

## Использование полупроводниковых лазерных диодов в области низких температур

В работе проведен теоретический анализ и экспериментальное исследование возможности использования серийно выпускаемых полупроводниковых лазерных диодов в области низких температур, вплоть до температуры 50 К. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки датчиков для дистанционного измерения низких температур на основе полупроводниковых лазерных излучателей. Для реализации идеи проведен анализ зависимости длины волны, излучаемой полупроводниковым лазерным диодом, от температуры среды. Рассмотрены физические причины, определяющие указанную зависимость. Показано, что температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны является ключевым фактором, определяющим зависимость длины волны излучения лазера от температуры среды. Выполнен расчет численных значений температурного коэффициента изменения ширины запрещенной зоны для исследуемых полупроводниковых лазерных диодов, осуществлено сравнение результатов эксперимента с литературными данными. Экспериментальное определение температурного коэффициента изменения ширины запрещенной зоны для диодов некоторых марок показало, что в области температур 130–150 К происходит резкое возрастание модуля величины анализируемого параметра. Высказано мнение, что требуются дальнейшие исследования в этом направлении, объясняющие возможные причины наблюдаемого эффекта. Для выяснения влияния температуры на характер спектра излучения полупроводникового лазерного диода выполнены измерения спектра излучения при нескольких температурах. Показано, что при определенной температуре полупроводниковый лазерный диод может работать в одномодовом режиме. Отмечено, что значение температурного коэффициента изменения ширины запрещенной зоны сохраняется, независимо от режима работы лазера (одномодовый, многомодовый, режим спонтанного излучения). Результаты исследования, представленные в статье, актуальны для анализа работы лазерных излучателей при низких температурах эксплуатации.

**Ключевые слова:** полупроводниковые лазерные диоды, спектры излучения, влияние температуры, одночастотный режим, температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны.

### Введение

В настоящее время полупроводниковые лазерные диоды широко используются в различных областях науки и техники. Возможности применения этих устройств далеко не исчерпаны. Идет дальнейший поиск современных источников излучения, работающих в жестких условиях эксплуатации, в том числе при низких температурах, характерных для Арктического региона. Например, обсуждается возможность создания дистанционного измерителя низких температур, в которых датчиком является полупроводниковый лазерный диод [1]. Авторы работы [1] опираются на корреляцию между температурой, при которой эксплуатируется полупроводниковый диод, и длиной волны его излучения. Однако чтобы создать предлагаемый датчик низких температур, следует детально изучить зависимость параметров излучения лазерного диода от условий, в которых он эксплуатируется. Также необходимо, опираясь на теоретические представления, исследовать причины, вызывающие изменение длины волны излучения лазерного диода в зависимости от условий эксплуатации.

Настоящая работа посвящена изучению характеристик излучения серийно выпускаемых лазерных полупроводниковых диодов в широкой области температур, а также обсуждению возможных причин, вызывающих изменение длины волны излучения при изменении температуры эксплуатации диода.

### Методы и результаты исследования

Известно [2], что в полупроводниковых лазерах оптический спектр излучения формируется за счет межзонных переходов (или переходов "зона – зона", т. е. из состояний у нижнего края зоны проводимости на состояния у верхнего края валентной зоны), экситонных переходов (при рекомбинации электрона и дырки, связанных в нейтральное подвижное образование экситон), переходов «зона – "мелкая примесь"» (имеется в виду локальный центр, обладающий энергетическим уровнем, отщепленным от одной из разрешенных зон на малое энергетическое расстояние по сравнению с шириной запрещенной зоны).

Таким образом, длина волны  $\lambda$  излучения полупроводникового лазера связана с шириной запрещенной зоны  $E_g$  соотношением [2]

$$\lambda \cong \frac{hc}{E_g}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме.

Равенство (1) является приближенным, поскольку в зависимости от концентрации примесей и уровня накачки длина волны может отличаться от значения, указанного в правой части выражения (1), на 2–3 %. Важной особенностью полупроводниковой активной среды является большая вероятность излучательных межзонных переходов, которые доминируют в рекомбинационных процессах [2].

В инжекционных лазерах используется эффективный способ получения избыточных электронов и дырок – их инжекция через нелинейный электрический контакт (например, *p-n*-переход). В основе механизма инжекции носителей через *p-n*-переход лежит диффузия носителей из области с их большей концентрацией в область с меньшей концентрацией. Можно показать, что для получения с помощью электрической накачки инверсии на переходах носителей с энергией кванта  $hc/\lambda$  к активному элементу лазера должно быть приложено напряжение  $V$ , удовлетворяющее условию [2]

$$V > \frac{hc}{q_e \lambda}, \quad (2)$$

где  $q_e$  – заряд электрона.

Численная оценка значения напряжения, необходимого для создания инверсии для лазера с длиной волны 635 нм, в соответствии с соотношением (2) дает значение напряжения более 1,96 В. Если же рассматривается излучение с длиной волны 610 нм, то напряжение, необходимое для создания инверсии, должно быть более 2,0 В. Очевидно, что полупроводниковый лазерный диод марки ADL-63058TL, для которого в паспорте указано рабочее напряжение 2,15 В (см. таблицу), будет работать в режиме создания инверсии.

Из соотношения (1) следует, что длина волны излучения (в пределах точности 2–3 %) определяется шириной запрещенной зоны полупроводника, на основе которого изготовлен лазерный диод. Отсюда вытекает вывод, что температурная зависимость длины волны излучения полупроводникового лазерного диода определяется в первую очередь температурной зависимостью ширины запрещенной зоны.

В работе [3] приведены экспериментальные оценки температурного коэффициента изменения ширины запрещенной зоны  $\beta$  для ряда полупроводников, взятые из различных литературных источников:

$$\beta = \frac{E_{g2} - E_{g1}}{T_2 - T_1}, \quad (3)$$

где  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$  – ширина запрещенной зоны полупроводника при температуре  $T_1$  и  $T_2$  соответственно. Материалы, широко используемые для изготовления полупроводниковых лазерных диодов, имеют величину  $\beta$ , равную  $(-5,0 \cdot 10^{-4})$  эВ/К (GaAs) и  $(-5,5 \cdot 10^{-4})$  эВ/К (AlSb). Но существуют полупроводниковые материалы, у которых значение  $\beta$  существенно выше (по модулю), хотя имеет тот же порядок величины. Например, у  $As_2SeTe_2$  согласно работе [3]  $\beta = (-10,06 \cdot 10^{-4})$  эВ/К.

В литературе анализируются различные факторы, которые могут оказать влияние на ширину запрещенной зоны полупроводника в связи с изменением температуры. Например, в работе [3] на основе математического моделирования процессов межзонного перехода электронов (с учетом влияния энергетических состояний зоны проводимости и валентной зоны на энергетический спектр поверхности полупроводника) показано, что для большинства полупроводников величина  $\beta$  имеет такой же порядок, как и экспериментально определенные значения, указанные выше. В работе [4] были изучены электротермооптические характеристики AlGaInP (желтого) и InGaN/GaN (синего) лазерных инжекционных диодов, находящихся в процессе старения под напряжением при температуре окружающей среды 25 °С. Авторами были получены противоречивые данные. Они обнаружили, что длительная выдержка под напряжением (3155 часов при фиксированном токе 80 мА) желтого диода AlGaInP приводит к смещению вольт-амперной характеристики (ВАХ) вдоль оси напряжений в меньшую сторону (на 0,053 В). Голубой диод InGaN/GaN, эксплуатировавшийся то же количество часов и при тех же условиях, смещает свою ВАХ, напротив, в сторону больших напряжений на 0,291 В. Авторы работы [4] для объяснения результатов используют "фактор идеальности", который формально учитывает проблемы, связанные с дополнительным разогревом диода (за счет адгезионных слоев конструкции) в процессе старения под напряжением.

В ряде работ отмечается, что модовый состав излучения лазерного диода может существенно изменяться при изменении условий эксплуатации [5; 6]. Также было установлено, что только импульсные измерения, исключающие нагрев кристалла, позволяют достоверно оценить квантовый выход светодиодной структуры и его изменение с плотностью тока. И хотя работа [7] относится к светодиодам, ее выводы, в известной степени, должны учитываться и при работе с лазерными диодами.

В описаниях, прилагаемых к серийно выпускаемым полупроводниковым лазерным диодам, как правило, указывается интервал изменения длины волны излучения от максимальной до минимальной, а также интервал рабочих температур, в которых рекомендовано эксплуатировать данные приборы. Поскольку

длина волны излучения полупроводниковых лазерных диодов непосредственно связана с шириной межзонного перехода, то, используя паспортные данные лазерного диода, можно приблизительно оценить величину коэффициента изменения ширины запрещенной зоны используемого в диоде полупроводникового материала  $\beta$  по соотношению

$$\beta = \frac{hc \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{T_2 - T_1}, \quad (4)$$

где  $\lambda_1$  – длина волны излучения лазера (обозначенная в паспортных данных как минимальная длина волны лазера), соответствующая температуре  $T_1$  (отмечена в качестве нижней границы температуры эксплуатации),  $\lambda_2$  – максимальная длина волны излучения лазера, соответствующая максимальной температуре эксплуатации  $T_2$ .

В таблице приведены значения вышеназванных параметров для серийно выпускаемых лазерных диодов марок ADL-63058TL и ADL-63058KA2 (значения взяты из паспортных данных). Расчеты, выполненные по формуле (4), показали, что температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны  $\beta$  для этих диодов равен  $(-6,14 \cdot 10^{-4})$  эВ/К. Таким образом, рассчитанное по формуле (4) на основе паспортных данных значение параметра  $\beta$  для упомянутых выше лазерных диодов имеет такой же порядок величины, что и значения, приведенные в работе [3].

Таблица. Паспортные данные серийных полупроводниковых лазеров ADL-63058TL и ADL-63058KA2  
Table. Passport data production of semiconductor lasers ADL-63058TL and ADL-63058KA2

Длина волны, нм		Температура эксплуатации, °С		Рабочее напряжение, В
минимальная	максимальная	минимальная	максимальная	
630	640	-10	40	2,15

В работе [8] экспериментально изучалась зависимость длины волны излучения серийно выпускаемых лазерных диодов от температуры в интервале от  $-80$  °С до комнатной. Показано, что длина волны излучения полупроводникового лазерного диода линейно возрастает с увеличением температуры эксплуатации. Оценка коэффициента изменения ширины запрещенной зоны на базе результатов работы [4] дает величину  $\beta$ , приблизительно равную  $(-9,9 \cdot 10^{-4})$  эВ/К. Такое высокое значение  $\beta$ , возможно, обусловлено тем, что материал, используемый для изготовления *p-n*-перехода в исследуемом лазерном диоде, имеет более высокое значение  $\beta$ .

Нами было выполнено измерение длины волны излучения полупроводникового лазерного диода марки ADL-63058TL в диапазоне температур от 50 до 270 К (стабилизация температуры осуществлялась в вакуумном криостате)<sup>1</sup>. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на графиках зависимости длины волны излучения лазера от температуры  $\lambda(T)$ , а также зависимости ширины запрещенной зоны от температуры  $E_g(T)$  определяются два участка с различными значениями показателя  $\beta$ : первый – от 50 до 130 К, а второй – от 150 до 270 К. Величина  $\beta$ , рассчитанная для первого участка, равна  $(-2,38 \cdot 10^{-4})$  эВ/К. Для второго участка  $\beta = (-4,62 \cdot 10^{-4})$  эВ/К. Полученные результаты показывают, что в области температур 130÷150 К в полупроводниковой структуре происходят процессы, приводящие к резкому изменению зависимости значения ширины запрещенной зоны от температуры. Очевидно, что для использования полупроводникового лазерного диода в качестве датчика для измерения низких температур, как это указано в работе [1], необходимо детально исследовать поведение излучения лазерного диода в области низких температур.

Одна из приоритетных задач – изучение спектрального состава излучения в области низких температур. Спектр излучения полупроводниковых лазерных диодов в области температур вблизи комнатной температуры достаточно изучен. Характер спектра определяется положением рабочей "точки" на ватт-амперной характеристике прибора. Эта характеристика имеет "излом" на пороге генерации при пороговой плотности тока, равной  $j_{\text{пор}}$ . Как правило, ниже порогового значения  $j_{\text{пор}}$  наблюдается режим спонтанной эмиссии, который отличается широким спектром излучения. Выше порогового значения может наблюдаться многомодовый или одномодовый режим. Кроме того, модовый состав излучения существенно зависит от конструкции и размеров резонатора [2].

Очевидно, что излучаемая лазером мощность определяется не только величиной подводимой мощности, но и коэффициентом полезного действия излучателя. В зависимости от последнего разность подводимой и излучаемой мощности расходуется на нагрев объема полупроводниковой структуры лазера, что может привести к изменению длины волны его излучения. К сожалению, в имеющейся литературе не уделяется должного внимания влиянию температуры на модовый состав излучения полупроводникового лазерного диода. В связи с этим было проведено исследование спектрального состава излучения промышленного полупроводникового лазерного диода при изменении его температуры.

<sup>1</sup> Измерения выполнены в ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета "Нанофотоника".

Объектом исследования являлся промышленный лазерный диод ADL-63058KA мощностью 5 мВт, имеющий "красную" линию излучения 635 нм, работающий в интервале температур от  $-10$  до  $40$  °С, рабочее напряжение составляло 3 В.

Спектр излучения лазерного диода исследовался при помощи монохроматора МДР-23 с установленным CCD-детектором<sup>2</sup> при температурах 31,  $-12$  и  $-81$  °С. Температура излучателя измерялась с помощью термопары, укрепленной непосредственно на корпусе диода.

На рисунке представлена зависимость интенсивности излучения диода (в относительных единицах) как функция длины волны при трех различных температурах.

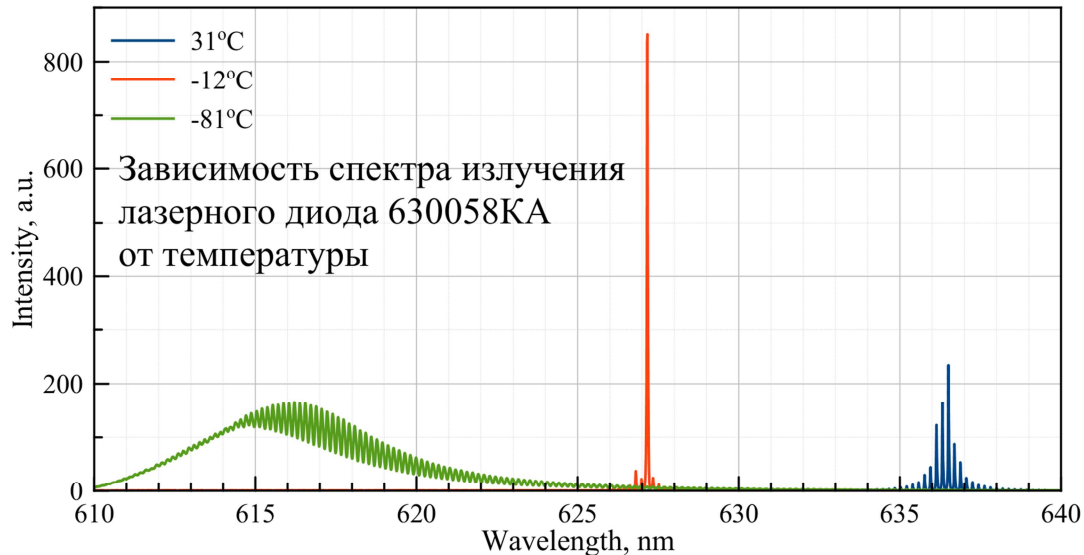


Рис. Влияние температуры на спектральный состав излучения промышленного полупроводникового диода ADL-63058KA  
Fig. The effect of temperature on the spectral composition of the ADL-63058KA industrial semiconductor diode radiation

Из рисунка видно, что спектральный состав излучения существенно образом изменяется при изменении температуры лазерного диода. Можно отметить следующие особенности:

- при температуре  $-12$  °С лазер генерирует практически одну частоту (одночастотный режим);
- при температуре 31 °С генерируется основная мода, но спектр представляет собой группу компонент, соответствующих, по-видимому, продольным модам лазера;
- при температуре  $-81$  °С лазер работает в режиме спонтанного излучения; при этом компоненты, соответствующие различным продольным модам лазера, не сформированы окончательно, а лишь намечаются;
- четко прослеживается тенденция, отмеченная также в работе [8]: с ростом температуры длина волны, соответствующая максимуму спектра излучения диода, смещается в сторону больших длин волн.

Коэффициент  $\beta$ , соответствующий температурам 31 °С и  $-81$  °С, рассчитанный по формуле (2), оказался равным  $(5,5 \cdot 10^{-4})$  эВ/К, что хорошо согласуется с литературными данными [3]. Это совпадение позволяет, с нашей точки зрения, сделать вывод, что зависимость длины волны излучения полупроводникового лазерного диода от температуры определяется, в основном, изменением ширины запрещенной зоны, другие факторы, в том числе и модовый режим, не оказывают заметного влияния на этот параметр.

## Выводы

1. Анализ факторов, которые могут оказывать воздействие на длину волны излучения полупроводникового лазера при изменении температуры его эксплуатации, показывает, что основным фактором является влияние температуры на величину ширины запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлен лазер.
2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в области температур  $130 \div 150$  К в полупроводниковом материале, используемом для изготовления лазерного диода марки ADL-63058TL, происходят процессы, приводящие к резкому изменению зависимости ширины запрещенной зоны

<sup>2</sup> Измерения выполнены в ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета "Нанофотоника".

от температуры. При этом значение температурного коэффициента изменения ширины запрещенной зоны  $\beta$  меняется от  $(-2,38 \cdot 10^{-4})$  до  $(-4,62 \cdot 10^{-4})$  эВ/К. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы понять природу процессов, вызывающих такой эффект. Очевидно, что для использования полупроводникового лазерного диода в качестве датчика для измерения низких температур следует детально изучить поведение излучения лазерного диода в области указанных температур.

3. Интервал изменения длины волны излучения промышленного полупроводникового лазерного диода, указанный в паспортных данных, может быть обусловлен температурной зависимостью ширины запрещенной зоны полупроводника в интервале рабочих температур лазера.

4. Существуют такие температурные режимы (в рассматриваемом случае это температура порядка  $-12$  °С), которые позволяют применять лазерный диод как инструмент с очень узкой спектральной линией излучения достаточно большой интенсивности.

5. Представленные материалы исследования актуальны для анализа работы лазерных излучателей при низких температурах эксплуатации.

#### Библиографический список

1. Власов А. Б., Деревянкин П. Г. Способ дистанционного измерения температуры среды : пат. Рос. Федерация. № 2013129258/28(0436110) ; заявл. 25.06.2013 ; опубл. 27.11.2014.
2. Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. М. : Наука, 1983. 294 с.
3. Гулямов Г., Шарипбаев Н. Ю. Влияние температуры на ширину запрещенной зоны полупроводника // Физическая инженерия поверхности. 2011. Т. 9, № 1. С. 40.
4. Huanting Chen, Arno Keppens, Peter Hanselaer, Yijun Lu, Yulin Gao, Rongrong Zhuang, Zhong Chen. Failure analysis of electrical-thermal-optical characteristics of LEDs based on IGaInP and InGaN/GaN // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, вып. 10. С. 1333.
5. Дворцов Д. В., Парфенов В. А. Одночастотный режим работы лазерных диодов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2013. № 2 (170). С. 89.
6. Подоскин А. А., Шашкин И. С., Слипченко С. О., Пихтин Н. А., Тарасов И. С. Модель оптической ячейки на основе конкуренции генерации модовых структур различной добротности в мощных полупроводниковых лазерах // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, вып. 8. С. 1108.
7. Никифоров С., Архипов А. Особенности определения квантового выхода светодиодов на основе AlGaInN и AlGaInP при различной плотности тока через излучающий кристалл // Компоненты и технологии. 2008. № 1. С. 82.
8. Власов А. Б. Исследование свойств лазерных диодов при криогенных температурах // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 1. С. 134–136.

#### References

1. Vlasov A. B., Derevyankin P. G. Sposob distantsionnogo izmereniya temperatury sredy [The method of remote measurement of ambient temperature] : pat. Ros. Federatsiya. N 2013129258/28(0436110) ; zayavl. 25.06.2013 ; opubl. 27.11.2014.
2. Eliseev P. G. Vvedenie v fiziku inzhektionsnykh lazerov [Introduction to physics of diode lasers]. M. : Nauka, 1983. 294 p.
3. Gulyamov G., Sharibaev N. Yu. Vliyanie temperatury na shirinu zapreschennoy zony poluprovodnika [The effect of temperature on the width of the forbidden band of the semiconductor] // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. 2011. V. 9, N 1. P. 40.
4. Huanting Chen, Arno Keppens, Peter Hanselaer, Yijun Lu, Yulin Gao, Rongrong Zhuang, Zhong Chen. Failure analysis of electrical-thermal-optical characteristics of LEDs based on IGaInP and InGaN/GaN // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2012. V. 46, vyp. 10. P. 1333.
5. Dvortsov D. V., Parfenov V. A. Odnochastotnyi rezhim raboty lazernykh diodov [The single-frequency mode of operation of laser diodes] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. 2013. N 2 (170). P. 89.
6. Podoskin A. A., Shashkin I. S., Slipchenko S. O., Pihitin N. A., Tarasov I. S. Model opticheskoy yacheyki na osnove konkurentsii generatsii modovykh struktur razlichnoy dobrotnosti v moschnykh poluprovodnikovyykh lazerakh [The optical cell model based on competitive generation modal structures of different Q-strong semiconductor lasers] // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2015. V. 49, vyp. 8. P. 1108.
7. Nikiforov S., Arhipov A. Osobennosti opredeleniya kvantovogo vyhoda svetodiodov na osnove AlGaInN i AlGaInP pri razlichnoy plotnosti toka cherez izluchayuschiy kristall [Features of determining the quantum yield of the LEDs based on AlGaInP and AlGaInN at different current densities through the emitting crystal] // Komponenty i tehnologii. 2008. N 1. P. 82.
8. Vlasov A. B. Issledovanie svoystv lazernykh diodov pri kriogennykh temperaturah [Studying the properties of laser diodes at cryogenic temperatures] // Vestnik MGTU. 2015. V. 18, N 1. P. 134–136.

#### Сведения об авторах

**Власова Светлана Васильевна** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, факультет арктических технологий, кафедра общей и прикладной физики, д-р филос. наук, канд. техн. наук, профессор; e-mail: vlasovasv@mstu.edu.ru

**Vlasova S. V.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Faculty of Arctic Technologies, Department of General and Applied Physics, Dr of Philos. Sci., Cand. of Tech. Sci., Professor; e-mail: vlasovasv@mstu.edu.ru

**Петров Владимир Владимирович** – ул. Ульяновская, 1, Старый Петергоф, Санкт-Петербург, Россия, 198504; Санкт-Петербургский государственный университет, ресурсный центр "Нанофотоника", канд. физ.-мат. наук, директор; e-mail: vladimir.petrov@spbu.ru

**Petrov V. V.** – 1, Ulyanovskaya Str., St. Petersburg, Russia, 198504; Saint Petersburg State University, Resource Center "Nanophotonics", Cand. of Phys.-Math. Sci., Director; e-mail: vladimir.petrov@spbu.ru

**Шапочкин Павел Юрьевич** – ул. Ульяновская, 1, Старый Петергоф, Санкт-Петербург, Россия, 198504; Санкт-Петербургский государственный университет, ресурсный центр "Нанофотоника", специалист; e-mail: pavel.shapochkin@gmail.com

**Shapochkin P. Yu.** – 1, Ulyanovskaya Str., St. Petersburg, Russia, 198504; Saint Petersburg State University, Resource Center "Nanophotonics", Specialist; e-mail: pavel.shapochkin@gmail.com

S. V. Vlasova, V. V. Petrov, P. Yu. Shapochkin

### **The use of semiconductor laser diodes at low temperatures**

The theoretical analysis and experimental research of possibility of using commercially available semiconductor laser diodes at low temperatures (down to the temperature of 50 K) has been performed in the paper. The relevance of this work is caused by the need to develop sensors for remote measurement of low temperatures on the basis of semiconductor laser emitters. To implement the idea some analysis of wavelength emitted by the semiconductor laser diode as a function of medium temperature has been made. Physical causes that determine this relationship have been discussed. It has been shown that the temperature coefficient of change of the band gap width is a key factor in determining the dependence of the wave length of the laser radiation from the medium temperature. The calculation of numerical values of the temperature coefficient of change of the band gap width for the studied semiconductor laser diodes has been performed. Comparison of the experimental results with the published data has been performed. The temperature coefficient of change of the band gap width for some diode brands has been determined experimentally. It has been shown that in the temperature range  $130 \div 150$  K there is a sharp change in the parameter being analyzed. It has been commented that further studies are needed in this direction to explain possible reasons for the observed effect. To determine the effect of temperature on the nature of the semiconductor laser diode emission spectrum the emission spectra at several temperatures have been measured. It has been shown that at a certain temperature the semiconductor laser diode can be operated in a single mode. It has been noted that the value of the temperature coefficient of change of the band gap width is maintained irrespective of the laser operation mode (single mode, multimode, spontaneous emission mode). The results of the research are relevant for analysis of the work of laser emitters at low operating temperatures.

**Key words:** semiconductor laser diodes, emission spectra, effect of temperature, single-frequency mode, temperature coefficient of change of the band gap width.