

ПРОСТОЙ МЕТОД ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ПОВЕРХНОСТЬ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

В. А. С ы ч у г о в, А. Е. Т и х о м и р о в

В настоящее время методы возбуждения оптических волноводов достаточно хорошо разработаны [1]. Для возбуждения планарных волноводов в основном используются призмный и решетчатый элементы связи, а также возбуждение через торец, которое применяется гораздо реже. Это связано, во-первых, с относительной простотой первых двух методик и, во-вторых, с отсутствием необходимости полировки торцов волноводов. Для случая же канальных волноводов указанные два метода применяются, однако предпочтительным оказывается метод ввода через торец. Это происходит из-за того, что не удается обеспечить необходимое угловое и пространственное распределение оптического поля в области связи канального волновода и призмы (решетки), используемой для его возбуждения, что приводит к крайне низкой эффективности ввода. Только лишь для решетчатого элемента связи в случае падения света под углами, близкими к нормали, можно реализовать ситуацию, когда в плоскости падения света, т.е. в плоскости, параллельной оси канала, расходимость падающего пучка имеет дифракционный характер, а в плоскости, перпендикулярной канальному волноводу, имеет расходимость  $\sim \lambda/d$ , где  $\lambda$  — длина волны падающего излучения, а  $d$  — ширина канального волновода, причем распределение поля по ширине одинаково в любой точке области связи. Соблюдение указанных условий, обеспечивающих достаточно высокую эффективность возбуждения, может быть осуществлено применением соответствующей цилиндрической линзы.

Для случая наклонного падения пучка, который является общим, а кроме того, интересен еще и с точки зрения возможности исполь-

зования призмного элемента связи, использование обычной цилиндрической оптики не приводит к желаемым результатам, т.к. полная ширина поперечного распределения поля различна вдоль канального волновода.

Другими словами, для возбуждения канального волновода под углами, отличными от нормали, для фокусировки падающего излучения требуется цилиндрическая линза с переменным по длине фокусным расстоянием. Простые геометрические соображения показывают, что таким элементом является линза, первоначально выполненная в виде конуса с полным углом раствора  $2\alpha$  (рис. 1) и в дальнейшем сполитрованная таким образом, что угол  $\theta$  между образующей конуса и плоскостополитрованной его частью равен углу падения света  $\varphi$ .

В общем случае и для любых реальных значений показателя преломления  $n_m$  материала, из которого выполнена конусная линза, зависимость фокусного расстояния от координаты  $x$  (см. рис. 1) дается соотношением

$$f(x) = \frac{x \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + (n_m - 1)^2}}, \quad (1)$$

а углы  $\theta$  и  $\alpha$  связаны между собой следующим образом:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{n_m - 1}.$$

Для случая призмного ввода излучения в канальный волновод конусная линза одновременно может выполнять роль призмы и фокусирующего элемента. Например, для ввода излучения в канальный волновод с эффективным показателем преломления  $n^*$  можно использовать конусный элемент, выполненный из материала с показателем преломления  $n_m$ ,  $n_m > n^*$ , а угол  $\theta$  определяется из соотношения  $\sin \theta = n^*/n_m$ . Так, для диффузионного волновода на основе стекла с характерным значением эффективного показателя преломления  $n^* = 1.512$  при использовании для конусной призмы стекла ТФ-5 с  $n_m = 1.75$  угол  $\theta$  составляет  $59.7^\circ$ , а половина полного угла раствора конуса  $\alpha = 52^\circ$ . Описываемая методика, вообще говоря, достаточно универсальна и может применяться и для других волноводов, в частности на основе ниобата лития. Конусные призмы в этом случае могут изготавливаться, например, из рутила или из GaP. С целью удобства обеспечения оптического контакта конусной призмы, так же как и в случае обычных призм, используемых для ввода излучения в планарный волновод, плоскостополитрованная часть, которая непосредственно контактирует с волноводом, может быть заменена поверхностью сферической или цилиндрической формы с большим радиусом кривизны [2]. Что касается применения конусной линзы для фокусировки излучения при вводе в канальный волновод (или выводе из него) с использованием дифракционной решетки, то в этом случае никаких существенных ограничений на материал конусной линзы не накладывается, однако период решетки  $L$  связан с остальными параметрами устройства: длиной волны излучения  $\lambda$ , углом ввода  $\theta$ , эффективным показателем

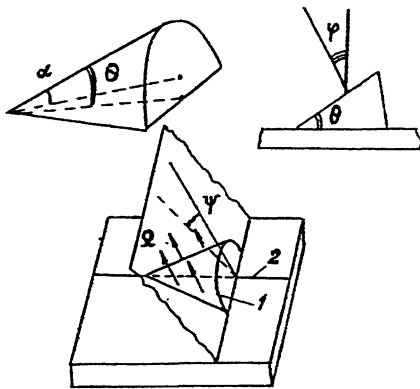


Рис. 1. Схема взаимного расположения конусной линзы и каналного волновода: 1 - конусная линза; 2 - каналный волновод. Стрелками показано излучение, выводимое из каналного волновода. Плоскость  $\Omega$  параллельна направлению вывода излучения, ее линия пересечения с плоскостью подложки перпендикулярна оси каналного волновода. Углом  $\psi$  в плоскости  $\Omega$  обозначено поперечное отклонение излучения.

преломления  $n^*$  показателем линзы  $n_m$ . В частности, для дифракции в „-1” порядок эта связь имеет вид:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n^* - n_m \sin \theta}. \quad (2)$$

Нами был экспериментально использован описанный конусный элемент для коллимации излучения  $\lambda = 0.63$  мкм, выводимого из волокна со сполитированной боковой поверхностью и сформированной на ней дифракционной решеткой (см., например, [3]). Фокусирующий элемент был изготовлен из стекла  $n_m = 1.512$ , полный угол  $2\alpha$  составлял  $17^\circ$ , период решетки  $\Lambda$  был  $0.625$  мкм. Выходной пучок после линзы имел низкую ( $< 1^\circ$ ) угловую расходимость вдоль и поперек сердцевины волокна. Тем не менее следует заметить, что в самом общем случае структура выходного пучка критична по отношению к поперечным смещению  $h$  и угловому развороту  $\beta$  фокусирующего элемента в плоскости волновода. На рис. 2 представлены зависимости поперечного углового смещения  $\psi$  выходного пучка от смещения  $h$ , рассчитанные для линзы, реализованной в эксперименте. Расчет показывает, что зависимость углового смещения  $\psi$  пучка от  $h$  определяется толщиной конусной линзы. Некритичность к поперечному смещению элемента относительно волновода может быть достигнута путем выбора соответствующего участка фокусирующего элемента, например в нашем случае при выборе участка конуса с  $x \geq 17$  мм, где  $x$  отсчитывается от вершины конуса, точность по отношению к  $h$  оказывается  $\sim 0.1$  мм. Поперечный размер  $D$  выходного пучка света при этом определяется по формуле

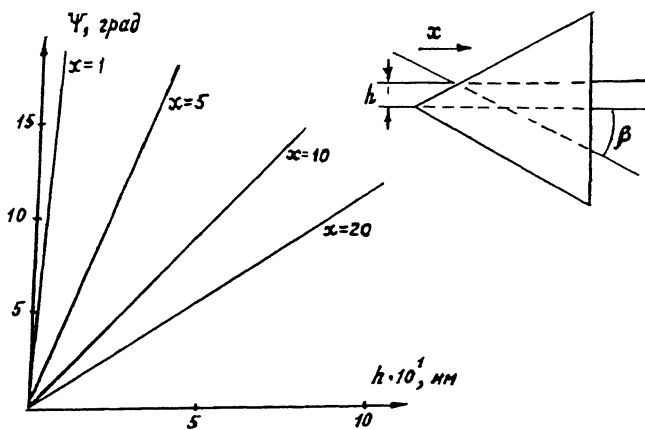


Рис. 2. Зависимость отклонения луча  $\psi$  от поперечного смещения фокусирующего элемента  $h$  в плоскости подложки при различных значениях координаты  $x$  ( $x$  указаны в мм).

$$D \approx \frac{\lambda}{n_m \cdot d} \cdot f(x),$$

где  $d$  - поперечный размер канального волновода. В нашем случае для основной моды волокна размер  $D$  составляет 0.25 мм. Небольшая, как правило, протяженность  $L$  участка связи канального волновода (практически 3-4 мм) и соответствующий выбор участка конусной линзы ( $x$ ) приводит к оценке величины углового разворота  $\psi$  по формуле

$$\psi \sim \frac{L \cdot \beta}{2 \cdot f(x)}.$$

В нашем случае (для  $\psi = 3^\circ$ )  $L$  составляла  $\sim 4$  мм и  $\beta \sim 6^\circ$ .

Все изложенные выше рассуждения проводились для случая нормального (в плоскости рисунка) падения света на поверхность конического фокусирующего элемента (рис. 1), или другими словами, при  $\theta = \psi$ . Однако нетрудно показать, что при наличии некоторой расстройки  $\Delta$ ,  $\Delta = \psi - \theta$ , описанный элемент не теряет работоспособность и может применяться в достаточно широком диапазоне  $\Delta$  ( $\sim 10^\circ$ ).

Относительная расстройка по фокусному расстоянию  $f$  (см. (1))  $\frac{\delta f}{f}$  в этом случае имеет вид:

$$\frac{\delta f}{f} \sim \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{\Delta}{n_m}. \quad (3)$$

Например, для экспериментально реализованного случая и для  $\Delta = \sim 10^\circ$   $\delta f/f$  составляет всего 3%.

Таким образом, предложенный нами способ фокусировки оптического излучения на поверхность канального волновода, с одной стороны, позволяет эффективно и достаточно просто согласовать каналные волноводы с объемными световыми волнами, с другой - не яв-

ляется сильно чувствительным по отношению к смещениям и угловым расстройкам фокусирующего элемента и, кроме того, может успешно применяться для практически любых типов канальных волноводов.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Т а м и р Т. Интегральная оптика. М.: Мир, 1978. С. 96-154.
- [2] З л е н к о А.А., С ы ч у г о в В.А. // Квантовая электроника. 1973. № 4. С. 16-19.
- [3] С в а х и н А.С., С ы ч у г о в В.А., Т у л а й к о - в а Т.В. // Квантовая электроника, 1986. Т. 13. № 2. С. 440-442.

Поступило в Редакцию  
15 июля 1991 г.