

УДК 621.373

А.Ю. Петухова^{1,2}, А.В. Перминов¹, А.И. Гаранин²¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия²ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная
компания», Пермь, Россия

ИСПЫТАНИЕ НА УСКОРЕННОЕ СТАРЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

В работе описывается методика проведения испытаний лазерных диодов и оценивается срок их нормальной работы. Из-за очень длительного срока службы лазерного диода нецелесообразно тестировать его при номинальных условиях работы. Для тестирования диода на отказ используется методика ускоренного старения диода, когда его работа происходит при более высоких температурах. Для оценки среднего времени работы лазерного диода до отказа (MTBF) используется модель Аррениуса. В статье приведены статистические данные измерений и расчетные значения ресурса лазерного диода.

Ключевые слова: лазерный диод, срок службы, высокая температура, тестирование, модель Аррениуса, линейная экстраполяция.

Yu. Petukhova^{1,2}, A.V. Perminov¹, A.I. Garanin²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia²Perm Research and production instrument-making
company "PNPPK", Perm, Russia

ACCELERATED AGING TEST FOR LASER DIODES

The paper describes a technique for testing laser diodes and estimates the period of their normal operation. Due to the very long service life of the laser diode, it is impractical to test it under nominal operating conditions. To test a diode for failure, a technique is used to accelerate the aging of the diode when it operates at higher temperatures. The Arrhenius model is used to estimate the mean time to failure of a laser diode (MTBF). The article provides statistical measurement data and calculated values of the laser diode resource.

Keywords: laser diode, service life, high temperature, testing, Arrhenius model, linear extrapolation.

Введение

Оценка срока службы лазерных диодов на сегодняшний день является одним из ключевых параметров для производства научного оборудования. Поскольку срок службы лазерного диода может составлять до 100 000 часов, обычно нецелесообразно тестировать лазерные диоды в штатных температурных диапазонах из-за длительного времени тестирования. Для того чтобы оценить срок службы лазерного диода, производителю необходимо спрогнозировать время безотказной работы. Для этого можно воспользоваться уравнением Аррениуса, ко-

торое позволяет вычислить зависимость ускорения реакции старения от температуры [1, 2]. С помощью данного уравнения можно сократить процесс испытаний диодов, выполняя процедуру их ускоренного старения при более высоких температурах.

Чтобы оценить срок службы лазерного диода с помощью испытаний ускоренного старения, необходимо знать значения энергии активации и масштабного коэффициента. Масштабный коэффициент – это эмпирическая константа в уравнении Аррениуса, с помощью которой устанавливается связь между температурой и скоростью реакции. В настоящей статье описаны испытания лазерного диода при повышенных температурах, выполнен анализ статистических данных и сделан вывод о сроке эксплуатации лазерного диода и энергии его активации.

Модель Аррениуса

При передаче лазерных диодов потребителю они проверяются и отбраковываются во время первичных испытаний. Отказы лазерных диодов, прошедших испытания, вызваны необратимыми последствиями старения материалов и характерны для диодов, работающих при постоянных температурах и постоянном токе.

При работе лазера в цепи обратной связи, где лазер поддерживает постоянный световой поток, в режиме отказа будет наблюдаться постоянное увеличение прямого тока. В этом случае время до отказа обычно определяется как временной интервал увеличения прямого тока от 20 до 50 % от своего первоначального значения.

Высокая температура является одним из видов нагрузок при испытаниях на долговечность. Для анализа срока службы лазерного диода часто используют модель Аррениуса, описывающую влияние температуры на срок службы изделий [1, 2]. Уравнение (1) показывает, как с помощью энергии активации, масштабного коэффициента и температуры можно оценить время до отказа:

$$t_f = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где t_f – время до отказа, с, A – масштабный коэффициент, с, E_a – энергия активации, эВ, k – константа Больцмана, $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, T – температура, К.

Возьмем натуральный логарифм от левой и правой частей уравнения (1), получим:

$$\ln t_f = E_a \left(\frac{1}{kT} \right) + \ln A \Rightarrow y = mx + b, \quad (2)$$

где $y = \ln t_f$, $m = E_a$, $x = \left(\frac{1}{kT} \right)$, $b = \ln A$.

Для оценки времени до отказа и энергии активации необходимо проведение испытаний на продолжительность службы при различных температурах. Стандартные испытания лазерных диодов проводятся с автоматическим регулированием тока и со стабилизированной оптической мощностью при повышенных температурах (от 100 до 1000 ч). При оценке времени до износа и энергии активации испытательная система должна гарантировать устойчивость системы и возможность одновременного выполнения нескольких температурных испытаний.

Если энергия активации известна, ее можно использовать для расчета срока службы при различных температурах [3].

Испытания на трех различных температурах

Испытание на износ при трех различных температурах проводилось в испытательной камере в условиях нагрева и охлаждения для AlGaAs лазерного диода с центральной длиной волны 1310 нм и выходной мощностью 5 мВт [4].

Для определения значения тока накачки при проведении испытаний необходимо построение ватт-амперной характеристики, пример которой показан на рис. 1 [5].

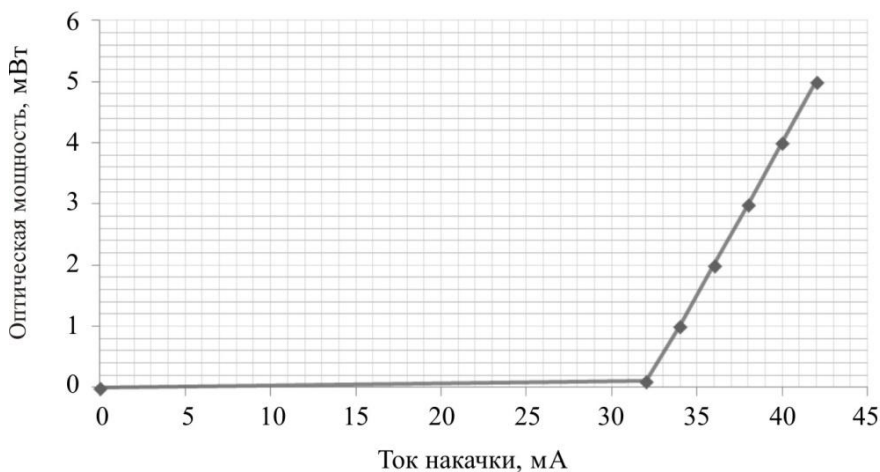


Рис. 1. Пример ватт-амперной характеристики лазерного диода [5]

В ходе испытаний была собрана экспериментальная установка для проведения испытаний ускоренного старения лазерного диода, которая показана на рис. 2.

Экспериментальная установка включает в себя блок питания, подключенный к лазерному диоду. Лазерный диод помещен в испытательную термокамеру, где температура может изменяться в диапазоне от 183 до 523 °К. К оптоволоконному выходу лазерного диода подключается фотоприемник для определения выходной оптической мощности. К блоку питания подсоединяется мультиметр для измерения тока накачки.

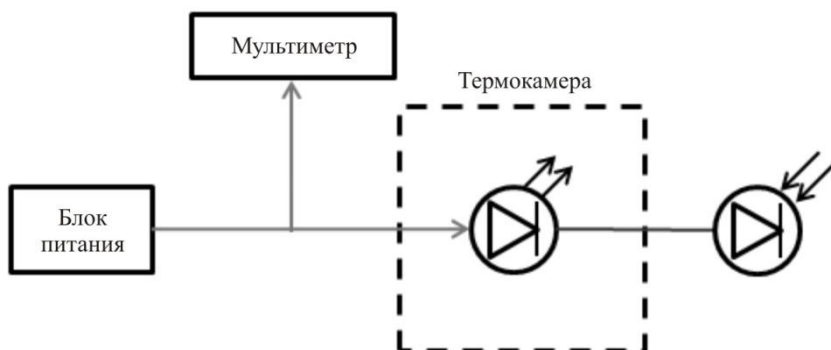


Рис. 2. Блок-схема проведения испытания на ускоренное старение

Были выполнены три эксперимента для температур 333, 343 и 353 К. Каждый эксперимент длился 1000 ч и выполнялся в режиме стабилизации оптической мощности при постоянной выходной оптической мощности 3,0 мВт. В результате были получены зависимости тока накачки от времени, показанные на рис. 3.

Зависимость тока накачки от времени близка к линейной, поэтому для определения срока службы возможна линейная экстраполяция. Средний срок службы лазерного диода определяется как время, в течение которого прямой ток увеличится на 20 % от своего начального значения [6,7].

На рис. 3 видно, что при температуре 333 °К ток накачки увеличился с 38 до 38,45 мА за 1000 ч, т. е. на 1,07 %. Аналогично при температуре 343 К ток накачки увеличился с 38,28 до 38,91 мА, деградация в этом случае составила 1,28 % за 1000 ч. Соответственно при тем-

пературе 353 К ток накачки увеличился с 38,55 до 39,21 мА за 1000 ч, т.е. деградация составила 2,06 %. В приведенной ниже таблице представлены сводные данные о предполагаемом сроке службы лазерного диода при температурах 333, 343 и 353 К, основанные на линейной экстраполяции экспериментальных данных, представленных на рис. 3.

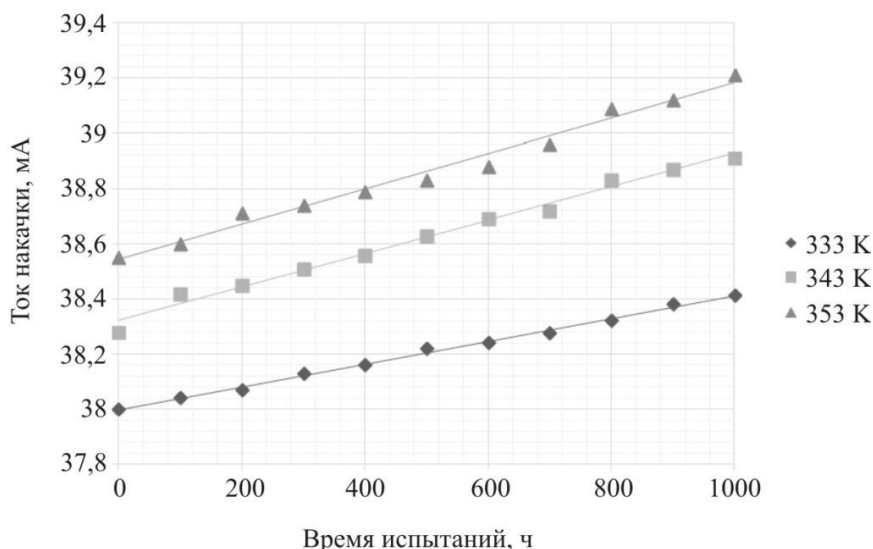


Рис. 3. Ускоренные испытания лазерного диода 1000 ч при температурах 333, 343 и 353 К

Расчетное время до отказа диода в часах при различных температурах

T	333 К	343 К	353 К
t_f	18536 ч	15576 ч	9674 ч
$\ln t_f$	9,827	9,653	9,177
$(kT)^{-1}$	34,85	33,834	32,875

Энергия активации

На основании данных таблицы вычисляем по три значения $y = \ln t_f$ и $x = \left(\frac{1}{kT}\right)$. Используя линейную зависимость (2) и метод наименьших квадратов (МНК), определим значения энергии активации E_a и масштабного коэффициента A .

Следуя МНК, составляется и решается система из двух уравнений с двумя неизвестными. Находим частные производные функции

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (m \cdot x_i + b))^2$$

по переменным m и b (m – энергия активации E_a , b – масштабный коэффициент A) и приравняем их к нулю.

$$\begin{cases} \frac{\partial F(m, b)}{\partial m} = 0 \\ \frac{\partial F(m, b)}{\partial b} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (m_i + b)) x_i = 0 \\ -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (m_i + b)) = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} m \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ m \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n b = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} m \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ m \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}$$

Решаем полученную систему уравнений методом Крамера и получаем формулы для нахождения коэффициентов:

$$m = \frac{3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - m \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{3}.$$

Подставляем в формулы (3) данные из таблицы, получаем значения энергии активации лазерного диода $E_a = m = 0,328$ эВ и масштабного коэффициента $A = e^b = e^{1,543} = 4,68$ с.

Расчет наработки до отказа при различных температурах

Зная энергию активации и масштабный коэффициент, по уравнению Аррениуса (1) можно оценить время безотказной работы светодиода при любой температуре окружающей среды. На рис. 4 показана зависимость времени безотказной работы светодиода от температуры для энергии активации 0,328 эВ и масштабного коэффициента 4,68.

Из рисунка видно, что снижение рабочей температуры лазерного диода существенно увеличивает срок его службы. Повышение окружающей температуры на 20°K сокращает срок службы диода примерно вдвое.

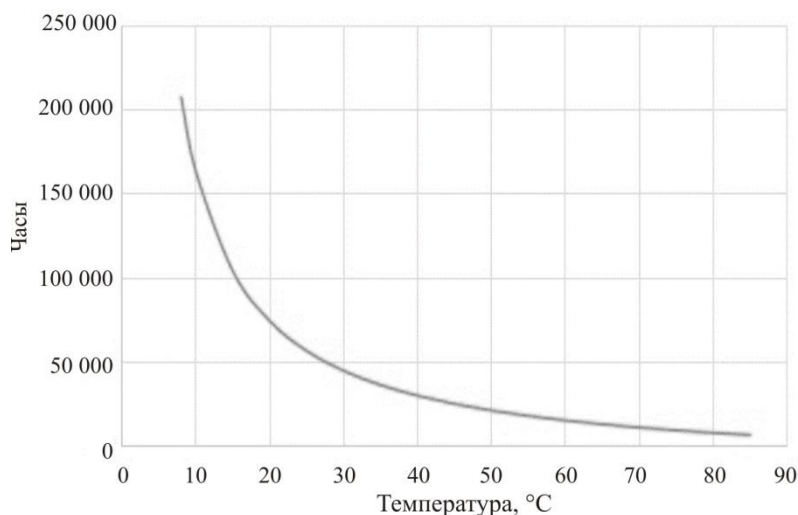


Рис. 4. График зависимости срока службы лазерного диода от рабочей температуры

Заключение

Расчет предполагаемого времени жизни лазерного диода является важным шагом при их разработке и применении. В данной работе была собрана экспериментальная установка и выполнены оценки времен работы светодиода до момента отказа при различных повышенных температурах окружающей среды, т.е. в условиях ускоренного старения. На основании экспериментальных данных получены значения энергии активации светодиода и масштабного коэффициента. В конечном итоге на основании модели Аррениуса построена зависимость срока службы лазерного диода от температуры эксплуатации. Было показано, что длительный срок эксплуатации диода возможен при более низких рабочих температурах. Например, прогнозируемое время безотказной работы лазерных диодов, использованных в данной работе, составляет около 101000 ч или 11 лет при температуре окружающей среды около 20°C . В дальнейшем планируется провести усовершенствование описанной методики по температурным испытаниям.

Список литературы

1. Qualification and selection of flight diode lasers for the NuSTAR space mission / P. Meras, M. Cooper, R.P. Dillon, S. Forouhar, I. Gontijo, C.C. Liebe, A. Shapiro // Aerospace Conference. – 2011. DOI: 10.1109/aero.2011.5747388
2. Ohring M, & Kasprzak L. // The Mathematics of Failure and Reliability, Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices. – 2015. – P. 181–248. DOI: 10,1016/b978-0-12-088574-9,00004-5
3. Gale P. // Estimating Laser Diode Lifetimes and Activation Energy. – 2016. – P. 1–11.
4. Degradation Mode Analysis on Highly Reliable Guardring-Free Planar InAlAs Avalanche Photodiodes / E. Ishimura, E. Yagy, M. Nakaji, S. Ihara, K. Yoshiara, T. Aoyagi, T. Ishikawa // Journal of Lightwave Technology. – 2007. – 25(12). – P. 3686–3693. DOI:10.1109/jlt.2007.909357
5. Lawrence A. Johnson. Laser Diode Burn In and Reliability Testing [Электронный ресурс] // ILX Lightwave. – 2006. – URL: <https://www.newport.com/>.
6. High Reliability and High Performance of 9xx nm Single Emitter Laser Diodes / L. Bao, P. Leisher, J. Wang, M. Devito, D. Xu, M. Grimshaw // SPIE LASE, International Society for Optics and Photonics. – 2011. – Vol. 791806. – P. 791806–12.
7. Jing Zhu, Thomas Yang, Cui peng Zhang. Research on the Reliability of Diode Lasers with Multiple Single High Brightness Level. – 2016. – P. 70–81. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.606.70.81

References

1. Meras, P., Cooper, M., Dillon R.P., Forouhar. S., Gontijo. I., Liebe. C. C., & Shapiro, A, (2011), Qualification and selection of flight diode lasers for the NuSTAR space mission, 2011 Aerospace Conference, DOI: 10.1109/aero.2011.5747388
2. Ohring, M., & Kasprzak, L, (2015), The Mathematics of Failure and Reliability, Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices, pp. 181-248, DOI: 10,1016/b978-0-12-088574-9,00004-5
3. Gale P. // Estimating Laser Diode Lifetimes and Activation Energy, 2016, pp. 1-11.

4. Ishimura, E., Yagyu, E., Nakaji, M., Ihara, S., Yoshiara, K., Aoyagi, T., Ishikawa, T, (2007), Degradation Mode Analysis on Highly Reliable Guardring-Free Planar InAlAs Avalanche Photodiodes, *Journal of Lightwave Technology*, 25(12), p. 3686-3693, DOI:10.1109/jlt.2007.909357

5. Lawrence A. Johnson (2006), Laser Diode Burn In and Reliability Testing, [Electronic resource] // ILX Lightwave, URL: [https://-www.newport.com/](https://www.newport.com/).

6. L. Bao, P. Leisher, J.Wang, M.Devito, D.Xu, M. Grimshaw, (2011) High Reliability and High Performance of 9xx nm Single Emitter Laser Diodes, – SPIE LASE, International Society for Optics and Photonics, v. 791806. 791806-12.

7. Jing Zhu, Thomas Yang, Cuipeng Zhang, (2016) Research on the Reliability of Diode Lasers with Multiple Single High Brightness Level, 70-81, DOI: 10.22184/1993-7296.2016.606.70.81

Получено 09.03.2021