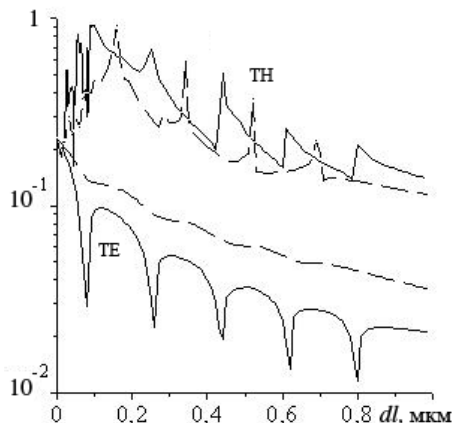
лент  $2\ell$  и  $h$  и зазором между лентами  $d\ell$ . В слое GaN длина волны излучения 0,18 мкм, в свободном пространстве — 0,45 мкм при коэффициенте преломления GaN, равном 2,5. Прошедшие и отраженные спектральные порядки обозначены на рис. 2 как  $\vec{k}_\mu^\pm$ .

Расчеты плотности тока в области  $p$ - $n$ -перехода структуры показали существенно неоднородное распределение плотности тока по элементарной ячейке электрода-решетки по мере увеличения периода решетки и приложенного к ней напряжения. Результаты расчетов, проведенных для решетки с шириной направляющих  $2\ell = 0,1$  мкм в приближении планарной конфигурации электродов (решетки и центрального контакта), приведены на рис. 3. Как видно, отношение плотности тока в центральной части ячейки к току под направляющей решетки меньше единицы и плотность тока в центральной части уменьшается по мере увеличения периода решетки и приложенного напряжения, т.е. тока, протекающего по Au-решетке. Поэтому, можно предположить, что область люминесценции представляет собой либо плоскость (область 1 при малых токах), либо периодическую систему ленточных источников (область 2, см. рис. 2), находящихся под направляющими решетки-контакта. Отметим, что при более широких направляющих решетки-контакта ( $2\ell > 0,1$  мкм) аналогичное по пространственной неоднородности распределение токов появляется при периоде решетки, значительно большем 1 мкм. Столь разреженные решетки неинтересны с точки зрения рассеяния электромагнитных волн с длиной волны порядка долей микрона.

На рис. 3 приведены результаты расчета отношения плотности тока в области  $p$ - $n$ -перехода, из которого видно, что максимальное различие плотностей тока в активной области структуры соответствует периоду решетки 1 мкм. Поэтому при расчете эффективности отражения света от решетки период ее принят равным  $\Lambda = 1$  мкм. Толщина решетки выбрана равной  $h = 0,1$  мкм, что минимизирует поглощение энергии электромагнитной волны в металлах типа золота или серебра [18, 19]. Варьируемые параметры — ширина лент  $2\ell$  и зазор между ними  $d\ell$ . На рис. 4 приведены зависимости эффективности отражения света обеих поляризаций от золотой решетки с шириной лент  $2\ell = 0,1$  и  $0,2$  мкм как функция зазора  $d\ell$ . Диэлектрическая проницаемость золота на частоте, соответствующей длине волны 0,18 мкм, равна  $\varepsilon = 0,23 + 3,04i$  [20]. Провалы в спектре отражения ТЕ-поляризованной волны исчезают при  $2\ell = 0,2$  мкм (нижние сплошная и штриховая линии на рис. 4). Однако основной вклад в отраженную мощность дает ТН-поляризация, но, как видно на рис. 4, отражение падает при периоде решетки порядка 1 мкм. Из сопоставления результатов, приведенных на рис. 3 и 4, выбраны параметры решетки-



**Рис. 3.** Расчетные зависимости отношения плотностей тока в области  $p$ - $n$ -перехода в центре квадратной ячейки сеточного контакта ( $j_{\text{center}}$ ) и под направляющей решетки ( $j_{\text{edge}}$ ) от периода решетки при напряжении на контакте-решетке 1 В (1), 1,5 В (2) и 3 В (3); ширина направляющих решетки 0,1 мкм



**Рис. 4.** Расчетные зависимости отражения по мощности ТЕ и ТН поляризованной нормально падающей плоской монохроматической волны (длина волны 0,18 мкм) от полосковой Au решетки как функция зазора ( $dl$ ) между направляющими решетки толщиной 0,1 мкм и шириной 0,1 (сплошные линии) и 0,2 мкм (штриховые линии)

электрода: толщина и ширина направляющих  $h = 2\ell = 0,1$  мкм, зазор  $dl = 0,9$  мкм, период  $\Lambda = 1$  мкм.

**Электрические и оптические характеристики СИД с периодически структурированным контактом.** На рис. 5 приведены ВАХ светодиодов со структурированным и обычным круглым омическим  $p$ -контактом. Как видно, наличие дифракционной решетки незначительно сказывается на ВАХ.

Измерения ВФХ показали, что удельная высокочастотная емкость СИД с контактом-решеткой (кривая 2 на рис. 6) остается постоянной от  $-5$  В обратного смещения и до  $+2$  В прямого смещения. Емкость же СИД с обычным контактом (кривая 1, рис. 6) имеет существенно немонотонный характер и значительно большую величину в подавляющей части указанного диапазона приложенных к структуре смещений.

Исследования проводимости структуры от напряжения в высокочастотной области (1 МГц) показали, что формирование  $p$ -контакта в виде решетки не влияет на проводимость диода. Действительно, согласно данным рис. 7, структура характеризуется участком с отрицательным значением дифференциальной проводимости. Уменьшение проводимости с ростом прикладываемого напряжения указывает на режим туннельного тока, что характерно для таких гетероструктур [21].

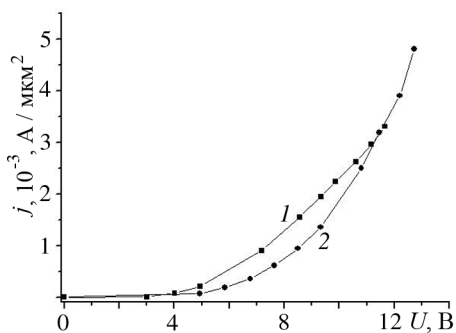


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики СИД с обычным контактом (1) и выполненным в виде Au/Ni ортогональной решетки (2) с периодом 1 мкм, ширина и толщина направляющих 0,1 и 0,1 мкм соответственно

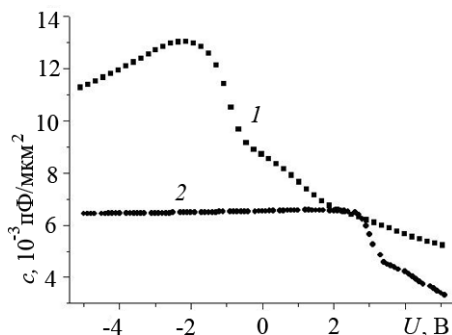


Рис. 6. Высокочастотные вольт-фарадные характеристики СИД с обычными (1) и структурированными (2) контактами от напряжения

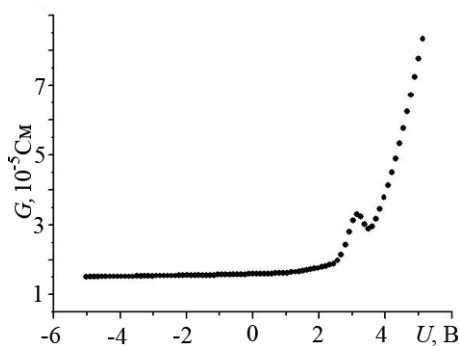


Рис. 7. Зависимость проводимости от напряжения (частота 1 МГц) для СИД со структурированным контактом

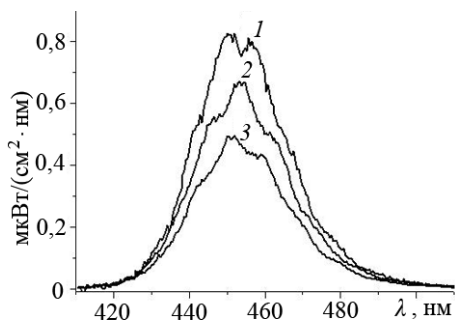
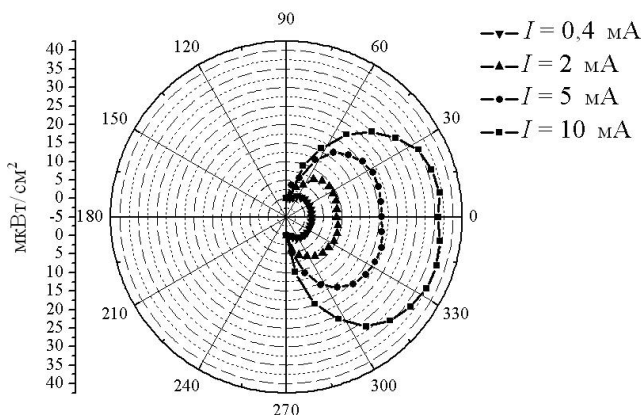


Рис. 8. Частотные спектры излучения СИД с контактом-решеткой, снятые в направлении нормали к излучающей поверхности (1) и по разные стороны от нормали под углами  $-14,4^\circ$  (2) и  $+36^\circ$  (3)

На рис. 8 приведены экспериментальные частотные спектры мощности излучения СИД с контактом-решеткой, снятые в направлении нормали к излучающей поверхности (кривая 1) и при отклонении детектора в разные стороны от нормали. Как видно, спектры не являются гладкими и покрыты мелкой “рябью”. Причем “рябь” не вызывается решеткой, так как такой же вид имеют спектры аналогичных светодиодов без решетки. Наиболее вероятная причина этого — то, что нижняя технологическая система слоев исследуемой структуры проявляет свойства плохого брэгговского рефлектора, а именно спектр излучения имеет не осциллирующий характер, как в упомянутой работе [9], а только лишь возмущенный “рябью” вид.

Экспериментальная диаграмма направленности излучения приведена на рис. 9 в зависимости от силы тока в направляющих решетки.



**Рис. 9. Измеренные диаграммы направленности излучения в зависимости от токов, протекающих по направляющим контакта-решетки: 0,4 (1), 2 (2), 5 (3) и 10 мА (4)**

Как видно, с ростом тока угловой спектр уширяется. Это обусловлено тем, что при увеличении силы тока происходит сосредоточение области излучения под решеткой. Большая часть генерируемого излучения дифрагирует на направляющих решетки, что приводит к энергетическому заполнению отличных от нулевого дифракционных порядков, т.е. угловому уширению излучения.

На основании экспериментальных результатов рассчитано значение КПД, которое составило 26,4 % при токе 0,4 мА, а максимальное значение КПД до нанесения дифракционной решетки — 18 %.

**Выводы.** Предложен и реализован на практике СИД с верхним электродом в виде двумерной дифракционной решетки и изучены его электрические свойства. Из экспериментальных данных получена эффективность преобразования электрической мощности (при токе 0,4 мА) в мощность оптического излучения, которая составляет 26 %, что на 8 % превышает значение аналогичного параметра светодиода с обычным контактом. Кроме того, дифракционная решетка позволяет варьировать угловое распределение излучения простым изменением величины электрического смещения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim T., Leisher P. O., Danner A. J., Wirth R., Streubel K., Choquette K. D. // IEEE Photonics Technology Letters, 18 (2006) 1876.
2. Fletcher R. M., Kuo C. P., Osentowski T. D., Huang K. H., Craford M. G. // J. Electron. Mater. 20 (1991) 1125.
3. Gessmann Th., Schubert E. F. // J. Appl. Phys. 95 (2004) 2203.
4. Wierer J. J., Steigerwald D. A., Krames M. R., O'Shea J. J. et al. // Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 3379.
5. Carr W. N., Pittman G. E. // Appl. Phys. Lett., 3 (1963) 173.

6. K r a m e s M. R., O c h i a i H o l c o m b M., H o f l e r G. E., C a r t e r - C o m a n C. et. al. // *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999) 2365.
7. C h o i H. W., D a w s o n M. D., E d w a r d s P. R., M a r t i n R. M. // *Appl. Phys. Let.* 83 (22), 4483 (2003).
8. B a y r a m B u t u n, J e a n C e s a r i o, S t e f a n E n o c h, R o m a i n Q u i d a n t, E k m e l O z b a y. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* 5, 86 (2007).
9. S c h n i t z e r I., Y a b l o n o v i t c h E., C a n e a u C., G m i t t e r T. J., S c h e r e r A. // *Appl. Phys. Lett.*, 63 (1993) 2174.
10. S e o n g - S u k L e e, I n - S e o k S e o, K y o n g - J u n K i m, C h e u l - R o L e e // *Journal of Korean Physical Society*, 45 (5), 1356 (2004).
11. S h e n Y. C., W i e r e r J. J., K r a m e s M. R., L u d o w i s e M. J., M i s r a M. S. // *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2221. (2003).
12. K i m T., D a n n e r A. J., C h o q u e t t e K. D. // *Electronics Letters* 41 (20) 2005.
13. O d e r T. N., K i m K. H., L i n J. Y., J i a n g H. X. // *Appl. Phys. Let.* 84 (4), 466 (2004).
14. H i r o y u k i I c h i k a w a, T o s h i h i k o B a b a // *Appl. Phys. Let.* 84 (4), 457 (2004).
15. И м е н к о в А. Н., Г р е б е н щ и к о в а Е. А., Ж у р т а н о в Б. Е., Д а н и л о в а Т. Н. и д р. // *ФТП* 38 (11), 1399 (2004).
16. S h a p o v a l S., B a r a b a n e n k o v M., S i r o t k i n V., P o l u s h k i n E., et. al. // *WOCSDISE 2007. Venice, Italy. 2007/05/20 – 23.* – P.29–30.
17. Б а р а б а н е н к о в Ю. Н., Б а р а б а н е н к о в М. Ю. // *ЖЭТФ.* – Т.123 (2003) 763.
18. S h e n g P., S t e p l e m a n R. S., S a n d a P. N. // *Phys. Rev. B* 26 (1982) 2907.
19. T h e y e M. - L. // *Phys. Rev. B* 2 (1970) 3060.
20. J o h n s o n P. B., C h r i s t y R. W. // *Phys. Rev. B* 6 (1972) 4370.
21. S a n g h y u n S e o, G u a n g Y u a n Z h a o, D i m i t r i s P a v l i d i s, V l a d i m i r L i t v i n o v // *WOCSDISE 2007. Venice, Italy. 2007/05/20–23.* – P.61–63.

Статья поступила в редакцию 16.12.2008

Михаил Юрьевич Барабаненков родился в 1959 г., окончил в 1990 г. Московский инженерно-физический институт. Д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИПТМ РАН Автор 103 научных работ в области радиационной физики и теории многократного рассеяния.

M.Yu. Barabanenkov (b. 1959) graduated from the Moscow Engineering and Physics Institute in 1990. D. Sc. (Phys.-Math.), leading researcher of the Institute for Problems of Microelectronics Technology and High-pure Materials of RAS. Author of 103 publications in the field of radiation physics and theory of multiple scattering.

Анатолий Викторович Ковальчук родился в 1961 г., окончил в 1988 г. Московский физико-технический институт. Старший научный сотрудник ИПТМ РАН. Автор 42 научных работ в области физики плазмы и фотохимии.

A.V. Kovalchuk (b. 1961) graduated from the Moscow Physics and Technology Institute in 1988. Senior researcher of the Institute for Problems of Microelectronics Technology and High-pure Materials of RAS. Author of 42 publications in the field of plasma physics and photochemistry.



Евгений Анатольевич Полушкин родился в 1981 г., окончил в 2005 г. Московский инженерно-физический институт. Младший научный сотрудник ИПТМ РАН. Автор трех научных работ в области плазмохимии.

Ye.A. Polushkin (b. 1981) graduated from the Moscow Engineering and Physics Institute in 1990. Junior researcher of the Institute for Problems of Microelectronics Technology and High-pure Materials of RAS. Author of 3 publications in the field of plasmochemistry.

Вадим Владимирович Сироткин родился в 1959 г., окончил в 1982 г. Московский институт электронной техники (МИЭТ). Канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией “Прикладная математика” ИПТМ РАН. Автор 73 научных работ в области численных методов, уравнений математической физики, математического моделирования.

V.V. Sirotkin (b. 1959) graduated from the Moscow Institute for Electronic Technology in 1982. Ph. D. (Phys.-Math.), head of “Applied Mathematics” laboratory of the Institute for Problems of Microelectronics Technology and High-pure Materials of RAS. Author of 73 publications in the field of numerical methods, equations of mathematical physics, and mathematical simulation.

Юлия Владимировна Холопова родилась в 1986 г., окончила в 2008 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Старший лаборант ИПТМ РАН. Автор трех научных в области нанoeлектроники.

Yu.V. Kholopova (b. 1986) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Senior laboratory assistant of the Institute for Problems of Microelectronics Technology and High-pure Materials of RAS. Author of 3 publications in the field of nanoelectronics.

Сергей Юрьевич Шаповал родился в 1949 г., окончил в 1975 г. Московский институт радиотехники, электроники и автоматики. Канд. техн. наук, заведующий лабораторией “Эпитаксиальные микро- и наноструктуры” ИПТМ РАН. Автор более 100 научных работ в области нанoeлектроники, физики плазмы, эпитаксии.

S.Yu. Shapoval (b. 1949) graduated from the Moscow Institute for Radio-Engineering Electronics and Automatics in 1975. Ph. D. (Eng.), head of “Epitaxial Micro- and Nanostructures” laboratory of the Institute for Problems of Microelectronics Technology and High-pure Materials of RAS. Author of more than 100 publications in the field of nanoelectronics, plasma physics and epitaxy.