



ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДНЫЕ МОДУЛИ: ВВОД ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКНО И ФИКСАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ МОДУЛЕЙ

А.Андриевский, ООО "Лазерском",
Датский технический университет;
В.Ф.Андриевский, ООО "Лазерском"

В статье рассмотрены основные технологии ввода излучения из полупроводникового лазерного диода в оптическое волокно и способы фиксации элементов лазерных диодных модулей.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковый лазер и оптическое волокно – важнейшие изобретения прошлого века, имевшие колоссальное влияние на техническое развитие общества и заслуженно отмеченные Нобелевскими премиями 2000 и 2009 годов, соответственно.

Первые лазерные образцы, созданные в лаборатории Р.Н. Холла в 1962 году, представляли собой гомоструктуры на основе GaAs и работали при криогенных температурах в импульсном режиме, однако уже в 1970 году группа Ж.И. Алферова продемонстрировала полупроводниковый лазер на гетероструктуре, работающий при комнатной температуре в непрерывном режиме. Далее, в 1970-х годах последовало стремительное развитие и совершенствование лазерных диодов и были предложены узкочастотные лазеры с распределенной обратной связью (DBR и DFB), лазеры на квантовых ямах и лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL). Однако только в 1990–2000 годах технология производства позволила создавать недорогие и надежные лазерные диоды для широкого спектра применений в оптической связи, датчиках, охранных системах и биомедицинских приборах. На сегодняшний день наиболее популярными типами лазеров являются лазерные диоды с резонатором Фабри-Перо с широким спектром, состоящим из нескольких мод, лазеры с распределенной обратной связью DFB, работающие в одночастотном режиме, и лазеры с вертикальным резонатором VCSEL (рис. 1).

Эксперименты по передаче оптического излучения по стеклянному волокну проводились

LASER DIODE MODULES: OPTICAL COUPLING AND PARTS BONDING

A.Andryieuski, LasersCom LLC and Technical
University of Denmark;
V.F.Andryieuski, LasersCom LLC

In this article we consider the main technologies of optical coupling from semiconductor laser diode to optical fiber and methods of module parts bonding.

INTRODUCTION

The semiconductor laser and optical fiber are the ones of the most important discoveries of the last century that had a great technical and societal impact. That fact was recognized by Nobel prizes of 2000 and 2009, respectively.

The first laser diode samples in 1962 by the group of R.N. Hall were GaAs homostructures and operated at cryogenic temperatures in pulse mode. However, already in 1970 the group headed by Zh.I. Alferov demonstrated a heterostructure-based semiconductor laser working at room temperature in CW mode. Further on in 1970-ies rapid development and improvement occurred and new types of lasers were suggested, including single-frequency lasers with distributed feedback (DBR and DFB), quantum wells lasers and vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL). However, only in the years 1990–2000 the manufacturing technology allowed to produce cheap and reliable laser diodes for a broad range of applications in telecommunication, sensors, security systems and biomedical equipment. Nowadays, the most popular types of laser diodes are the lasers with a Fabry-Perot resonator with a broad spectrum containing several modes, the lasers with distributed feedback DFB working in a single-mode regime and the lasers with vertical resonator VCSEL (Fig. 1)

The experiments on optical radiation transmission through a glass fiber started in the beginning of XX century, but only by 1970 Corning Inc. decreased optical losses to 17 dB/km that made an optical fiber acceptable for communication. The following technology development allowed to decrease optical losses by a factor of 100. Nowadays, multiple types of optical fibers on the basis of quartz glass are used, namely, single

с начала XX века, однако только в 1970 г. компании Corning удалось уменьшить величину оптических потерь до 17 дБ/км, что сделало оптическое волокно приемлемым для передачи информации. Последующее развитие технологии позволило уменьшить оптические потери почти в 100 раз. В настоящее время используются различные типы оптических волокон на основе кварцевого стекла: одномодовые и многомодовые, волокна с и без поддержки поляризации, специализированные фотоннокристаллические волокна, spun-волокна, волокна с заполнением металлом и пр.

Чрезвычайно важным с точки зрения практического использования излучения полупроводникового лазерного диода в технике является задача ввода излучения в оптическое волокно. Если в стационарной оптической лаборатории со стабильным температурным режимом можно использовать систему линз и микрометрических подвижек для коллимации выходящего из лазера пучка и его фокусировки на торце волокна, то в составе приборов, подверженных механическим вибрациям и перепадам температур, а также при наличии жестких требований по весу и габаритам, использование громоздких и сложных оптических систем совершенно недопустимо. Именно поэтому волокно и фокусирующая линза точно юстируются и фиксируются с лазерным диодом в одном корпусе, образуя тем самым лазерный диодный модуль. Такой модуль удобно использовать в составе аппаратуры, его можно быстро и многократно монтировать и демонтировать. К лазерным диодным модулям предъявляются разнообразные требования, в частности, малый вес, компактность, высокая эффективность ввода излучения, стабильность работы при тряске, высоких и низких температурах. Все это обеспечивается как точностью и эффективностью оптической юстировки, так и конструкцией корпуса и методами крепления составных частей.

В данной статье мы рассмотрим два важных аспекта изготовления лазерных диодных модулей – ввод оптического излучения в оптическое волокно и фиксацию элементов лазерного диодного модуля в единое целое.

ВВОД ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКНО

Не все излучение, выходящее из лазерного диода, попадает в ведущую моду (рис. 2а). Часть излучения пролетает мимо волокна, часть попадает в оболочку и далее вытекает наружу, часть отражается от торца. Основная характеристика

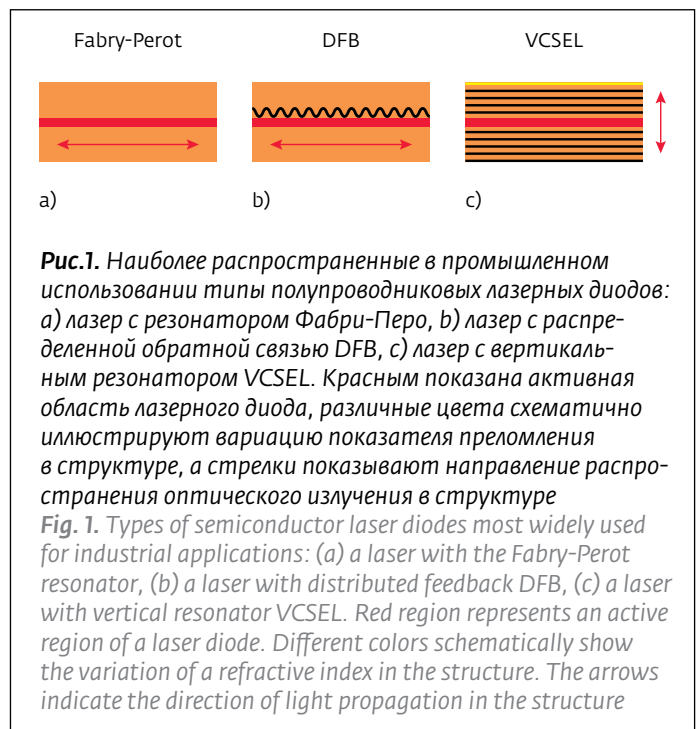


Рис.1. Наиболее распространенные в промышленном использовании типы полупроводниковых лазерных диодов: а) лазер с резонатором Фабри-Перо, б) лазер с распределенной обратной связью DFB, в) лазер с вертикальным резонатором VCSEL. Красным показана активная область лазерного диода, различные цвета схематично иллюстрируют вариацию показателя преломления в структуре, а стрелки показывают направление распространения оптического излучения в структуре

Fig. 1. Types of semiconductor laser diodes most widely used for industrial applications: (a) a laser with the Fabry-Perot resonator, (b) a laser with distributed feedback DFB, (c) a laser with vertical resonator VCSEL. Red region represents an active region of a laser diode. Different colors schematically show the variation of a refractive index in the structure. The arrows indicate the direction of light propagation in the structure

and multi-mode fibers, polarization maintaining fibers, photonic crystal fibers, spun-fibers, fibers with metal filler etc.

Coupling light from semiconductor laser diode to optical fiber is the task of extreme importance for practical applications of laser diodes. Even though it is possible to use a system of lenses and micromanipulators in an optical lab for light collimation and focusing of the fiber end, usage of bulky optical systems is unacceptable in the equipment subject to mechanical vibrations and temperature variations and under strict constraints on weight and size. This is the main reason why a fiber, a focusing lens and a laser diode have to be carefully aligned and fastened, thus making a laser diode module. Such module is convenient to be used in an equipment, it can be quickly installed and removed multiple times. Laser diode modules are subject to various requirements, including small weight, compactness, large optical coupling efficiency, stability of work under vibrations, high and low temperatures. All these can be ensured by accuracy of optical alignment as well as by construction of package and methods of bonding the modules parts.

In this article we consider two important aspects of laser diode modules assembly: coupling to an optical fiber and bonding the parts of a laser diode module.

ввода излучения – коэффициент ввода η , который определяется отношением мощности, попавшей в ведущую моду, к падающей мощности:

$$\eta = \frac{P_{wg}}{P_{inc}}$$

В 1990-х годах использовалась достаточно сложная технология ввода оптического излучения, требующая предварительного покрытия оптического волокна золотом, а далее юстировки по отношению к лазерному диоду в расплавленном припое и фиксации до остывания припоя (рис.2b). Линза при этом формировалась на торце оптического волокна чаще всего оплавлением в электрической дуге. Для упрощения центрирования припой находился в трубке, куда далее помещалось волокно [1]. Типичный коэффициент ввода излучения при помощи данного метода – 30–40%. Данный способ оказался дорогостоящим и сложным, однако имеет ограниченное применение и в настоящее время.

В конце 1990-х годов массово стали выпускаться лазерные диоды с линзой, представляющей собой маленький шарик, вмонтированный в защитный колпачок [2] (рис.2c). Таким образом можно было вводить только около 10–20% излучения в волокно, однако несомненным достоинством данной технологии была ее дешевизна.

Эксперименты по вводу излучения в оптическое волокно при помощи градиентной линзы (градана) проводились еще в 1980-е годы [3], однако только в начале 2000-х лазерные диоды с градинами вместо шариковых линз стали коммерчески доступными (рис.2d). Несмотря на то, что лазерные диоды с такими линзами были и дороже, коэффициент ввода был выше и достигал 30%. Недостатком же была работоспособность такой системы в более узком диапазоне температур.

Примерно в 2010 году на массовом рынке появились лазерные диоды с асферической линзой более сложной геометрической формы и с антиотражающими покрытиями (рис.2e). Такие линзы используются и в настоящее время в качественных лазерных диодах и обеспечивают коэффициент ввода до 40%.

Компания "Лазерском" выбрала другой метод ввода излучения, при котором используется линза, сформированная прямо на торце волокна при помощи селективного травления. Это позволяет вводить до 80% оптической мощности в серийно выпускаемых изделиях. При этом отсутствуют линзы как отдельные оптические элементы, что делает юстировку оптического волокна проще

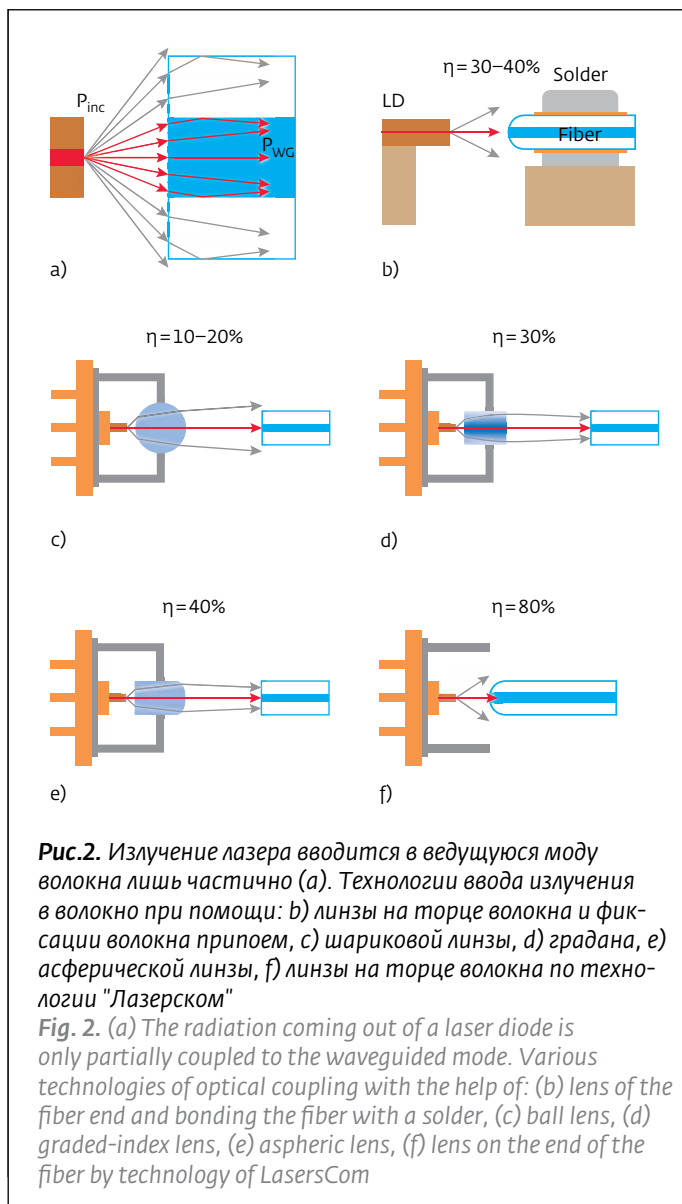


Рис.2. Излучение лазера вводится в ведущую моду волокна лишь частично (а). Технологии ввода излучения в волокно при помощи: б) линзы на торце волокна и фиксации волокна припоем, в) шариковой линзы, д) градана, е) асферической линзы, ф) линзы на торце волокна по технологии "Лазерском"

Fig. 2. (a) The radiation coming out of a laser diode is only partially coupled to the waveguided mode. Various technologies of optical coupling with the help of: (b) lens of the fiber end and bonding the fiber with a solder, (c) ball lens, (d) graded-index lens, (e) aspheric lens, (f) lens on the end of the fiber by technology of LasersCom

COUPLING TO AN OPTICAL FIBER

Not all the radiation coming out of a laser diode couples to a guided mode (Fig. 2a). A part of it goes outside of the fiber, a part enters the cladding and is coupled out further on, a part is reflected from the end. The main characteristic of coupling is the coupling efficiency η that is the ratio of power coupled to the waveguided mode to an incident power

$$\eta = \frac{P_{wg}}{P_{inc}}$$

In 1990-ies a complicated technology of optical alignment was used. It required covering the fiber with a layer of gold and then alignment in a melted solder and then fixation until the solder is cooled

и надежнее. Такой коэффициент ввода в два раза выше, чем у типичных лазерных диодных модулей, применяемых для производства оптических рефлектометров, и в пять раз выше, чем у типичных модулей, применяемых для оптической связи. Высокий коэффициент ввода позволяет получать ватт-амперные характеристики с большей крутизной и работать при меньших значениях силы тока, что существенно важно для снижения потребления электроэнергии в системах связи.

ФИКСАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРНОГО ДИОДНОГО МОДУЛЯ

Не менее важную роль в производстве лазерных диодных модулей играет метод фиксации составных элементов. Именно этот аспект обеспечивает надежность, долговечность работы и температурную стабильность параметров модулей.

До 2000 года основным методом фиксации элементов модулей была фиксация при помощи клеев на основе эпоксидных смол [4] (рис.3а). Несмотря на то, что работать с эпоксидными клеями достаточно удобно, после сборки модуля необходимо проводить термоциклирование и ускоренные испытания. Это приводит к тому, что значительная доля изделий уходит в брак.

Начиная с 2000 года в производстве стала внедряться технология лазерной сварки [5] (рис.3б). Производители лазерных диодных модулей в рекламе изделий старались подчеркнуть, что модули не содержат эпоксидной смолы. Однако лазерная сварка не лишена недостатков. Основным из них является необходимость надежной фиксации составных элементов во время сварки во избежание механических деформаций [6] и тщательного контроля воздействия сварки на оптические параметры модуля.

Технология компании "Лазерском" имеет существенное отличие от вышеперечисленных технологий. Она заключается в использовании в качестве связующего материала специально разработанного компаунда с низким коэффициентом термического расширения (рис.3с). Это обеспечивает как высокую прочность, так и отличную температурную стабильность.

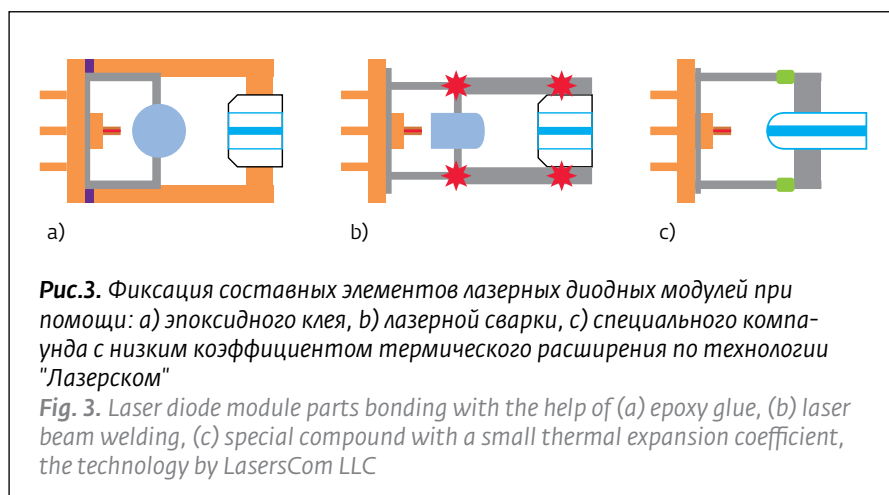


Рис.3. Фиксация составных элементов лазерных диодных модулей при помощи: а) эпоксидного клея, б) лазерной сварки, с) специального компаунда с низким коэффициентом термического расширения по технологии "Лазерском"

Fig. 3. Laser diode module parts bonding with the help of (a) epoxy glue, (b) laser beam welding, (c) special compound with a small thermal expansion coefficient, the technology by LasersCom LLC

down (Fig. 2b). The lens was most commonly formed on the fiber end by an electric arc discharge. In order to simplify the alignment the solder was predeposited into a tube where the fiber was then placed [1]. A typical coupling efficiency by this method was 30–40%. This method was, however, expensive and difficult to implement. Nevertheless, it has a limited employment up to nowadays.

In the end of 1990-ies the laser diodes with a small ball lens in a protective cap started to be produced [2] (Fig. 2c). This way allowed to couple only 10–20% of radiation in a fiber, but the main advantage of this technology was cheapness.

The experiment on light coupling with the help of a graded-index (GRIN) lens were conducted already in 1980-ies [3], but only in the beginning of the XXI century the laser diodes with the GRIN lenses became commercially available (Fig. 2d). Even though the laser diodes with such lenses were more expensive, the coupling efficiency was larger and reached 30%. As for a disadvantage, such systems could work in a narrower temperature range.

In 2010 the laser diodes in aspherical lenses of more complicated shape and with antireflection coatings appeared on the market (Fig. 2e). Such lenses are used nowadays in quality laser diodes and provide coupling efficiency up to 40% in the modules.

LasersCom LLC chose another method of optical coupling that uses a lens formed on the end of an optical fiber by selective etching. This allows to couple up to 80% of optical power in the mass-produced modules. This technology does not use a lens as a separate optical element that makes optical alignment simpler and more reliable. The achieved coupling efficiency is 2 time larger than for typical laser diode modules for optical time-domain



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совмещение технологии формирования линзы на торце волокна с технологией фиксации элементов модуля позволяет ООО "Лазерском" создавать лазерные диодные модули с превосходными характеристиками. К примеру, стабильность мощности P излучения при вариации температуры T характеризуется величиной максимального отклонения мощности от опорной, так называемой tracking error

$$E_r = \max \left| 10 \lg \frac{P(T)}{P(T_0)} \right|_{T=T_{\min}}^{T_{\max}},$$

где $T_0 = 25$ °С – опорная температура, а T_{\min} и T_{\max} – минимальная и максимальная температуры, соответственно. Все модули производства ООО "Лазерском" проходят температурный контроль в диапазоне температур от -20 °С до 50 °С, а также проводится избирательный контроль в диапазоне от -60 до 80 °С, и максимальное отклонение мощности E_r не превышает $0,04$ дБ. Модули "Лазерском" успешно проходят испытания на вибрации и радиационную стойкость. Малые габаритные размеры и низкое энергопотребление делают лазерные диодные модули перспективными для портативных приборов и аппаратуры, к которой предъявляются строгие требования по размеру и весу. Высокая крутизна ватт-амперных характеристик и высокая энергоэффективность дает разработчикам дополнительные преимущества при создании конкурентоспособной аппаратуры. Еще одной важной особенностью лазерных модулей ООО "Лазерском" является высокая стабильность оптической мощности в широком температурном диапазоне и низкий уровень низкочастотных шумов, что позволяет применять данные модули для изготовления высокостабильных источников оптического излучения.

Кроме лазерных диодных модулей с длинами волн в широком спектральном диапазоне от 400 нм до 1650 нм ООО "Лазерском" производит суперлюминесцентные светодиодные модули, PIN и лавинные фотодиодные модули, фотодиодные модули с трансимпедансным усилителем и автоматической регулировкой усиления, а также гибридные модули, включающие также в состав разветвители, изоляторы, мультиплексоры и прочие пассивные компоненты [7].

Компактные оптоэлектронные модули находят применение в измерительных и эталон-

reflectometry and 5 times larger than for the typical modules for optical communication. Large coupling efficiency results in a large slope of the PI-curve and allows for using smaller currents that is of extreme importance for reducing power consumption in communication systems.

MODULE PARTS BONDING

As important as optical coupling is the technology of the laser diode module parts bonding. This factor ensures reliability, durability and thermal stability of the modules parameters.

Up to 2000 the main method of module parts bonding was employment of epoxy glues [4] (Fig. 3a). Even though working with epoxy glues is convenient, after module assembly one needs to perform thermal cycling and accelerated aging tests. A considerable part of the devices is rejected due to parameters worsening.

Starting from 2000 the technology of laser beam welding was introduced into laser diode modules assembly [5] (Fig. 3b). The manufacturers of the laser diode modules even tried to emphasize in advertisements that the modules did not contain epoxy glue. Even though laser beam welding increased modules yield, it also has some constraints. The most important is that the welded parts have to be firmly fixed during welding in order to avoid mechanical deformations [6] and the influence of laser welding on optical parameters has to be thoroughly controlled.

The technology by LasersCom LLC has a significant advantage the essence of which is to use instead of glue a special compound with a low thermal expansion coefficient (Fig. 3c). This ensures high strength as well as excellent thermal stability.

CONCLUSIONS

Combining together the technology of lens formation on the end of the fiber with the technology of parts bonding allows LasersCom LLC manufacturing laser diode modules with excellent parameters. For example, stability of the optical power P under temperature T variation is characterized by the value of maximal deviation of the power from the reference value, the so-called tracking error

$$E_r = \max \left| 10 \lg \frac{P(T)}{P(T_0)} \right|_{T=T_{\min}}^{T_{\max}},$$

where $T_0 = 25$ °С is the reference temperature, T_{\min} and T_{\max} are the minimal and maximal temperatures,



ных приборах ВОЛС, системах оптической связи, дальнометрии, оптических охранных системах, СВЧ-фотонике, биомедицине и научных исследованиях. Дальнейшее развитие технологии лазерных диодных модулей направлено как на расширение диапазона используемых длины волн, в частности, в средний инфракрасный диапазон, так и на повышение эффективности, надежности и устойчивости к экстремальным условиям работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **W.H.Cheng, M.T.Sheen, G.L.Wang, S.C.Wang, J.H.Kuang.** Fiber alignment shift formation mechanisms of fiber-solder-ferrule joints in laser module packaging. – *J. Light. Technol.*, vol. 19, no. 8, pp. 1177–1184, 2001.
2. **R.P.Ratowsky, L.Yang, R.J.Deri, K.W.Chang, J.S.Kallman, G.Trott.** "Laser diode to single-mode fiber ball lens coupling efficiency: full-wave calculation and measurements. – *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 15, pp. 3435–3438, 1997.
3. **I.Kitano, H.Ueno, M.Toyama.** "Gradient-index lens for low-loss coupling of a laser diode to single-mode fiber. – *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 19, p. 3336, 1986.
4. **M.S.Cohen, G.W.Johnson, J.M.Trehella, D.L.Lacey, M.M.Oprysko, D.L.Karst, S.M.Defoster, W.K.Hogan, M.D.Peterson, J.A.Weirick.** Low-Cost Fabrication of Optical Subassemblies, vol. 20, no. 3, pp. 256–263, 1997.
5. **J.H.Kuang.** Crack formation mechanism in laser welded au-coated invar materials for semiconductor laser packaging. – *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 22, no. 1, pp. 94–100, 1999.
6. **Y.Lin, C.Eichele, and F.G.Shi.** Effect of Welding Sequence on Welding-Induced-Alignment-Distortion in Packaging of Butterfly Laser Diode Modules: Simulation and Experiment. – *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 615–623, 2005.
7. "LasersCom, LLC." <http://www.laserscom.com/>. [Accessed: 22-Mar-2017].

respectively. All the modules produced by LasersCom LLC pass the thermal control in the temperature range from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, and some modules are also controlled in the range from $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. The maximal tracking error E_r does not exceed 0.04 dB. The LasersCom modules successfully pass the vibration tests as well as confirm ionizing radiation resistance tests. Small size and low power consumption make the laser diode modules suitable for portable devices and equipment, for which strict size and weight requirements are imposed. An additional feature of the LasersCom modules is the high stability of optical power in a broad temperature range and small level of low-frequency noise that allows to use the modules for optical radiation sources with high stability.

Except for the laser diode modules at the wavelengths in a broad spectral range from 400 to 1650 nm, LasersCom LLC produces superluminescent LED modules, PIN and avalanche photodiode modules, photodiode modules with transimpedance amplifiers and automatic gain control, as well as hybrid modules including optical splitters, isolators, multiplexors and other passive components [7].

Compact optoelectronic modules find multiple applications in fiber optical measurement and communication systems, metrology, range finding, security systems, microwave photonics, medicine, life science and scientific research. The following development of technology of the laser diode modules is targeted to broadening the spectral range, for example, to mid-infrared, as well as to increasing the power efficiency, reliability and resistance to extreme conditions.