

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Полецук А. Г., Пальчикова И. Г. Считывание информации с компакт-дисков лазерной головкой с дифракционной оптикой // Квантовая электроника.— 1988.— № 10.
2. Донцова В. В., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. Исследование параметров дифракционных микрообъективов // Автометрия.— 1989.— № 2.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973.
4. Донцова В. В., Ленкова Г. А., Чурин Е. Г. Влияние спектра полупроводникового лазера на ФРГ дифракционного микрообъектива для лазерной считывающей головки // Компьютерная оптика.— М.: МЦНТИ, 1989.— № 5.

Поступила в редакцию 31 июля 1989 г.

УДК 621.378.325 : 535.317

В. А. ДОМБРОВСКИЙ, С. А. ДОМБРОВСКИЙ, Е. Ф. ПЕН,  
А. Н. ПОТАПОВ, З. Л. ПУСТОВАЯ  
(Новосибирск)

#### СТЫКОВКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА С ОДНОМОДОВЫМ ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДОМ

**Введение.** Полупроводниковые лазеры видимого диапазона и одномодовые волоконные световоды (ОВС) открывают новые возможности в голографической технике, и в частности в области голографической памяти. Эти элементы обеспечивают компактность, гибкость, многоканальность оптической системы, позволяют легко формировать пучки высокого качества и управлять их параметрами.

Для эффективного соединения полупроводникового лазера с ОВС необходимо преобразовать эллиптический лазерный пучок в круглую волноводную моду. Известен целый ряд методов сопряжения полупроводникового лазера с ОВС [1—18]. В [1, 2, 4, 7, 10, 17, 18] исследован метод соединения полупроводникового лазера с ОВС путем прямой стыковки. Достигнута эффективность ввода излучения полупроводникового лазера в ОВС  $K = 10 - 25 \%$ . В [3, 4] фотолитографическая техника использовалась для создания сферических и цилиндрических микролинз с диаметром 4—10 мкм на торце ОВС. Эффективность ввода излучения составляла  $K \approx 40 \%$ . В [7, 9] стыковка полупроводникового лазера с ОВС осуществлялась с помощью линзы «Selfoc» ( $K \approx 22 \%$ ), а в [10] — фокона, который создавался на торце ОВС ( $K = 10 - 23 \%$ ). В [5—8, 10] в качестве цилиндрической линзы применялся отрезок волоконного световода диаметром 6—20 мкм, помещаемый между ОВС и полупроводниковым лазером. Эффективность ввода доходила до 70%. Расчет эффективности стыковки полупроводникового лазера с ОВС и формулировка требований к точности установки основных элементов для различных способов проведены в [7]. Делается вывод, что метод цилиндрической линзы наиболее подходящий, хотя требования к точности установки элементов здесь являются высокими. В [11, 12] предложен эффективный метод соединения полупроводникового лазера, имеющего небольшую асимметрию диаграммы излучения, с ОВС, основанный на использовании двух сферических линз, установленных софокусно. Этот метод обеспечивает достаточно высокую эффективность ( $\sim 40 \%$ ) при допустимой точности установки элементов.

© 1990 Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф.,  
Потапов А. Н., Пустовая З. Л.

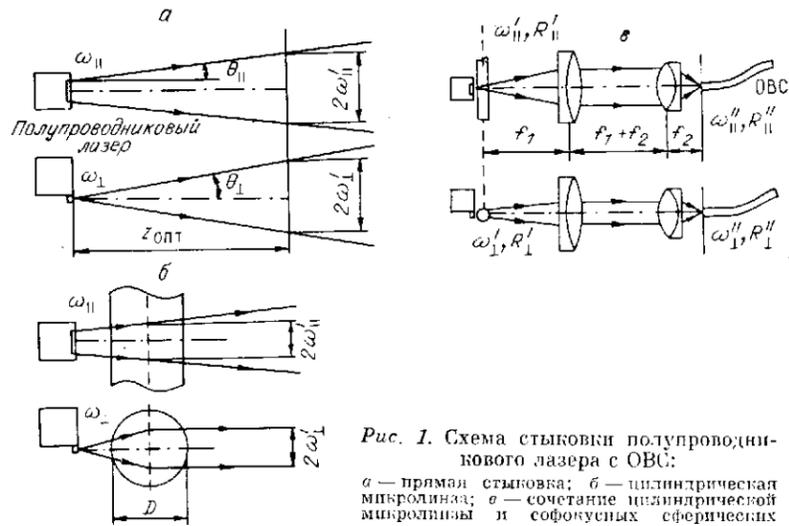


Рис. 1. Схема стыковки полупроводникового лазера с ОВС:  
 а — прямая стыковка; б — цилиндрическая микролинза; в — сочетание цилиндрической микролинзы и софокусных сферических линз

В данной статье теоретически и экспериментально исследуется эффективность способа стыковки полупроводникового лазера со значительной асимметрией диаграммы излучения с одномодовым волоконным световодом, сочетающего методы цилиндрической линзы и софокусных сферических линз. Предполагается, что в этом случае может быть достигнута высокая эффективность ввода излучения в ОВС при относительно низких требованиях к точности установки оптических элементов.

**Метод цилиндрической микролинзы.** Предположим, что пучок в плоскости выходного зеркала полупроводникового лазера описывается гауссовой функцией [1, 2], причем  $\omega_{||}$  и  $\omega_{\perp}$  являются радиусами пучка на уровне  $e^{-2}$  по интенсивности соответственно в плоскости, параллельной и перпендикулярной  $p-n$ -переходу. Для полупроводникового лазера  $\omega_{||} > \omega_{\perp}$ , при этом расходимость

$$\Theta_{\perp} = \lambda/\pi\omega_{\perp} > \lambda/\pi\omega_{||} = \Theta_{||}.$$

На некотором расстоянии  $z_{\text{опт}}$  от лазера размеры пучков становятся равными (рис. 1, а):  $\omega'_{||} = \omega'_{\perp}$ . Расстояние  $z_{\text{опт}}$  находится из формулы  $z_{\text{опт}} = q_{\perp}\omega_{\perp}/\omega_{||} = \pi\omega_{\perp}\omega_{||}/\lambda$ , которая получается на основе выражения [19]

$$\omega'_{\perp, ||} = \frac{\lambda}{\pi\omega_{\perp, ||}} [q_{\perp, ||}^2 + z^2]^{1/2}, \quad (1)$$

описывающего изменения размера гауссового пучка по мере удаления от лазера. Здесь  $\lambda$  — длина волны излучения лазера,  $q_{\perp, ||} = \pi\omega_{\perp, ||}^2/\lambda$  — обобщенный параметр лазерного пучка в плоскости, перпендикулярной ( $\perp$ ) и параллельной ( $||$ )  $p-n$ -переходу.

Для достижения максимальной эффективности ввода  $K$ , как следует из выражения [20, 8]

$$K = K_{\perp}K_{||}, \quad (2)$$

$$K_{\perp, ||} = \frac{2}{\left[ \left( \frac{\omega_0}{\omega'_{\perp, ||}} + \frac{\omega'_{\perp, ||}}{\omega_0} \right)^2 + \left( \frac{\pi\omega'_{\perp, ||}\omega_0}{\lambda R_{\perp, ||}} \right)^2 \right]^{1/2}},$$

еще недостаточно согласовать размеры лазерного пучка  $\omega'_{\perp}$ ,  $\omega'_{||}$  с радиусом основной моды  $\omega_0$  ОВС ( $\omega_{\perp} = \omega_{||} = \omega_0$ ). Необходимо выполнить также определенные требования на величину радиусов кривизны фронта лазерного пучка  $R_{\perp}$  и  $R_{||}$  в плоскости входного торца ОВС:

$$R_{\perp, ||} \geq q_0,$$

где  $q_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$  — обобщенный параметр основной моды ОВС. Например, при  $R_{\perp,\parallel} = q_0$  эффективность ввода падает на 20 %.

Радиусы кривизны фронта лазерного пучка с увеличением расстояния  $z$  изменяются по закону [19]  $R_{\perp,\parallel} = z + q_{\perp,\parallel}^2/z$ . Если входной торец ОВС располагается на расстоянии  $z_{\text{опт}} = q_{\parallel}\omega_{\perp}/\omega_{\parallel}$  от лазера, то  $R_{\parallel} = q_{\parallel}\eta\left(1 + \frac{1}{\eta^2}\right)$ ,  $R_{\perp} = q_{\parallel}\frac{1}{\eta}\left(1 + \frac{1}{\eta^2}\right)$ , или в предположении, что  $\omega'_{\perp} = \omega'_{\parallel} = \omega_0$ , а  $\eta^2 = \omega_{\parallel}^2/\omega_{\perp}^2 \gg 1$ ,  $R_{\parallel} \approx q_0\eta$ ;  $R_{\perp} \approx q_0/\eta$ .

В этом случае выражение (2) для коэффициента эффективности ввода  $K$  преобразуется в виде

$$K = \frac{4}{(4 + 1/\eta^2)^{1/2}(4 + \eta^2)^{1/2}}.$$

Например, при  $\eta = 3$   $K = 55$  %, а при  $\eta = 8$   $K = 20$  %.

Таким образом, понятно, что при значительной ( $\eta = \omega_{\parallel}/\omega_{\perp} > 3$ ) асимметрии площадки излучения полупроводникового лазера необходимо корректировать радиус фронта волны в плоскости, перпендикулярной  $p$  —  $n$ -переходу. Это можно сделать с помощью цилиндрической линзы, фокусное расстояние которой выбирается из выражения

$$f_{\text{опт}} = z_{\text{опт}} = (\pi\omega_{\perp}\omega_{\parallel})/\lambda = q_{\parallel}/\eta. \quad (3)$$

(Например, при  $\lambda = 0,66$  мкм;  $\omega_{\parallel} = 2,5$  мкм;  $\omega_{\parallel}/\omega_{\perp} = 9$   $q_{\parallel} \approx 30$  мкм, а  $f_{\text{опт}} = 3,3$  мкм.) Заметим, что входной торец ОВС целесообразно располагать в главной плоскости цилиндрической линзы. При этом  $R_{\parallel} = -R_{\perp} \approx q_{\parallel}\omega_{\parallel}/\omega_{\perp}$ ,  $\omega'_{\parallel} = \omega'_{\perp}$  и, например, если  $\omega'_{\parallel} = \omega_0$ , то расчетная эффективность ввода излучения полупроводникового лазера в ОВС близка к 100 %.

В качестве цилиндрической микролинзы можно использовать отрезок оптического волокна (рис. 1, б). Диаметр волокна  $D$  связан с фокусным расстоянием формулой толстой линзы

$$f = nD/4(n - 1),$$

где  $n$  — показатель преломления световолокна. Например, при  $n = 1,5$ ;  $f = 3$  мкм,  $D = 4$  мкм.

Хотя эффективность ввода излучения полупроводникового лазера в ОВС с использованием таких цилиндрических линз оказывается высокой (экспериментально до 70 %), однако допуски на погрешность установки элементов здесь очень жесткие (доли микрона) [7]. Кроме того, на практике возникают трудности, связанные с малыми расстояниями между лазером, цилиндрической микролинзой и ОВС.

**Метод софокусных сферических линз.** Требования к точности установки оптических элементов могут быть значительно ослаблены, если использовать цилиндрические линзы с фокусным расстоянием, значительно (примерно на порядок) большим, чем оптимальное  $f_{\text{опт}}$ . Однако в этом случае падает эффективность ввода. Исследуем зависимость эффективности ввода  $K$  от фокусного расстояния цилиндрической линзы.

Радиусы лазерного пучка  $\omega'_{\parallel}$ ,  $\omega'_{\perp}$  в главной плоскости цилиндрической линзы с фокусным расстоянием  $f$  определяются выражением (1):

$$\omega'_{\parallel} = \omega_{\parallel} \sqrt{1 + f^2/q_{\parallel}^2}; \quad (4)$$

$$\omega'_{\perp} = \frac{\omega_{\perp}}{\eta} \sqrt{1 + \eta^4 f^2/q_{\parallel}^2}, \quad (5)$$

где  $\eta = \omega_{\parallel}/\omega_{\perp}$ . Введем параметр

$$l = \omega'_{\perp}/\omega'_{\parallel} = \sqrt{1 + \eta^4 f^2/q_{\parallel}^2} / \eta \sqrt{1 + f^2/q_{\parallel}^2}, \quad (6)$$

который понадобится в дальнейших расчетах.

Радиус основной моды ОВС  $\omega_0$  в общем случае не совпадает с размером лазерного пучка ни в параллельной  $\omega_{\parallel}$ , ни в перпендикулярной  $\omega_{\perp}$  плоскостях  $p-n$ -перехода. Для согласования лазерного пучка с основной модой ОВС целесообразно использовать две сферические линзы, установленные софокусно (рис. 1, в). Причем фокусные расстояния этих линз  $f_1$  и  $f_2$  выбираются из условия, максимизирующего эффективность ввода  $K$  [11]:

$$m_{\text{опт}} = f_2/f_1 = \omega_0/\sqrt{\omega'_{\perp}\omega'_{\parallel}}, \quad (7)$$

которое с учетом (4) и (5) преобразуется следующим образом:

$$m_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{q_0}{lq_{\parallel}}} \frac{1}{\sqrt{1+f^2/q_{\parallel}^2}}. \quad (8)$$

Выражения для радиусов кривизны фронта лазерного пучка в плоскости, параллельной  $R''_{\parallel}$  и перпендикулярной  $R''_{\perp}$   $p-n$ -переходу, на входном торце ОВС имеют вид

$$R''_{\parallel,\perp} = m_{\text{опт}}^2 R'_{\parallel,\perp},$$

где

$$R'_{\parallel} = f(1 + q_{\parallel}^2/f^2),$$

$$R'_{\perp} = -f(1 + \eta^4 f^2/q_{\parallel}^2)$$

или

$$R''_{\parallel} = q_0/l(f/q_{\parallel}), \quad (9)$$

$$R''_{\perp} = -q_0 l \eta^2 (f/q_{\parallel}). \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в (2) и учитывая соотношения  $\omega_{\perp}'' = \omega_0 \sqrt{l}$ ,  $\omega_{\parallel}'' = \omega_0/\sqrt{l}$ , для эффективности ввода излучения полупроводникового лазера в ОВС получим

$$K_{\text{max}} = \frac{4}{\left[ \left( \sqrt{l} + \frac{1}{\sqrt{l}} \right)^2 + l \left( \frac{f}{q_{\parallel}} \right)^2 \right]^{1/2} \left[ \left( \sqrt{l} + \frac{1}{\sqrt{l}} \right)^2 + \frac{1}{l^2 \eta^4 (f/q_{\parallel})^2} \right]^{1/2}}. \quad (11)$$

Графики зависимостей  $K_{\text{max}}$ ,  $1/m_{\text{опт}} = f_1/f_2$ ,  $l = \omega'_{\perp}/\omega'_{\parallel}$  от относительного фокусного расстояния цилиндрической линзы  $f/q_{\parallel}$ , рассчитанные из выражений (11), (8) и (6) при  $\eta = 8$  и  $q_0/q_{\parallel} = 1$ , показаны на рис. 2. Из графиков видно, что максимальная эффективность ввода ( $K_{\text{max}} \approx 100\%$ ) получается, когда  $f_{\text{опт}} = q_{\parallel}/\eta = 0,125$ . С увеличением фо-

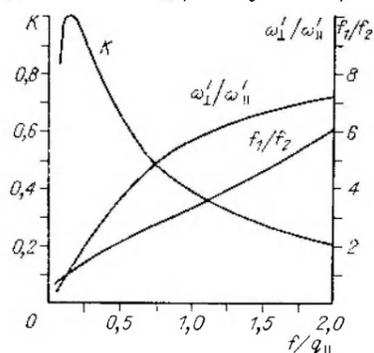


Рис. 2. Зависимости  $K$ ,  $f_1/f_2$ ,  $\omega'_{\perp}/\omega'_{\parallel}$  от фокусного расстояния цилиндрической микролинзы  $f/q_{\parallel}$

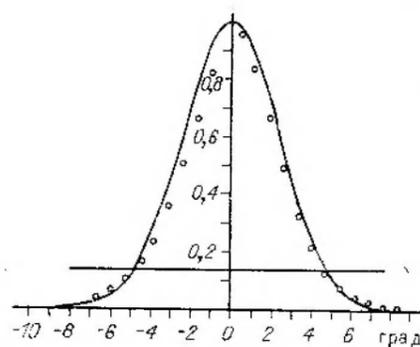


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения на выходе ОВС в дальней зоне

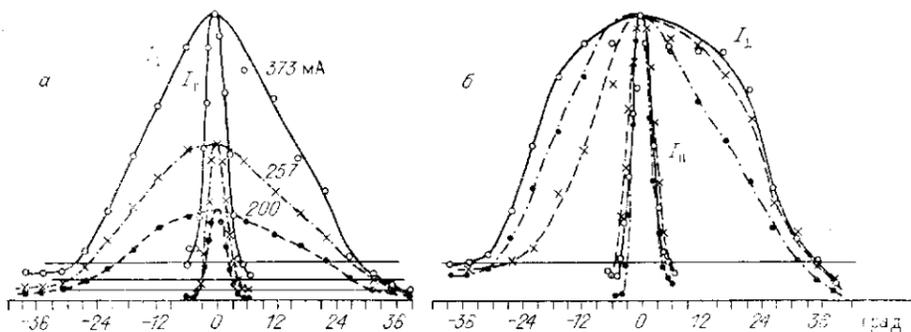


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения полупроводникового лазера ИЛПИ-2-7К-А в дальней зоне в плоскости, параллельной  $I_{||}$  и перпендикулярной  $I_{\perp}$   $p-n$ -переходу:

а — для трех значений тока накачки; б — для трех образцов полупроводникового лазера

кусного расстояния в 4 и 8 раз по сравнению с оптимальным эффективностью падает, но остается еще достаточно высокой: 64 и 39 % соответственно. При этом требования к точности установки цилиндрической линзы снижаются пропорционально увеличению ее фокусного расстояния, т. е. в 4 — 8 раз.

**Эксперимент.** В эксперименте использовался импульсный полупроводниковый лазер ИЛПИ-2-7К-А ( $\lambda = 665$  нм,  $\Delta\lambda = 0,1$  нм,  $\tau_{\text{имп}} = 1$  мкс,  $P_{\text{имп}} = 10$  мВт, скважность 10). Для стыковки полупроводниковых лазеров с одномодовыми световодами по схеме рис. 1, а применялись цилиндрические линзы, в одном случае с фокусным расстоянием первой линзы  $f^{(1)} = 45$  мкм (диаметр отрезка оптического волокна  $D^{(1)} = 60$  мкм), в другом — с  $f^{(2)} = 22,5$  мкм ( $D^{(2)} = 30$  мкм).

Радиусы  $\omega_0$ ,  $\omega_{\perp}$ ,  $\omega_{||}$  рассчитывались по результатам измерений распределений интенсивности излучения на выходе ОВС (рис. 3) и полупроводникового лазера (рис. 4) в дальней зоне на основе выражения (1). Полученные значения для радиусов пучка полупроводникового лазера  $\omega_{\perp} \approx 0,35$  мкм,  $\omega_{||} \approx 3$  мкм и ОВС  $\omega_0 \approx 2,4$  мкм использовались далее для расчета параметров оптической схемы и оценки эффективности ввода. Обобщенный параметр пучка полупроводникового лазера  $q_{||} = \pi\omega_{||}^2/\lambda = 42,5$  мкм, обобщенный параметр основной моды ОВС  $q_0 = \pi\omega_0^2/\lambda = 27,2$  мкм,  $\eta = 8,6$ ;  $l^{(1)} = (\omega_{\perp}/\omega'_{\perp})^{(1)} = 6,25$ ;  $l^{(2)} = (\omega_{\perp}/\omega'_{\perp})^{(2)} = 4$ ;  $(f_1/f_2)^{(1)} = 4,6$ ;  $(f_1/f_2)^{(2)} = 2,8$ . Коэффициент эффективности ввода излучения полупроводникового лазера в ОВС:  $K_{\text{max}}^{(1)} = 35\%$  — для цилиндрической линзы с фокусным расстоянием  $f^{(1)} = 45$  мкм;  $K_{\text{max}}^{(2)} = 59\%$  —  $f^{(2)} = 22,5$  мкм.

Схема стыковки полупроводникового лазера с ОВС соответствовала приведенной на рис. 1, а. В эксперименте фокусные расстояния сферических линз выбирались соответственно  $f_1 = 20$  мм,  $f_2 = 6$  мм, так что  $f_1/f_2 = 3,3$ . Погрешность установки цилиндрической линзы вдоль оптической оси  $\sim 10\%$  от ее фокусного расстояния. При этом экспериментально достигнутая эффективность ввода излучения одномодового полупро-

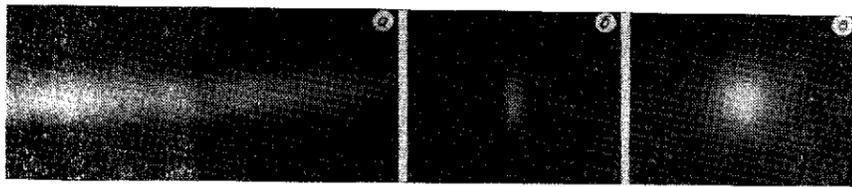


Рис. 5. Пучок полупроводникового лазера в дальней зоне без цилиндрической линзы (а), с цилиндрической линзой (б) и на выходе ОВС (в)

водникового лазера в ОВС составила 25 % для цилиндрической линзы с фокусным расстоянием  $f^{(1)} = 45$  мкм и 40 % — с  $f^{(2)} = 22,5$  мкм. Более низкие экспериментальные значения эффективности ввода по сравнению с теоретическими оценками обусловлены главным образом потерями из-за френелевских отражений на линзах, а также гранях ОВС. На рис. 5 приведен пучок полупроводникового лазера в дальней зоне без цилиндрической линзы (а), с цилиндрической линзой  $f^{(2)} = 22,5$  мкм (б) и на выходе ОВС (в).

Таким образом, теоретически и экспериментально показана возможность стыковки одномодового полупроводникового лазера, имеющего значительную асимметрию диаграммы излучения, с одномодовым волоконным световодом с эффективностью  $\sim 40$  % путем сочетания методов цилиндрической микролинзы и двух софокусных сферических линз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen L. G. Power coupling from GaAs injection laser into optical fibers // *Bell. Syst. Tech. J.*— 1972— 51, N 3.— P. 573.
2. Koharzadeh Y. Injection laser coupling to optical wave-guides with integral lenses // *J. Appl. Phys.*— 1976.— 47, N 1.— P. 477.
3. Cohen L. G., Schneider M. V. Microlenses for coupling junction lasers to optical fibers // *Appl. Opt.*— 1974.— 13.— P. 89.
4. Weidel E. Light coupling from a junction laser into monomode-fiber with glass cylindrical lens on the fiber end // *Opt. Commun.*— 1974.— 12.— P. 93.
5. Weidel E. New coupling method for GaAs laser-fiber coupling // *Electron. Lett.*— 1975.— 11.— P. 436.
6. Maeda M., Ikushima I., Nagano K. et al. Hybrid laser-to-fiber coupler with a cylindrical lens // *Appl. Opt.*— 1977.— 16, N 7.— P. 1966.
7. Saruwatari M., Nawata K. Semiconductor laser to single-mode fiber coupler // *Appl. Opt.*— 1979.— 18, N 11.— P. 1847.
8. Lee K. S., Bames F. S. Simple side coupler for coupling between laser diode and single-mode optical fiber // *Appl. Opt.*— 1987.— 25, N 12.— P. 2294.
9. Odagiri Y., Shikada M., Kobagashi K. High efficiency laser-to-fiber coupling circuit using a combination of a cylindrical lens and a selffocusing lens // *Electron. Lett.*— 1977.— 13, N 14.— P. 395.
10. Аюнд Ю. X., Беловолов М. И., Бородулин Б. И. и др. Согласование одномодовых световодов с полупроводниковыми лазерами // *Квантовая электроника*.— 1982.— 9, № 11.
11. Saruwatari M., Sugie T. Efficient laser diode to single-mode fiber coupling using a combination of two lenses on confocal condition // *IEEE J. of Quant. Electron.*— 1981.— QE-17, N 6.— P. 1021.
12. Kawano K., Saruwatari M., Mitoni O. A new confocal combination lens method for a laser diode module using a single-mode fiber // *J. Lightwave Technology*.— 1985.— LT-3.— P. 739.
13. Murakami Y., Yamada J., Sakai J. et al. Microlens tipped on a single-mode fiber end for InGaAsP laser coupling improvement // *Electron. Lett.*— 1980.— 16.— P. 322.
14. Lee K. S., Bames F. S. Microlenses on the end of single-mode optical fibers for laser applications // *Appl. Opt.*— 1985.— 24.— P. 3134.
15. Базаров А. Е., Гарман И., Голдобин И. С. и др. Излучательные характеристики лазерных и суперлюминесцентных диодов с градиентным волокном // *ЖТФ*.— 1987.— № 5.
16. Беловолов М. И., Дианов Е. М., Крюков А. П. Модуль эффективной стыковки промывленного полупроводникового лазера ИЛПН-204 с одномодовым волоконным световодом // *Электросвязь*.— 1986.— № 8.
17. Yamada J., Murakami Y., Sakai J., Kimura T. Characteristics of a hemispherical microlens for coupling between a semiconductor laser and single-mode fiber // *IEEE J. Quantum. Electron.*— 1980.— QE-16.— P. 1067.
18. Kayoun P., Puech C., Papuchon M., Arditty H. J. Improved coupling between laser diode and single-mode fiber tipped with a chemically etched self-centered diffracting element // *Electron. Lett.*— 1981.— 17.— P. 401.
19. Когельник Г., Ли Т. Резонаторы и световые пучки лазеров // *ТНПЭР*.— 1966.— 54, № 10.
20. Kogelnik H. Coupling and conversion coefficients for optical modes // *Proc. Symp. on Quasi-Optics*.— Brooklyn: Polytechnic Press, 1964.— P. 333.

Поступила в редакцию 16 января 1989 г.