

УДК 621.383.933

Д. т. н. Л. М. КОГАН

Россия, г. Москва, НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ»

E-mail: levkogan@mail.ru

## МОЩНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

*Представлены разработанные в НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ» мощные ИК-диоды с длиной волны излучения  $805\pm 10$ ,  $870\pm 20$  и  $940\pm 10$  нм. Сила излучения узконаправленных диодов — до 4 Вт/ср в непрерывном режиме и до 100 Вт/ср в импульсном. Мощность излучения широкоугольных диодов достигает 1 Вт в непрерывном режиме. Внешний квантовый выход излучения ИК-диодов достигает 30%. Созданы также модули ИК-диодов с блоком плоских линз Френеля с силой излучения до 70 Вт/ср.*

*Ключевые слова:* мощные излучающие диоды, ИК-диапазон.

Излучающие диоды инфракрасного диапазона (ИК-диоды) широко используются в технике ночного видения, видеонаблюдения, инфракрасного освещения, дистанционного управления, в телевизионных системах с электронно-оптической связью (ЭОП) на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), в оптической связи и др. Важнейшие показатели качества ИК-диодов — это значения мощности излучения и силы излучения в сочетании с длиной волны.

Исследования в области создания ИК-диодов проводятся в течение последних нескольких десятилетий [1]. Первоначально в ИК-диодах использовался диффузионный  $p-n$ -переход в GaAs, и максимальный внешний квантовый выход излучения ( $\eta_{\text{вн}}$ ) составлял 1,4–1,7% при быстром действии 20–50 нс [2]. Создание жидкостно-эпитаксиальной  $p-n$ -структуры GaAs, легированной Si [3], позволило значительно увеличить эффективность этих приборов. Значения  $\eta_{\text{вн}}$  диодов на основе этой структуры с плоским кристаллом составляли 3–4,5%, но такие диоды характеризовались пониженным быстродействием (0,2–1,5 мкс) [4, 5]. При использовании полусферического кристалла величина  $\eta_{\text{вн}}$  составила 20–28%, а на кристалле с мезаструктурой при выводе света через подложку — от 3 до 8%. Созданные позже излучающие диоды на основе двойных гетероструктур  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  с переизлучающим слоем на GaAs-подложке имели  $\eta_{\text{вн}}=4-8\%$  и быстродействие 15–25 нс [6, 7]. Однако для многих применений такая эффективность была недостаточной. И только разработка многопроходных двойных гетероструктур (МДГС) в системе  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ , возможность создания которых теоретически была обоснована в [7], позволила значительно увеличить квантовый выход их излучения. Высокое значение квантового выхода здесь обусловлено тем, что внутренний кванто-

вый выход достигает почти 100%, а также эффектом «электронного ограничения» в активной области (приводит к снижению поглощения излучения в активной области) и эффектом «многoproходности». Вследствие второго эффекта фотоны, направленные к нижней грани кристалла, а также отраженные внутрь кристалла верхней и боковыми гранями, испытывают многократное внутреннее отражение без поглощения в активной области и тем самым вносят вклад в выводимое излучение.

Первые высокие результаты ( $\eta_{\text{вн}}=30\%$ ) были получены на МДГС  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  с мезаструктурой с полусферическим покрытием из эпоксидной смолы [8]. При использовании плоского кристалла без мезаструктуры с полимерной полусферой квантовый выход составлял 22% [9].

В настоящей статье описаны мощные узконаправленные и широкоугольные ИК-диоды, а также модули на их основе, созданные в НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ». Диоды реализованы на базе структур и кристаллов, выпускаемых ОАО «Восход» (Россия, г. Калуга).

### Излучающие структуры и кристаллы

МДГС из  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  типа ЭСАГА-140 имеют активную область  $p$ -типа толщиной приблизительно 2 мкм, легированную Zn и Ge, эмиттерные области с содержанием AlAs около 30% и пассивную область с 15–30% AlAs. Общая толщина структуры —  $150\pm 20$  мкм. Проводимость верхнего слоя гетероструктуры —  $n$ -типа. Излучение структур характеризуется длиной волны в максимуме спектра ( $\lambda_{\text{max}}$ )  $805\pm 10$ ,  $870\pm 20$  и  $940\pm 10$  нм.

ИК-диоды с  $\lambda_{\text{max}}=805\pm 10$  нм используются в телевизионных системах с электронно-оптическими преобразователями и ПЗС [10]. ПЗС-матрицы, работающие в ближней ИК-области

спектра, имеют более высокую спектральную чувствительность для коротковолнового излучения ( $805 \pm 10$  нм), чем для излучения с длиной волны  $870 \pm 20$  нм (разница в чувствительности составляет 15–20%).

ИК-диоды с длиной волны излучения в максимуме спектра  $\lambda_{\max} = 870 \pm 20$  нм широко применяются для видеонаблюдения, инфракрасного освещения, дистанционного управления радиоаппаратурой, для оптической связи, в медицинской терапевтической аппаратуре и др. Диоды с  $\lambda_{\max} = 940 \pm 10$  нм предназначены для скрытого ИК-видеонаблюдения, т. к. их свечение невидимо для человеческого глаза.

Кристаллы имеют мезаструктуру, обеспечивающую стабильность приборов в процессе работы, омические контакты выполнены на основе Au. При разработке кристаллов были решены проблемы оптимизации площади омических контактов (для обеспечения низкого прямого напряжения, а также снижения потерь излучения на омических контактах за счет поверхностной рекомбинации и внутреннего отражения) и снижения теплового сопротивления кристалла. Площадь омического контакта верхней грани кристалла, содержащего элементы улучшения растекания тока, не превышает 20% площади мезаструктуры. Омический контакт к нижней грани кристалла состоит из точек диаметром около 80 мкм. Общая площадь омического контакта к нижней грани кристалла не превышает 30–40% площади нижней грани. Типичный кристалл имеет вид, представленный на рис. 1. Размеры контактной площадки для сварки гибкого вывода —  $0,14 \times 0,14$  мм.

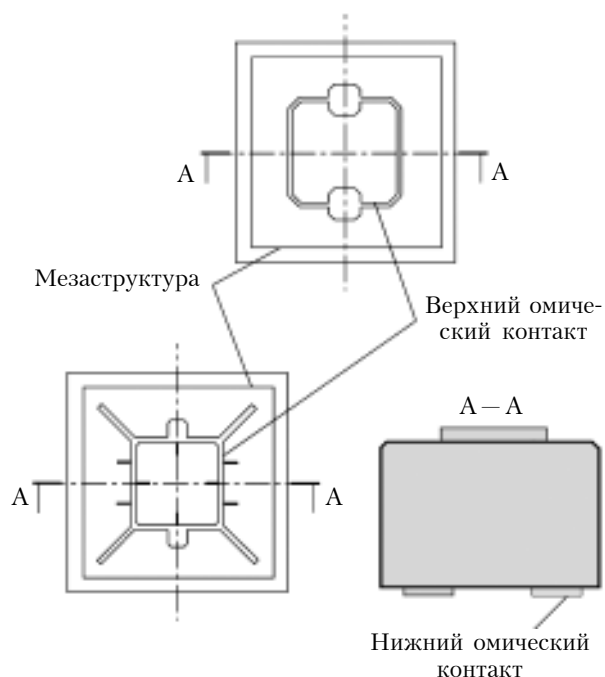


Рис. 1. Излучающие ИК-кристаллы размерами  $0,6 \times 0,7$  мм (вверху) и  $1,24 \times 1,24$  мм (внизу)

### Излучающие ИК-диоды с узконаправленным излучением

Это диоды с шириной диаграммы направленности излучения не более 10–12 градусов на уровне 0,5 от максимальной интенсивности.

ИК-кристаллы размещаются в полимерном корпусе из эпоксидного компаунда с показателем преломления  $n \approx 1,56$ . Использование полимерного корпуса позволяет увеличить внешний квантовый выход излучения примерно в 1,5 раза за счет увеличения критического угла вывода излучения из кристалла.

Для получения светового потока в виде пучка почти параллельных лучей применяется асферический полимерный купол (ранее применялся сферический) с уменьшенными потерями на сферическую абберацию [11, 12]. Такое решение обусловлено тем, что применение безабберационной асферической линзы дает максимальную силу излучения. Получение параллельного пучка лучей (рис. 2) основано на использовании принципа Ферма. Уравнение безабберационной поверхности вращения может быть записано так:

$$n'x + nt = ns.$$

Учитывая, что

$$t = \sqrt{y^2 + (s - x)^2},$$

после преобразования получим

$$y^2 = 2sx(1 - n'/n) + x^2(n'^2/n^2 - 1). \quad (1)$$

Это уравнение эллипса, и при  $n' = 1$

$$b^2/a^2 = 1 - 1/n^2, \quad e = 1/n, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  — большая и малая полуоси эллипса,  $e$  — его эксцентриситет. То есть, эксцентриситет эллипса обратно пропорционален показателю преломления компаунда. Длина малой полуоси эллипса выбирается равной радиусу полимерного

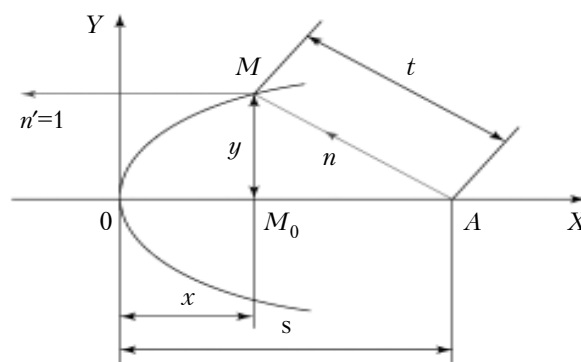


Рис. 2. Ход луча через преломляющую поверхность полимерного купола:

$A$  — положение светоизлучающего кристалла;  $n, n'$  — показатели преломления полимера и воздуха;  $s$  — расстояние от излучающей поверхности до вершины полимерного купола;  $M$  — точка падения луча на поверхность полимерного купола;  $t$  — длина пути светового луча

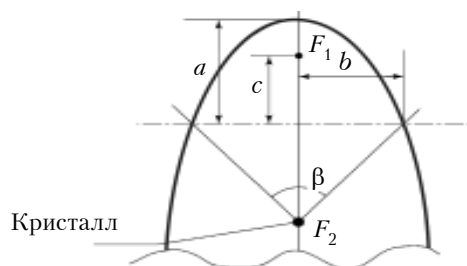


Рис. 3. Эллиптическая поверхность полимерного купола светодиода:

$\beta$  — угол захвата излучения;  $F_1, F_2$  — фокусы эллипса

купола (исходя из намеченных габаритов прибора: 5, 8, 18 мм и др.). Тогда из приведенного выше соотношения (2) можно легко найти длину большой полуоси:  $a = b / (1 - 1/n^2)^{0.5}$ . Преломляющая свет эллиптическая поверхность рассчитывается по уравнению (1). Принцип ее построения показан на рис. 3.

Конструкции ИК-диодов различной мощности излучения с эллиптическим полимерным куполом приведены на рис. 4, параметры некоторых из них — в табл. 1.

ИК-диоды АОИ 188, АОИ 189 и АОИ 190 выполнены с кристаллом размерами 0,35×0,35 мм, диоды У-190 — 0,6×0,7 мм, диоды У-224 и У-176 — 1,24×1,24 мм. Сила излучения диодов У-190 достигает 1 Вт/ср, У-224 и У-176 — 4 Вт/ср, что позволяет создавать на их основе модули и ИК-прожекторы с силой излучения в сотни ватт на стерадиан и обеспечивать инфракрасное освещение на значительном расстоянии.

ИК-диоды с длиной волны излучения  $\lambda_{\max}$ , равной 805 и 870 нм, обладают высоким быстродействием: время нарастания ( $\tau_n$ ) и спада ( $\tau_{\text{сп}}$ ) импульса излучения по уровням 0,1–0,9 составляет 5–25 нс. Диоды с длиной волны излучения  $\lambda_{\max} = 940$  нм имеют меньшее быстродействие —  $\tau_n$  и  $\tau_{\text{сп}}$  составляют примерно 200 нс.

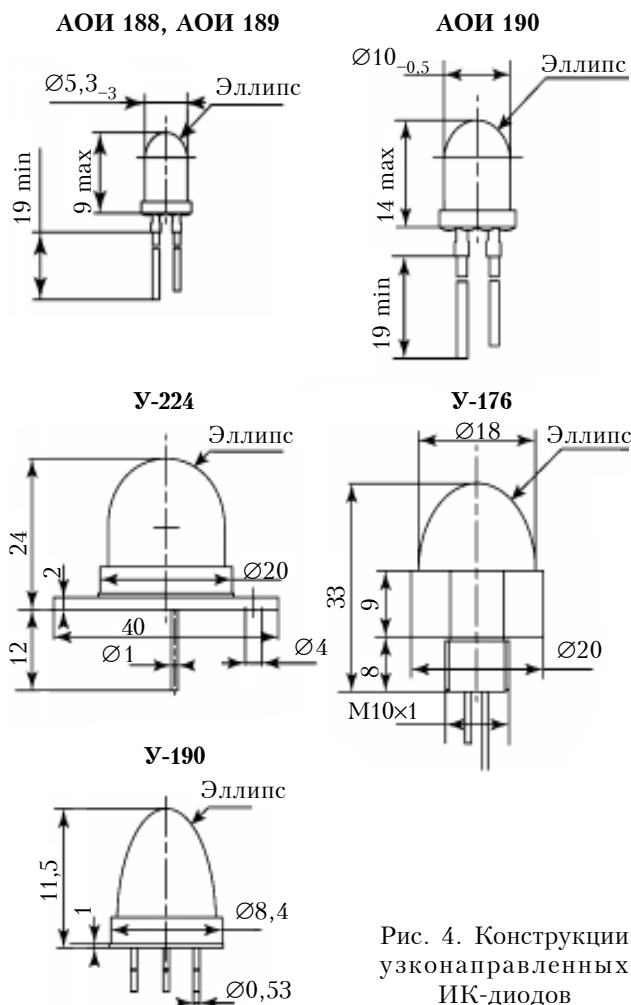


Рис. 4. Конструкции узконаправленных ИК-диодов

Все приборы могут работать в импульсном режиме. Для диодов типов У-224 и У-176 ток в импульсе может достигать 10 А при среднем токе не более 350 мА. При этом сила излучения ИК-диода в импульсе достигает 100 Вт/ср.

Таблица 1

Фотометрические и электрические параметры узконаправленных ИК-диодов

| Тип<br>дио́да                         | Мощность излучения<br>$P_e$ , мВт |                      | Сила излучения $J_e$ ,<br>мВт/ср |                      | Угол<br>излучения<br>$2\theta_{0,5}$ ,<br>градус | Прямое<br>напряжение<br>$U_{\text{пр}}$ , В,<br>не более | Длина<br>волны<br>излучения<br>$\lambda_{\text{max}}$ , нм |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                       | не менее                          | типичное<br>значение | не менее                         | типичное<br>значение |                                                  |                                                          |                                                            |
| Прямой ток ( $I_{\text{пр}}$ ) 100 мА |                                   |                      |                                  |                      |                                                  |                                                          |                                                            |
| АОИ 188В                              | —                                 | 20                   | 170                              | 190                  | 10±3                                             | 2,2                                                      | 805±10                                                     |
| $I_{\text{пр}} = 400$ мА              |                                   |                      |                                  |                      |                                                  |                                                          |                                                            |
| У-190А-П                              | 90                                | 100                  | —                                | 1000                 | 10±3                                             | 3,0                                                      | 805±10                                                     |
| $I_{\text{пр}} = 700$ мА              |                                   |                      |                                  |                      |                                                  |                                                          |                                                            |
| У-224А                                | 200                               | 250                  | —                                | 4000                 | 7±2                                              | 2,2                                                      | 805±10                                                     |
| У-176А                                | 200                               | 250                  | —                                | 4000                 | 7±2                                              | 2,2                                                      | 805±10                                                     |
| У-176Б                                | 200                               | 250                  | —                                | 4000                 | 7±2                                              | 2,2                                                      | 870±20                                                     |



### Спектральные и энергетические характеристики ИК-диодов

Полуширина полос излучения составляет 35 нм для диодов с длиной волны излучения  $\lambda_{\max}$ , равной  $805 \pm 10$  и  $870 \pm 20$  нм, и 50 нм для диодов с  $\lambda_{\max} = 940 \pm 10$  нм (рис. 6). Зависимость мощности излучения от прямого тока близка к линейной (рис. 7). Внешний квантовый выход излучения ИК-диодов составляет 25–30%. Типичные зависимости мощности излучения от температуры окружающей среды приведены на рис. 8, а типичные диаграммы направленности излучения — на рис. 9.

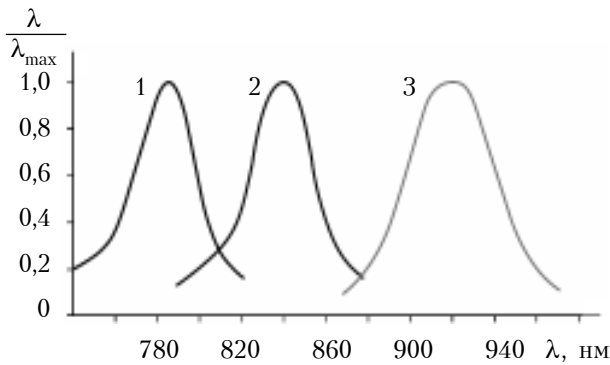


Рис. 6. Спектры излучения ИК-диодов с различным значением  $\lambda_{\max}$ :  
1 —  $805 \pm 10$  нм; 2 —  $870 \pm 20$  нм; 3 —  $940 \pm 10$  нм

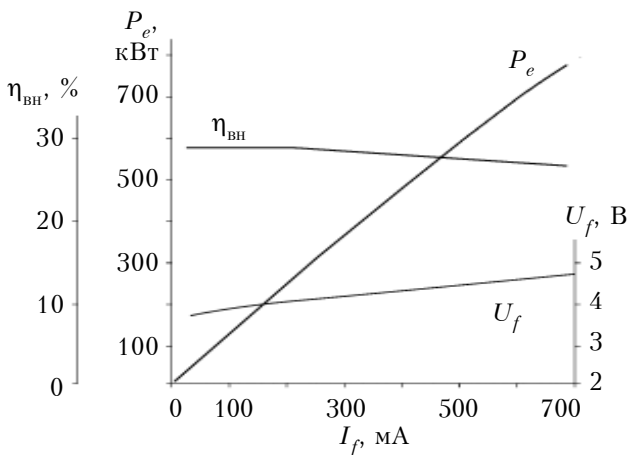


Рис. 7. Зависимости мощности излучения, внешнего квантового выхода и прямого напряжения от прямого тока  $I_f$  для ИК-диода У-234Б

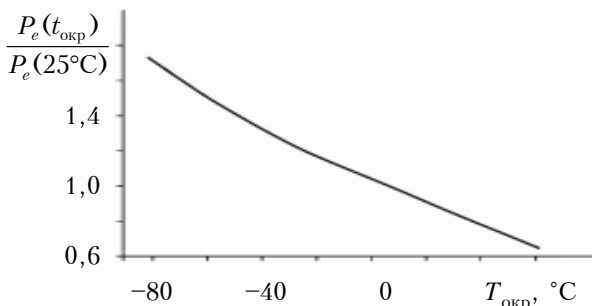


Рис. 8. Типичная зависимость мощности излучения ИК-диодов от температуры окружающей среды

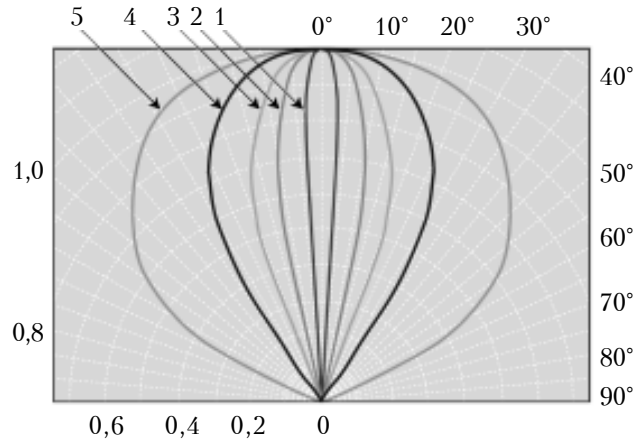


Рис. 9. Типичные диаграммы направленности излучения диодов с различным углом излучения  $2\Theta_{0,5}$ :  
1 —  $7^\circ$ ; 2 —  $25^\circ$ ; 3 —  $40^\circ$ ; 4 —  $75^\circ$ ; 5 —  $120^\circ$

### Инфракрасные осветительные модули направленного действия

Разработаны два вида модулей. Они используются для прожекторного ИК-освещения вместе с очками или приборами ночного видения на основе ЭОП и ПЗС-матриц.

Модуль с использованием блока плоских линз Френеля (рис. 10) [13, 14]. Модули типа У-200ИК созданы на основе двенадцати ИК-диодов диаметром 5 мм (например, типа У-136), размещенных вблизи фокуса блока плоских линз Френеля, включают также печатную плату с элементами управления. Фотометрические параметры модулей приведены в табл. 3. Их габаритные размеры  $\varnothing 106 \times 43$  мм, угол излучения  $2,5 - 3,5^\circ$ , входные электрические параметры:

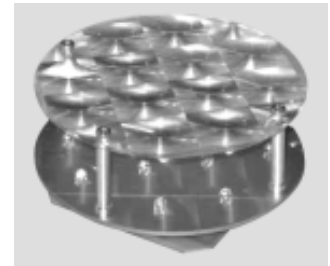


Рис. 10. Модуль ИК-диодов с блоком плоских линз Френеля

$U_{\text{вх}} = 12 \pm 1$  В,  $J_{\text{вх}} = 200$  мА. Сила излучения модулей достаточно велика (до 70 Вт/ср), что позволяет обеспечить дальность ИК-освещения до 500 м и высечку яркость. Излучение модуля У-200ИК-3 невидимо для человеческого глаза.

Таблица 3  
Фотометрические параметры модулей

| Тип модуля | Спектр излучения      |                      | Сила излучения $J_e$ , Вт/ср |                   |     |
|------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|-----|
|            | $\lambda_{\max}$ , нм | $\Delta\lambda$ , нм | не менее                     | типичное значение | max |
| У-200ИК-1  | $870 \pm 20$          | 35                   | 60                           | 65                | 70  |
| У-200ИК-2  | $805 \pm 10$          | 35                   | 60                           | 65                | 70  |
| У-200ИК-3  | $940 \pm 10$          | 50                   | 30                           | 35                | 40  |

*Модули с использованием мощных ИК-диодов.* При использовании мощных узконаправленных диодов У-176 или У-224 удается получить значительную силу излучения модулей на их основе. Так, модуль с тридцатью диодами указанных типов обеспечивает силу излучения 120 Вт/ср и дальность более 700 м. Модули на основе мощных ИК-диодов содержат радиатор для отвода тепла. В других конструкциях для отвода тепла может быть использован корпус осветителя.

Для освещения на меньшее расстояние предназначены модули на основе ИК-диодов типа АОИ 195 и др.

#### Стабильность параметров ИК-диодов в процессе эксплуатации

Разработанные ИК-диоды характеризуются высокой стабильностью параметров в процессе работы: в условиях максимальной рабочей температуры 70°C при предельно-допустимом рабочем токе в течение 100 ч изменение мощности излучения не превышает 15–25%. Срок службы ИК-диодов — не менее 25 тыс. ч. Диапазон рабочих температур составляет от –60 до 70°C.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. — М.: Энергоатомиздат, 1983. [Kogan L. M. Poluprovodnikovye svetoizluchayushchie diody. Moscow. Energoatomizdat, 1983]
2. Herzog A. H., Keune D. L., Craford M. G. High efficiency Zn-diffused GaAs electroluminescent diodes. // J. Appl. Phys. — 1972. — Vol. 43. — N 2. — P. 600–608.
3. Rupprecht H., Woodail J. M., Konnerth K., Petit D. G. Efficient electroluminescence from GaAs diodes at 300 K // Appl. Phys. Lett. — 1966. — Vol. 9, N 6. — P. 221–223.
4. Дубровская Н. С., Кривошеева Р. Н., Мескин С. С. и др. Квантовый выход излучения GaAs p–n-структур, легированных кремнием // Физика и техника полупроводников. — 1969. — Т. 3, вып. 12. — С. 1845–1850. [Dubrovskaya N. S., Krivosheeva R. N., Meskin S. S. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1969. Vol. 3, iss. 12. — P. 1845]
5. Коган Л. М., Водовозова М. Л., Деготь Ю. М. и др. Диодные источники инфракрасного излучения из арсенида галлия // В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. — М.: Сов. радио, 1977. — Вып. 2. — С. 154–171. [Kogan L. M., Vodovozova M. L., Degot' Yu. M. i dr. // V kn.: Mikroelektronika i poluprovodnikovye pribory. Moscow. Sov. radio, 1977. Iss. 2. P. 154]
6. Брагин Н. В., Бондарь С. А., Малышкин М. А. и др. ФЭЛ-диоды для системы ВОЛС // Письма в ЖТФ. — 1982. — Т. 8, вып. 11. [Bragin N. V., Bondar' S. A., Malyshevskiy M. A. i dr. // Pis'ma v ZhTF. 1982. Vol. 8, iss. 11]
7. Алферов Ж. И., Агафонов В. Г., Гарбузов Д. З. и др. Многопроходные гетероструктуры. Внешний квантовый выход излучения // Физика и техника полупроводников. — 1976. — Т. 10, вып. 8. — С. 1497–1506. [Alferov Zh. I., Agafonov V. G., Garbuzov D. Z. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1976. Vol. 10, iss. 8. P. 1497]
8. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Гарбузов Д. З. Светодиоды меза-конструкции на основе двойных гетероструктур в системе AlAs-GaAs // ЖТФ. — 1977. — Т. 47, № 8. — С. 1772–1777. [Alferov Zh. I., Andreev V. M., Garbuzov D. Z. // ZhTF. 1977. Vol. 47, N 8. P. 1772]

9. Коган Л. М., Андреев Ю. П., Вишневская Б. И. и др. Высокоэффективные и быстродействующие излучающие диоды для фотоэлектрических устройств // Электронная промышленность. — 1991. — № 12, С. 44–47. [Kogan L. M., Andreev Yu. P., Vishnevskaya B. I. i dr. // Elektronnaya promyshlennost'. 1991. N 12, P. 44]

10. Волков В., Коган Л. Телевизионные системы с использованием светодиодных осветителей // Электронные компоненты. — 2002. — № 2. — С. 27–31. [Volkov V., Kogan L. // Elektronnye komponenty. — 2002. N 2. P. 27]

11. Коган Л. М., Водовозова М. Л., Вишневская Б. И. и др. Светодиоды с узконаправленным излучением // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1988. — Вып. 1. — С. 17–23. [Kogan L. M., Vodovozova M. L., Vishnevskaya B. I. i dr. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory. 1988. Iss. 1. P. 17]

12. Патент РФ на полезную модель № 48673. Мощный светодиод. 25.10.2004. [Patent RF na poleznuyu model' N 48673. 25.10.2004]

13. Коган Л. М., Рассохин И. Т. Светодиодные модули направленного действия // Светотехника. — 2001. — № 5. — С. 13–14. [Kogan L. M., Rassokhin I. T. // Svetotekhnika. 2001. — N 5. P. 13]

14. Патент РФ на изобретение. № 2202731. Световой прибор на светодиодах. 13.12.2000. [Patent RF na izobretenie. N 2202731. 13.12.2000]

*Статья перепечатана из журнала  
«Электроника: НТБ» № 8 2011  
с некоторыми сокращениями*

Kogan L. M. **Powerful infrared emitting diodes.**

*Keywords: high-power emitting diodes, infrared range.*

Powerful infrared LEDs with emission wavelength  $805 \pm 10$ ,  $870 \pm 20$  and  $940 \pm 10$  nm developed at SPC OED "OPTEL" are presented in the article. The radiant intensity of beam diode is under 4 W/sr in the continuous mode and under 100 W/sr in the pulse mode. The radiation power of wide-angle LEDs reaches 1 W in continuous mode. The external quantum efficiency of emission IR diodes runs up to 30%. There also has been created infrared diode modules with a block of flat Fresnel lenses with radiant intensity under 70 W/sr.

Russia, Moscow, SPC OED "OPTEL".

Коган Л. М. **Потужні випромінюючі діоди інфрачервоного діапазону.**

*Ключові слова: потужні випромінюючі діоди, ІЧ-діапазон.*

В НВЦ ОЕП «ОПТЕЛ» розроблено потужні ІК-діоди з довжиною хвилі випромінювання  $805 \pm 10$ ,  $870 \pm 20$  та  $940 \pm 10$  нм. Сила випромінювання вузьконаправлених діодів — до 4 Вт/ср в безперервному режимі та до 100 Вт/ср в імпульсному. Потужність випромінювання ширококутних діодів досягає 1 Вт в безперервному режимі. Зовнішній квантовий вихід випромінювання ІЧ-діодів досягає 30%. Створено також модулі ІЧ-діодів з блоком плоских лінз Френеля з силою випромінювання до 70 Вт/ср.

Россія, м. Москва, НВЦ ОЕП «ОПТЕЛ».