



СЮРПРИЗЫ СРЕДНЕВОЛНОВЫХ ИК-СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР A^3B^5

Б. Матвеев, д.ф. – м.н., bmat@iropt3.ioffe.ru,
Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург

В статье рассмотрены специфические свойства средневолновых СД, отсутствующие у "обычных" СД видимого диапазона, например, такие как отрицательная люминесценция и термоэлектрическое возбуждение. Проведен анализ подобных свойств применительно к приборостроению.

В последнее время наметилась тенденция преодоления "водобоязни", вызванной непониманием специфических особенностей средневолновых ИК-светодиодов, и все больше и больше компаний заявляют о начале производства "светодиодных" газоанализаторов (ГА). Вместе с тем, для определенной части разработчиков-прибористов такие СД по-прежнему представляются некой "экзотикой", требующей дополнительных разъяснений. В предлагаемой статье мы попытаемся представить некоторые из таких разъяснений, а также рассмотрим новые свойства средневолновых СД, открытые лишь недавно.

Обычно первое удивление у разработчиков, впервые изучающих спецификации, полученные от производителей СД, вызывает непривычно большие значения полуширины спектров электролюминесценции (ЭЛ), составляющие в зависимости от длины волны от 0,3 до 0,7 мкм. Для оптических недисперсионных (англ. термин – NDIR) ГА такой широкий спектр излучения создает проблемы из-за перекрестной чувствительности, поскольку на величину светового потока, прошедшего через анализируемую смесь, влияет поглощение одновременно нескольких газов. Например, при измерении концентрации угарного газа (аналитическая длина волны 4,7 мкм) с помощью измерения ослабления излучения от светодиода с длиной волны в максимуме 4,7 мкм при его прохождении через газ весьма существенным оказывается поглощение на длине волны 4,3 мкм, обусловленное присутствием на оптическом пути атмосферного углекислого газа

SURPRISES OF MEDIUM-WAVE IR LIGHT EMITTING DIODES BASED ON HETEROSTRUCTURES A^3B^5

B. Matveev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, bmat@iropt3.ioffe.ru,
Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg

The specific properties of medium-wave LEDs, which the "common" LEDs with visible band do not have, are considered in the article, for example, negative luminescence and thermoelectric excitation. Analysis of such properties in respect to the instrument engineering is performed.

Recently, the tendency of overcoming of "hydrophobia" caused by the misunderstanding of the specific peculiarities of medium-wave IR light emitting diodes has been outlined and increasingly more companies have declared about the commencement of production of "light emitting" gas analyzers (GA). In the meantime, for the certain part of instrument developers such LEDs are still some "exotics" which requires additional explanations. In the offered article we will try to give such explanations and consider the new properties of medium-wave LEDs which have been recently discovered.

Usually, the developers who study the specifications received from LED manufacturers for the first time are surprised because of the unordinary high values of the half-width of electroluminescence (EL) spectrums which are equal to 0.3–0.7 μm depending on the wavelength. For the optical non-dispersion (NDIR) GA such broad radiation spectrum causes problems due to the cross sensitivity, because the simultaneous absorption of several gases influences on the value of the light flux which passed through the analyzed mixture. For example, when measuring the concentration of carbon monoxide (analytical wavelength is 4.7 μm) using the measurement of radiation attenuation from the light emitting diode with the maximum wavelength of 4.7 μm during its transmission through the gas, the absorption at the wavelength of 4.3 μm turns out to be very significant; it is caused by the presence of atmospheric carbon dioxide (concentration 0.03% by volume) in the optical path [1]. It is commonly supposed that the LED spectrum width is equal to 1.8

(концентрация 0,03% об.) [1]. Принято считать, что ширина спектра СД составляет величину, равную $1,8 kT$ (k – постоянная Больцмана, T – температура), поэтому задача сужения спектра может быть решена за счет охлаждения СД. Однако использование охладителей с большой долей вероятности не принесет разработчикам и конечным пользователям оптимизма, поскольку при использовании охлаждающих систем нивелируются основные преимущества СД – их малое энергопотребление и габариты. Для устранения перекрестного влияния CO и CO_2 на показания ГА используют "спектральные" ухищрения, такие как применение узкополосных интерференционных фильтров (обычно $\Delta\lambda=50-100$ нм), резонаторов Фабри-Перо, модовая структура которых повторяет спектр одного из газов [2], или фильтров "негативной фильтрации", состоящих из кюветы с одним из газов с высокой концентрацией [1]. Разумеется, перечисленные приемы применимы лишь к однокомпонентным ГА; для многокомпонентного же анализа в условиях неподвижных частей ГА наиболее удобно использование дифракционной решетки. В этом случае большая ширина спектра ЭЛ есть положительное свойство, позволяющее создавать большое количество спектральных каналов измерений [3].

Следующим сюрпризом может быть то, что согласно публикациям некоторых авторов, коэффициент преобразования, т.е. количество выделяемой в единицу времени световой энергии, в импульсном режиме значительно превосходит коэффициент преобразования для непрерывного или квазинепрерывного (т.е. со скважностью 2) режимов. Расхождение значений непрерывной и импульсной мощности ЭЛ, достигающее при одном и том же значении тока до нескольких раз, эти авторы объясняют разогревом активной области СД при прохождении тока. Действительно, СД с неоптимальным дизайном (как правило, это – СД с точечным верхним контактом и удаленным от держателя р-п – переходом) подвержены сильному разогреву р-п – перехода в процессе работы, что действительно вызывает уменьшение коэффициента преобразования [4]. Однако сильный разогрев СД имеет следствием также заметное изменение ширины запрещенной зоны и, естественно, длины волны максимума ЭЛ. Тем не менее, такие изменения или различия спектров при импульсном и непрерывном режимах этими авторами зафиксированы не были.

В других типах СД с хорошим теплосъемом и выводом излучения через прозрачную подложку спектры ЭЛ ($\lambda_{max}=3,3$ мкм) не зависели от тока в пределах от 0,01 до 500 мА [5], что соответствовало представлениям о несущественном джоулевом

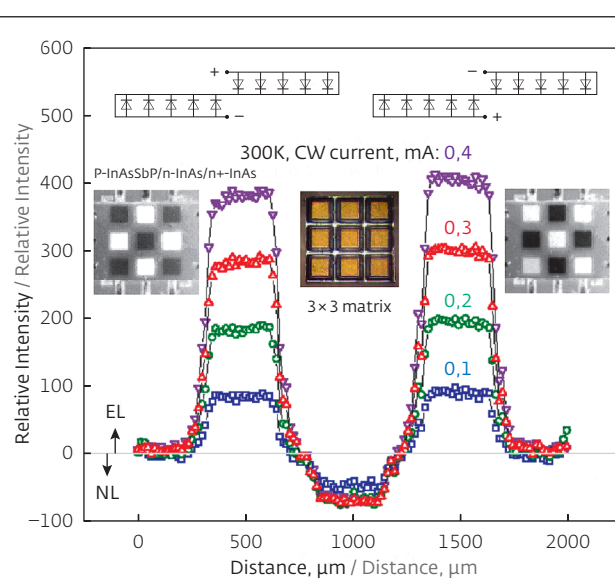


Рис. Распределение интенсивности ОЛ и ЭЛ матрицы вдоль ее центрального сечения при одновременном подключении всех элементов к источнику питания по схеме, представленной в левом верхнем углу рисунка [9].

На вставках приведены фотографии матрицы со стороны слоя р-типа/анодов (в центре), а также ИК-изображения при общем токе через матрицу 100 мкА при двух вариантах включения, показанных в верхней части рисунка

Fig. Distribution of the intensity of NL and EL array along its central cross-section upon the simultaneous connection of all elements to the power source according to the scheme given in the left upper corner of the figure [9]. The picture of array from the side of the layer of p-type/anodes (in the center) and IR images with the total current through the array of 100 μA in two connection variants shown in the upper part of the figure are given in the insertions

kT (k is the Boltzmann's constant, T is the temperature), and therefore the task of spectrum narrowing can be solved at the expense of LED cooling. However, very likely that the use of coolers will not bring optimism to the developers and end users because during the use of cooling systems the main advantages of LEDs – their low energy consumption and overall dimensions – are leveled. In order to eliminate the cross impact of CO and CO_2 on the GA parameters the "spectral" tricks are used; such as, for example, application of narrow-band interference filters (usually, $\Delta\lambda=50-100$ nm), Fabry-Perot resonators, the mode structure of which repeats the spectrum of one of the gases [2], or filters with "negative filtration", which consist of the cuvette with one of the gases with high concentration [1]. Of course, the listed methods are applicable only for single-component GAs; the use of diffraction grating is the most convenient method for multi-component analysis under the conditions of GA immovable parts.



разогреве таких СД и об идентичности "непрерывной" и импульсной мощности, по крайней мере в области малых токов. Для оценки влияния температуры на положение максимума излучения СД можно воспользоваться, например, спецификациями для СД типа LED42Sr, излучающего на длине волны 4,2 мкм при 300К [6]. Двукратному уменьшению мощности такого СД соответствует возрастание его температуры (точнее – температуры окружающей среды) с 25 до 90°C, при этом длина волны максимума ЭЛ возрастает с 4,15 до 4,4 мкм. Отсюда понятно, что не заметить в эксперименте столь сильное изменение максимума спектра ЭЛ невозможно. Простой вывод из рассмотрения приведенных выше примеров состоит в том, что при выборе компонентов для ГА нужно внимательно изучить и проанализировать все заявленные производителем параметры, включая температурные зависимости спектров и мощности ЭЛ в непрерывном и импульсном режимах. Естественно, что большее доверие вызывают СД, для которых приведены данные с совпадением импульсной и непрерывной мощности ЭЛ, по крайней мере в области малых токов.

Для высокоточных ГА даже небольшие (и часто неизбежные) температурные изменения длины волны ЭЛ вызывают серьезную озабоченность разработчиков. Вместе с тем, в иммерсионных СД флип-чип конструкции такое изменение не имеет гистерезиса и воспроизводится при многократном термоциклировании, поэтому его можно учесть в аналитическом выражении для передаточной функции ГА и получить высокую точность измерений. Такой подход позволил достичь предела обнаружения в 50–100 ppm при объеме анализируемого газа (CO₂, C₂H₄ или CO) менее 10 мл и времени усреднения в несколько секунд, что удовлетворяет требованиям большинства задач для портативных ГА [2].

Термин "отрицательная" применительно к физическому явлению не всегда несет в себе оттенок бесполезности или ненужности для технических приложений. В данном контексте отрицательная люминесценция (ОЛ) означает лишь то, что основной поток (неравновесных) фотонов направлен не в сторону наблюдателя, а от него. Такая ситуация впервые была обнаружена при исследовании рекомбинационного излучения в антимониде индия и впоследствии воспроизведена во многих диодных структурах на основе CdHgTe, InAsSb, InAs и более сложных материалах – сверхрешетках, имеющих малые токи утечек [7]. Для инициации ОЛ достаточно сместить СД в обратном направлении, и СД начнет поглощать фотоны больше, чем излучать их во вне в пределах своего спектра поглощения.

In this case, large width of EL spectrum is the positive property which allows creating the great amount of spectral measurement channels [3].

The next surprise can be the fact that according to the publications of some authors the conversion coefficient or, in other words, amount of the light energy released in unit time considerably exceeds the conversion coefficient in the pulse mode for the continuous or quasi-continuous (in other words, with the porosity 2) operation. These authors explain the discrepancy of the values of continuous and pulse EL power reaching several times with the same current value by the heating of LED active region during the current passage. Indeed, LED with non-optimal design (as a rule, these are LEDs with the point top contact and p-n junction which is distant from the holder) are subject to the intense heating of p-n junction during operation which in reality causes the decrease of conversion coefficient [4]. However, the intense LED heating also causes the noticeable variation of the width of forbidden band and, of course, EL maximum wavelength. Nevertheless, such spectrum variations or differences in pulse and continuous modes were not registered by these authors.

In other types of LEDs with good heat pick up and radiation coupling through the transparent substrate, the EL spectrums ($\lambda_{\max}=3.3 \mu\text{m}$) did not depend on the current within the limits from 0.01 to 500 mA [5], which corresponded to the conceptions of insignificant Joule heating of such LEDs and identity of continuous and pulse power, at least, in the region of low currents. In order to estimate the temperature influence on the position of maximum LED radiation, we can use the specifications for LED43Sr radiating at the wavelength of 4.2 μm at 300 K as example [7]. Increase of the temperature (more precisely, ambient temperature) from 25 to 90°C corresponds to the double decrease of power of such LED and the EL maximum wavelength grows from 4.15 to 4.4 μm . It follows that it is impossible not to notice such significant variation of EL spectrum maximum during the experiment. The simple conclusion from the consideration of aforementioned examples consists in the fact that when selecting the components for GA it is necessary to study attentively and analyze all parameters declared by the manufacturer including the temperature dependencies of LED spectrums and power in continuous and pulse modes. Of course, the LEDs, which have the data given with the concordance of pulse and continuous EL power, at least in the region of low currents, have higher credibility.

For high-precision GAs even small (and often unavoidable) temperature variations of EL wavelength



В качестве примера на рисунке 1 показано распределение интенсивности люминесцентного излучения при одновременном подключении всех элементов монокристаллической матрицы 3×3 с активным слоем из InAs ($\lambda_{\text{max}}=3,4$ мкм, 300К) к внешнему источнику питания [8]. В данном эксперименте диодные элементы были объединены в две группы, состоящие из четырех и пяти элементов соответственно, как показано на вставках к рисунку. На правой вставке показано ИК-изображение поверхности матрицы, полученное при постоянном токе ≈ 25 мкА в каждом из четырех недиагональных элементов, работающих в режиме ОЛ, т.е. в режиме пониженной по сравнению с равновесным фоном излучательной способности (темные квадраты), и токе ≈ 20 мкА в каждом из диагональных и центральном элементах, работающих в режиме ЭЛ (светлые квадраты, повышенная по сравнению с фоном яркость излучения). В другом эксперименте (см. левую вставку) четыре диагональных и центральный элементы матрицы работали в режиме ОЛ ($I_{\text{pixel}} \approx 20$ мкА), а четыре оставшихся – в режиме ЭЛ ($I_{\text{pixel}} \approx 25$ мкА). Амплитуда общего тока в обоих случаях формирования ИК-изображения типа "доска для крестиков-ноликов" составляла 100 мкА.

Из данных на рисунке следует, что при токах, близких к 100 мкА, интенсивности ОЛ и ЭЛ

give rise to the serious concerns of developers [1]. In the meantime, in the immersion LED with flip-chip construction such variation does not have hysteresis and is reproduced upon the multiple thermocycling, therefore, it can be taken into account in the analytical expression for GA transfer function and the high precision of measurements can be reached. Such approach made it possible to reach the detection limit of 50–100 ppm with the volume of analyzed gas (CO_2 , C_2H_4 or CO) less than 10 ml and averaging time of several seconds which meet the requirements of the majority of tasks for portable GAs [2].

The term "negative" in relation to the physical phenomenon does not always mean something useless or unnecessary for the technical applications. In this context, the negative luminescence (NL) only means that the main flux of (non-equilibrium) photons is directed not towards the observer but from him. Such situation was detected for the first time during the research of recombination radiation in indium antimonide and afterwards it was reproduced in many diode structures based on CdHgTe, InAsSb, InAs and more complex materials – supergratings having low leakage currents [7]. For NL initiation it is sufficient to displace LED in backward direction and LED will start absorbing photons more than radiating

практически совпадали, а при больших токах имела место слабая зависимость интенсивности ОЛ от тока – хорошо известная особенность приборов ОЛ, вызванная почти полной экстракцией носителей из активной области СД [9, 10].

Помимо использования ОЛ для создания "холодных" экранов в охлаждаемых фотоприемных системах на основе матриц большого формата, тестирования таких матриц [8, 9] и получения суммарного, "температурно-независимого" оптического сигнала [10] ОЛ важна и для исследований и прогнозирования параметров фотодиодов (ФД), имеющих один из контактов на облучаемой поверхности полупроводника с высоким значением объемного сопротивления. Так, например, изучение пространственного распределения ОЛ в ФД на основе InAsSb выявило сгущение фототока вблизи от контакта и вскрыло основную причину их низкой токовой фоточувствительности – неполный сбор фотогенерированных носителей [11]. Эти исследования позволили по-новому взглянуть на конструирование средневолновых ФД [12] и создать высокоэффективные оптические газовые сенсоры, способные работать, в том числе, и при повышенных температурах [13].

Отличительной особенностью средневолновых СД является сублинейность их ватт-амперной характеристики даже при небольших значениях токов. Снижение эффективности при возрастании тока вызвано не только упомянутым выше нагревом СД во время его работы, но и более фундаментальными причинами – так называемой Оже-рекомбинацией, названной по имени открывателя основных механизмов безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей в узкозонных соединениях типа InAs. Скорость этой рекомбинации пропорциональна кубу концентрации инжектированных носителей, и поэтому разработчики и производители средневолновых СД предпочитают использовать достаточно толстые полупроводниковые слои, в которых носители заряда "размазываются" по всему объему активной области. В результате достигается относительно низкая концентрация инжектированных носителей и, соответственно, низкая скорость Оже-рекомбинации. Разумеется, при этом верхняя граница для толщины активной области выбирается исходя из возможности вывода излучения из этой области с учетом самопоглощения излучения. В результате оптимальная толщина АО СД часто оказывается сопоставимой с оптимальной толщиной АО в ФД. Другими словами, эффективный средневолновый СД нередко оказывается одновременно и эффективным ФД. Это обстоятельство было учтено при выборе единого дизайна многих средневолновых СД

them outwards within the limits of its absorption spectrum. The distribution of intensity of luminescent radiation is shown in figure as the example upon the simultaneous connection of all elements of monolithic array 3x3 with the active layer of InAs ($\lambda_{\max}=3.4 \mu\text{m}$, 300 K) to the external power source [8]. In this experiment the diode elements were united into two groups consisting of 4 and 5 elements respectively as it is shown in the insertions to figure. IR image of array surface obtained at the direct current $\approx 25 \mu\text{A}$ in each of 4 non-diagonal elements, which operate under the NL conditions or conditions of decreased radiation capacity (dark squares) in comparison with the equilibrium background, and at the current $\approx 20 \mu\text{A}$ in each of diagonal and central elements, which operate under the NL conditions (light squares, increased radiation brightness in comparison with the background) is shown in the right insertion to figure. In other experiment (see left insertion) four diagonal and central array elements operated under the NL conditions ($I_{\text{pixel}} \approx 20 \mu\text{A}$), and four remaining elements – under the EL conditions ($I_{\text{pixel}} \approx 25 \mu\text{A}$). Amplitude of the total current in both cases of the formation of IR image of the type "board for noughts and crosses" was 100 μA .

From the data in figure it follows that at the currents close to 100 μA the intensities of NL and EL practically concurred and at high currents the small dependence of NL intensity on the current occurred – it is well known peculiarity of NL devices which is caused by almost complete extraction of carriers from the LED active region [9, 10].

Besides NL use, for the creation of "cold" screens in cooled photodetecting systems based on the arrays with large size, for the testing of such arrays [8, 9] and obtainment of combined, "temperature-independent" optical signal [10], NL is important for the studies and forecasting of the parameters of photodiodes (PD), which have one of the contacts on the illuminated semiconductor surface with the high value of bulk resistance. Thus, for example, the studies of the spatial distribution of NL in PD based on InAsSb revealed the photocurrent concentration near the contact and disclosed the main reason of their low current photosensitivity – incomplete collection of photogenerated carriers [11]. These studies allowed viewing the construction of medium-wave PD in a new way [12] and creating the high-efficiency optical gas sensors which can operate even at high temperatures [13].

The distinctive feature of medium-wave LEDs is sublinearity of their Watt-Ampere characteristics even at insignificant values of currents. Decrease of the



и ФД с широким отражающим анодом [4-8]. В результате были существенно снижены затраты на производство, поскольку одни и те же постростовые операции и оснастка применимы и к ФД, и к СД, включая, например, шаблоны для фотолитографии. Описанная "дуальность" свойств средневолновых диодов может оказаться полезной также и при проектировании ГА. Так, например, в [14] при фотометрических измерениях, включая газовый анализ, было предложено поочередно использовать один и тот же диод то в качестве приемника, то в качестве источника излучения. Подобная "хитрость" будет особенно полезна для анализаторов с большим числом оптически связанных СД и ФД [15], поскольку существенно увеличивает число полезных сигналов, которые можно использовать для самокалибровки ГА при соответствующей математической обработке оцифрованных сигналов – задачи, актуальной и поныне.

Но, пожалуй, самый приятный сюрприз средневолновых СД – это их способность работать в качестве теплового насоса при небольших смещениях р-п – перехода. Аспиранты и сотрудники Массачусетского Технологического Института (США) установили, что произведенные компанией "ИюффелеД" СД на основе р-п структур InGaAsSb

efficiency with the current increase is caused not only by the aforementioned LED heating during its operation but by more fundamental reasons as well – so-called Auger recombination which has such name after the name of the discoverer of basic mechanisms of radiationless recombination of non-equilibrium carriers in the narrow-bandgap compounds of InAs type. The speed of this recombination is proportional to the cube of the concentration of injected carriers, and therefore the developers and manufacturers of medium-wave LEDs prefer using quite thick semiconductor layers, in which the charge carriers are "spread" throughout the active region. As a result, relatively low concentration of injected carriers and low speed of Auger recombination are reached accordingly. Of course, the upper bound is selected for the thickness of active region on the basis of the capability to couple radiation out of this region taking into account the radiation self-absorption. As a result, the optimal thickness of LED AR (active region) often turns out to be comparable to the optimal thickness of AR in PD. In other words, the efficient medium-wave LED often simultaneously turns out to be efficient PD. This circumstance was taken into account in the selection of the common design for many medium-wave LEDs and PDs with broad reflecting anode [4-8].



с длиной волны вблизи 2 мкм, обладают способностью забирать часть тепловой энергии от кристаллической решетки и трансформировать ее в энергию фотонов [16]. В результате взаимодействия фононного и фотонной полей эффективность СД, определяемая как отношение выделившейся из СД в виде фотонов энергии к затраченной электрической энергии, оказывается существенно выше единицы (230%, 135°C). К сожалению, при температурах, близких к комнатным, "супервысокий" КПД имеет место быть только в области малых токов, меньших, чем несколько пикоампер [17]. Для реализации измерительного прибора, использующего столь низкие токи питания СД, потребуются ФД с предельно низкими собственными шумами, например ФД, охлажденные до температур, близких к 77К [18]. Это заставляет считать применение эффекта теплового насоса в практических целях, например в недорогих портативных "светодиодных" ГА, пока преждевременным. Так что остается надеяться на усердие и целеустремленность аспирантов, вдохновленных красотой нового физического явления и готовых "добывать", а потом защищать и применять на практике новые научные положения по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Автор выражает благодарность сотрудникам группы диодных оптопар лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН за полезные советы при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sotnikova G.Y., Aleksandrov S.E. and Gavrilov G.A.** Performance analysis of diode optopair gas sensors. – Proc. of SPIE, v. 7356, p. 7356-69 2009
2. **Meneses J., Briz S., A.J. de Castro, J. Melendez and Lopez F.** A new method for imaging of carbon dioxide in combustion environment. – Rev. Sci. Instrum., 1997, 68 (6), p. 2568-2573/
3. Авт. свид. 1672814 СССР. Газоанализатор / Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н. и др.
4. **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.
5. **Matveev B.A.** LED-Photodiode Opto-pairs. – Mid-IR-Semiconductor Optoelectronics. – Springer Series in OPTICAL SCIENCE, ISSN 0342-4111, 2006, p. 395-428.
6. <http://www.mirdog.spb.ru/Specifications/2013/LED42.pdf>
7. **Иванов-Омский В.И., Матвеев Б.А.** Отрицательная люминесценция и приборы на ее основе (обзор). – ФТП, 2007, т. 41, № 3, с. 257-268.

As a result, the expenses connected with production were significantly decreased due to the fact that the same post-growth operations and accessories are applicable for PDs and LEDs including, for example, templates for photolithography. The described "duality" of the properties of medium-wave diodes can turn out to be useful for the projecting of GA as well. Thus, for example, in [14] during the photometric measurements including the gas analysis, it was suggested to use the same diode in the capacity of detector and then in the capacity of radiation source by turns. Such "ruse" will be especially useful for the analyzers with large amount of optically connected LEDs and PDs [16] because it significantly increases the number of useful signals which can be used for the self-calibration of GAs with the relevant mathematical processing of digitized signals – this task is still topical.

But probably the most pleasant surprise of medium-wave LEDs is their capability to operate in the capacity of thermal pump with low displacements of p-n junction. Graduate students and workers of Massachusetts Institute of Technology (USA) established that the LEDs manufactured by the company "IoffeLED" based on p-n structures InGaAsSb with the near wavelength of 2μm have the capability to take part of the thermal energy from the crystal lattice and transform it into the energy of photons [16]. As a result of interaction of phonon and photon fields, the LED efficiency, which is determined as the ratio of the energy released from LED in the form of photons to the expended electric energy, turns out to be considerably higher than one (230%, 135°C). Unfortunately, at the temperatures, which are close to the room temperatures, the "super high" coefficient of efficiency occurs only in the region of low currents which are less than several picoamperes [17]. In order to implement the measurement device using such low LED supply currents, the PDs with extremely low intrinsic noises will be required, for example, PDs cooled to the temperatures close to 77 K [18]. It compels us to consider the application of the effect of thermal pump for practical purposes, for example, in inexpensive portable "light emitting" GAs, untimely, as for now. So we can just to rely on the diligence and commitment of the graduate students who are inspired by the beauty of the new physical phenomenon and ready to "mine" and then defend and put into practice the new scientific provisions in the major 01.04.10 – Physics of Semiconductors.

Author expresses gratitude to the workers of the group of diode optical couplers of the Laboratory of Infrared Optoelectronics of the Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences for the useful recommendations during the article preparation.



8. 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.
9. Ashley T., Elliott C.T., Gordon N.T. et al. Applications of negative luminescence. – Infrared Physics & Technology, 1997, v. 38, Issue 3, p. 145–151.
10. Ashley T. "Negative Luminescence" in Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics. – Springer Series in OPTICAL SCIENCE, ISSN 0342-4111, p. 453–485, 2006.
11. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ратушный В.И. и др. Вольт-амперные характеристики и сбор фототока в радиально симметричных поверхностно облучаемых фотодиодах на основе InAsSb (P). – Журнал технической физики, 2014, т. 84, вып. 11, с. 52–57.
12. Патент 2521156 РФ. Полупроводниковый фотодиод для инфракрасного излучения / Б.А.Матвеев
13. Матвеев Б.А., Ратушный В.И., Рыбальченко А.Ю., Сотникова Г.Ю. Высокотемпературные датчики углекислого газа для систем безопасности в энергетике на основе поверхностно облучаемых фотодиодов на основе InAsSb. – Глобальная ядерная безопасность, 2011, №1 (1), с. 110–116.
14. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Матвеев Б.А. и др. Фотометр, Заявка на изобретение № 2013109254 от 01.03.2013
15. Patent 6995360 US. Method and Sensor for monitoring gas in a downhole environment/Jones T.G.J., Matveev B., Vanshteyn V. et al.
16. Parthiban Santhanam, Dodd Joseph Gray, Jr., and Rajeev J. Ram, Thermoelectrically Pumped Light-Emitting Diodes Operating above Unity Efficiency. – Phys. Rev. Lett. 108, 097403 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.097403)
17. 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; doi: 10.1063/1.4828566
18. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared>.