

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535-15

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИММЕРСИОННЫХ СВЕТОДИОДОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 3,4 МКМ В ДАЛЬНОМ ПОЛЕ

© 2012 г. Н. В. Зотова, канд. физ.-мат. наук; С. А. Карандашев;  
Б. А. Матвеев, доктор физ.-мат. наук; М. А. Ременный, канд. физ.-мат. наук;  
Н. М. Стусь

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

В статье рассмотрено видоизменение распределения и мощности излучения в дальнем поле при варьировании геометрических параметров иммерсионных линз из кремния ( $\bar{n} = 3,4$ ) и халькогенидного стекла ( $\bar{n} = 2,4$ ), состыкованных с излучающими ( $\lambda = 3,4$  мкм) диодами на основе арсенида индия ( $\bar{n} = 3,5$ ), и даны оценки эффективности использования таких устройств в миниатюрных оптических системах.

**Ключевые слова:** светодиоды средневолнового диапазона, линзы ИК диапазона, ИК газоанализаторы.

Коды OCIS: 230.6080, 260.3060, 120.3620, 230.0250.

Поступила в редакцию 18.01.2012.

Оптическая пирометрия и спектроскопия уже давно заняли прочное место среди наиболее надежных и достоверных методов контроля многих технологических процессов в промышленности и экологии. Новые возможности для этих методов открывают свето- и фотодиоды (СД и ФД соответственно) средневолнового диапазона (3–5 мкм) на основе полупроводниковых гетероструктур  $A^3B^5$ , для которых характерны стабильность металлургических границ раздела, невосприимчивость к влаге, а также однородность свойств по поверхности эпитаксиальных структур. До недавнего времени широкое применение вышеуказанных компонентов сдерживалось невысоким значением их эффективности и недостаточной проработанностью конструкции приборов, в частности низким коэффициентом вывода излучения из полупроводникового кристалла с высоким показателем преломления ( $\bar{n} = 3,5$ ). Одно из первых упоминаний о существенном возрастании коэффициента вывода излучения и увеличении мощности излучения СД на основе  $In(Ga)As$  ( $\lambda = 3,3$  мкм) относится к 1987 году, когда благодаря использованию иммерсионной линзы из халькогенидного стекла, имеющего показатель преломления  $1 < \bar{n} < 3,5$ , удалось достичь оптиче-

ской мощности в 1 мВт [1]. В работе [2] также сообщалось об увеличении мощности излучения и о получении направленного пучка с полушириной  $28^\circ$  для СД на основе  $In(Ga)As$  с линзой из халькогенидного стекла в виде усеченного эллипсоида. Дальнейшее совершенствование конструкции средневолновых СД состояло в использовании технологии “флипчип”, обеспечивающей увеличение теплосъема и эффективности за счет минимизации теплового сопротивления и организации отражения излучения от внутренних концентраторов излучения (наклонных стенок мезы\*) и широкого анода, а также в микротекстурировании световыводящей поверхности полупроводни-

\* **Примечание.** Под мезой понимается часть эпитаксиальной (слоистой) структуры, выделенной при удалении слоев или части слоев в окружающей мезу замкнутой области и получаемой за счет разнотолщинности структуры. Чаще всего для создания мезы и пространственного ограничения протекания тока в планарных структурах используют локальное удаление слоя или слоев, содержащих  $p-n$ -переход, с помощью химического травления через окна в фоторезисте. При этом меза является обычно активной областью, т. е. единственной областью структуры, в которой внешнее напряжение воздействует на высоту потенциального барьера  $p-n$ -перехода. Один образец может содержать большое количество мез (активных областей), например, в диодных монолитных линейках и матрицах свето- и фотодиодов.

ка и приближении к условиям увеличенного эффективного угла полного внутреннего отражения и минимизированного отражения для нормальных лучей ( $R_{\perp} \rightarrow 0$ ) [3]. Это позволило более чем на порядок поднять мощность и яркость излучения на длине волны 3,4 мкм до значений, соответствующих эффективной (радиационной) температуре 1250 К. Отсутствие контактов на внешней стороне флип-чип диодов существенно упрощает процесс их стыковки с иммерсионными линзами как из кремния, так и из халькогенидного стекла [4]. Такие СД полезны в качестве калибровочных источников фотоприемных систем, например диодных матриц, и в качестве зондирующих источников в оптико-акустических газоанализаторах [5], и, согласно данным ООО “Июффе ЛЕД”, имеют наибольший спрос у потребителей. То же относится и к “иммерсионным” ФД, значение обнаружительной способности которых ( $D^*$ ) на порядок превосходит соответствующую величину для плоских, т. е. без линз, ФД [6]. Преимущества таких приборов наиболее полно проявляются в устройствах, использующих оптически согласованные пары “светодиод-фотодиод”, для которых удастся реализовать оптимальный, с точки зрения получения максимального отношения сигнал/шум, режим работы. Кроме того, для сенсоров на основе диодных оптопар удастся достичь предельно низких концентраций обнаружения газов при минимальном энергопотреблении [7].

Несмотря на имеющиеся примеры успешного практического использования “иммерсионных” СД средневолнового диапазона и большое количество посвященных им публикаций (см., например, [8] и обзор работ по светодиодам с активной областью из арсенида индия [3]), ряд вопросов, касающихся оптических характеристик оптоэлектронных компонентов, остается малоизученным. В данной работе мы приводим результаты измерений характеристик излучения в дальнем поле “иммерсионных” СД с длиной волны 3,4 мкм с линзами из халькогенидного стекла и из кремния, которые будут полезны при решении задачи максимального полного использования оптической мощности в недисперсионных (NDIR) сенсорах и газоанализаторах метана и других углеводородов.

### Образцы и методы исследований

Для изготовления СД использовались одиночные гетероструктуры  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}/$

$n^+\text{-InAs}$ , аналогичные описанным в [3, 4], преобразованные с помощью “мокрой” фотолитографии в чипы с квадратными активными областями и наклонными стенками мезы, служащими для перенаправления части излучения к световыводящей поверхности полупроводникового кристалла.

Для первой группы образцов поверхность подложки  $n^+\text{-InAs}$  состыковывалась с плоской частью кремниевых линз ( $\bar{n} = 3,4$ ), по форме близких к гиперполусфере Вейерштрасса высотой 3,26 мм и радиусом кривизны  $r = 2,45$  мм с помощью халькогенидного стекла, имеющего показатель преломления  $\bar{n} = 2,4$ . Линзы были адаптированы для светодиодов серии LED34SR и LED34SU и имели покрытие для подавления отражения излучения на длине волны 3,4 мкм; схемы стыковки с диодом приведены в [4–6].

Для второй группы образцов микролинзы из халькогенидного стекла ( $\bar{n} = 2,4$ ) с поперечным размером 1–2 мм были сформированы на поверхности СД и имели непосредственный (“иммерсионный”) оптический контакт с  $n^+\text{-InAs}$ , аналогично образцам, описанным ранее в работе [4].

Для измерений распределения интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) в дальнем поле использовались измерения фототока в ФД PD34SR с размерами активной области  $210 \times 210$  мкм со снятой линзой при его перемещении в плоскости, отстоящей от СД на расстоянии  $L = 0\text{--}30$  мм (см. рис. 1) (под расстоянием

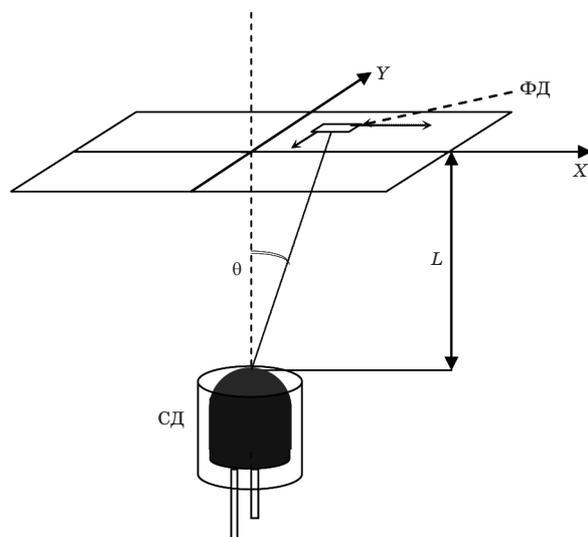


Рис. 1. Схема установки для измерения распределения излучения СД в дальнем поле с помощью неохлаждаемого ФД. Направления перемещения ФД показаны стрелками.

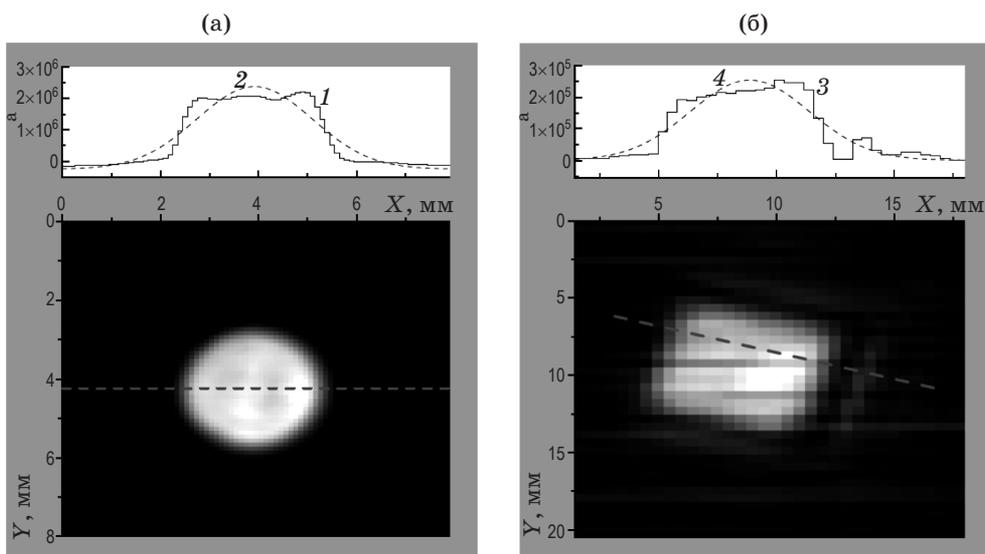


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения (1 и 3) на верхней части рисунка и ИК изображения поля излучения (внизу) СД с кремниевой линзой при  $I = 200$  мА. а –  $L \rightarrow 0$ , б –  $L = 30$  мм. 2 и 4 – функции Гаусса.

$L = 0$  понималось расстояние, минимально возможное в условиях эксперимента). Полученное таким образом распределение излучения – ИК изображение – имело формат матриц  $40 \times 40$  или  $80 \times 80$  с шагом 100 и 500 мкм соответственно; зависимость освещенности на плоскости от угла падения  $\theta$  не учитывалась. В качестве пространственных характеристик измеряемых пучков излучения были выбраны амплитуда фототока ФД в относительных единицах ( $A$ ) и параметр уширения (ширина пучка)  $\beta$  функции Гаусса

$$a = a_0 + A \exp\left(\left(\frac{x - x_c}{\beta}\right)^2\right), \quad (1)$$

аппроксимирующей распределение относительной интенсивности излучения в плоскости  $XU$  в одном из направлений (см. штриховые линии на рис. 2).

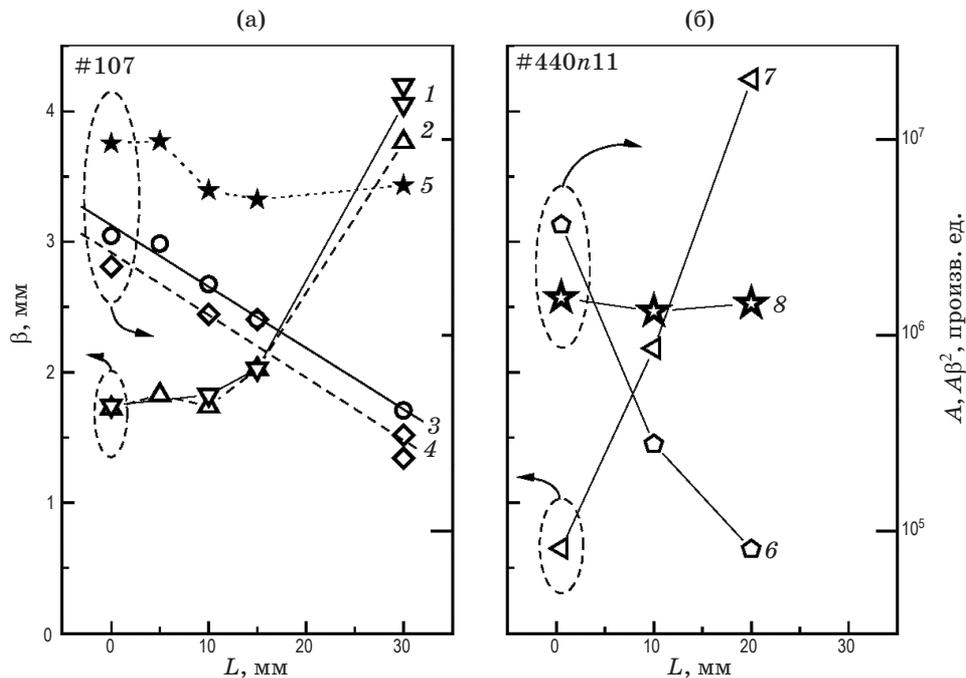
### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены изображения поля излучения СД с кремниевой линзой и распределение излучения в двух выбранных сечениях при прямом токе 200 мА и расстоянии до СД  $L = 30$  мм (б) и в непосредственной близости от СД, т. е.  $L \rightarrow 0$ , (а). При этом низкой интенсивности излучения в области 3,4 мкм присвоен темный фон, а высокой – светлый. Штриховыми линиями (2 и 4) на верхних рисунках показаны функции Гаусса, полученные мето-

дом наименьших квадратов; плоскости  $XU$  на рис. 1 и рис. 2 совпадают.

Как видно из рис. 2, при удалении от СД форма пучка ЭЛ (в сечении) трансформируется из усеченного конуса в усеченную пирамиду с квадратом в основании. Очевидно, что на расстоянии  $L = 30$  мм формируется увеличенное изображение излучающей (активной) области СД. На это указывает не только совпадение форм ИК изображения и мезы, но и наличие более тонких деталей, например более ярких, чем фон полос, окружающих основной “квадрат” изображения на рис. 2б. Указанные полосы сформированы отражением излучения от наклонных стенок мезы, играющих роль внутренних концентраторов излучения. Отражение излучения от стенок мезы и его значение в увеличении эффективности свето- и фотодиодов было рассмотрено нами ранее [3, 4, 9].

На рис. 3 представлена эволюция ширины пучка  $\beta$  и амплитуды  $A$  ЭЛ при изменении расстояния до СД. Из рис. 3 следует, что результирующая (Гауссова) амплитуда экспоненциально уменьшается при удалении от СД, при этом резкое увеличение ширины пучка для СД с кремниевой линзой наступает, начиная с расстояний  $L \approx 10$  мм; при  $L = 30$  мм полуширина пучка увеличивается, по сравнению со своим начальным значением при  $L = 0$ , более, чем в 2 раза. Для СД с микролинзой из халькогенидного стекла характерна более рез-



**Рис. 3.** Зависимость характеристик пучка излучения  $\beta$  (1, 2, 7),  $A$  (3, 4, 6) и  $A\beta^2$  (5, 8) от расстояния до СД ( $L$ ) с линзой из кремния (а) и халькогенидного стекла (б). Ток через СД: 100 (2, 4) и 200 мА (1, 3, 5–8). СД, данные которого приведены на рис. 3б, не оптимизирован.

кая, чем для СД с кремниевыми линзами, зависимость интенсивности и ширины пучка от  $L$ . Это связано с невысокой направленностью излучения, обусловленной как неидеальностью формы линзы, так и ее небольшими по отношению к чипу размерами. Для обоих типов СД суммарная мощность излучения, оцениваемая как произведение амплитуды интенсивности и квадрата параметра  $\beta$ , имеет незначительную зависимость от  $L$  в силу удаленности полосы излучения СД от спектральных областей сильного поглощения атмосферы (3 и 4,2 мкм).

В СД, содержащих “микроиммерсионные” линзы из халькогенидного стекла, нам не удавалось получать четкие увеличенные изображения чипа, подобные представленным на рис. 2, так как линзы имели небольшие размеры, а использованный метод их изготовления не позволял точно контролировать форму линзы, в частности не позволял независимо варьировать радиус кривизны ( $r$ ) и ее высоту ( $H + r$ ). Расчетные зависимости полной выходной мощности СД ( $\bar{n} = 3,5$ )  $P/P_0$  с “микроиммерсионной” линзой от высоты ее цилиндрической части (пьедестала)  $H$  при фиксированном радиусе ее кривизны  $r = 0,55$  мм и  $\bar{n} = 2,4$ ,

а также значения оптической мощности  $P_m/P_0$ , собираемой отражателями со сферической поверхностью разных размеров, представлены на рис. 4.

Из рис. 4а следует, что в СД с полусферической линзой ( $H \rightarrow 0$ ) благодаря ее высокому показателю преломления ожидается мощность излучения  $P$ , примерно в 6,5 раз превосходящая значение для плоского СД без специальных покрытий  $P_0$ . Для линзы в виде гиперполусферы Вейерштрасса ( $H = r/\bar{n}$ ) фактор увеличения мощности составляет примерно 4,6, что с учетом направленности излучения делает СД с подобными линзами привлекательными для практического использования. В таблице приведены характеристики излучения нескольких СД с линзами разных размеров для двух значений расстояния до СД – 0 и 10 мм – при токе 200 мА (поз. 2–6). Для сравнения там же приведены параметры плоского СД (без линзы – поз. 7) и СД с кремниевой линзой (поз. 1); на рис. 5 приведена фотография типичного СД с диаметром линзы порядка 1 мм. Из таблицы следует, что применение “микроиммерсионных” линз дает существенное (до 4 раз) увеличение мощности излучения СД (сравни СД в поз. 6 и 7), при этом в лучших СД (поз. 4)

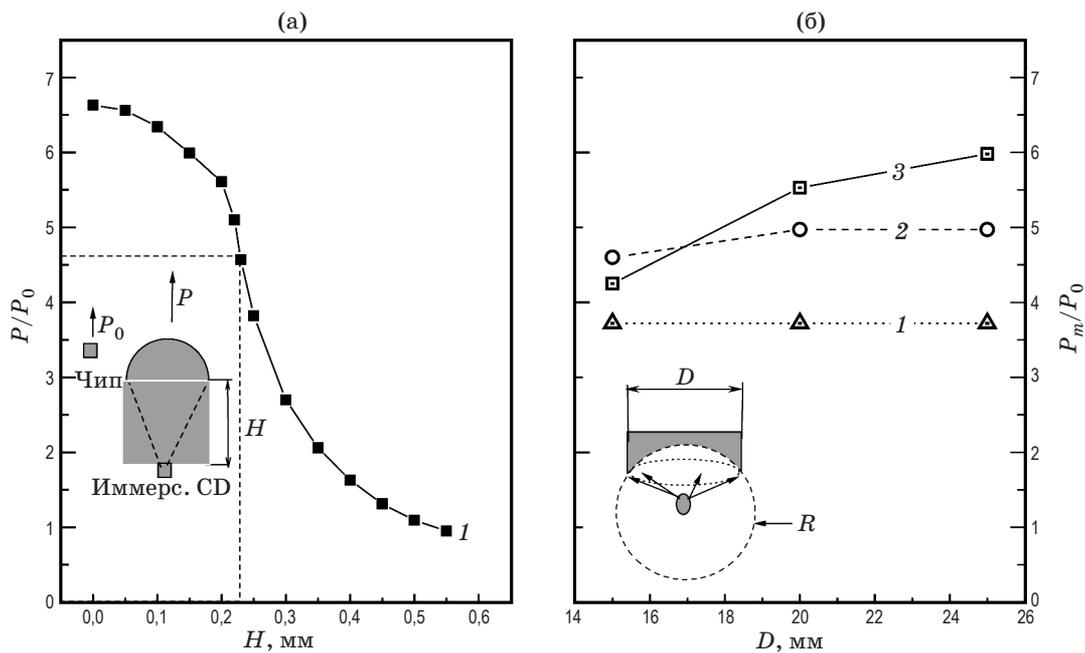


Рис. 4. Зависимость мощности излучения СД ( $P/P_0$ ) от высоты цилиндрической части линзы  $H$  (а) и зависимость мощности СД, собираемой сферическим зеркалом, от его поперечного диаметра (б). 1 –  $H = 0,25$ , 2 –  $0,2$ , 3 –  $0,15$  мм. На вставках – схемы, поясняющие условия расчета.

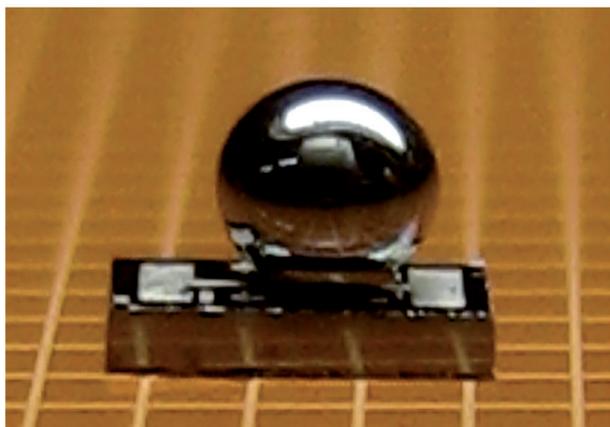
Параметры потоков излучения иммерсионных СД с 6 различными модификациями линз (поз. 1–6) в непосредственной близости от СД ( $L \rightarrow 0$ ) и на удалении 10 мм от СД при токе  $I = 200$  мА

Характеристики СД			$L \rightarrow 0$			$L = 10$ мм		
№	Тип линзы	# образца	$A_0$ , произв. ед.	$\beta_0$ , мм	$A_0\beta_0^2$	$A_{10}$ , произв. ед.	$\beta_{10}$ , мм	$A_{10}\beta_{10}^2$
1	Si ( $A_{\text{meas}}$ )	107	3,22	1,72	9,55	1,82	1,74	5,49
2	Chal.glass	440n1	3,66	0,65	1,55	0,27	2,18	1,32
3	Chal.glass	440n5	4,51	0,74	2,49	0,33	1,99	1,29
4	Chal.glass	6303n4*	2,88	1,67	8,04	0,08	8,11	5,58
5	Chal.glass	6329n3*	3,70	0,73	1,97	0,07	5,16	1,98
6	Chal.glass	6022	5,43	1,17	7,43	—	—	—
7	No lens	6022	0,55	1,84	1,87	—	—	—

выходная мощность сравнима с мощностью стандартных СД серии LED34SR, снабженных кремниевой линзой ( $P = 200$  мкВт при токе 200 мА).

Увеличение эффективности в микроиммерсионных СД достигается за счет потери направленности выходящего пучка – на это указывают как расчеты (см. рис. 4), так и данные эксперимента, показывающие уменьшение мощности излучения  $P$  при уменьшении размеров линзы (см. СД по поз. 4 и 5 в таблице). Поэтому при создании СД необходимо учесть

возможные условия будущего применения СД. На рис. 4б представлены расчеты мощности излучения  $P_m$ , собираемого сферическим зеркалом с радиусом отражающей поверхности 15 мм, в зависимости от поперечного диаметра зеркала ( $D$ ) для разных значений высоты пьедестала линзы ( $H$ ). Как видно из рис. 4б, для СД с наиболее высокой линзой ( $H = 0,25$  мм) имеет место неизменность эффективности сбора излучения (т. е.  $P_m$ ) при варьировании светосилы из-за высокой направленности излучения СД. Вместе с тем, значение мощности  $P_m$ , соби-



**Рис. 5.** Фотография микроиммерсионного СД, смонтированного на плоской монтажной плате (вид сбоку). Шаг масштабной сетки на фотографии 0,5 мм.

раемой зеркалом, невелико из-за малого угла сбора излучения внутри полупроводникового кристалла. Значение  $P_m$  можно повысить при уменьшении  $H$  (увеличении угла сбора излучения внутри кристалла), при этом из-за широкой диаграммы направленности вышедшего из

СД излучения значение  $P_m$  достигает максимума при большом диаметре зеркала –  $D > 20$  мм (при  $H = 0,2$  мм). СД с самой широкой диаграммой направленности излучения (приближение формы линзы к полусфере,  $H = 0,15$  мм) создает наибольший поток излучения среди перечисленных выше СД при наличии светосильного зеркала диаметром  $D > 17$  мм.

### Заключение

Таким образом, в работе показано, что линзы из кремния ( $\bar{n} = 3,4$ ) и микролинзы из халькогенидного стекла ( $\bar{n} = 2,4$ ) создают примерно одинаковое (4–5)-кратное увеличение оптической мощности СД, смонтированного по принципу иммерсионного источника излучения. При создании миниатюрной светосильной оптической схемы, например схемы датчика газоанализатора, изменяя размеры линзы из халькогенидного стекла, можно оптимизировать значение полезной мощности СД, используемой при измерениях.

Работа частично поддержана грантом седьмой рамочной программы ЕС (MINIGAS, # 224625).

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chey J.W., Sultan P., Gerritsen H.J. Resonant photoacoustic detection of methane in nitrogen using a room temperature infrared light emitting diode // Appl. Optics. 1987. V. 26. P. 3192–3194.
2. Есина Н.П., Зотова Н.В., Марков И.И., Матвеев Б.А., Розачев А.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н. Газоанализатор на основе полупроводниковых элементов // ЖПС. 1985. Т. 42. № 4. С. 691–694.
3. Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М. Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия (обзор) // ФТП. 2008. Т. 42. № 6. С. 641–657.
4. Matveev B.A. Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics // Springer Series in Optical Science. ISSN 0342-4111. 2006. P. 395–428.
5. Kuusela T., Peura J., Matveev B.A., Remenny M.A., Stus' N.M. Photoacoustic gas detection using a cantilever microphone and III–V mid-IR LEDs // Vibrational Spectroscopy. 2009. V. 51. № 2. P. 289–293.
6. Remenny M.A., Matveev B.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Stus' N.M., Ilinskaya N.D. InAs and InAs(Sb(P) (3–5  $\mu\text{m}$ ) immersion lens photodiodes for portable optic sensors // Proc. SPIE. 2007. V. 6585. P. 658504.
7. Sotnikova G.Y., Gavrilo G.A., Aleksandrov S.E., Kapralov A.A., Karandashev S.A., Matveev B.A., Remenny M.A. Low Voltage CO<sub>2</sub>-Gas Sensor Based on III–V Mid-IR Immersion Lens Diode Optopairs: Where we Are and How Far we Can Go? // Sensors Journal. IEE. 2010. V. 10. № 2. P. 225–234.
8. Кузнецов А.А., Балашов О.Б., Васильев Е.В., Логинов С.А., Луговской А.И., Черняк Е.Я. Дистанционный инфракрасный детектор углеводородных газов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 6. С. 55–59.
9. Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Черняков А.Е. Неохлаждаемые широкополосные флип-чип фотодиоды на основе InAsSb ( $\lambda_{\text{cut off}} = 4,5$  мкм) // ФТП. 2009. Т. 43. № 3. С. 412–417.