

## МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВОЛНОВОДА С ПОМОЩЬЮ ОДНОМОДОВОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

*О.А.Власенко, В.А.Сычугов, А.Е.Тихомиров*

Для многих применений оптоэлектроники задача эффективного согласования оптического волокна (ОВ) с волноводными структурами на основе полупроводников представляет значительный интерес и в настоящее время (см., например, [1,2]). Традиционной является задача согласования полупроводниковых (ПП) лазеров с волокном для применений в ВОЛС (волоконно-оптических линиях связи) [3], для создания узкополосных источников излучения на основе ПП лазеров с внешним резонатором, в качестве которого может быть использовано волокно, как, например, в [4,5].

Бурное развитие полупроводниковых технологий привело к созданию эффективных и быстродействующих модуляторов света [6], для которых согласование с ОВ также актуально.

Последние достижения в разработке ОВ легированных  $\text{Er}^{3+}$  с целью создания оптических волоконных усилителей в области длин волн  $\lambda \sim 1.5$  мкм делает задачу согласования с ПП лазером, используемым для накачки ОВ ( $\lambda \sim 0.98$  мкм), исключительно важной.

Существует большое количество работ, посвященных данным вопросам. Их решение может достигаться применением микролинзовых систем [7], согласованием волокна и лазера с помощью градиентных линз [2], при помощи фокона оттянутого и оплавленного торца волокна [8], а также путем применения специальной полировки торца, когда на нем формируется ребро, проходящее через область сердцевины [9] так, как показано на рис. 1,а. Достигнутая в этой работе эффективность согласования волоконного световода с ПП лазером составляла 37%.

Применение методики приготовления торца волокна с формированием цилиндрической поверхности на торце также известно [10]. Относительная простота этой методики и возможность формировать на торце ОВ линзу с различной кривизной в двух взаимно перпендикулярных направлениях делают ее привлекательной для исследования случая согласования ОВ, обработанного указанным образом, с ПП волноводной структурой.

Однако в указанной выше работе не обосновывается каким-либо образом выбор угла клина на торце волокна. В связи с этим мы предлагаем следующие соображения по поводу выбора этого угла.

Хорошо известно, что для безабберационной фокусировки профиль преломляющей поверхности  $y(x)$  должен отличаться от сферического и



Рис. 1. Торцы ОВ со сформированным ребром (а) и с линзой, полученной при помощи полировки (б).

удовлетворять уравнению гиперболы

$$y^2(x) - \frac{x^2}{n^2 - 1} = \frac{f^2}{(n + 1)^2}, \quad (1)$$

где  $f$  — фокусное расстояние линзы,  $n$  — показатель преломления фокусирующей среды.

Угол пересечения асимптотических прямых для уравнения (1) зависит лишь от показателя преломления и для ОВ с  $n \sim 1.45$  составляет  $\sim 87^\circ$ . Обработка торца волокна указанным выше образом (рис. 1, б) с формированием  $M$  угла при ребре  $87^\circ$  и последующим скруглением этого ребра может позволить приблизить получаемый профиль линзы к оптимальному, выраженному формулой (1).

Поскольку в волокне световой пучок ограничен размерами сердцевинны, то очевидно, что радиус кривизны линии, формируемой на ребре клина, не должен быть меньше, чем половина диаметра сердцевинны. Как показано в ряде работ, оптимальный радиус кривизны близок к радиусу сердцевинны ОВ и составляет 3–5 мкм.

Известно, что положение перетяжки гауссова пучка, прошедшего через линзу, располагается ближе к линзе, чем геометрический фокус, и это смещение  $\Delta f$  может быть выражено следующим образом [11]:

$$\Delta f = -\frac{f}{(1 + \pi^2 N^2)}, \quad (2)$$

$N = \omega^2 / (\lambda^2 f^2)$ ,  $\omega$  — половина диаметра гауссова пучка по уровню  $1/e$ .

Однако расчет фокусирующих характеристик реальных линз, строго говоря, должен проводиться с учетом ограничения апертуры падающего пучка и с учетом aberrаций линз. При этом размер перетяжки сфокусированного пучка, ее положение оказываются смещенными, а кроме того, положение максимальной интенсивности сфокусированного пучка в параксиальной области не совпадает с положением перетяжки. Такой расчет производился в [11].

В данной работе экспериментально исследовано согласование ПП волновода в ОВ, на торце которого сформирована путем полировки линза с радиусом  $\sim 5$  мкм. Полупроводниковый волновод представлял из себя пленку  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$  толщиной 2 мкм, выращенную МОС-гидридным методом на подложке GaAs, легированного Te до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Показатель  $n$  преломления такой волноводной пленки составляет  $\sim 3.45$  и потери в волноводе не превышают величину 1 дБ/см [12]. На поверхности волновода была сформирована путем реактивного ионного травления через фоторезистивную маску дифракционная решетка с периодом  $\sim 0.4$  мкм и длиной  $\sim 10$  мм. Торцы волновода приготавливались путем скалывания

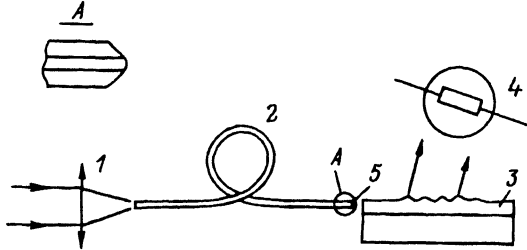


Рис. 2. Схема установок для возбуждения ПП волновода.

1 — объектив ( $\times 9$ ,  $NA = 0.2$ ), 2 — ОВ, 3 — ПП волновод, 4 — фотосопротивление ФСВ-16, 5 — выходной торец ОВ.

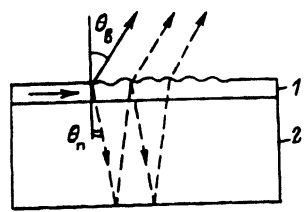


Рис. 3. Схема процесса вывода излучения.

1 — волноводная пленка, 2 — подложка. Прямая линия — излучение, выведенное в воздух; штриховая — в подложку.

вдоль направления  $\langle 110 \rangle$ . В качестве источника излучения использовался одноимодовый He-Ne лазер с длиной волны  $\lambda = 1.153$  мкм. Для стыковки волокна с ПП волноводом применялся трехкоординатный микропозиционер с точностью перемещения 0.3 мкм. Регистрация излучения производилась при помощи фотосопротивления на PbS. Схема установки представлена на рис. 2.

Излучение лазера после прохождения через ОВ фокусировалось на торце ПП волновода. Излучение, распространяющееся по волноводу, взаимодействует с гофрированной поверхностью и при этом излучается как в сторону воздуха, так и в сторону подложки. Излучение, выведенное в воздух, детектировалось фотоприемником 4.

Схема процесса излучения показана на рис. 3. Углы  $\theta_b$ ,  $\theta_n$  связаны с параметрами волновода соотношениями

$$n^* - \frac{\lambda}{\Lambda} = \sin \theta_b,$$

$$n^* - \frac{\lambda}{\Lambda} = n \sin \theta_n, \quad (3)$$

$n^*$ ,  $n_n$  — эффективный показатель преломления волновода и показатель преломления подложки соответственно;  $\Lambda$  — период решетки;  $\lambda$  — длина волны падающего излучения.

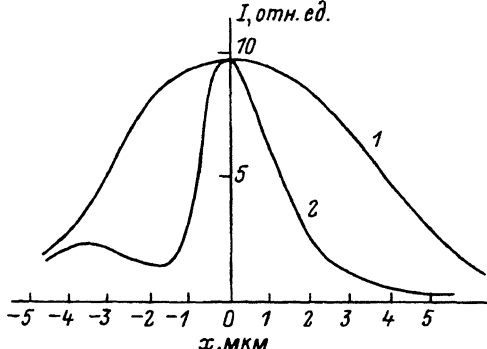
Эффективность возбуждения волновода  $\eta$  определялась из соотношения

$$\eta = \frac{I_{\text{вв}}}{T \cdot I_{\text{пад}}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{n \cos \theta_n}{\cos \theta_b}\right)}{\left(1 + \frac{R \cdot T}{1 - R^2} \frac{n \cos \theta_n}{\cos \theta_b}\right)} \quad (4)$$

где  $I_{\text{вв}}$  — интенсивность излучения, выведенного в воздух,  $I_{\text{пад}}$  — интенсивность излучения из волокна,  $R$  и  $T$  — френелевские коэффициенты соответственно отражения и пропускания на границе полупроводник-воздух.

Эффективность возбуждения волновода без учета отражения на склоте торце и потерь, связанных с рассеянием на решетке, составила величину  $\sim 65\%$ . Изучалось распределение интенсивности оптического поля вблизи перетяжки пучка, выведенного из волокна. С этой целью использовалась оптическая система с увеличением  $\Gamma = 400$ . Оптическое

Рис. 4. Распределение поля вблизи перетяжки выведенного из ОВ излучения. 1 — распределение поля вдоль образующей цилиндрической поверхности линзы, 2 — в перпендикулярном направлении.



изображение перетяжки сканировалось фотодиодом с диаметром светочувствительной площадки 300 мкм. Разрешающая способность оптической системы была не хуже 1 мкм. Распределение поля в двух взаимно перпендикулярных направлениях представлено на рис. 4. Кривая 1 приблизительно соответствует распределению поля в волокне с диаметром моды по уровню  $1/e \sim 10$  мкм. Полная ширина распределения другой кривой по такому же уровню  $\sim 2.5$  мкм. Асимметричный вид распределения связан, по-видимому, с погрешностями, допущенными при полировке линзы. Измерялось положение перетяжки пучка по отношению к торцу ОВ. Это расстояние оказалось равным  $10 \pm 1$  мкм, что с учетом поправки, выраженной формулой (2), хорошо соответствует положению геометрического фокуса.

Как уже отмечалось, размер перетяжки сфокусированного пучка  $\sim 2.5$  мкм, и в то же время эффективная толщина ПП волновода составляла  $\sim 2.8$  мкм; это обстоятельство, а также асимметрия распределения поля в таком волноводе обусловили то, что коэффициент согласования, достигнутый нами, оказался всего лишь  $\sim 65\%$ , а не  $95\%$ , как упоминалось в работе [10].

Отметим здесь еще один момент, характеризующий описанную методику согласования. Как оказалось, торец волокна, обработанный в виде прямоугольной призмы, отражает часть распространяющегося в волокне излучения. Определение коэффициента отражения проводилось путем сравнения интенсивности выведенного излучения  $I_B$  с полной интенсивностью излучения в волокне  $I_n$ , согласно соотношению

$$K = \frac{I_n - I_B}{I_n}. \quad (5)$$

Для определения  $I_n$  торец волокна и фотоприемник погружались в иммерсионную жидкость с показателем преломления  $\sim 1.45$ , в результате чего отражение от сполитованного торца исчезло.

Коэффициент  $K$  отражения не превышая 20%. Напыление просветляющих отражающих покрытий, вероятно, позволит его существенно уменьшить. Таким образом, экспериментально показано, что эффективное согласование ПП волновода с волокном может быть успешно достигнуто путем создания цилиндрической линзы на поверхности сердцевинны волокна.

Список литературы

- [1] Дедушенко К.Б., Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 9. С. 1733-1762.
- [2] Giok-Djan Khoe, Hendricus G. Kock, Diter Küppers et al. // J. Lightwave Technol. 1984. Vol. LT-2. N 3. P. 217-227.
- [3] Аюц Ю.Х., Беловолов М.И., Бородулин В.И. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 11. С. 2197-2203.
- [4] Аеруцкий И.А., Дураев В.П., Неделин Е.Т. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 14. С. 849-852.
- [5] Park C.A., Rowe C.Y., Buns Y. et al. // Elektron. Lett. 1986. Vol. 22. N 21. P. 1132-1133.
- [6] Mario N. // Prec. of the International Workshop OCTIMA-91. Rome, 1991. P.
- [7] Kerji Kawano, Osami Mitomi, Masatoshi Saruwatari // Appl. Opt. 1985. Vol. 24. N 7. P. 984-989.
- [8] Kawahara H., Sasaki M., Tokoyo N. // Appl. Opt. 1980. Vol. 19. N 15. P. 2578-2583.
- [9] Shan V., Curtis L., Richard S. Vodhanel, Young W.C. // Technical Digest of Optical Fiber Communication Conf. San Francisco, 1990.
- [10] Baranov D.V., Vlasenko O.A., Zolotov E.M., Tavlikaev R.F. // Technical Digest of 2<sup>nd</sup> Microoptics Conf. MOC/GRIN-89. Tokyo, 1989.
- [11] Kyung S. Lee // Appl. Opt. 1989. Vol. 25. N 20. P. 3671-3675.
- [12] Бабушкина Т.С., Кунцевич Т.С., Сычугов В.А., Тихомиров А.Е. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 9. С. 161-163

Институт общей физики  
Москва

Поступило в Редакцию  
21 мая 1991 г.