



К ВОПРОСУ О ТЕРМИНОЛОГИИ В СРЕДНЕВОЛНОВОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Б. Матвеев, д. ф. - м. н., ФТИ им. А. Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург

Термин "отрицательная люминесценция" уже давно перестал удивлять физиков. Но может ли эффективность средневолновых ИК-фотодиодов или КПД источника излучения превышать единицу? В литературе при описании новых оптоэлектронных приборов их разработчики не всегда корректно используют такие важные понятия, как радиационное охлаждение, квантовый выход и эффективность, а также быстрдействие свето- и фотодиодов.

В научной литературе можно встретить публикации, авторы которых утверждают, что при некоторых допущениях квантовая эффективность средневолновых инфракрасных (ИК) фотодиодов (ФД) превышает единицу. Это, разумеется, выходит за рамки принятых физических представлений и требует пояснений, которые обычно сопровождают подобные утверждения [1,2]. Непривычно выглядят также значения коэффициента полезного действия светодиодов (СД), превышающего единицу [см., например, 3]. Но, более чем странный, на первый взгляд, результат становится понятным после внимательного прочтения литературы по ИК-светодиодам. Авторы некоторых работ, рассматривающие эффекты радиационного охлаждения (термоэлектрического возбуждения) и фотоэлектрических явлений в полупроводниковых р-п-структурах, либо излишне расширительно, либо не вполне корректно используют терминологию, принятую в ИК-оптоэлектронике. В чем же дело?

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И РАДИАЦИОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Термин "отрицательная люминесценция" (ОЛ) уже давно перестал удивлять физиков. Он прочно вошел в лексикон исследователей, занимающихся оптоэлектронными приборами для диапазона длин волн 3-7 мкм, и в Британскую энциклопедию. Но иногда ОЛ заменяют понятием

REVISITING THE TERMINOLOGY IN THE MEDIUM WAVE INFRARED OPTOELECTRONICS

*B. Matveev, Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Ioffe
Physical and Technical Institute, Saint-Petersburg*

The term "negative luminescence" has long ago ceased to amaze physicists. But can the efficiency of medium wave infrared photodiodes or coefficient of efficiency of the light source exceed one? In the literature, in the description of new optoelectronic devices their developers do not always correctly use such important concepts as the radiative cooling, quantum yield and efficiency, as well as the operation speed of the light and photodiodes.

In the scientific literature we can meet publications the authors of which argue that, under certain assumptions, the quantum efficiency of medium wave infrared (IR) photodiodes (PD) is greater than one. Of course, it goes beyond the accepted physical concepts and requires explanations that usually accompany such statements [1,2]. The value of coefficient of efficiency of the LEDs exceeding one also looks unusual [see, for example, 3]. But the result being very strange at first glance is becoming clear after a careful reading of the literature on the infrared LEDs. The authors of some works, considering the effects of radiative cooling (thermoelectric excitation) and photoelectric phenomena in semiconductor p-n structures use the terminology adopted in the infrared optoelectronics too broadly, or not quite correctly. What is the matter?

NEGATIVE LUMINESCENCE AND RADIATIVE COOLING

The term "negative luminescence" (NL) has long ago ceased to amaze physicists. It is firmly adopted in the vocabulary of the researchers involved in optoelectronic devices for the wavelength range of 3-7 microns, and the Encyclopedia Britannica. But sometimes "negative luminescence" is replaced with the term "radiative cooling" [6]; the degree of cooling (ΔT) often has a dimension of temperature [K]. The methods for determining such radiative cooling, followed by the emergence of a negative flow of photons are explained in detail in the respective surveys [7]. Due to the terminological "democracy" the unsophisticated reader can be confused, because



"радиационное охлаждение" [6]; степень этого охлаждения (ΔT) часто имеет размерность температуры [K]. Способы определения такого радиационного охлаждения, сопровождаемого возникновением отрицательного потока фотонов, подробно освещены в соответствующих обзорах [7]. У неискушенного читателя из-за терминологической "демократии" может возникнуть путаница, поскольку под "радиационным охлаждением" можно понимать два различных физических явления. Во-первых, - собственно ОЛ, возникающую при обратном смещении р-п-перехода и означающую превалирование поглощения над излучением в спектральной области, близкой к краю собственного поглощения активной области [6-8]. Во-вторых, - эффект "теплового насоса" или термоэлектрического возбуждения при смещении р-п-перехода в прямом направлении [3-6]. Во втором случае, благодаря взаимодействию фонового и фотонного полей, у фотона, покидающего полупроводник, возникает добавочная энергия. По нашему мнению, во избежание будущих недоразумений понятие "радиационное охлаждение" следует относить к эффектам, возникающим лишь при прямом смещении р-п-перехода.

КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В отличие от радиационного охлаждения, упомянутые выше и относящиеся к работе ФД случаи, могут быть проанализированы без привлечения знаний математической физики, их можно рассмотреть в рамках обычных понятий геометрической оптики и закона Бугера-Ламбера. Действительно, для правильного определения эффективности работы ФД ключевым параметром является точное значение количества квантов (фотонов), попадающих в электрически активную зону фотоприемника. Именно поэтому в измерениях используют, как правило, модель абсолютно черного тела (АЧТ) с заданной (фиксированной) температурой (T); плотность излучения при этом определяется "нобелевской" формулой Планка и, разумеется, расстоянием между АЧТ и ФД. Однако, несмотря на известность количества фотонов, излучаемых АЧТ в выделенной спектральной области, указать точное количество квантов, попадающих в активную зону ФД, в ряде случаев не представляется возможным. Иными словами, ряд фотодиодов обладает такой конструкцией, что определить площадь сбора излучения невозможно или можно лишь приблизительно ее оценить. Причем, почти всегда можно

the "radiative cooling" can be interpreted as two different physical phenomena. Firstly, the actual negative luminescence occurring during the reverse bias of p-n junction and representing the prevalence of absorption over radiation in the spectral range close to the edge of own absorption of the active area [6-8]. Secondly, the effect of "heat pump" or thermoelectric excitation during the bias of the p-n junction in forward direction [3-6]. In the second case, due to the interaction phonon and photon fields, a photon, leaving a semiconductor, receives the additional energy. In our opinion, in order to avoid future misunderstandings, the term "radiative cooling" should be attributed to the effects that arise only in the case of the forward bias of the p-n junction.

THE QUANTUM EFFICIENCY OF PHOTOCONVERSION.

In contrast to the radiative cooling, the cases mentioned above and related to the photodiodes can be analyzed without the involvement of knowledge of mathematical physics, they can be considered within the ordinary concepts of geometrical optics and the law of Bouguer-Lambert. Indeed, for the proper determination of the effectiveness of the photodiode work, the key parameter is the exact value of the number of quanta (photons) entering the electrically active area of the photodetector. That is why the measurements typically use the model of absolute black body (ABB) at a predetermined (fixed) temperature (T); at the same time, the radiation density is determined by the "Nobel" Planck's formula and, of course, by the distance between the ABB and the PD. However, despite the known number of photons emitted by the ABB in the selected spectral range, it is not possible in some cases to specify the exact number of photons entering the active zone of the PD. In other words, the number of photodiodes has such a structure that it is impossible to determine the area of radiation collection, or it is possible only to approximately estimate it. Moreover, we can almost always confidently say that the area of the radiation collection in the PD not containing the external radiation hubs is always greater than the area of the p-n junction (i.e., the area of the electrically active parts) [1, 2, 9-11]. This statement is due to the fact that part of the radiation that has entered into the PD chip, can be redirected to the p-n junction by the multiple reflection from the faces, curved surfaces or other components of the heterostructure, for example, from the ohmic contacts. This last remark is especially

с уверенностью говорить, что площадь сбора излучения в ФД, не содержащих внешних концентраторов излучения, всегда больше площади р-п перехода (т.е. площади электрически активной части) [1, 2, 9–11]. Это утверждение связано с тем, что часть излучения, вошедшего в чип ФД, может быть перенаправлена к р-п-переходу многократным отражением от граней, искривленных поверхностей или иных составных частей гетероструктуры, например от омических контактов. Последнее замечание особенно актуально для ФД, имеющих флип-чип-конструкцию с широким омическим контактом [1, 2, 11].

В качестве примера можно указать на зависимость токовой чувствительности на длине волны 4,2 мкм S_I , имеющей размерность [А/Вт] от соотношения площади р-п-перехода и квадрата глубины мезы, приведенную в [11]. Она показывает, что при увеличении высоты наклонных стенок мезы (т.е. ее глубины) площадь сбора излучения увеличивается и, соответственно, растет фототок ФД. Использование наклонных стенок мезы для повышения площади сбора излучения, т.е. создание внутренних концентраторов излучения, широко известно и давно используется в полупроводниковой оптоэлектронике, например при создании диодных панелей большой площади с минимально возможной величиной обратного тока. Такие панели используют для защиты фотоприемных матриц от внешних тепловых шумов [7, 8]. При создании панелей используют, как правило, набор идентичных ФД, включенных в обратном направлении, т.е. излучающих ОЛ.

С другой стороны, для ряда конструкций ФД можно достаточно точно указать верхний предел количества квантов, поступающих в область р-п-перехода. Одной из таких конструкций является "иммерсионный" ФД, т.е. ФД, сопряженный с линзой с помощью иммерсии, чаще всего с помощью оптического клея [12, 13] (рис.1). Иммерсионный слой ("клей") на схеме не показан, в данном случае подразумевается, что иммерсию обеспечивает отсутствие воздушной прослойки между линзой и поверхностью ФД. Имеется в виду, что расстояние между поверхностями линзы и ФД много меньше длины волны излучения. Такое сопряжение требует высокоточного оборудования для достижения "оптического" качества поверхностей ФД и линзы. При использовании оптического клея требования к качеству сопрягаемых поверхностей в иммерсионном ФД, разумеется, менее строги.

Для ФД с иммерсионной линзой оптическая площадь существенно увеличивается, при этом

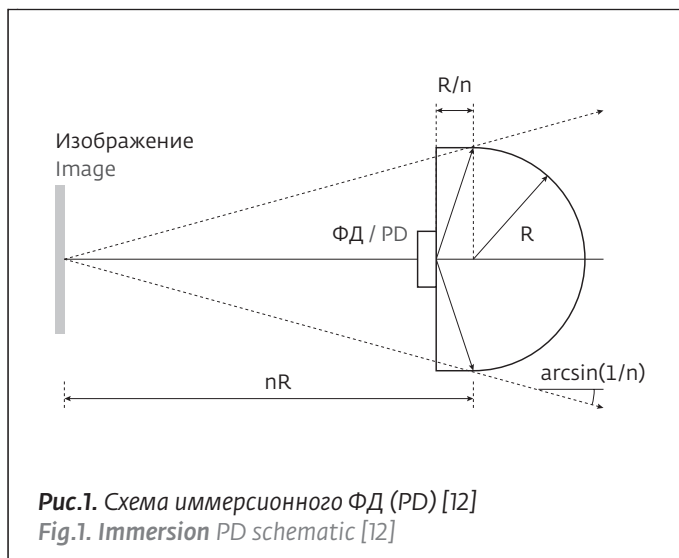


Рис.1. Схема иммерсионного ФД (PD) [12]
Fig.1. Immersion PD schematic [12]

important for the PD with a flip-chip structure with a wide ohmic contact [1, 2, 11].

As an example, we can point to the dependence of current sensitivity at a wavelength of 4.2 microns S_I having the dimension [A/W] from the p-n junction area and mesa depth square ratio indicated in [11]. It shows that with increasing height of the mesa sloped walls (i.e., its depth) the radiation collecting area is increased and thus the PD photocurrent is also increased. Using the mesa sloped walls to increase the radiation collecting area, i.e., establishment of internal radiation gubds is widely known and has long been used in semiconductor optoelectronics, for example, when creating a large area diode panels with the least possible value of the reverse current. Such panels are used for the protection of photodetector arrays from the external thermal noise [7, 8]. While making such panels the scientists generally use a set of identical PDs activated in the reverse direction, i.e. emitting negative luminescence.

On the other hand, for some PD designs it is possible to rather accurately specify an upper limit of the number of quanta entering the p-n junction area. One of these designs is the "immersion" PD, i.e. the PD conjugated with the lens using immersion, more often, by an optical adhesive [12,13] (Figure 1). The immersion layer ("adhesive") is not shown in the diagram, in this case it means that the immersion is ensured by absence of the air gap between the lens and the PD surface. It is understood that the distance between the lens surface and PD is much smaller than the radiation wavelength. This conjugation requires the high-precision equipment in order to achieve "optical" quality of the surfaces of FD and lenses. When using the optical adhesive the quality requirements



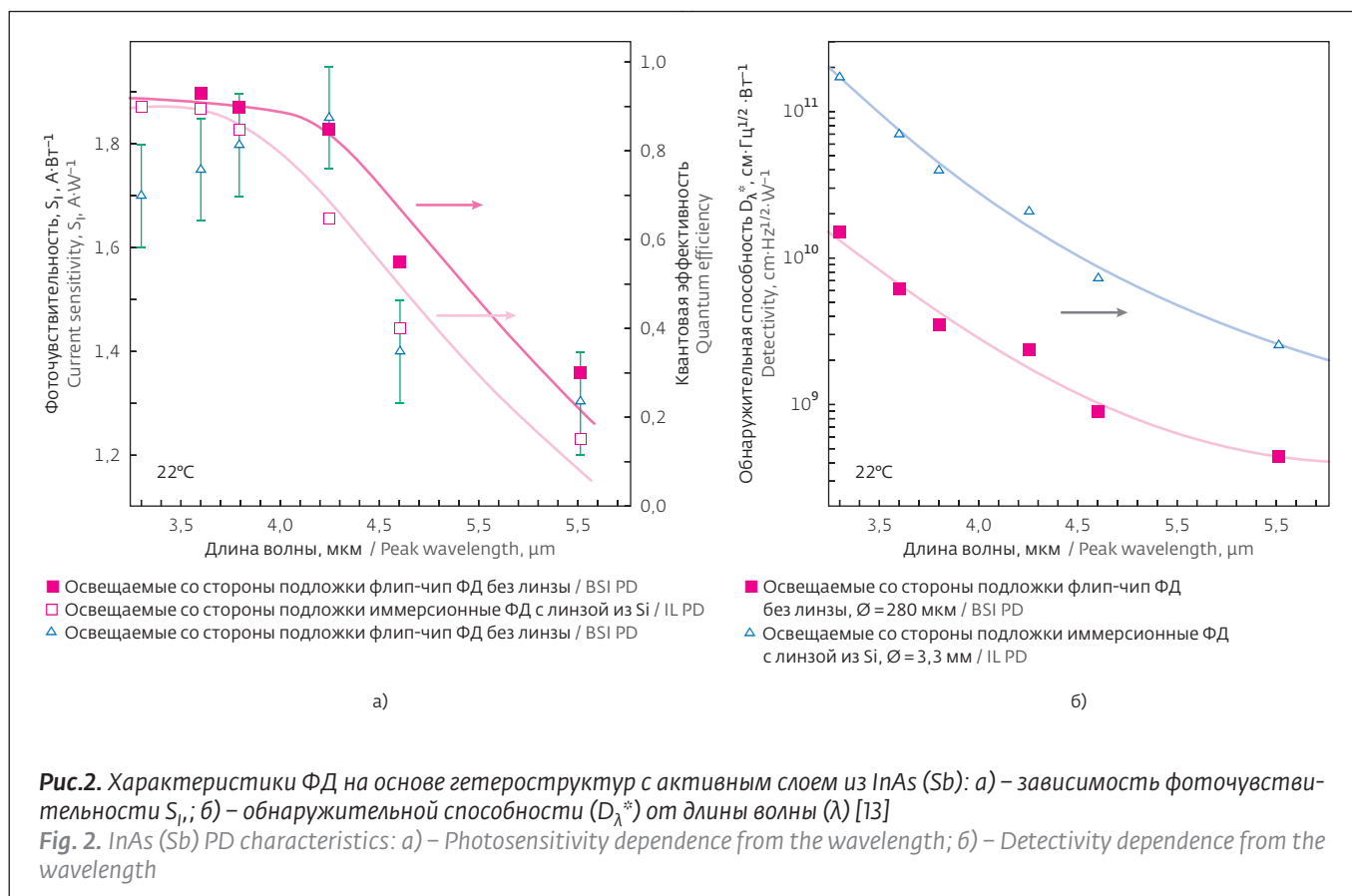
количество квантов, попадающих в область р-п-перехода, не может превысить количества квантов, вошедших в линзу. Это количество достаточно точно может быть оценено для линзы с известным диаметром. Поэтому параметры для иммерсионных ФД могут служить некоторым "эталоном" для характеристики свойств р-п-перехода и активной области в исходном чипе ФД*. Действительно, как показывают измерения, квантовая эффективность уменьшается при присоединении иммерсионной линзы к "голому" чипу ФД (рис.2) [13]. На деле это означает уменьшение токовой чувствительности ФД. Среди возможных причин уменьшения этого важного параметра можно назвать оптические потери, вызванные как паразитным поглощением, так и неполной фокусировкой излучения на активную область ФД. Тем не менее, несмотря на снижение токовой фоточувствительности, для потребителя использование иммерсионного ФД почти всегда предпочтительно и полезно, поскольку при этом достигается существенное увеличение отношения сигнал/шум при оптических измерениях

* В английской литературе исходный чип часто называют "голым" чипом (bare chip).

of the conjugated surfaces in the immersion PD, of course, are less strict.

For the PD with an optical immersion the optical area is substantially increased, while the number of photons entering the p-n junction area can not exceed the number of photons entering the lens. This amount can be rather accurately estimated for a lens with a known diameter. Therefore, the parameters for the immersion PDs can serve as some "standard" to characterize the properties of the p-n junction and the active area in the original PD chip*. Indeed, as it is shown by measurements, the quantum efficiency is reduced in the case of attachment of the immersion lens to the "bare" PD chip (Figure 2) [13]. In practice, it means a reduction in the current sensitivity of the PD. Among the possible reasons for reducing this important parameter we can indicate the optical losses caused both by parasitic absorption and incomplete radiation focusing on the active PD area. However, despite the decline in the current photosensitivity, for the customer the use of the immersion PD is almost always preferred and useful, because it is possible to achieve a substantial increase in the signal/noise

* In the English literature the original chip is often called "bare chip".



слабых сигналов. Для наиболее употребительного параметра – обнаружительной способности D_{λ}^* – такое увеличение в зависимости от угла зрения составляет от n^2 до n^4 , где n – показатель преломления наименее плотного оптического материала, используемого в конструкции ФД [12]. Для средневолновых ФД, изготовленных из гетероструктур на основе арсенида индия ($n \approx 3,4$) с диаметром активной области ~ 280 мкм, присоединенных к кремниевой линзе ($n = 3,5$) с помощью халькогенидного стекла ($n = 2,4$), увеличение D^* составляет в среднем около 10 раз для линзы с рабочим диаметром 3,3 мм (см. рис. 26).

Увеличение площади сбора фотонов в ФД с тонким кольцевым контактом на лицевой стороне узкозонной части структуры можно обеспечить также и за счет лучей, отраженных от тыльной стороны подложки GaSb или InAs. Авторами [9, 10] было установлено, что полупроводниковый приемник с развитой тыльной поверхностью подложки, наряду с расширенным диапазоном спектральной чувствительности, обладает еще и повышенной эффективностью в средней ИК-области спектра (1–5 мкм) за счет дополнительного поглощения в активной области

ratio in optical measurements of weak signals. For the most common option – the detectability D^* – such an increase depending on the vision angle is from n^2 to n^4 , where n – the index of refraction of the less dense optical material used in the PD design [12]. For medium wave PD made of heterostructures on the basis of indium arsenide ($n \approx 3,4$) with the diameter of active area of ~ 280 microns, bonded to a silicon lens ($n = 3,5$) using the chalcogenide glass ($n = 2,4$) the increase in D_{λ}^* in average is about 10 for the lens with a working diameter of 3.3 mm (see. Figure 26).

Increasing the photon collection area in the PD with a thin annular contact on the front side of the narrow-band part of the structure can be achieved also by the beams reflected from the back side of the base coat GaSb or InAs. The authors of [9, 10] have found that the semiconductor receiver with the advanced back surface of the base coat, along with the extended band of the spectral sensitivity has also increased efficiency in the medium IR region of the spectrum (1–5) microns due to the additional absorption in the active region of the heterostructure of the photons repeatedly re-reflected from the curved surfaces of depressions in the semiconductor base coat (Figure 3). In fact, while creating a relief to the original streams

гетероструктуры фотонов, многократно переотраженных от криволинейных поверхностей углублений в полупроводниковой подложке (рис.3). Действительно, при создании рельефа к исходным потокам А и D, поглощаемым в поверхностном слое ФД с плоской тыльной стороной подложки, добавляются потоки, формируемые за счет потоков В и С и их последующих "отголосков". Повышение фоточувствительности в области длин волн 1-2,5 мкм (подложка GaSb) и 1,5-4 мкм (подложка InAs), согласно данным указанных работ, невелико (~ 30%). Поэтому понятно, что предложенный подход способен в будущем дать значительное увеличение чувствительности при использовании других, более прозрачных подложек, например GaAs для диапазона длин волн $\lambda=1-2,5$ мкм) и GaSb для $\lambda=2-4$ мкм.

В некоторых типах ФД токовая чувствительность (квантовая эффективность) может быть повышена за счет увеличения коэффициента отражения от тыльной стороны структуры. К такому типу устройств можно отнести ФД, имеющие конструкцию флип-чип и отражающие контакты, например анод ($R=0,6$ [11]). В таких диодах часть не поглощенных при первом проходе квантов может при отражении от контакта

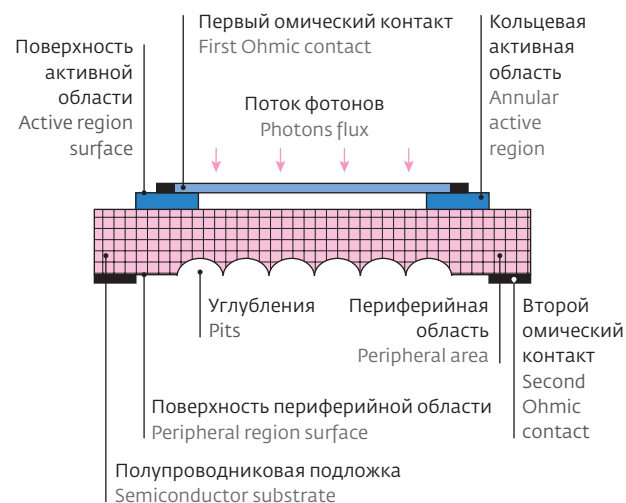


Рис.3. Схема ФД с кольцевым контактом и развитой поверхностью на тыльной стороне подложки [9]

Fig. 3. Scheme PD having an annular contact surface area and textured surface on the back side of the substrate [9]

A and D, absorbed in the PD surface layer with a flat back surface of the base coat, are combined with the flows generated by the flows B and C and their



быть перенаправленной в сторону активной области, что даст увеличение фототока. Естественно, что подобный механизм увеличения квантовой эффективности актуален для излучения с невысоким коэффициентом поглощения, т.е. вблизи длинноволнового края поглощения активной области. В коротковолновой части спектральной кривой не стоит ожидать увеличения квантовой эффективности из-за полного поглощения излучения активной областью – эффекты, обусловленные отражением от контакта для этой области спектра, могут быть проигнорированы. Понятно также, что при затенении всех частей ФД, кроме активной области, квантовая эффективность не может превысить единицу.

БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ФД

Термин "быстродействующие ФД" также требует уточнения, поскольку разные авторы вкладывают несколько разный смысл в это понятие. В качестве примера рассмотрим работы, в которых термин "быстродействующие" или "сверхбыстродействующие" ФД вынесен в название статьи [14–16]. В работе [15] под быстродействием ФД из InAs понимается постоянная времени RC-цепочки, вычисляемая для $R=50$ Ом и составляющая 30–80 нс для ФД диаметром $D=0,2-0,3$ мм. Иногда ограничиваются приведением значения емкости ФД, например $C=2-5$ пФ при обратном смещении ($U=-(0,2-0,4$ В)) для ФД диаметром $\varnothing=50$ мкм [16]. В работе [17] приведено вдвое меньшее, чем в [15], значение постоянной времени ($\tau=15$ нс) для ФД на основе p-InAsSbP/n-InAs с сопоставимыми размерами, полученное при измерениях с помощью полупроводникового лазера на основе GaAs. Еще меньшее значение для постоянной времени можно обнаружить в [18] (расчетное значение $\tau=1-6$ нс для диода площадью 1 мм²), а также в спецификациях серийно выпускаемого фотодиода J12-LD2-R250U из арсенида индия диаметром $\varnothing=250$ мкм, для которого термин "High-Speed" ($\tau<3$ нс) применен лишь к описанию схемы его включения, а не к прибору в целом [19]. В этой связи разумным представляется приведение в названии статьи значения, относящегося к быстродействию, например значения произведения коэффициента умножения на полосу пропускания лавинного фотодиода (см., например, [14]) или полосу пропускания (см., например, [16]), но без расширительной трактовки и распространения одних данных на все типы исследованных ФД).

subsequent "echoes". The increase in photosensitivity in the wavelength region of 1–2.5 micrometers (GaSb base coat) and 1.5–4. μ m (InAs base coat), according to the above works, is small (~ 30%). Therefore it is clear that the proposed approach is capable in the future to provide a significant increase in sensitivity during the use of other, more transparent base coats, for example, GaAs for the wavelength range $\lambda=1-2,5$ m, and GaSb for $\lambda=2-4$ microns.

In some PD types the current sensitivity (quantum efficiency) can be increased by increasing the coefficient of reflection from the back surface of the structure. Such a device may include the FDs having a flip chip structure and a reflective contacts such as the anode ($R=0,6$ [11]). In such diodes the part of photons not absorbed during the first pass can be redirected towards the active region as a result of reflection from the contact that will provide the increase in the photocurrent. Naturally, such a mechanism of increasing the quantum efficiency is relevant for radiation with a low absorption coefficient, i.e., close to the long-wavelength absorption of the active region. In the short-wave part of the spectral curve it is not necessary to expect the increase in the quantum efficiency due to the complete absorption of radiation by the active area – the effects due to reflection from the contact for this spectrum area can be ignored. It is also clear that while shading all PD parts except for the active region the quantum efficiency can not exceed one.

OPERATION SPEED OF THE PD

The term "fast PD" also requires clarification, because different authors put different meaning in this concept. As an example, we will consider the works in which the term "high-speed" or "ultra high-speed" PD is included in the name of the article [14–16]. In the work [15] the PD operation speed from InAs means the time constant of the RC-chain calculated for $R=50$ Ohm and is 30–80 ns for the PD with the diameter $D=0,2-0,3$ mm. Sometimes we are limited to the usage of the FD capacitance values, for example, $C=2-5$ pF in the case of the reverse bias ($U=-(0,2-0,4$ V)) for the PD with the diameter $\varnothing=50$ mm [16]. The work [17] provides the time constant that is less than half of the value indicated in [15], ($\tau=15$ ns) for the PD on the basis of p-InAsSbP/n-InAs with the comparable dimensions, obtained by the measurements using semiconductor laser based on GaAs. Even lower value for the time constant can be found in [18] (the calculated value of $\tau=1-6$ ns for diode with an area of 1 мм²), as well as the specifications of the commercially available photodiode J12-LD2-R250U made of indium arsenide



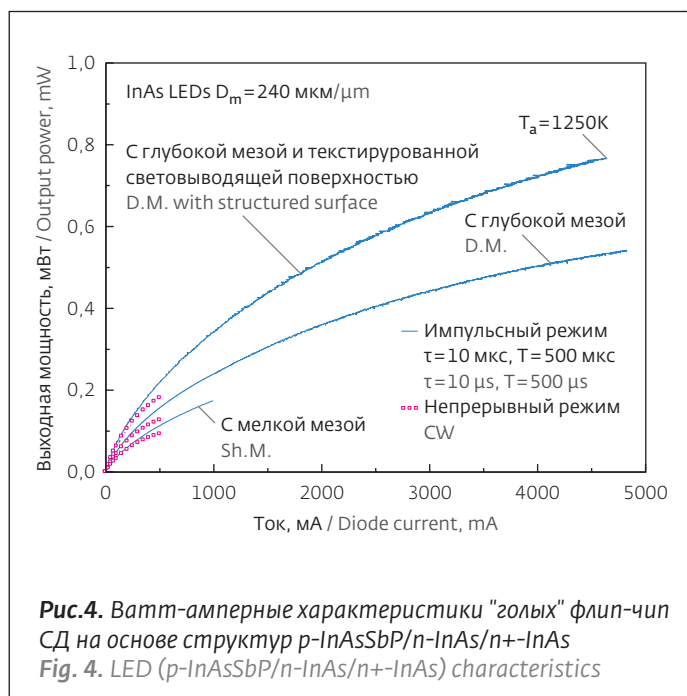
МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ.

Весьма распространенным прилагательным, используемым для характеристики средневолновых светодиодов, является прилагательное "мощный" [20-22] или "очень мощный" [23]. Понятно, что в понятие "мощный" авторы вкладывали смысл "оптически мощный" светодиод. При этом нередко оказывается, что "очень мощный" (в оригинале "high power", 5 мВт, $I=1,4$ А [23]) уступает по оптической мощности просто "мощному" (5,5 мВт, $I=9$ А [20]) при сопоставимых токах накачки. Несложный расчет показывает также, что эффективность преобразования, определяемая, например, для светодиодов из номинально одинаковых структур с активной областью из арсенида индия [20-23] и имеющая размерность милливольт на ампер, постепенно уменьшается с ростом номера тома журнала. Заметим также, что уменьшение коэффициента преобразования в более поздних работах, указанных авторов (см., например, [20]) получено, несмотря на существенные доработки конструкции чипа СД, т.е. при переходе от конструкции с точечным контактом к р-области [21] и удаленностью р-п-перехода от теплоотвода [21, 22] к конструкции чипа с точечным контактом

with the diameter $\varnothing=250$ mm, for which the term "high-speed" ($\tau < 3$ ns) is applied only to the description of its connection layout, rather than to the device as a whole [19]. In this connection it seems reasonable to use in the title of the article the value relating to the operation speed, for example, values of the product of the multiplication factor and the bandpass of the avalanche photodiode (see, for example, [14]) or the bandpass (see, for example, [16], but without broad interpretation and dissemination of the same data on all types of the studied PDs.

RADIATION POWER

The very common adjective used to describe the medium wave LEDs is the adjective "powerful" [20-22] or "high powerful" [23]. It is understood that the concept of "powerful" is meant by the authors as the "optically powerful" LED. It often turns out that the "high powerful" (in the original, the "high power", 5 mW, $I=1,4$ А [23]) is second in the optical power to the simply "powerful" (5.5 mW, $I=9$ А [20]) at comparable pump currents. A simple calculation also shows that the conversion efficiency defined, for example, for the LEDs of nominally identical structures with the active region, ade of indium



к p-области и максимальным приближением p-n перехода к теплоотводу, т.е. при монтаже эпитаксиального слоя вниз на корпус [20]. По всем предпосылкам и соображениям, приведенным в [24, 28], СД в [20] должны были бы быть более эффективными и мощными, чем СД в [21, 22]. Вопрос несоответствия ожиданий и реальных данных уже рассматривался нами в [24] применительно к измерениям с помощью инфракрасных микроскопов.

ВНУТРЕННИЙ КВАНТОВЫЙ ВЫХОД

Довольно часто приводимый авторами внутренний квантовый выход, получаемый из экспериментальных значений оптической мощности, имеет значение, не соответствующее всей совокупности данных об объекте исследования, прежде всего температурной зависимости его оптической мощности. На подобное несоответствие уже обращалось внимание ранее в обзоре [24] и отмечалось, что стандартное для светодиодов из арсенида индия увеличение мощности на 1-2 порядка при охлаждении от 300 до 77К означает, что при комнатной температуре внутренний квантовый выход не может превышать 1-10%. К сожалению, некоторые авторы (см. например, [20]) пренебрегают простыми оценками квантового выхода, основанными на предположении о 100%-ом квантовом выходе в InAs при температурах ниже 77 К и неизменности пропускания слоев в гетероструктуру при изменении температуры. По нашему мнению,

арсенида [20-23], и having the dimension of mW/A gradually decreases with increasing volume serial number of the file. It should be also noted that the reduction in the conversion factor in the later works of these authors [see, for example, 20] is received, despite the substantial improvements in the LED chip design, i.e. during the transition from design with the point contact to the p-region [21] and the remoteness of the p-n junction from the heat sink [21, 22] to the chip design with a point contact to n-region and the closest approximation of the p-n junction to the heat sink, i.e. while mounting the epitaxial layer down on the body [20]. According to all the prerequisites and reasons given in [24, 28] the LEDs [20] would have to be more efficient and powerful than the LEDs in [21, 22]. The issue of non-compliance of expectations with the actual data has already been considered in [24] with respect to the measurements using the infrared microscopes.

THE INTERNAL QUANTUM EFFICIENCY

The internal quantum efficiency quite often provided for by the authors and obtained from the experimental values of the optical power has a value that does not match the data aggregate relating to the object of research, especially the temperature dependence of its optical power. We have already drawn attention to such a discrepancy earlier in the review [24] and noted that the power increase by 1-2 orders standard for the LEDs of indium arsenide during cooling from 300 to 77 K means that at the room temperature, the internal quantum efficiency can not exceed 1-10%. Unfortunately, some authors [for example, 20] neglect the simple estimates of the quantum efficiency, based on the assumption of 100% quantum efficiency in InAs at the temperatures below 77 K, and the transmission immutability of the layers in the heterostructures with changes in temperature. In our opinion, the overestimated value of power and, consequently, the internal quantum efficiency, is due most likely to the methodological errors in the calculation of power. This assumption is appropriate, given the large difference in the values of power in the pulsed and continuous modes [20-23]. This difference, of course, should be available, but only at the high pump currents when the LED chip is heated by Joule heat (see, for example, data in [24, 25]).

RADIATION TEMPERATURE

For most applications of the IR LEDs the paramount importance is provided by their luminosity, or brightness, but not by the integral radiation power. This is due to the fact that for efficient use of radiation



завышенное значение мощности и, соответственно, внутреннего квантового выхода, связано, вероятнее всего, с методическими ошибками при расчете мощности. Такое предположение вполне уместно, если учесть сильное различие значений мощности в импульсном и непрерывном режимах [20–23]. Это различие, конечно же, должно быть, но только при больших токах накачки, когда чип СД разогревается Джоулевым теплом (см., например, данные в [24, 25]).

РАДИАЦИОННАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Для большинства применений ИК-светодиодов первостепенное значение имеет их светимость или яркость, а не их интегральная мощность излучения. Это связано с тем, что для эффективного использования излучения и подаваемой на излучатель электрической мощности важно, чтобы размер активной области СД был существенно меньше, чем размер фокусирующих оптических элементов, например иммерсионных линз или зеркал, используемых в измерительном устройстве. Так, например, при использовании СД с поперечным размером активной области 430 мкм, микроиммерсионных линз размером ~1 мм и сферических зеркал диаметром 68 мм удалось создать измерительный канал на длину волны 3,3 мкм с оптической длиной до 100 м [26]. При этом становится понятным, что ключевым параметром в светодиоде является мощность излучения с единицы площади его активной области ($\text{мВт}/\text{см}^2$). Очень часто для характеристики такой "удельной" мощности пользуются понятием "радиационная температура" или "apparent temperature" (T_a) [24, 27]. Аналитические выражения для вычисления радиационной температуры можно найти, например, в [27]; на рис. 4 приведены данные для самых ярких на сегодняшний день средневолновых ИК СД, для которых эффективная радиационная температура на длине волны 3,3 мкм составляет 1250 К [24, 28]. Значение эффективной радиационной температуры (T_a) указано для максимального значения импульсного тока (4.5 А) для СД с глубокой мезой травления и текстурированной поверхностью, полученной химическим травлением световыводящей поверхности n^+ -InAs. Помимо высокой яркости предложенные в [28] СД удобны для стыковки с оптическим волокнами, что создает предпосылки для их использования в волоконно-оптических датчиках, например датчиках химического состава жидкости, работающих по методу исчезающей волны.

and the electric power supplied to the emitter, it is important that the size of the LED active area is significantly smaller than the size of the focusing optical elements, such as immersion lenses or mirrors used in the measuring device. For example, when using the LEDs with a lateral dimension of the active region of 430 microns, microimmersion lens with the size of ~ 1 mm and spherical mirrors with the diameter of 68 mm it was able to create a measurement channel for the wavelength of 3.3 microns with the optical length of up to 100 m [26]. At the same time it is becoming clear that the key parameter in the LED is radiated power per unit of its active area (mW/cm^2). The characteristics of such a "specific" power very often uses the term "radiation temperature" or "apparent temperature" (T_a) [24, 27]. The analytical expressions for calculating the radiation temperature can be found, for example, in [27]; Fig. 4 shows the data for the brightest modern medium wave IR LEDs for which the effective radiation temperature at a wavelength of 3.3 microns is 1250 K [24, 28]. The effective radiation temperature (T_a) is indicated for the maximum pulse current value (4.5 A) for the LEDs with the deep etching mesa and textured surface, obtained by chemical etching of the light deferential surface of the n^+ -InAs. In addition to the high brightness the LEDs proposed in [28] are suitable for the optical fiber connections that creates prerequisites for their use in the fiber-optic sensors, for example, the sensors of chemical composition of the fluid working according the disappearing wave method.

INSTEAD OF CONCLUSION.

We believe that understanding the above mentioned nuances of using the terminology of infrared optoelectronics is important for proper assessment of the applicability of a particular PH or LED design to solution of a particular technical problem. Such problems have recently become more and more, the balance between high speed, sensitivity, power, brightness and the possibility of PH/LED using in the fiber-optical systems, for example, to measure the objects heated to low temperatures [29], have greater importance.

The author expresses his gratitude to the personnel of the MIRD OG diode optocouplers group of the infrared optoelectronics laboratory, Ioffe Physical and Technical Institute of the Russian Academy of Sciences for assistance in work.

The appearance of this article is due to the implementation of the project "Development of technology for semiconductor photosensitive materials



ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Нам представляется, что понимание перечисленных выше нюансов использования терминологии ИК-оптоэлектроники важно для правильной оценки применимости той или иной конструкции ФД или СД к решению конкретной технической задачи. Таких задач в последнее время становится все больше, причем все более и более важное значение приобретает баланс между быстродействием, чувствительностью, мощностью, яркостью и возможностью использования ФД/СД в волоконно-оптических системах, например для измерения нагретых до невысоких температур объектов [29].

Автор выражает благодарность сотрудникам группы диодных оптопар MIRDOG лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН за помощь в работе.

Появление данной статьи обусловлено выполнением работ по проекту "Разработка технологии получения полупроводниковых фоточувствительных материалов для матричных инфракрасных фотоприемников и тепловизоров". Код контракта 14.576.21.0057.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Карпухина Н.Г. и др. Диодные матрицы формата 3x3 на основе одиночных гетероструктур p-InAsSbP/n-InAs. – Прикладная физика, 2014, № 6, с. 47–51.
2. Brunkov P.N., Il'inskaya N.D., Karandashev S.A. et al. Cooled P-InAsSbP/n-InAs/N-InAsSbP double heterostructure photodiodes. – Infrared Physics & Technology, 2014, v. 64, p. 62–65.
3. Santhanam P., Huang D., Ram R.J. et al. Room Temperature Thermo-Electric Pumping in mid-Infrared Light-Emitting Diodes. – Appl. Phys. Lett. 2013, v.103, № 19, p. 183513.
4. Tauc J. The share of thermal energy taken from the surroundings in the electro-luminescent energy radiated from a p-n junction. – Czech. J. Phys., 1957, v.7, p. 275–276.
5. Dousmanis G.C., Mueller C.W., Nelson H. and Petzinger K.G. Evidence of refrigeration action by means of photon emission in semiconductor diodes. – Physical Review 1964, v.133, p.A316–318.
6. Berdahl P. Radiant refrigeration by semiconductor diodes. – Journal of Applied Physics 1985; v.58, p.1369–1374.
7. Elliott C.T. Negative luminescence and its applications. – Phil. Trans. R.Soc. Lond. A, 2001, v.359, p.567.
8. Lindle J.R., Bewley W.W., Vurgaftman I. et al. Negative Luminescence from Large – Area HgCdTe Photodiode Arrays with 4.8–6.0 μm Cut-off Wavelengths. – IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, v.41, p. 227–233.
9. Патент 2488916 РФ. Полупроводниковый приемник инфракрасного излучения/ Гребенщикова Е.А., Старостенко Д.А., Шерстнев В.В. и др.
10. Гребенщикова Е.А., Старостенко Д.А., Шерстнев В.В. и др. Повышение квантовой эффективности фотодиодов за счет изменения направления световых потоков в гетероструктуре InAs/InAsSb/InAsSbP. – ПЖТФ, 2012, т. 38, вып.10, с. 43–49.
11. Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д. и др. Неохлаждаемые широкополосные флип-чип фотодиоды на основе InAsSb (lcut off=4,5 мкм). – ФТП, 2009, т. 43, № 3, с.412417.
12. Jones R.C. Immersed radiation detector s. – Appl. Opt., 1962, v.1, p.607–613.
13. Antony Rogalski. Infrared Detectors. – 2-nd edition, 2012. International Standard Book Number: 978-1-4200-7671-4, CRC press, Tailor and Francis group.
14. Marshall A.R.J., Ker P.J., Krysa A. et al. High speed InAs electron avalanche photodiodes overcome the conventional gain-bandwidth product limit. – OPTICS EXPRESS, 2011, v. 19, № 23, p.23341.
15. Yakovlev Yu.P., Andreev I.A., Kizhayev S.S. et al. High-speed photodiodes for 2,0–4,0 μm spectral range. – 19 th International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices, edited by Anatoly M. Filachev, Vladimir P. Ponomarenko, Alexander I. Dirochka. –Proc. of SPIE Vol. 6636 66360D, (2007) · doi: 10.1117/12.742322.
16. Andreev I.A., Serebrennikova O.Yu., Sokolovskii G.S. et al. Ultrafast (bandwidth 2–10 GHz) photodiodes for the 1.3–3.8 micron spectral range. – Book of Abstracts, "Mid-IR Optoelectronics: Materials and Devices, "MIOMD 2014": October 5–9, 2014, Montpellier, France.
17. Сукач А.В., Тетеркин В.В., Старый С.В. и др. Неохлаждаемые p-InAsSbP/n-InAs фотодиоды для оптоэлектронных сенсоров. – Тезисы докладов на XVIII Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25–28 мая 2004 года, Москва, с.29.
18. Кижяев С.С., Михайлова М.П., Молчанов С.С. и др. Выращивание InAs фотодиодных структур из металлоорганических соединений. – ПЖТФ, 1998, т. 24, вып. 7, с.1–7.





19. Indium Arsenide Detectors, Judson Technologies LLC, www.judsontechnologies.com.
20. **Астахова А.П., Головин А.С., Ильинская Н.Д. и др.** Мощные светодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для спектроскопии метана ($\lambda \approx 3.3 \mu\text{м}$). – ФТП, 2010, т. 44, вып. 2, с. 278–285.
21. **Popov A.A., Sherstnev V.V., Yakovlev Y.P. et al.** Powerful mid-infrared light emitting diodes for pollution monitoring. – ELECTRONICS LETTERS, 1997, v. 33, №. 1, p. 86–88.
22. **Krier A. and Sherstnev V.V.** Powerful interface light emitting diodes for methane gas detection. – J. Phys.D: Appl. Phys, 2000, v.33, p.101–106.
23. **Kizhayev S.S., Zotova N.V., Molchanov S.S. et al.** High power mid-infrared light emitting diodes grown by MOVPE. – IEE Proc. optoelectronics 2002, v. 149, №.1, p.36–39.
24. **Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А. и др.** Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия (обзор). – ФТП, 2008, т. 42, № 6, с.641–657.
25. www.ioffeled.com
26. **Кузнецов А.А., Балашов О.Б., Васильев Е.В. и др.** Дистанционный инфракрасный детектор углеводородных газов. – Приборы и системы. Управление контроль, диагностика, 2003, № 6, с. 55–59.
27. **Jung S., Suchalkin S., Westerfeld D. et al.** High dimensional addressable LED arrays based on type I GaInAsSb quantum wells with quaternary AlGaInAsSb barriers. – Semicond.Sci.Techn., 2011, v.26, 085022 (6pp).
28. **Matveev B A, Zotova N V, Il'inskaya N D et al.** 3.3 μm high brightness LEDs. – Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2005, v. 891 9–14 (paper # 0891-EE01-04).
29. **Sotnikova G.Yu., Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A. et al.** Radiometric temperature measurements using In (Ga) As (Sb) backside illuminated photodiodes. – Abstract of the 42-th Freiburg Infrared Colloquium, 3–4 March 2015, p.89–90.