

МОЩНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Л. Коган, д.т.н.
levkogan@mail.ru

Излучающие диоды инфракрасного диапазона (ИК-диоды) широко используются в технике ночного видения, видеонаблюдения, инфракрасного освещения, дистанционного управления, в телевизионных системах с ЭОП на основе ПЗС, в оптической связи и др. Важнейшие показатели качества ИК-диодов – это величины мощности излучения и силы излучения в сочетании со значениями длины волны. Разработанное в ООО "НПЦ ОЭП "ОПТЭЛ" семейство мощных ИК-диодов имеет силу излучения 4 Вт/ср в непрерывном режиме и 100 Вт/ср в импульсном (для узконаправленных ИК-диодов) и мощность излучения 1 Вт в непрерывном режиме (для широкоугольных ИК-диодов). Внешний квантовый выход излучения достигает 30%. Созданы модули с блоком плоских линз Френеля с силой излучения 65 Вт/ср. Основные длины волн излучения ИК-диодов: 805 ± 10 , 870 ± 20 и 940 ± 10 нм.

Излучающие диоды инфракрасного диапазона развиваются в течение нескольких десятилетий [1]. Первоначально они создавались с использованием диффузионного р-п-перехода в GaAs, и максимальный внешний квантовый выход излучения ($\eta_{\text{вн}}$) составлял 1,4–1,7% при быстродействии 20–50 нс [2]. Создание жидкостно-эпитаксиальной р-п-структуры GaAs, легированной Si [3], позволило значительно увеличить эффективность этих приборов. Диоды на основе этой структуры с плоским кристаллом имели диапазон $\eta_{\text{вн}}$, равный 3–4,5%, но 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 $\eta_{\text{вн}} = 4\text{--}8\%$ и быстродействие 15–25 нс [6, 7]. Однако для многих применений эта эффективность была недостаточна. 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 работе [7], позволила значительно увеличить квантовый выход.

Высокое значение квантового выхода обусловлено почти 100%-ным внутренним квантовым выходом, эффектом "электронного ограничения" в активной области (приводит к снижению поглощения излучения в активной области) и эффектом "многопроходности". Вследствие второго эффекта фотоны, направленные к нижней грани

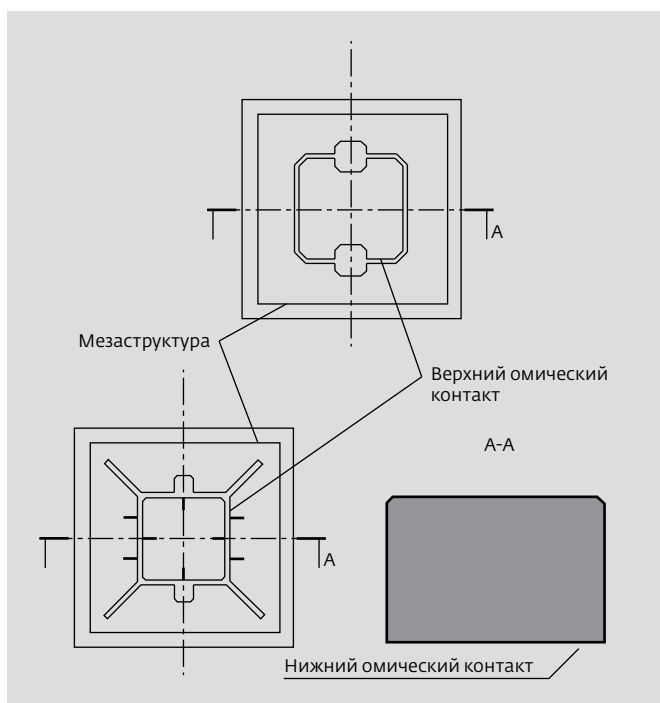


Рис.1. Излучающие ИК-кристаллы размером 0,6×0,7 мм (а) и 1,24×1,24 мм (б)

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].

Излучающие структуры и кристаллы

МДГС из $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ типа ЭСАГА-140, выпускаемые ОАО "Восход" (Калуга), имеют активную область р-типа толщиной ~2 мкм, легированную Zn и Ge, эмиттерные области с содержанием AlAs около 30% и пассивную область с AlAs – 15–30%. Общая толщина структуры – 150±20 мкм. Проводимость верхнего слоя гетероструктуры – п-типа. Структуры характеризуются длиной волны в максимуме спектра излучения 805±10, 870±20 и 940±10 нм.

ИК-диоды с длиной волны излучения 805±10 нм используются в телевизионных системах с ЭОП и приборами с зарядовой связью (ПЗС) [10]. Спектральная чувствительность ПЗС-матриц, работающих в ближней ИК-области спектра, более высокая для коротковолнового

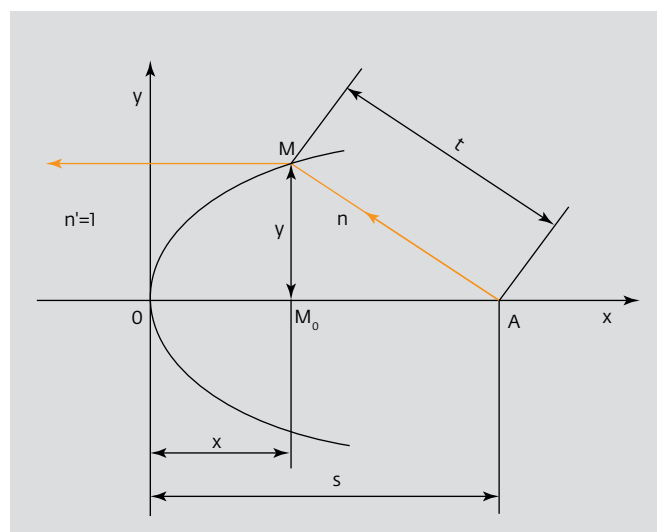


Рис.2. Ход луча через преломляющую поверхность полимерного купола: А – положение светоизлучающего кристалла; n, n' – показатели преломления полимера и воздуха; s – расстояние от излучающей поверхности до вершины полимерного купола; М – точка падения луча на поверхность полимерного купола; t – длина пути светового луча

излучения (805±10 нм), чем для 870±20 нм (разница в чувствительности составляет 15–20%).

ИК-диоды с длиной волны излучения 870±20 нм широко применяются для видеонаблюдения, инфракрасного освещения, дистанционного управления радиоаппаратурой, для оптической связи, в медицинской терапевтической аппаратуре и др.

Диоды с длиной волны излучения 940±10 нм предназначены для скрытого ИК-видеонаблюдения, так как их свечение невидимо для человеческого глаза.

При разработке кристаллов были решены проблемы оптимизации площади омических

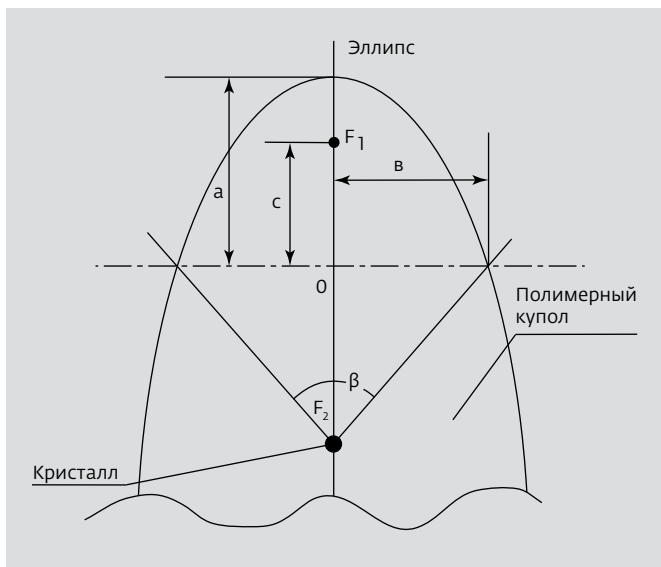


Рис.3. Устройство светодиода с эллиптическим полимерным куполом: β – угол захвата излучения; F_1, F_2 – фокусы эллипса

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.

Выпускаемые ОАО "Восход" кристаллы имеют мезаструктуру, обеспечивающую стабильность приборов в процессе работы, и омические контакты на основе Au. 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 ~ 80 мкм. Общая площадь омического

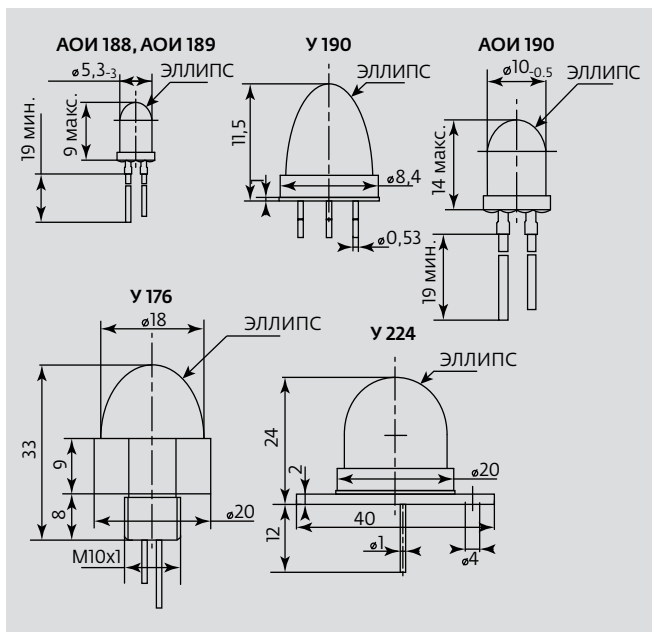


Рис.4. Конструкции узконаправленных ИК-диодов

контакта к нижней грани кристалла не превышает 30–40% площади нижней грани. Типичный кристалл имеет вид, представленный на рис.1. Размер контактной площадки для сварки гибкого вывода – $0,14 \times 0,14$ мм.

Излучающие ИК-диоды с узконаправленным излучением

Это диоды с шириной диаграммы направленности излучения не более 10–12 град. 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

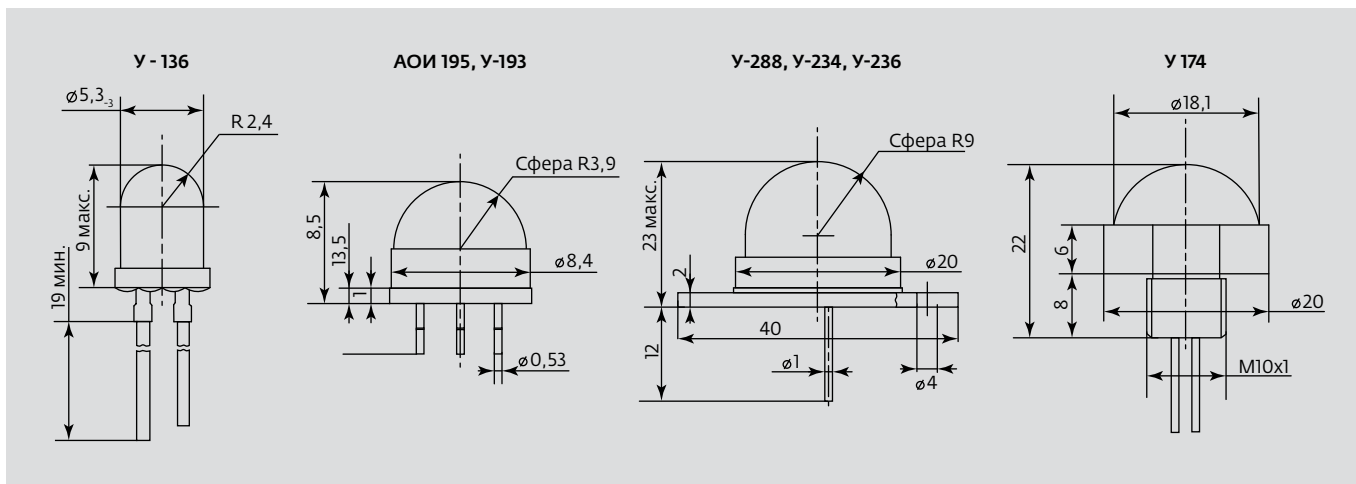


Рис.5. Конструкции широкоугольных ИК-диодов

Таблица 1. Фотометрические и электрические параметры узконаправленных ИК-диодов

Тип диода	Мощность излучения P _e , мВт		Сила излучения J _e , мВт/ср		Угол излучения 2θ _{0,5} , град.	Прямое напряжение U _{пр} , В, не более	Длина волны излучения λ _{макс.} , нм
	не менее	типичное значение	не менее	типичное значение			
Прямой ток (I _{пр}) 100 мА							
АОИ189Г	–	25	170	220	10±3	2,2	870±20
АОИ188В	–	20	170	190	10±3	2,2	805±10
АОИ190Г	–	20	200	250	7±2	2,2	805±10
Прямой ток (I _{пр}) 400 мА							
У-190А-П	90	100	–	1000	10±3	3,0	805±10
У-190Б-П	90	100	–	600	10±3	2,2	870±20
У-190В-П	60	75	–	400	10±3	1,8	940±10
Прямой ток (I _{пр}) 700 мА							
У-224А	200	250	–	4000	7±2	2,2	805±10
У-224Б	200	250	–	4000	7±2	2,2	870±20
У-224В	100	150	–	2500	7±2	2,2	940±10
У-176А	200	250	–	4000	7±2	2,2	805±10
У-176Б	200	250	–	4000	7±2	2,2	870±20

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 почти параллельного пучка лучей применяется асферический полимерный купол (ранее применялся сферический) с уменьшенными потерями на сферическую aberrацию [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 значение $t = \sqrt{y^2 + (s-x)^2}$, после преобразования получим:

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

Это уравнение эллипса. При $n' = 1$ получим $b^2/a^2 = 1 - 1/n^2$, $e = 1/n$, где a и b - большая и малая полуоси эллипса; e - эксцентриситет.

Таким образом, эксцентриситет эллипса обратно пропорционален показателю преломления компаунда. Значение малой полуоси эллипса выбирается равным радиусу полимерного купола. Легко показать, что большая полуось эллипса $a = b/\sqrt{1 - 1/n^2}$. Преломляющая свет эллиптическая поверхность рассчитывается по вышеприведенному уравнению. Общий вид полученной конструкции прибора приведен на рис.3.

Конструкции разработанных ОАО "Восход" ИК-диодов различной мощности излучения с эллиптическим полимерным куполом приведены на рис.4. ИК-диоды типов АОИ 188, АОИ 189 и АОИ 190 выполнены с кристаллом размером 0,35×0,35 мм, типа У-190 – с кристаллом 0,6×0,7 мм, типов У-224 и У-176 – с кристаллом 1,24×1,24 мм. Параметры

узконаправленных ИК-диодов приведены в табл.1. Сила излучения ИК-диодов У-190 достигает 1 Вт/ср, У-224 и У-176 – 4 Вт/ср. Столь высокие значения позволяют создавать на основе этих ИК-диодов модули и ИК-прожекторы с силой излучения в сотни ватт на стерадиан и обеспечивать инфракрасное освещение на значительном расстоянии.

Таблица 2. Фотометрические и электрические параметры широкоугольных ИК-диодов

Тип диода	Мощность излучения P_e , мВт		Сила излучения J_e , мВт/ср		Угол излучения $2\theta_{0,5}$, град.	Прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Длина волны излучения $\lambda_{макс.}$, нм
	не менее	типичное значение	не менее	типичное значение			
Прямой ток ($I_{пр}$) 100 мА							
У-136Е	30	33	–	120	25±5	2,2	805±10
Прямой ток ($I_{пр}$) 200 мА							
У-288А	350	400	–	550	40±10	10,0	805±10
У-288Б	350	400	–	550	40±10	10,0	870±20
У-288В	200	300	–	300	40±10	10,0	940±10
У-174Б	350	400	–	100	120±10	10,0	870±20
Прямой ток ($I_{пр}$) 400 мА							
АОИ 195А	100	120	–	300	35±10	2,2	870±20
АОИ 195Б	80	90	–	200	35±10	2,2	940±10
АОИ 195В	120	130	–	350	35±10	3,0	805±10
Прямой ток ($I_{пр}$) 600 мА							
У-234А	580	620	–	200	100±10	5,0	805±10
У-234Б	580	620	–	200	100±10	5,0	870±20
У-234А-1	580	610	–	450	70±5	5,0	805±10
У-234Б-1	580	610	–	450	70±5	5,0	870±20
У-234А-2	580	610	–	2200	20±5	5,0	805±10
У-234Б-2	580	610	–	2200	20±5	5,0	870±20
Прямой ток ($I_{пр}$) 700 мА							
У-193А	200	230	–	500	30±10	2,2	805±10
У-193Б	200	230	–	500	30±10	2,0	870±20
Прямой ток ($I_{пр}$) 1000 мА							
У-236А	800	900	–	550	85±10	5,0	805±10
У-236Б	800	900	–	550	85±10	5,0	870±20
У-236А-1	800	850	–	3000	20±5	5,0	805±10
У-236Б-1	800	900	–	3000	20±5	5,0	870±20

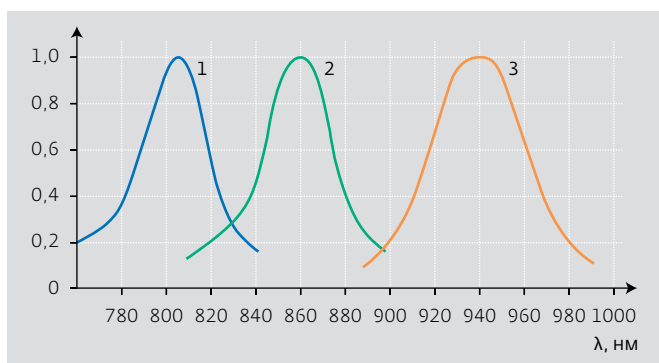


Рис.6. Спектры излучения ИК-диодов: кривая 1 – длина волны излучения 805 ± 10 нм, 2 – 870 ± 20 нм, 3 – 940 ± 10 нм

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

Все приборы могут работать в импульсном режиме. Для приборов 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.

Излучающие ИК-диоды с широкоугольным излучением

Имеют угол излучения ($2\theta_{0,5}$) в диапазоне 20–120 град. Нужный угол излучения обеспечивается за счет необходимого соотношения размеров S/R (S – расстояние от поверхности кристалла (кристаллов) до вершины полимерного полусферического купола, R – радиус полусферы купола), а также за счет использования отражателя бокового излучения кристалла (кристаллов). Конструкции приборов приведены на рис.5, а фотометрические и электрические параметры – в табл.2.

В приборах типа У-136 используется один кристалл размером $0,35 \times 0,35$ мм, типа АОИ 195 – $0,6 \times 0,7$ мм, типа У-193 – $1,24 \times 1,24$ мм. Все остальные приборы содержат несколько кристаллов: типа У-228 – шесть кристаллов размером $0,8 \times 0,8$ мм, типа У-234 – три кристалла $1,24 \times 1,24$ мм, типа У-236 – три кристалла $1,65 \times 1,65$ мм (все кристаллы соединены последовательно).

Мощности излучения находятся в диапазоне от 30 до 1000 мВт. Существенный интерес представляют ИК-диоды типов У-234А-2 (Б-2) и У-236А-1 (Б-1), позволяющие получить высокую силу излучения (до 3 Вт/ср) при угле излучения $2\theta_{0,5} \approx 20$ град.

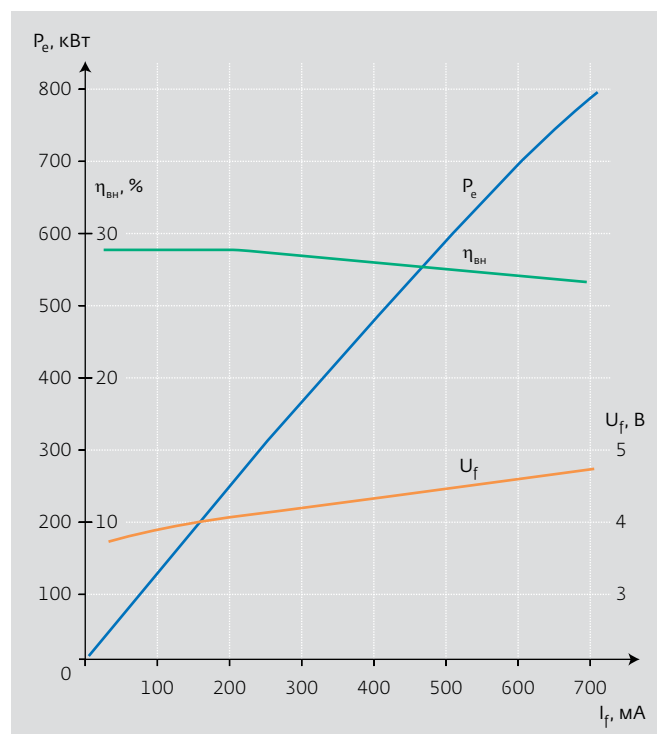


Рис.7. Зависимости мощности излучения, внешнего квантового выхода излучения и прямого напряжения от прямого тока (для ИК-диода типа У-234Б)

Спектральные и энергетические характеристики ИК-диодов

Полуширина полос излучения составляет 35 нм для длины волны излучения 805 ± 10 и 870 ± 20 нм и 50 нм для длины волны излучения 940 ± 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 диаграммы направленности излучения приведены на рис.8, а типичные зависимости мощности излучения от температуры окружающей среды – на рис.9.

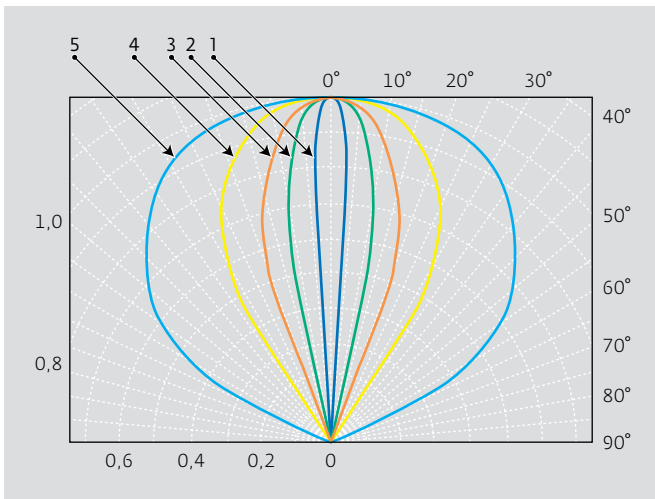


Рис.8. Типичные диаграммы направленности излучения ИК-диодов: кривая 1 – угол излучения $2\theta_{0,5} \approx 7$ град., 2 – $2\theta_{0,5} \approx 25$ град., 3 – $2\theta_{0,5} \approx 40$ град., 4 – $2\theta_{0,5} \approx 75$ град., 5 – 120 град.

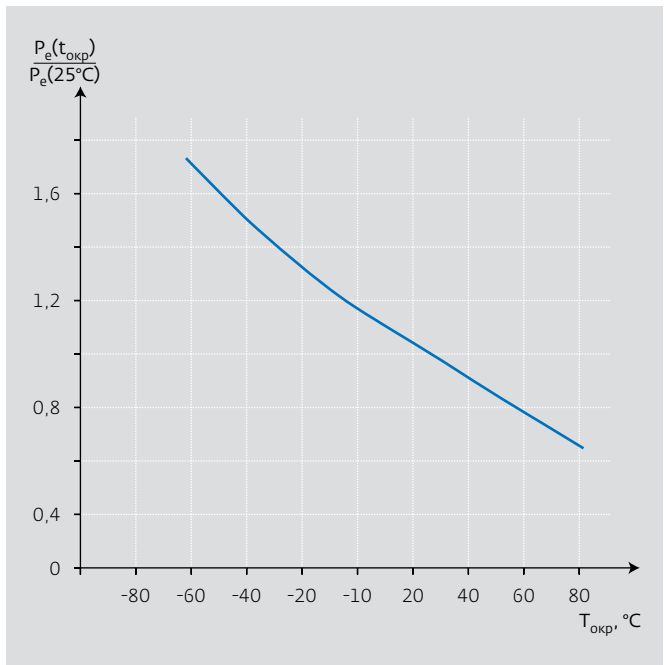


Рис.9. Типичная зависимость мощности излучения ИК-диодов от температуры окружающей среды

Инфракрасные осветительные модули направленного действия

Модули используются для прожекторного ИК-освещения совместно с очками или приборами ночного видения на основе ЭОП и ПЗС-матриц. Рассмотрим два вида модулей.

Модули с использованием блока плоских линз Френеля [13, 14]. Модули типа У-200ИК созданы на основе 12 ИК-диодов диаметром 5 мм (например, типа У-136), размещенных вблизи фокуса блока плоских линз Френеля

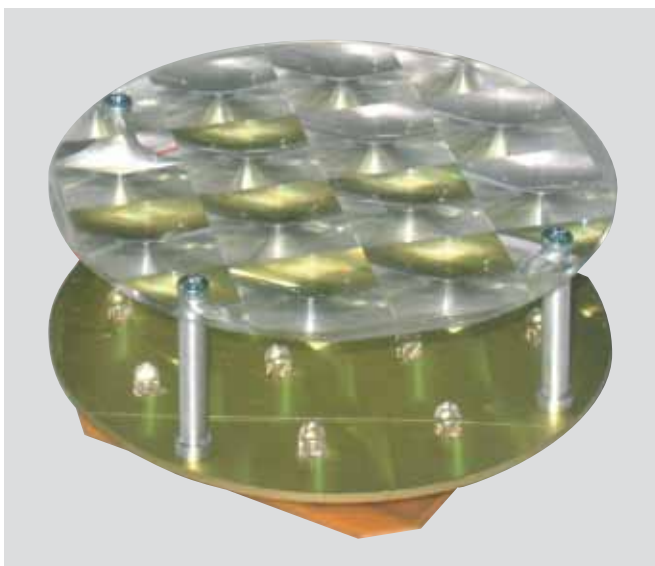


Рис.10. Модуль ИК-диодов с блоком плоских линз Френеля

(рис.10). Модуль (габариты $\phi 106 \times 43$ мм) включает также печатную плату с элементами управления. Входные электрические параметры модуля следующие: $U_{вх} = 12 \pm 1$ В, $J_{вх} = 200$ мА. Полученные образцы модулей характеризуются высокими фотометрическими параметрами (табл.3). Угол излучения модулей $2\theta_{0,5} = 2,5 - 3,5$ град. Сила излучения модулей достаточно велика (до 70 Вт/ср), что позволяет обеспечить дальность ИК-освещения до 500 м и высокую яркость. Излучение модуля У-200ИК-3 невидимо для человеческого глаза.

Модули с использованием мощных ИК-диодов.

При использовании в составе модуля мощных узконаправленных ИК-диодов типа У-176 или У-224 удается получить значительные величины силы излучения. Так, модуль с 30 ИК-диодами указанных типов обеспечивает силу излучения 120 Вт/ср и дальность – более 700 м. Модули на основе мощных ИК-диодов должны создаваться с использованием радиатора для отвода тепла. В качестве радиатора может быть использован также корпус осветителя.

Для освещения на более близкое расстояние используются 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.

Таблица 3. Фотометрические параметры модулей

Тип модуля	Спектр излучения		Сила излучения, J_e , Вт/ср		
	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	$\Delta\lambda$, нм	не менее	типичная	макс.
У-200ИК-1	870±20	35	60	65	70
У-200ИК-2	805±10	35	60	65	70
У-200ИК-3	940±10	50	30	35	40

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коган Л.М.** Полупроводниковые светоизлучающие диоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. **Herzog A.H., Keune D.L., Craford M.G.** High efficiency Zn-diffused GaAs electroluminescent diodes. – J. Appl. Phys., 1972, vol.43, №2, p.600–608.
3. **Rupprecht H., Woodail J.M., Konnerth K., Petit D.G.** Efficient electroluminescence from GaAs diodes at 300K. – Appl. Phys. Let., 1966, vol.9, №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.
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.
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.
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.
8. Светодиоды меза-конструкции на основе двойных гетероструктур в системе AlAs-GaAs./ Ж.И.Алферов, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, Н.Ю. Давидюк, Н.С. Дубровская, Б.В. Егоров, Л.М. Коган и др. – ЖТФ, 1977, т.47, №8, с.1772–1777.
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.
10. **Волков В., Коган Л.** Телевизионные системы с использованием светодиодных осветителей. – Электронные компоненты, 2002, №2, с.27–31.
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.
12. Мощный светодиод. Патент на полезную модель, № 48673 от 25.10.2004.
13. **Коган Л.М., Рассохин И.Т.** Светодиодные модули направленного действия. – Светотехника, 2001, №5, с.13–14.
14. Световой прибор на светодиодах. Патент на изобретение, № 2202731 от 13.12.2000.