

УДК 535.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СОГЛАСОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ОДНОМОДОВЫМ ВОЛОКНОМ ПРИ ПОМОЩИ МИКРООБЪЕКТИВА

П. В. Амосов, С. И. Божевольный, П. С. Радько

Рассчитаны параметры микрообъектива для согласования полупроводникового лазера с одномодовым оптическим волокном. Определена требуемая точность юстировки лазера и волокна относительно объектива. Проведено экспериментальное исследование согласования лазера с волокном и получена эффективность согласования 25 %. Мощность излучения, вводимого в волокно, достигала 1 мВт.

Разработка широкополосных волоконно-оптических линий связи требует использования одномодовых оптических волокон (ООВ). Это в свою очередь ставит задачу эффективного согласования полупроводниковых лазеров (ПЛ) с ООВ. Такая же проблема возникает при создании различного рода интегрально-оптических систем обработки информации. Поскольку характерные размеры распределений интенсивности излучения на торцах ПЛ и ООВ составляют соответственно ~ 2 и ~ 10 мкм, то непосредственная стыковка имеет низкую эффективность $\eta \sim 10$ %. К настоящему времени исследованы разнообразные методы согласования ПЛ с ООВ [1-6], которые можно условно разбить на две группы: методы, в которых согласование достигается за счет создания соответствующей формы вводного конца волокна [1-4], и методы, в которых между лазером и торцом волокна располагаются согласующие элементы [3, 5, 6].

Следует отметить, что методы из первой группы основаны на использовании сложных технологических процессов так, что вопросы воспроизводимости полученных результатов до конца не решены. Достигнутое в этой группе рекордное значение эффективности согласования $\eta = 75$ % [4] требует точности юстировки волокна относительно лазера ~ 0.5 мкм, которую можно обеспечить только в лабораторных условиях. Среди методов второй группы лучшие результаты ($\eta \approx 50$ %) достигнуты при использовании в качестве согласующих элементов сферической линзы и селфока, к торцу которого жестко присоединено ООВ [6]. Однако изготовление требуемой короткофокусной сферической линзы радиусом $r \approx 400$ мкм и юстировка ее положения с точностью ~ 0.5 мкм также требуют решения сложных технологических проблем.

Представляется целесообразным снизить требования к точности юстировки и применить по возможности более простые и надежные методы, даже если это и приведет к уменьшению эффективности согласования. Наиболее традиционными согласующими элементами в оптике являются линзы, причем достаточно отработана технология изготовления линз с фокусными расстояниями вплоть до нескольких миллиметров. Вследствие большой расходимости излучения ПЛ согласование с помощью одной или двух линз требует использования линз с фокусными расстояниями 10 [3] или 500 мкм [6]. Применение для согласования трех линз позволяет соответственно увеличить их фокусные расстояния.

В настоящей работе проводится исследование согласования ПЛ с ООВ при помощи микрообъектива, состоящего из трех относительно длиннофокусных ($f > 1$ мм) линз. С помощью закона ABCD [7] преобразования гауссовых пучков

рассчитываются параметры микрообъектива для оптимального согласования и допустимые пределы их изменений. Определяется требуемая точность юстировки ПЛ и ООВ относительно объектива. Сообщаются результаты экспериментального исследования согласования лазера ИЛПН-203 (длина волны генерации $\lambda \approx 0.85$ мкм) с ООВ (диаметр сердцевины $2a = 5.3$ мкм, приращение показателя преломления $\Delta n = 3.7 \cdot 10^{-3}$).

Расчет параметров микрообъектива

Рассмотрим согласование ПЛ и ООВ при помощи объектива, состоящего из трех линз (рис. 1), которые вначале будем считать тонкими. Для упрощения расчетов и конструкции объектива будем рассматривать линзы с одинаковым фокусным расстоянием f .

Распределение интенсивности излучения на торце каналного ПЛ (плоскость I на рис. 1) можно аппроксимировать эллиптической гауссовой функцией с полуширинами ω_{\perp} и ω_{\parallel} в направлениях, перпендикулярном и параллельном пло-

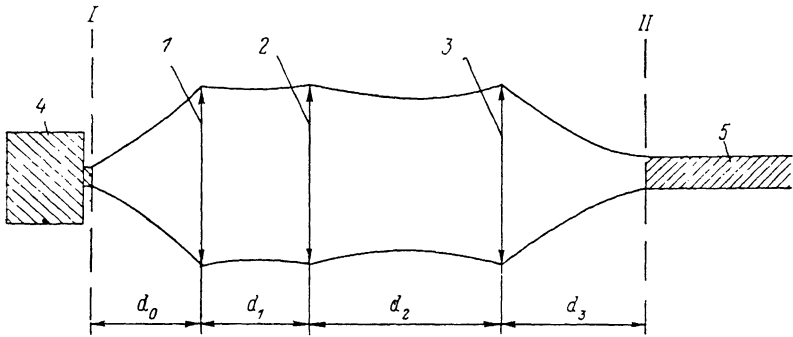


Рис. 1. Схема согласования ПЛ с ООВ.

1—3 — линзы, 4 — ПЛ, 5 — ООВ.

скости p — n -перехода. Распределение интенсивности излучения на торце ООВ симметричное, и его полуширину обозначим через ω_0 . Эллиптические гауссовы пучки излучения преобразуются осесимметричной системой линз независимо в перпендикулярных плоскостях [7]. Поэтому, вообще говоря, положение перетяжек в этих плоскостях после прохождения системы линз не совпадает вдоль оси распространения. Однако если длина каустики пучка мала по сравнению с расстоянием до линзы, то перетяжки пучка после линзы в перпендикулярных плоскостях находятся практически на одном расстоянии от линзы. В этом случае преобразование пучка в перпендикулярных плоскостях происходит подобным образом, так что достаточно рассматривать преобразование пучка излучения только в одной плоскости.

Обозначим значения полуширин пучка излучения ПЛ после прохождения системы линз в перетяжке (плоскость II на рис. 1) через ω'_{\perp} и ω'_{\parallel} . Тогда эффективность согласования лазера с волокном определяется следующим соотношением [6]:

$$\eta = 4 \left/ \left(\frac{\omega_{\perp}}{\omega'_{\perp}} + \frac{\omega'_{\perp}}{\omega_0} \right) \left(\frac{\omega_{\parallel}}{\omega'_{\parallel}} + \frac{\omega'_{\parallel}}{\omega_0} \right) \right. \quad (1)$$

Можно показать, что эффективность достигает максимума при $\omega_0 = \sqrt{\omega'_{\perp} \omega'_{\parallel}}$ и, следовательно, условие оптимального согласования с учетом соотношения подобия $\omega_{\perp}/\omega_{\parallel} = \omega'_{\perp}/\omega'_{\parallel}$ выражается следующим образом:

$$\omega'_{\perp} = \omega_0 \sqrt{\omega_{\perp}/\omega_{\parallel}} \quad \text{или} \quad \omega'_{\parallel} = \omega_0 \sqrt{\omega_{\parallel}/\omega_{\perp}} \quad (2)$$

Уравнения (2) приводят к формуле для максимальной эффективности согласования ПЛ с ООВ осесимметричной системой линз [6]

$$\eta_0 = 4 \left/ \left(\sqrt{\frac{\omega_{\parallel}}{\omega_{\perp}}} + \sqrt{\frac{\omega_{\perp}}{\omega_{\parallel}}} \right)^2 \right. \quad (3)$$

которая показывает, что максимальная эффективность определяется только степенью эллиптичности излучения ПЛ. Следует отметить, что наличие аббераций в реальной системе линз не позволяет достичь эффективности, соответствующей выражению (3).

Получим уравнения, связывающие параметры микрообъектива, при выполнении условий (2) оптимального согласования. Введем комплексный параметр q гауссового пучка [7]

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi n \omega^2}, \quad (4)$$

где R — радиус кривизны гауссового пучка; n — показатель преломления среды (в нашем случае $n=1$); λ — длина волны излучения в вакууме, ω — полуширина гауссового пучка, причем величины ω , R , q относятся к одной плоскости, перпендикулярной оптической оси. Если обозначить через q_1 — комплексный параметр пучка во входной плоскости I , а через q_2 — в выходной плоскости II (рис. 1), то по известному закону ABCD [7]

$$q_2 = (Aq_1 + B)/(Cq_1 + D), \quad (5)$$

где A , B , C , D — элементы лучевой матрицы $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$, связывающей выходную плоскость II с входной плоскостью I . Параметры q_1 и q_2 рассматриваются в плоскостях, где ширина пучка наименьшая ($R = \infty$), а значит, в сечении, перпендикулярном p — n -переходу

$$q_1 = i \frac{\pi}{\lambda} \omega_1^2, \quad q_2 = i \frac{\pi}{\lambda} \omega_2^2. \quad (6)$$

Подставляя соотношения (6) в выражение (5), получаем, приравнивая действительные и мнимые части, систему двух уравнений

$$\begin{aligned} B + (\pi \omega_1 \omega_2' / \lambda)^2 C &= 0, \\ \omega_1'^2 D - \omega_1^2 A &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где ω_1' при оптимальном согласовании удовлетворяет условию (2). Поскольку плоский слой толщины d и показателя преломления $n=1$ описывает матрица $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, а тонкую линзу с фокусным расстоянием f матрица $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$, то в рассматриваемом случае (для 7-компонентной среды) посредством последовательного перемножения матриц получаем для коэффициентов A , B , C , D следующие соотношения (рис. 1):

$$\begin{aligned} A &= 1 - \frac{2d_2 + 3d_3}{f} + \frac{2d_2d_3}{f^2} - \frac{d_1}{f} \left(1 - \frac{d_2 + 2d_3}{f} + \frac{d_2d_3}{f^2} \right), \\ B &= d_0 + d_2 + d_3 - \frac{d_0}{f} (2d_2 + 3d_3) + \frac{d_2d_3}{f} \left(\frac{2d_0}{f} - 1 \right) + \\ &\quad + d_1 \left(1 - \frac{d_0}{f} \right) \left(1 - \frac{d_2 + 2d_3}{f} - \frac{d_2d_3}{f^2} \right), \\ C &= \frac{1}{f} \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{f} - \frac{d_1d_2}{f^2} - 3 \right], \\ D &= \frac{d_0}{f} \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{f} - \frac{d_1d_2}{f^2} - 3 \right] + \left(1 - \frac{d_2 + 2d_1}{f} - \frac{d_1d_2}{f^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Параметры ПЛ и ООВ — величины ω_1 , ω_1' , ω_0 — определяются экспериментальным путем. Таким образом, система (7) содержит пять неизвестных: f , d_0 , d_1 , d_2 , d_3 и, следовательно, имеет неединственное решение. Поэтому возможные значения параметров микрообъектива при выполнении условий (2) оптимального согласования занимают некоторый интервал, что существенно упрощает создание такого объектива.

Рассмотрим возможные ограничения допустимых значений параметров объектива. Заметим, что в реальной системе линз расстояния $d_0 \div d_3$ соответствуют расстояниям, связанным с главными плоскостями линз. Это ограничивает величины $d_0 \div d_3$ снизу. Для простоты рассмотрим симметричную двояковыпуклую линзу с радиусом R кривизны поверхности и показателем преломления $n=1.5$. Фокусному расстоянию $f=6$ мм соответствует $R=6$ мм. Если принять радиус линзы $r=3$ мм, то ее толщина будет $t \approx 2$ мм и расстояние d от главной плоскости до поверхности линзы вдоль оптической оси $d \approx 0.7$ мм [8]. Поэтому были выбраны следующие ограничения: $d_0, d_3 \geq 1$ мм; $d_1, d_2 \geq 2$ мм, а в целях компактности рассматривались только значения $d_3 \leq 10$ мм. Для параметров лазера и волокна $\omega_1=0.5$ мкм, $\omega_0=2.5$ мкм, $\omega_0=3.7$ мкм были рассчитаны с учетом огра-

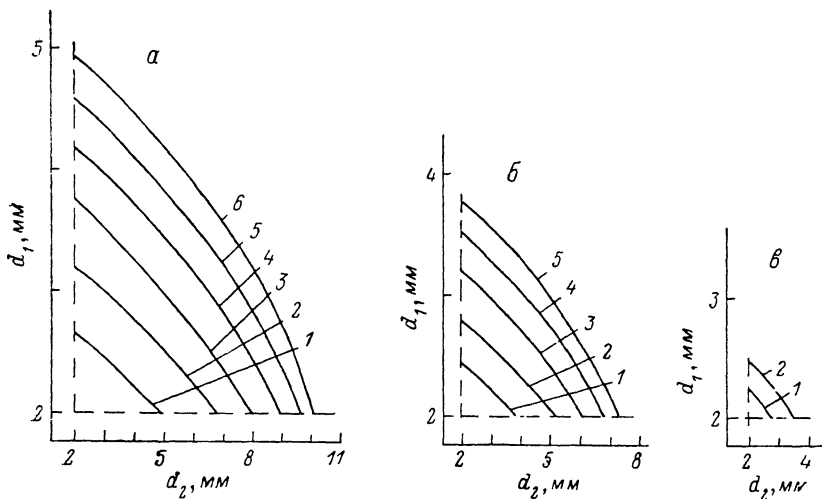


Рис. 2. Графики расчетных значений расстояний между линзами d_1 и d_2 для фокусных расстояний $F=10$ (а), 8 (б), 6 мм (в) при различных значениях d_0 от ПЛ до объектива.

а: 1 — $d_0=2.95$ мм, 2 — 2.6, 3 — 2.25, 4 — 1.9, 5 — 1.55, 6 — 1.2; б: 1 — 2.12, 2 — 1.85, 3 — 1.58, 4 — 1.31, 5 — 1.04; в: 1 — 1.26, 2 — 1.07.

ничений области допустимых значений расстояний d_1 и d_2 между линзами для фокусных расстояний $f=6, 8, 10$ мм (рис. 2). На этом же рисунке указаны соответствующие значения d_0 — расстояния лазера до микрообъектива. Видно, что расстояния d_1 и d_2 могут изменяться в широких пределах, т. е. нет необходимости жестко выдерживать их значения при изготовлении объектива. Если же при юстировке ПЛ и ООВ выдержать соответствующие значения d_0 и d_3 , то теоретически возможно (без учета aberrаций) добиться эффективности согласования η , определяемой выражением (3), что при наших параметрах ПЛ и ООВ составляет $\eta_0=55\%$.

Рассмотрим ограничения на радиус линз объектива, связанные с большой расходимостью излучения ПЛ. Как видно из рис. 2, характерная величина расстояния ПЛ до микрообъектива $d_0 \leq 2$ мм, что при расходимости излучения ПЛ примерно $\theta \leq 0.5$ приводит к следующим размерам пучка на первой линзе $a_1 \leq 2$ мм, а на второй и третьей $a_2, a_3 \leq 4$ мм. Таким образом, радиус линз $r \geq 3$ мм обеспечит с запасом преобразование объективом всего пучка излучения ПЛ. Заметим, что при таких размерах пучка излучения на линзах объектива aberrации будут заметными, что приведет к уменьшению величины эффективности согласования.

Расчет точности юстировки ПЛ и ООВ

При согласовании ПЛ с ООВ довольно сложно точно выдержать расчетное значение расстояния d_0 от лазера до объектива, а точнее до главной плоскости первой линзы. Поэтому представляет интерес зависимость эффективности согласования от величины d_0 при фиксированных значениях параметров объектива

d_1 , d_2 и f . Соответствующие зависимости для трех наборов типичных значений d_1 , d_2 , f были рассчитаны по формулам (1), (7), (8) при условии, что ООВ каждый раз располагается в месте перетяжки пучка излучения, прошедшего объектив (рис. 3). Проведенные расчеты показывают слабую зависимость $\eta = \eta(d_0)$, и что расстояние от ПЛ до объектива достаточно устанавливать с точностью ≈ 500 мкм. Смещение ПЛ перпендикулярно оптической оси на величину Δ приводит к смещению перетяжки пучка излучения, прошедшего объектив, на величину $m\Delta$ (где m — увеличение объектива) и к отклонению оси пучка на угол Δ/f [8]. Смещение перетяжки пучка можно компенсировать соответствующим смещением ООВ, однако при этом остается еще угловая расстройка. Характерная величина допустимой угловой расстройки составляет $\sim 2 \cdot 10^{-2}$, что при $f=6$ мм приводит к допустимой величине смещения ПЛ перпендикулярно оптической оси объектива $\Delta \approx 120$ мкм.

Таким образом, при наличии юстировки ООВ вдоль и перпендикулярно к оптической оси объектива требуемая точность размещения ПЛ вдоль оптической оси и в плоскости, перпендикулярной к ней, составляет 500 и 100 мкм при фокусном расстоянии линз $f \geq 5$ мм. Такую точность нетрудно обеспечить без специальных юстировочных устройств, что делает возможным жесткую компоновку ПЛ и микрообъектива в одном корпусе.

Рассмотрим теперь зависимость эффективности согласования ПЛ с ООВ от поперечных и продольных смещений, а также от угла поворота ООВ

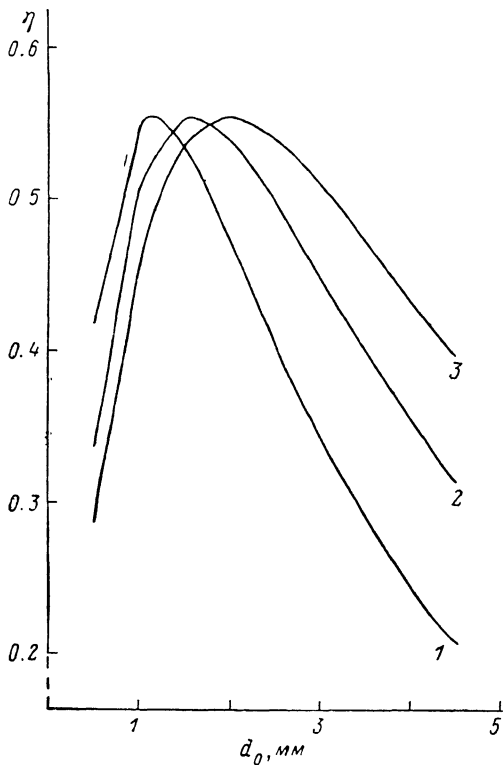


Рис. 3. Расчетные зависимости эффективности согласования ПЛ с ООВ от расстояния d_0 ПЛ от объектива для трех наборов параметров объектива.

f (мм), d_1 (мм), d_2 (мм): 1 — 6, 2.1, 3; 2 — 8, 2.6, 4.5; 3 — 10, 3.1, 6.

относительно оси пучка излучения, прошедшего через объектив. Эффективность согласования определяется интегралом перекрытия поля $E_0(x, y)$ моды ООВ и поля $E_1(x, y)$ излучения ПЛ в плоскости торца ООВ

$$\eta = \left| \iint E_0(x, y) E_1(x, y) dx dy \right|^2, \quad (9)$$

где поля $E_0(x, y)$ и $E_1(x, y)$ предполагаются нормированными, а координаты x и y лежат в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Следуя методике вычислений, подробно изложенной в работе [9], были рассчитаны зависимости эффективности согласования от поперечных смещений ООВ от оптической оси в плоскости и перпендикулярно p - n -переходу для параметров перетяжки пучка излучения ПЛ после объектива $\omega'_1 = 3.5$ мкм и $\omega'_n = 7$ мкм и при том же значении полуширины $\omega_0 = 3.7$ мкм поля моды ООВ (рис. 4, а). Допустимые значения поперечных смещений ООВ до увеличения потерь при согласовании на 1 дБ составляют $\Delta_x \approx \pm 3$ мкм, $\Delta_y \approx \pm 2$ мкм. Также были рассчитаны зависимости эффективности от смещения ООВ вдоль оптической оси по отношению к перетяжке пучка излучения ПЛ после объектива (рис. 4, б) и от угла поворота ООВ относительно оптической оси (рис. 4, в). Допустимые значения составляют для осевого смещения $\Delta_z \approx \pm 80$ мкм, углового поворота $\Delta_\alpha \approx \pm 2^\circ$. Таким обра-

зом, для юстировки ООВ в плоскости, перпендикулярной оптической оси микрообъектива, требуется использование достаточно точных перемещений или специального юстировочного устройства.

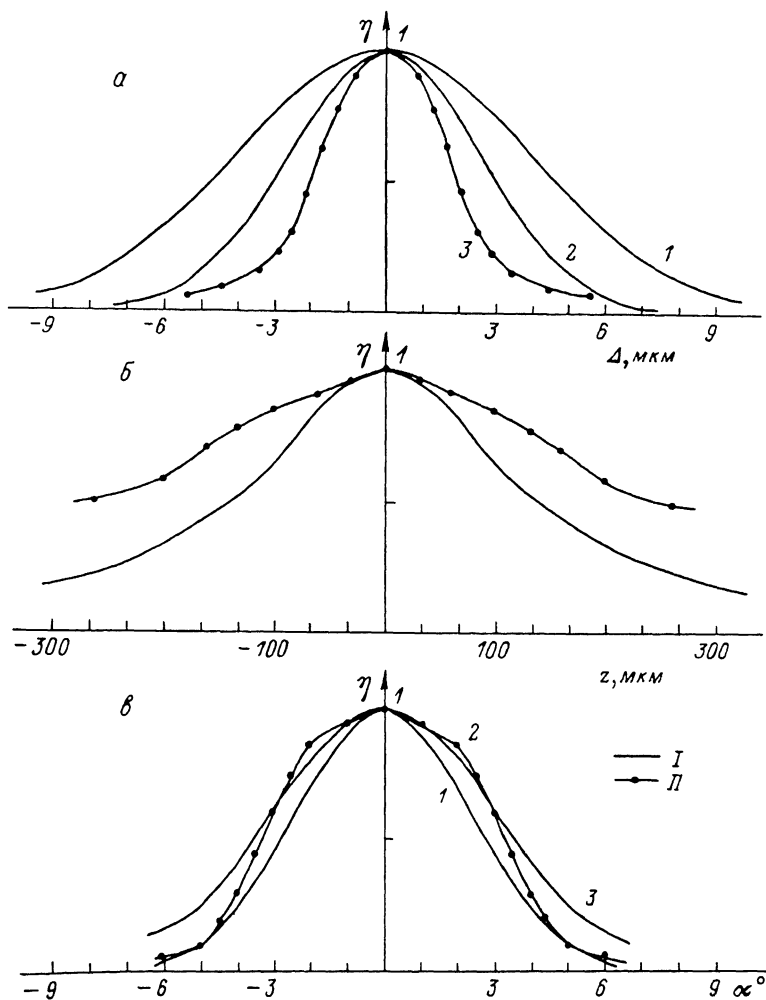


Рис. 4. Зависимости эффективности согласования ПЛ с ООВ от смещения ООВ (а) в плоскости (I) и перпендикулярно $p-n$ -переходу (2, 3), от смещения вдоль оптической оси (б) и угла поворота ООВ (в) относительно оптической оси в плоскости (1, 2) и перпендикулярно $p-n$ -переходу (3).

I — расчет, II — эксперимент.

Экспериментальное согласование ПЛ с ООВ

Нами было проведено экспериментальное исследование согласования лазера ИЛПН-203 ($\lambda \approx 0.85$ мкм) с ООВ (диаметр сердцевины $2a = 5.3$ мкм, $\Delta n = 3.7 \times 10^{-3}$, длина волны отсечки второй моды $\lambda_c \approx 0.75$ мкм) при помощи микрообъектива, состоящего из трех одинаковых линз с фокусным расстоянием $f = 6.3$ мм и диаметром $2r = 5.3$ мм. Расстояния между соответствующими главными плоскостями линз составляли $d_1 \approx 1400$ мкм и $d_2 \approx 1600$ мкм. На поверхности линз были напылены просветляющие покрытия, однако измеренные потери излучения при прохождении объектива составляли $\leq 20\%$, что связано, по-видимому, с различными углами падения излучения ПЛ на линзы, в особенности на первую. Были измерены параметры распределений интенсивности излучения на торце лазера, в фокусе микрообъектива и на торце волокна при возбуждении его ПЛ. Измерения проводились путем отображения объекта микроскопом на катод телекамеры с последующим выводом строки на осциллограф. Полученные таким

образом значения параметров составляли: $\omega_{\perp} \approx 0.5$ мкм, $\omega_{\parallel} \approx 2.5$ мкм, $\omega'_{\perp} \approx 3.5$ мкм, $\omega'_{\parallel} \approx 7$ мкм, $\omega_0 \approx 3.7$ мкм. Отметим, что распределение излучения ПЛ зависело от тока накачки [3] и приведенные значения относятся к току $I \approx 60$ мА (пороговое значение $I_0 \approx 50$ мА). Согласно (7), (8), были рассчитаны значения параметров пучка излучения ПЛ в фокусе микрообъектива: $\omega'_{\perp} = 1.3$ мкм, $\omega'_{\parallel} = 6.8$ мкм ($d_0 \approx 2.2$ мм). Отличие расчетных значений от экспериментально измеренных связано скорее всего с аберрациями микрообъектива, которые особенно сильно сказываются в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, где излучение ПЛ имеет значительную расходимость.

При экспериментальном исследовании согласования ПЛ вместе с микрообъективом был заключен в единый корпус вплотную друг к другу и специально не юстировался. ООВ закреплялось на площадке, которая могла перемещаться в плоскости, перпендикулярной оптической оси, с точностью ≈ 0.3 мкм, а вдоль оптической оси с точностью ≈ 10 мкм. Кроме того, угол наклона ООВ относительно оптической оси объектива устанавливался с точностью $\approx 0.1^\circ$. Эффективность согласования ПЛ с ООВ определялась как отношение мощности излучения на выходе ООВ (длина 10 м) к мощности излучения ПЛ, так что потерями излучения на отражение от торцов ООВ и при распространении в волокне пренебрегалось. Максимальная эффективность согласования зависела от тока накачки и достигала наибольшей величины $\eta \approx 25\%$ при токе накачки $I \approx 60$ мА. Подобная зависимость $\eta(I)$ отмечалась в работе [3] и связана с зависимостью распределения излучения ПЛ на торце от тока накачки. Вид $\eta(I)$ отличался для различных исследованных лазеров ИЛПН-203, однако для всех ПЛ эффективность согласования достигала максимума при токе накачки, незначительно превышающем пороговое значение. При дальнейшем увеличении тока накачки эффективность уменьшалась, хотя значение мощности излучения, вводимого в волокно, увеличивалось. Максимальная мощность излучения, введенного в ООВ, в непрерывном режиме работы ПЛ составила 1 мВт при токе накачки $I \approx 100$ мА. Заметим, что у половины из исследованных нами лазеров при $I \geq 60$ мА режим генерации излучения становился многомодовым, и в этом случае эффективность согласования не превышала 10%.

Использованный нами объектив не являлся оптимальным, так как не выполнялись условия (2), поэтому максимальная эффективность $\eta_0 = 55\%$ не могла быть достигнута в принципе. Кроме того, аберрации микрообъектива приводят к искажению волнового фронта пучка излучения ПЛ и, следовательно, к уменьшению эффективности согласования. О степени искажения волнового фронта можно судить по изменению отношения полуширин распределения излучения, которое составляет на торце ПЛ $\omega_{\perp}/\omega_{\parallel} \approx 0.2$, а в фокусе микрообъектива $\omega'_{\perp}/\omega'_{\parallel} \approx 0.5$. Отношение полуширин изменилось в 2.5 раза, тогда как при безаберрационном преобразовании пучка оно должно оставаться постоянным. Кроме того, распределение излучения на торце ПЛ только приблизительно описывается гауссовой функцией, что также уменьшает эффективность согласования. Рассмотренные причины являются, по нашему мнению, главными причинами, которые обуславливают относительно низкое значение достигнутой эффективности согласования $\eta \approx 25\%$ по сравнению с максимально возможной $\eta_0 = 55\%$.

С помощью точных перемещений ООВ были измерены зависимости эффективности согласования от поперечного смещения ООВ в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу (рис. 4, а, кривая 3), от смещения волокна вдоль оптической оси (рис. 4, б, кривая 2), а также от угла поворота ООВ относительно оптической оси в плоскости $p-n$ -перехода (рис. 4, в, кривая 3). Отличие экспериментальных и расчетных зависимостей характеризует отличие распределения излучения в фокусе объектива от распределения гауссового пучка. Более пологая экспериментальная зависимость $\eta(\alpha)$ свидетельствует о том, что фазовый фронт излучения в фокусе объектива не является плоским. Это же приводит к более крутой зависимости η от поперечных смещений. Более пологая по сравнению с расчетной экспериментальная зависимость $\eta(z)$ указывает, что при удалении от фокуса фазовый фронт излучения становится более близким к сферическому. Проведенные измерения показывают, что для эффективного согласования ПЛ с ООВ при помощи микрообъектива необходимо обеспечить в пло-

скости, перпендикулярной оптической оси, точность юстировки ≈ 1 мкм. Такую точность юстировки можно получить при помощи, например, специального стыковочного устройства.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведены теоретический анализ и экспериментальное исследование согласования ПЛ с ООВ при помощи микрообъектива, состоящего из трех относительно длиннофокусных ($f > 1$ мм) линз. Получены соотношения для определения параметров микрообъектива и рассчитаны оптимальные значения этих параметров для согласования лазера ИЛПН-203 с одномодовым волокном. Показано, что параметры объектива могут изменяться в широких пределах без нарушения условий оптимального согласования. Также показано, что юстировка ПЛ относительно микрообъектива обладает слабой критичностью. Это позволяет считать рассмотренный метод согласования ПЛ с ООВ более простым и надежным по сравнению с известными методами [1-6].

Проведено экспериментальное исследование согласования ПЛ, заключенного вместе с микрообъективом в единый корпус, с ООВ и получена эффективность согласования $\eta \approx 25$ %. Рассчитаны и экспериментально измерены зависимости эффективности согласования от координатных и угловых смещений ООВ. Рассмотрены возможные причины отличия расчетной от экспериментально достигнутой эффективности согласования. Максимальное значение мощности излучения, введенного в волокно, составило 1 мВт, что является достаточным для волоконно-оптических линий связи [3].

Следует заметить, что аналогичный микрообъектив можно использовать для согласования ПЛ с одномодовым канальным волноводом (ОКВ) в ниобате лития, а значит, с различного рода интегрально-оптическими устройствами. Если обозначить параметры распределения излучения на торце ОКВ в соответствующих плоскостях через ω_{\perp}^0 и ω_{\parallel}^0 , то условие оптимального согласования запишется следующим образом:

$$\omega'_{\perp} = \sqrt{\frac{\omega_{\perp}}{\omega_{\parallel}} \omega_{\perp}^0 \omega_{\parallel}^0} \quad \text{или} \quad \omega'_{\parallel} = \sqrt{\frac{\omega_{\parallel}}{\omega_{\perp}} \omega_{\perp}^0 \omega_{\parallel}^0}, \quad (10)$$

а максимальная эффективность согласования при этом дается выражением

$$\eta_0 = 4 \left| \left(\sqrt{\frac{\omega_{\perp} \omega_{\parallel}^0}{\omega_{\parallel} \omega_{\perp}^0}} + \sqrt{\frac{\omega_{\parallel} \omega_{\perp}^0}{\omega_{\perp} \omega_{\parallel}^0}} \right)^2 \right|. \quad (11)$$

В соотношениях (10), (11) предполагается, что плоскость среза кристалла с ОКВ параллельна плоскости p - n -перехода ПЛ, и одинаковые нижние индексы соответствуют одинаковым плоскостям. Видно, что выбором параметров ОКВ соответствующим образом ($\omega'_{\perp}/\omega'_{\parallel} = \omega_{\perp}/\omega_{\parallel}$) можно добиться 100 %-ного согласования ПЛ с ОКВ при помощи микрообъектива.

В заключение авторы выражают благодарность Е. М. Золотову за постоянное внимание к работе и полезные советы, Е. М. Дианову за предоставленные волокна.

Литература

- [1] Sakai J., Kimura T. IEEE. J. Quantum Electron., 1980, v. 16, N 10, p. 1059—1066.
- [2] Eisenstein G., Vitello D. Appl. Optics, 1982, v. 21, N 19, p. 3470—3474.
- [3] Аюнь Ю. X., Беловолов М. И., Бородулин В. И. и др. Квант. электр., 1982, т. 9, № 11, с. 2197—2203.
- [4] Schwander T., Schwanderer B., Storm H. Electron. Lett., 1983, v. 21, N 7, p. 287—289.
- [5] Saruwatari M., Nawata K. Appl. Optics, 1979, v. 18, N 11, p. 1847—1856.
- [6] Kawano K., Mitomi O., Saruwatari M. Appl. Optics, 1985, v. 24, N 7, p. 984—989.
- [7] Яриш А. Квантовая электроника. М.: Сов. радио, 1980.
- [8] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
- [9] Золотов Е. М., Казанский П. Г., Прохоров А. М. Квант. электр., 1982, т. 9, № 1, с. 165—168.