

Анализ характеристик волноводного устройства для объединения внешних оптических пучков

© В.И. Наливайко, М.А. Пономарева

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 28.08.2022 г.

В окончательной редакции 06.11.2022 г.

Принята к публикации 04.12.2022 г.

Предложена конструкция планарного волноводного объединителя световых пучков, выполняющего суммирование набора внешних световых пучков. Рассмотрены варианты конструкции объединителя и предложен 3D-вариант с оптической развязкой. Проведены расчеты рабочих параметров элементов объединителя в зависимости от величин показателей преломления слоев конструкции. Оценены минимальные размеры вводных/выводных дифракционных элементов объединителя.

Ключевые слова: оптические интегральные схемы, объединитель оптических пучков, дифракционная решетка, волновод.

DOI: 10.21883/OS.2023.01.54544.4035-22

Введение

В оптических интегральных схемах (ОИС), предназначенных для параллельной обработки информации, требуется устройство для суммирования пучков в свободном пространстве [1,2]. Можно выделить два типа устройств, связанных с объединением оптических сигналов. К первому типу устройств можно отнести оптический мультиплексор, используемый для уплотнения оптических сигналов и увеличения пропускной способности каналов. Оптические сигналы в мультиплексоре отличаются длиной волны, поляризацией или углом распространения волноводной моды [3–8]. Сигналы распространяются независимо по единому каналу, а на выходе разделяются с помощью демultipлексора. Устройство второго типа, называемое оптическим объединителем, служит для суммирования нескольких оптических пучков в целях их усиления. Объединители используются для получения высокомошных лазерных пучков [9–11], усиления слабых оптических сигналов в астрономии и микроскопии [12,13], а также для выполнения вектор-матричных оптических преобразований в устройствах ассоциативной памяти и коммутирующих схемах [14,15].

Предлагаемый волноводный объединитель, предназначенный для суммирования оптических пучков, может быть реализован в виде матрицы [16]. Кроме того, планарный объединитель пучков может найти применение в качестве оптического мультиплексора для спектрального уплотнения каналов в случае изготовления вводных решеток с различным периодом. В настоящей работе проводится теоретический анализ характеристик разрабатываемого устройства, выполненного в виде тонкопленочной многослойной 3D-конструкции.

1. Конструкция многослойного волноводного объединителя

Технология изготовления волноводного объединителя подобна технологии изготовления волноводного делителя световых пучков [17]. Объединитель, как и делитель, состоит из общей оптической шины в виде тонкопленочного планарного волновода и линейки вводных и выводных элементов на основе рельефных дифракционных решеток. Поскольку делители и объединители предполагается применять совместно для вектор-матричных преобразований [16], то единая технология их изготовления позволяет упростить процесс создания ОИС.

Ввиду обратимости оптических процессов можно было бы использовать делитель в качестве объединителя, сделав выходные элементы делителя входными элементами объединителя. Но это будет малоэффективно, так как введенный в первые вводные элементы свет будет частично или даже полностью выводиться на последующих вводных элементах. Для преодоления этого недостатка мы предлагаем применить оптическую развязку — буферный диэлектрический слой, отделяющий вводную решетку от основного волновода (рис. 1).

Буферный слой не позволяет волноводной моде основного волновода выводиться через вводные решетки. На поверхности буферного слоя формируются вводные волноводы для связи с основным волноводом. Для того чтобы угол распространения волноводной моды во вводном волноводе совпадал с углом распространения моды в основном волноводе, необходим подбор толщины этих волноводов исходя из условия фазового согласования [18].

Для эффективной развязки вводной решетки и оптической шины необходимо, чтобы толщина буферного слоя была больше глубины проникновения волноводной моды в эту среду [18]. Например, для волновода, выполненного из халькогенидного стекла As_2S_3 ($n = 2.5$), и буферного слоя, выполненного из фтористого магния MgF_2 ($n = 1.34$), глубина проникновения составляет около $0.05 \mu\text{m}$. Таким образом, буферный слой толщиной более $0.1 \mu\text{m}$ обеспечит требуемую развязку.

Чтобы не возникало потерь на отражение в области стыковки вводных волноводов с основным, они должны изготавливаться из одного материала.

Толщины основного и вводных волноводов должны быть выбраны так, чтобы удовлетворить условию согласования мод в этих волноводах. Это означает, что угол распространения волноводной моды одного волновода должен быть равен углу распространения моды другого волновода. Это условие автоматически выполняется, если оба волновода одинаковой толщины.

Потери интенсивности оптической моды на вертикальных переходах слоев интегратора могут быть минимизированы до единиц процентов с помощью плавного замытия границ и малых толщин волноводных и буферных слоев.

В случае многомодового основного волновода существует возможность уменьшить протяженность рассеивающей области стыковки волноводов за счет уменьшения толщины вводного волновода. Для этого толщины волноводов выбираются так, чтобы во вводном волноводе распространялась нулевая мода, а в основном — мода более высокого порядка. При этом толщина вводного волновода будет меньше толщины основного волновода.

В нашем случае дифракционные решетки ввода записываются излучением с длиной волны 532 nm в слое актиничного фоторезиста As_2S_3 , а основной и вводные волноводы выполняются из материала $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$, малочувствительного к этой длине волны.

Общая схема объединителя световых пучков приведена на рис. 2. N входных пучков из свободного пространства вводятся в основной волновод с помощью N дифракционных элементов ввода с оптической развязкой. Пучок с суммарной интенсивностью выводится

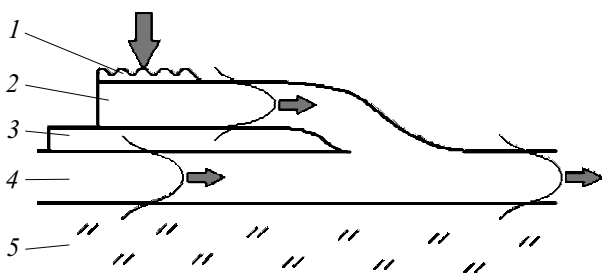


Рис. 1. Элемент 3D-объединителя световых пучков. 1 — решетчатый элемент ввода (As_2S_3), 2 — вводный волновод ($\text{As}_{20}\text{S}_{80}$), 3 — буферный слой (MgF_2), 4 — основной волновод ($\text{As}_{20}\text{S}_{80}$), 5 — подложка (стекло K8).

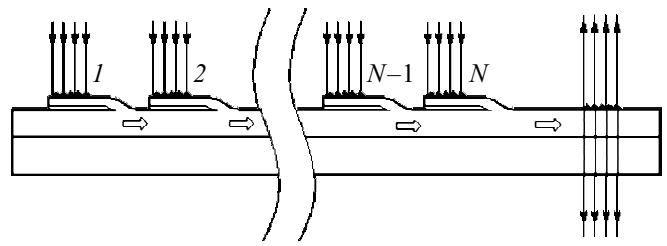


Рис. 2. Объединитель N световых пучков на основе планарного волновода с оптической развязкой.

в свободное пространство в результате дифракции на выводной решетке основного волновода.

2. Преимущества халькогенидных стекол по сравнению с оксидными стеклами для изготовления волноводов

Значения показателей преломления волноводов и окружающих сред определяют характеристики элементов ввода/вывода объединителя световых пучков. Рассмотрим два типа волноводов с отличающимися показателями преломления на рабочей длине волны $0.63 \mu\text{m}$:

- диффузионный волновод в оксидном стекле K8, $n = 1.52$;
- тонкопленочный волновод из халькогенидного стекла $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$, $n = 2.2$. Подложки выполнены из оксидного стекла K8, $n = 1.5163$.

2.1. Толщина волновода

С увеличением показателя преломления волновода уменьшается его толщина, достаточная для поддержания определенного числа мод. Для одномодового волновода из оксидного стекла его толщина составляет порядка $1.5 \mu\text{m}$, а для 4-модового волновода — около $12 \mu\text{m}$. Для волноводов из халькогенидного стекла эти толщины равны $0.04 \mu\text{m}$ и $0.7 \mu\text{m}$ соответственно. Таким образом, использование материалов с более высоким показателем преломления позволяет на порядок уменьшить толщину волноводов.

2.2. Эффективность ввода света

Под эффективностью ввода излучения в волновод подразумевается отношение интенсивности волноводной моды к интенсивности входного пучка. Дифрагированная решетчатая волна в планарном волноводе деформируется по одной координате, формируя волноводную моду. Оказалось, что максимальная эффективность ввода излучения в волновод возможна при определенных параметрах входного пучка [19]. Рассмотрим пучок с гауссовым

распределением интенсивности:

$$I = I_0 \exp[-(x - c_0)^2/s_0^2],$$

где $2s_0$ — эффективная ширина пучка, а c_0 — смещение его центра относительно левого конца гофрированного участка волновода, I_0 — интенсивность пучка в центре. Для такого пучка максимальная эффективность ввода излучения составляет около 80% и происходит при условиях

$$\begin{aligned} \alpha s_0 &= 0.68, \\ \alpha c_0 &= 0.5, \end{aligned}$$

где α — коэффициент утечки волноводной моды.

Для примера рассмотрим решетки с дифракционными эффективностями 10 и 30%. Коэффициент утечки оценим по формуле [20]

$$\alpha = \ln(1 - \eta_{\text{dif}})/L_{\text{ef}},$$

где η_{dif} — дифракционная эффективность решетки, а L_{ef} — эффективная длина волновода (период зигзагообразной волны), равная

$$L_{\text{ef}} = 2h_{\text{ef}} \operatorname{tg} \theta, \quad (1)$$

где h_{ef} — эффективная толщина волновода [18]; θ — угол распространения волноводной моды.

Выберем c_0 оптимальным и найдем оптимальные значения для s_0 . Для 4-модового волновода из оксидного стекла ширина пучка для максимального ввода составит 6 и 2 мм соответственно, а для 4-модового волновода из халькогенидного стекла — 70 μm и 25 μm соответственно. Видно, что применение халькогенидных волноводов с более высоким показателем преломления позволяет уменьшить размеры элементов ввода почти на два порядка.

2.3. Поляризационные свойства элементов ввода

Планарные волноводы обладают поляризационными свойствами и могут использоваться в качестве поляризаторов [21].

Чтобы оценить поляризационные свойства вводного элемента, рассмотрим явление многолучевой интерференции при вводе света в планарный волновод [22]. Кратность интерференции определяется отношением длины вводной решетки L к эффективной длине волновода L_{ef} , определяемой условием (1). При этом интенсивность вводимого света в результате многолучевой интерференции выражается как

$$I(\phi) = I_0(1 - \cos N\theta)/(1 - \cos \theta),$$

где θ определяет угол распространения введенного в волновод излучения, а $N = L/L_{\text{ef}}$ — кратность интерференции. Таким образом, при увеличении длины вводного элемента уменьшается угловая ширина волноводной

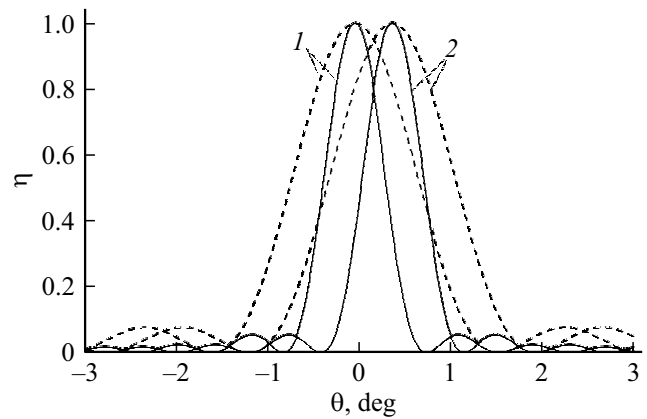


Рис. 3. Зависимость относительной эффективности ввода излучения η в халькогенидный волновод от угла ввода θ для различных поляризаций: 1 — для ТЕ-поляризации, 2 — для ТМ-поляризации.

моды. Под угловой шириной волноводной моды подразумевается диапазон углов распространения излучения в волноводе, при котором интенсивность моды не более чем в два раза отличается от интенсивности излучения, введенного под углом волноводной моды. Когда различие между углами возбуждения ТЕ- и ТМ-мод будет больше угловой ширины моды, элемент ввода станет более чувствительным к поляризации входного пучка.

Поскольку максимальный ввод излучения происходит при определенной длине решетки, степень поляризации оптимизированным элементом ввода будет фиксированной. Покажем это на примерах 4-модовых волноводов из халькогенидного и оксидного стекол с различными длинами вводных решеток, определенных в разд. 2.2. На рис. 3 показана зависимость эффективности ввода от угла ввода излучения в халькогенидный волновод.

Штриховые линии соответствуют решетке с дифракционной эффективностью 30, а сплошные — 10%, при этом длина решеток соответствует максимальному вводу излучения в волновод. Видно, что при различии углов ввода ТЕ- и ТМ-мод порядка 1° поляризации можно разделять. Поляризационные свойства элементов объединителя могут быть использованы в качестве поляризационных фильтров при зашумлении оптических сигналов помехами.

Для оксидных волноводов ширина пиков практически такая же, но разность между углами ввода ТЕ- и ТМ-мод для 4х-модового волновода более чем на два порядка меньше и составляет 0.005° , а графики вообще неразличимы.

2.4. Эффективность вывода света

Интенсивность света, выведенного из волновода, определяется длиной решетки и ее дифракционной эффективностью [20]:

$$I_{\text{out}} = I_0[1 - (1 - \eta_{\text{dif}})^{-L/L_{\text{ef}}}],$$

где I_0 — интенсивность волноводной моды; η_{dif} — дифракционная эффективность решетки; L — длина решетки.

Рассмотрим случай синусоидальной решетки с эффективностью 30%. Для 4-модового волновода из оксидного стекла расчетная длина решетки с эффективностью вывода на уровне 95% составляет 6 мм, а для 4-модового халькогенидного волновода — около 70 мкм. Таким образом, различие в размерах выводных элементов, как и в случае вводных элементов, составляет почти два порядка.

Синусоидальная дифракционная решетка выводит свет в обе прилегающие к волноводу среды, и отношение интенсивностей, выведенных в разные среды, при гофрировании волновода на границе с воздухом определяется как [23]

$$\frac{P_c}{P_s} = \frac{[N_f^2 - (n_f^2 - n_s^2) \sin^2(N_f k h)] N_c}{N_f^2 N_s},$$

где $N_{c,f,s} = [n_{c,f,s}^2 - (n^* - \lambda/d)^2]^{1/2}$, $n_{c,f,s}$ — показатели преломления воздуха, волновода и подложки соответственно; n^* — эффективный показатель преломления волновода; h — толщина волновода; d — период гофра.

Оценки величин интенсивностей света, выведенных ортогонально из оксидного и халькогенидного волноводов, показали, что для оксидного волновода около 60% света выводится в подложку, а остальные 40% — в воздух, и это соотношение практически не изменяется при изменении толщины волновода. Тогда как в халькогенидном волноводе подбором толщины волновода можно получить до 80% вывода света через подложку. Таким образом, в волноводах с высоким показателем преломления изменением толщины волновода и периода выводной решетки можно добиться вывода света преимущественно в одну среду.

3. Минимальные размеры элементов объединителя

Интегрально-оптическое исполнение объединителя оптических пучков подразумевает исполнение его элементов с минимальными размерами. С другой стороны, существуют факторы для предельного уменьшения размеров, которые следует учитывать.

Уменьшение размеров вводных/выводных элементов будет способствовать увеличению дифракционной расходимости пучков. Для решеточного элемента вывода угол расходимости $\Delta\theta$ будет определяться соотношением

$$\Delta\theta \sim \lambda/(nL),$$

где λ — длина волны света, n — показатель преломления решетки, L — длина решетки. Выводные решетки из халькогенидного стекла длиной 15 мкм приведут к угловой расходимости выходных пучков порядка 1°. Это

необходимо учитывать при согласовании с регистрирующей системой.

Максимальная эффективность ввода/вывода света решеткой, нанесенной на волновод, определяется длиной решетки. Как было показано выше, для 4-модового волновода из халькогенидного стекла As_2S_3 эта длина составляет около 70 мкм, а для одномодового — около 20 мкм. Поэтому для обеспечения эффективного ввода/вывода длина решеток должна быть не менее определенной величины.

Таким образом, размеры объединителя будут определяться требованиями, предъявляемыми к ним. В зависимости от области применения устройства, частью которого они являются, можно подобрать длину отдельных элементов, оптимальную с точки зрения миниатюризации схемы, расходимости рабочих пучков, их интенсивности и поляризации.

Максимальное количество входных пучков объединителя будет определяться потерями на элементах ввода и в волноводе. Чтобы обеспечить достоверность результата суммирования N пучков, полные потери при распространении введенных пучков не должны превышать интенсивности одного из этих пучков.

Заключение

Предложена новая конструкция устройства — объединителя оптических пучков, предназначенного для суммирования набора параллельных пучков в свободном пространстве. Она реализуется в виде многослойной структуры на основе планарных волноводов и дифракционных элементов ввода/вывода света с оптической развязкой.

Показаны преимущества волноводов из халькогенидного стекла с высоким показателем преломления для получения минимальных размеров устройства и улучшения поляризационной избирательности элементов ввода. Применение таких волноводов позволяет уменьшить геометрические размеры вводных/выводных элементов волноводных структур по сравнению с волноводами из оксидного стекла: толщину волновода — на порядок, длину элемента ввода/вывода с максимальной эффективностью — на два порядка. Эффективность вывода света в сторону подложки из волновода с более высоким показателем преломления также увеличивается на 20% за счет перераспределения интенсивности пучков, выходящих в прилегающие среды.

В настоящее время отработаны все технологические этапы для практической реализации схемы объединителя оптических пучков на основе халькогенидных волноводов — нанесение халькогенидных и буферных слоев в высоком вакууме, получение вводных и выводных голографических решеток рельефного типа. Формируются технические задания на возможные параметры элементов схемы объединителя для различных приложений.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки гос. рег. № 121022000126-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.И. Козик, П.Е. Твердохлеб. *Автометрия*, **3**, 44 (1993).
- [2] Н.Н. Каменев, В.И. Наливайко. Патент РФ № 2167445 (2001).
- [3] P. Sillard, M. Bigot-Astruc, D. Molin. *J. Light. Tech.*, **32** (16), 2824 (2014). DOI: 10.1109/JLT.2014.2312845
- [4] L. Zou, X. Lv, Y. Huang, H. Long, Q. Yao, J. Xiao, Y. Du. *Opt. Lett.*, **38** (19), 3807 (2013). DOI: 10.1364/OL.38.003807
- [5] P.J. Winzer. *IEEE Photon. J.* **4**, 647 (2012). DOI: 10.1109/JPHOT.2012.2189379
- [6] Y. Xu, J. Xiao, X. Sun. *Appl. Opt.*, **53** (35), 8305 (2014). DOI: 10.1364/ao.53.008305
- [7] G. Li, N. Bai, N. Zhao, C. Xia. *Adv. Opt. Phot.*, **6**, 413 (2014). DOI: 10.1364/AOP
- [8] N.I. Petrov, A.L. Storozheva, Y.M. Sokolov, M.N. Khromov. *Frontiers in Optics*, **6** (3), 48 (2017). DOI: 10.25210/jfop-1703-048053
- [9] P. Shi, X. Zhang. *Asia Comm. and Phot. Conf.* (Optica Publishing Group, 2017), Su2A.90. DOI: 10.1364/acpc.2017.su2a.90
- [10] I.S. Choi, J. Park, H. Jeong, J.W. Kim, M.Y. Jeon, H.-S. Seo. *Opt. Expr.*, **26** (23), 30667 (2018). DOI: 10.1364/oe.26.030667
- [11] P.A. Thielen, J.G. Ho, D.A. Burchman, G.D. Goodno, J.E. Rothenberg, M.G. Wickham, K.B. Rowland. *Opt. Lett.*, **37** (18), 3741 (2012). DOI: 10.1364/ol.37.003741.
- [12] M. Benisty, J.P. Berger, L. Jocou, P. Labeye, F. Malbet, K. Perraut, P. Kern. *Astronomy and Astrophysics*, **498** (2), 601 (2009). DOI: 10.1051/0004-6361/200811083.
- [13] H.-D.K. Goldsmith, N. Cvetojevic, M. Ireland, S. Madden. *Opt. Expr.*, **25** (4), 3038 (2017). DOI: 10.1364/oe.25.003038.
- [14] А.С. Семенов, В.Л. Смирнов, А.В. Шмалько. *Квант. электрон.*, **14** (7), 1319 (1987).
- [15] Y.A. Vlasov. *IEEE Commun. Mag.*, **50** (2), S67 (2012). DOI: 10.1109/MCOM.2012.6146487.
- [16] M.A. Gigailenko, N.N. Kamenev, V.I. Nalivaiko, P.E. Tverdokhlebo. *Proc. SPIE*, **3900**, 187 (1999).
- [17] Н.Н. Каменев, В.И. Наливайко. *Автометрия*, **3**, 114 (1993).
- [18] *Волноводная оптоэлектроника*, под ред. Т. Тамира (Мир, М., 1991).
- [19] В.А. Киселев. *Квант. электрон.*, **1** (7), 1578 (1974).
- [20] И.А. Авруцкий, В.А. Сычугов, А.В. Тищенко. *Труды ИОФАН*, **34**, 3 (1991).
- [21] М.М. Векшин, В.А. Никитин, Н.А. Яковенко. *Письма в ЖТФ*, **24** (6), 35 (1998).
- [22] H. Kogelnik, T.P. Sosnowski. *The Bell Syst. Tech. J.*, **49**, 1602 (1970).
- [23] А.А. Зленко, В.А. Киселев, А.М. Прохоров, А.А. Спихальский. *Квант. электрон.*, **1** (7), 1519 (1974).