

УДК 621.373.8

МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙКИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

© А. Н. Апарников, Е. В. Бурый, Н. Е. Орлов

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
E-mail: alexander.aparnikov@gmail.com*

На основании анализа отличий результатов экспериментальных измерений зависимости вольт-амперной характеристики (ВАХ) линейки лазерных диодов (ЛД) на базе гетероструктуры AlGaAs/GaAs от температуры и отсчётов этой зависимости, полученных в соответствии с известной моделью ВАХ светоизлучающих диодов, сделано предположение об источниках обнаруженных несоответствий. Учёт в модели изменений сопротивлений слоёв структуры ЛД, вызванных температурой, позволил заметно улучшить соответствие экспериментальных и модельных результатов. Показано, что измеренную величину падения напряжения на линейке ЛД при известной амплитуде протекающего тока можно использовать для оценки температуры активной области ЛД при построении систем термостабилизации, в том числе в твердотельных лазерах с системой накачки активного элемента на основе линеек ЛД.

Ключевые слова: линейка лазерных диодов, температура, вольт-амперная характеристика, разность потенциалов.

DOI: 10.15372/AUT20190606

Введение. Эффективность преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения линейки лазерных диодов (ЛЛД) на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs может превышать 60 % [1, 2], причём среднее значение эффективности составляет 50 % [3]. Конечное значение эффективности преобразования энергии и малые размеры ЛЛД приводят к её существенному нагреву в течение действия импульса протекающего тока [4]. С повышением температуры ЛЛД ухудшается ряд её параметров: растёт пороговый ток, возникают механические деформации структуры ЛЛД, приводящие к ухудшению качества лазерного пучка и её надёжности [5, 6]. Кроме того, наблюдаются уширение и сдвиг спектра оптического излучения, что, как правило, недопустимо при использовании ЛЛД в системах, чувствительных к изменению его спектральных характеристик. Так, например, ширина спектра поглощения алюмоиттриевого граната, легированного ионами неодима, часто применяемого в качестве активной среды твердотельных лазеров, равна ~ 1 нм, а центральная спектральная линия излучения ЛЛД на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs, используемых для накачки такой активной среды, имеет температурный коэффициент $0,27$ нм/°С. Как следствие, нагрев или охлаждение ЛЛД на 4 °С и более приведёт к значительному снижению эффективности накачки активного элемента твердотельного лазера и мощности выходного излучения. Поэтому стабильность теплового режима ЛЛД является обязательным условием их успешного применения в системах накачки. Для автоматического поддержания температуры ЛЛД необходимо осуществлять её контроль. Распространённые методы измерения температуры ЛЛД обладают рядом недостатков: технологической сложностью монтажа датчиков температуры — термисторов, значительной погрешностью измерения температуры из-за монтажа термистора на внешней грани ЛЛД и инерционностью выполняемых измерений. Альтернативой можно

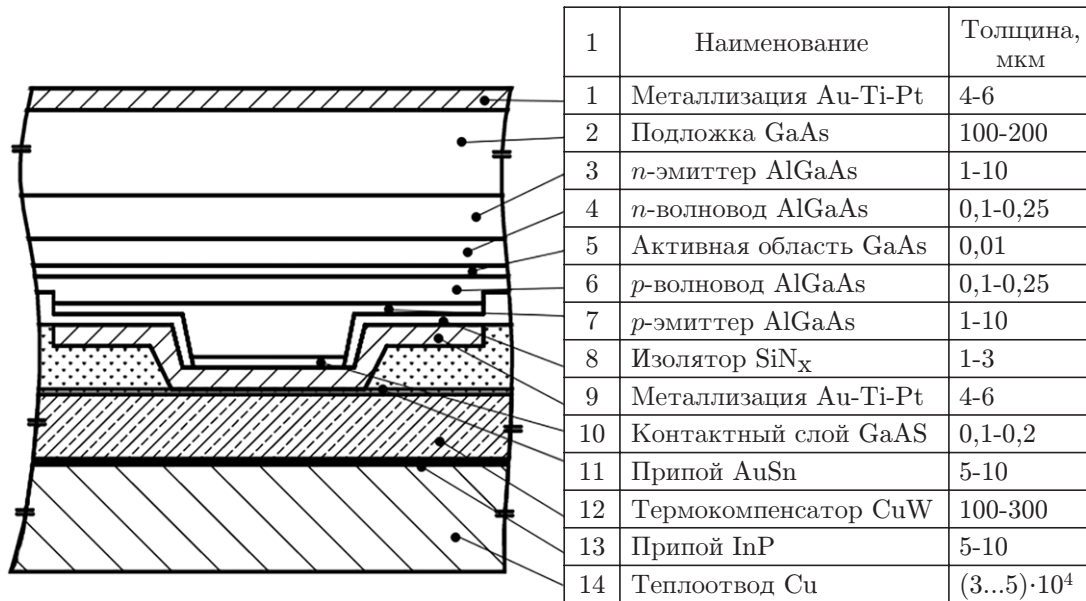


Рис. 1. Структура слоёв лазерного диода, входящего в состав ЛЛД

считать метод измерения температуры ЛЛД по величине разности потенциалов между её выводами при известной величине протекающего через ЛЛД тока. Этот метод основан на зависимости вольт-амперной характеристики (ВАХ) ЛЛД от её температуры [7–12], однако значительная величина погрешности расчёта ВАХ по известным моделям препятствует их практическому применению.

Целью данного исследования является построение модели температурной зависимости ВАХ ЛЛД на базе существующей модели для ВАХ лазерного диода (ЛД), позволяющей с меньшей погрешностью проводить оценку температуры активной области ЛЛД.

Модель ВАХ ЛЛД. Рассматриваемые ЛЛД на базе гетероструктуры AlGaAs/GaAs с квантоворазмерной активной областью, предназначенные для работы в импульсном режиме, характеризуются следующими значениями основных параметров: центральная длина волны излучения 808 нм, рабочий диапазон амплитуд импульсов тока 100–150 А, оптическая мощность излучения 150 Вт, эффективность преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения в рабочем диапазоне тока 50 %. Каждая такая ЛЛД содержит 60 лазерных диодов и монтируется в типовом корпусе. Структура слоёв лазерного диода, входящего в состав ЛЛД, которая смонтирована на медном теплоотводе, приведена на рис. 1.

Известна модель, описывающая температурную зависимость ВАХ полупроводникового диода, основанная на уравнении Шокли [13]. Несмотря на то что уравнение, описывающее баланс энергий в ЛД, отличается от аналогичного в неизлучающем диоде, такая же модель используется и для описания температурной зависимости ВАХ ЛД. Линейка лазерных диодов представляет собой одномерный массив электрически соединённых параллельно ЛД, поэтому ВАХ ЛЛД определяется методом сложения по току ВАХ отдельных ЛД. В соответствии с уравнением Шокли температурная зависимость разности потенциалов на выводах ЛД $U_{\text{ЛД}}(T, I_{\text{ЛД}})$ имеет вид [14]

$$U_{\text{ЛД}}(T, I_{\text{ЛД}}) = I_{\text{ЛД}}R_S + \varphi_T(T) \ln \left(1 + \frac{I_{\text{ЛД}}}{I_S(T)} \right), \quad (1)$$

где $I_{\text{ЛД}}$ — значение тока, протекающего через ЛД; R_S — последовательное сопротивление ЛД; $I_S(T)$ — ток насыщения, оцениваемый при обратном смещении ЛД; $\varphi_T(T) =$

$= kT/e$ — величина термоЭДС, которая определяется величиной абсолютной температуры p - n -перехода T (k — постоянная Больцмана, e — заряд электрона).

Первое слагаемое уравнения (1) задаёт разность потенциалов на границах сильно легированных слоёв полупроводниковой структуры, второе — учитывает разность потенциалов на гетеропереходах [15].

Температурная зависимость тока насыщения $I_S(T)$ находится в основном изменением концентрации собственных носителей полупроводника $n_i(T)$ при изменении температуры [13]:

$$I_S(T) = eAn_i^2(T) \left(\frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p(T)}{\tau_p}} + \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n(T)}{\tau_n}} \right),$$

где A — площадь резонатора ЛД; $D_p(T) = \varphi_T(T)\mu_p$ и $D_n(T) = \varphi_T(T)\mu_n$ — коэффициенты диффузии дырок и электронов, определяемые соотношением Эйнштейна согласно с величинами подвижности дырок μ_p и подвижности электронов μ_n ; N_D и N_A — концентрации донорных и акцепторных носителей в n -эмиттере и p -эмиттере соответственно; τ_p и τ_n — время жизни дырок и электронов.

Концентрация собственных носителей полупроводника n_i существенно зависит от температуры T и определяется уравнением

$$n_i(T) = \sqrt{N_C(T)N_V(T)} \exp \left(- \frac{E_g(T)}{2kT} \right),$$

где $N_C(T)$ и $N_V(T)$ — эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне собственного полупроводника; $E_g(T)$ — ширина запрещённой зоны.

В свою очередь, значения $N_C(T)$ и $N_V(T)$ определяются уравнениями [14]

$$N_C(T) = 2 \left(\frac{2\pi m_{de}kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad N_V(T) = 2 \left(\frac{2\pi m_{dh}kT}{h^2} \right)^{3/2},$$

где m_{de} и m_{dh} — эффективные массы плотности состояний электронов и дырок соответственно.

Температурная зависимость ширины запрещённой зоны E_g описывается эмпирическим уравнением Варшни [9]:

$$E_g = E_0 - \frac{\alpha T^2}{\beta + T},$$

где E_0 — ширина запрещённой зоны при температуре 20 °С, α и β — параметры Варшни.

Значение сопротивления R_S в (1), называемого последовательным, равно сумме сопротивлений всех слоёв, входящих в состав структуры ЛД:

$$R_S = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i d_i}{A},$$

где ρ_i — удельное сопротивление i -го слоя структуры ЛД; d_i — толщина i -го слоя структуры ЛД; n — число слоёв в структуре диода.

Для оценки разности потенциалов между выводами ЛЛД $U_{\text{ЛЛД}}(T, I_{\text{ЛЛД}})$ в соответствии с (1) необходимо величину тока $I_{\text{ЛД}}$ увеличить пропорционально числу ЛД, входящих в состав ЛЛД. В итоге получим

$$U_{\text{ЛЛД}}(T, I_{\text{ЛЛД}}) = I_{\text{ЛЛД}} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i d_i}{A} + \varphi_T(T) \ln \left(1 + \frac{I_{\text{ЛЛД}}}{I_S(T)} \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) учитывает физические явления, имеющие место в ЛД, но не описывает влияние материалов элементов, входящих в конструкцию ЛЛД, а именно термокомпенсатора, теплоотвода, имеющего значительные размеры, а также припоя. Эти элементы в дальнейшем будем рассматривать как слои материалов, имеющих соответствующие характеристики. Температурные зависимости сопротивлений этих слоёв оказывают заметное влияние на вид $U_{\text{ЛЛД}}(T, I_{\text{ЛЛД}})$. Они определяются значениями температурных коэффициентов электрических сопротивлений α_i их материалов:

$$R_S(T) = \sum_{i=1}^n r_i(T) = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{0i} d_i (1 + \alpha_i \Delta T)}{A}, \quad (3)$$

где ρ_{0i} — удельное сопротивление материала i -го слоя структуры ЛЛД, обычно вычисляемое при температуре $T_0 = 20$ °С; ΔT — изменение температуры относительно T_0 ; α_i — температурный коэффициент электрического сопротивления материала этого слоя.

С учётом (3) скорректированная модель ВАХ ЛЛД приобретает следующий вид:

$$U_{\text{ЛЛД corr}}(T, I_{\text{ЛЛД}}) = I_{\text{ЛЛД}} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{0i} d_i (1 + \alpha_i \Delta T)}{A} + \varphi_T(T) \ln \left(\frac{I_{\text{ЛЛД}}}{eA(N_D^{-1} \sqrt{D_p/\tau_p} + N_A^{-1} \sqrt{D_n/\tau_n}) N_C(T) N_V(T) e^{-E_g(T)/(kT)}} - 1 \right). \quad (4)$$

При постоянной величине амплитуды импульса тока изменение разности потенциалов выводов ЛЛД $\Delta U_{\text{ЛЛД}}$ пропорционально изменению температуры: $\Delta U_{\text{ЛЛД}} = \gamma \Delta T$, поэтому, измерив $\Delta U_{\text{ЛЛД}}$ при известном значении амплитуды тока $I_{\text{ЛЛД}}$, можно найти изменение температуры ЛЛД ΔT относительно температуры T_0 . Модель (4) обеспечивает сходимость к нулю математического ожидания ошибки оценки разности потенциалов между выводами ЛЛД, причём дисперсия этой ошибки стремится к некоторому значению, определяемому погрешностью имеющихся данных о параметрах слоёв ЛЛД. Однако величину температурной чувствительности ВАХ не удаётся установить с высокой точностью, так как она зависит от конструктивных особенностей ЛЛД, параметров материалов слоёв и реализуемых технологических отклонений их толщин.

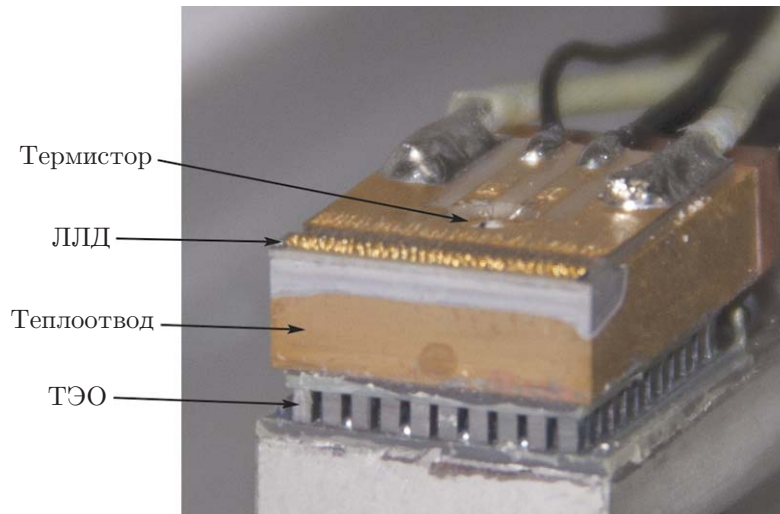


Рис. 2. Конструкция ЛЛД

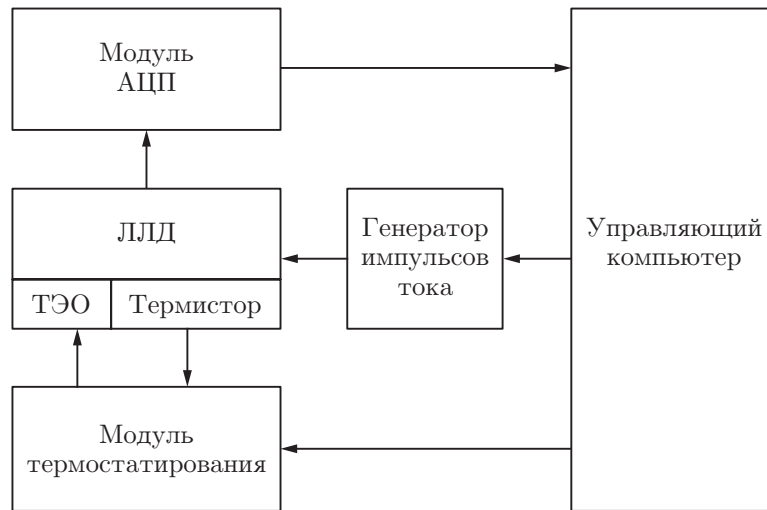


Рис. 3. Функциональная схема экспериментального стенда

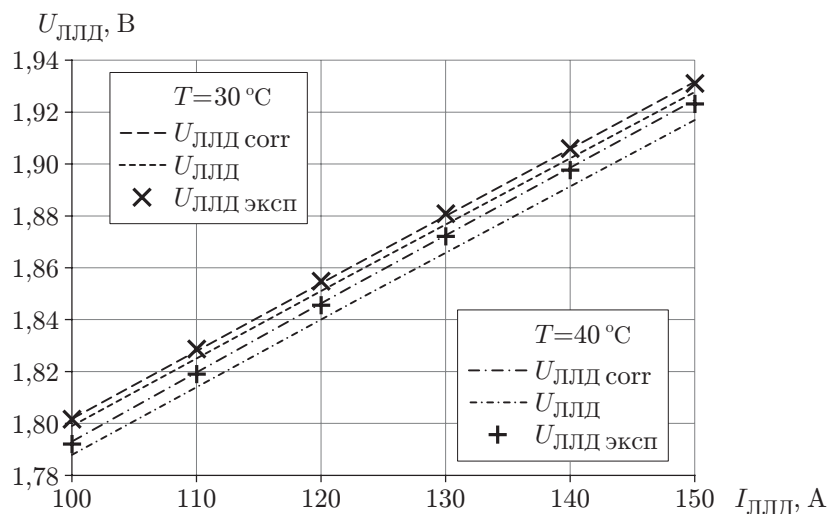


Рис. 4. Семейства ВАХ ЛЛД, экспериментально зарегистрированные при $T = 30$ и $T = 40$ °С, а также результаты моделирования ВАХ

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Конструкция исследованного модуля ЛЛД представлена на рис. 2. Линейка лазерных диодов и термокомпенсатор смонтированы на медном теплоотводе, который установлен на термоэлектрическом охладителе (ТЭО), необходимом для поддержания рабочей температуры ЛЛД. Её измерение осуществлялось с помощью термистора, обеспечивающего погрешность измерения менее $0,1$ °С в диапазоне значений от 20 до 40 °С. Формирование импульсов тока длительностью 300 мкс с амплитудой, регулируемой в диапазоне от 20 до 200 А, а также обеспечение поддержания температуры ЛЛД и регистрация значений разности потенциалов между её выводами осуществлялись средствами комплекса СВЕТИНФО [16], функциональная схема которого представлена на рис. 3.

На рис. 4 представлены семейства экспериментально зарегистрированных ВАХ ЛЛД и результаты моделирования, свидетельствующие об увеличении степени соответствия скорректированной модели (4) свойствам объекта исследования.

На рис. 5 представлены зависимости температурной чувствительности ВАХ ЛЛД от величины амплитуды импульса тока, рассчитанные при использовании модели (4) и

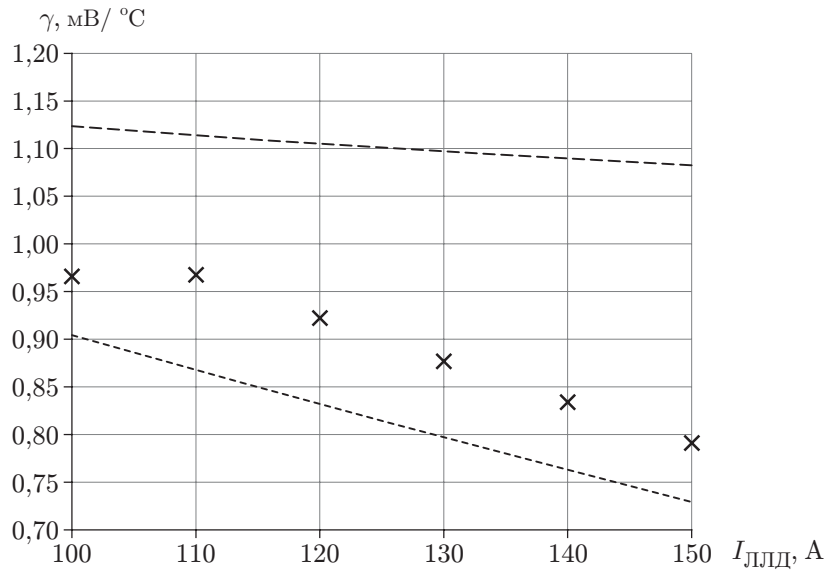


Рис. 5. Температурная чувствительность ВАХ ЛЛД и моделей ВАХ ЛЛД: штриховая кривая — расчёт по (2), пунктирная кривая — расчёт по (4); × — экспериментально полученные результаты

на основании экспериментально полученных данных. Соответствие экспериментальных и расчётных значений γ свидетельствует о том, что учёт температурной зависимости последовательного сопротивления ЛЛД $R_S(T)$ обеспечивает получение оценки температуры ЛЛД с меньшей погрешностью.

Модель (4) позволяет оценивать температуру активной области ЛЛД по величине разности потенциалов между её выводами. Реализуемые современными средствами измерений погрешности оценок температуры [17] могут быть меньше чем 0,5–0,2 °С. Таких величин погрешностей достаточно для уверенного функционирования системы термостабилизации ЛЛД, обеспечивающей эффективную накачку активного элемента из АИГ:Nd³⁺ твердотельного лазера в диапазоне температур от 5 до 45 °С [18]. Кроме того, применение модели (4) обеспечивает экстраполирование изменений электрических характеристик ЛЛД в широком диапазоне температур от –40 до +80 °С.

Заключение. Скорректированная модель ВАХ ЛЛД, в которой учтены температурные зависимости значений сопротивлений элементов конструкции ЛЛД $R_S(T)$, демонстрирует лучшую степень соответствия результатам эксперимента по сравнению с используемой ранее моделью. Малое отличие значений температурных чувствительностей скорректированной модели и семейства экспериментально полученных ВАХ свидетельствует о том, что на основе этой модели можно получить оценку температуры активной области ЛЛД, выполняя измерение разности потенциалов между выводами этой ЛЛД в пределах интервала времени прохождения импульса тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crump P., Wang J., Das S. et al. > 360 W and > 70 % efficient GaAs-based diode lasers // Proc. SPIE. 2005. **5711**. P. 21–29.
2. Wang Zh., Li T., Yang G., Song Y. High power, high efficiency continuous-wave 808 nm laser diode arrays // Opt. Laser Technol. 2017. **97**. P. 297–301.

3. **Wölz M., Pietrzak A., Kindsvater A. et al.** Laser diode stacks: Pulsed light power for nuclear fusion // High Power Laser Sci. Eng. 2016. **4**. e14.
4. **Zhang Zh., Zhang P., Li X. et al.** Thermal modeling and analysis of high power semiconductor laser arrays // Proc. of the 13th Intern. Conf. on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. Guilin, China, 13–16 Aug., 2012. P. 560–566.
5. **Dong J., Liu X.-Sh., Peng Ch. et al.** High power diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG solid-state laser with a thermoelectric cooler // Appl. Sci. 2015. **5**, Iss. 4. P. 1837–1845.
6. **Liu X., Zhao W., Xiong L., Liu H.** Packaging of High Power Semiconductor Lasers. N. Y.: Springer-Verlag, 2015. 402 p.
7. **Qiao Y., Feng Sh., Xiong C. et al.** The thermal properties of AlGaAs/GaAs laser diode bars analyzed by the transient thermal technique // Solid-State Electronics. 2013. **79**. P. 192–195.
8. **Yao R., Zhang D., Zou B., Xu J.** Junction temperature measurement of alternating current light-emitting-diode by threshold voltage method // Front. Optoelectron. 2016. **9**, Iss. 4. P. 555–559.
9. **Xi Y., Schubert E. F.** Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method // Appl. Phys. Lett. 2004. **85**, Iss. 12. P. 2163–2165.
10. **Chhajed S., Xi Y., Gessmann Th. et al.** Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods // Proc. SPIE. 2005. **5739**. P. 16–24.
11. **Sa E. M., Antunes F. L. M., Perin A. J.** Junction temperature estimation for high power light-emitting diodes // Proc. of the 2007 IEEE Intern. Symp. on Industrial Electronics. Vigo, Spain, 4–7 June, 2007. P. 3030–3035.
12. **Keppens A., Chen H., Lu Y. et al.** Junction temperature measurement of light-emitting diodes by voltage-temperature relation method // Light and Eng. 2011. **19**, Iss. 1. P. 34–44.
13. **Shockley W.** The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors // The Bell Syst. Techn. Journ. 1949. **28**, Iss. 3. P. 435–489.
14. **Brodnik G. M.** Development and Validation of an Empirical Temperature-Dependent Voltage Model for Diode Laser Characterization. Master's Thesis. 2016. Paper 16.
15. **Матюхин С. И., Макулевский Г. Р.** Вольт-амперная характеристика лазерного диода с квантово-размерной активной областью // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. **299**, № 3. С. 9–22.
16. **Лабораторный комплекс СВЕТИНФО.** МГТУ им. Н. Э. Баумана. URL: http://www.llis.bmstu.ru/Лабораторный_комплекс_СВЕТИНФО (дата обращения: 25.11.2018).
17. **Аракчеев П. В., Безделов В. Л., Бурый Е. В. и др.** Современные средства высокоточного измерения разности потенциалов между узлами электрической цепи // Радиотехника. 2018. № 6. С. 109–112.
18. **Аракчеев П. В., Бурый Е. В., Безделов В. Л.** Определение параметров регулятора системы термостабилизации оптико-электронной аппаратуры, используемой при пониженных температурах окружающей среды // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. **17**, № 10. С. 678–684.

Поступила в редакцию 17.04.2019

После доработки 16.05.2019

Принята к публикации 17.05.2019