

УДК 535.232.65

М. В. Базанов, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб

(Новосибирск)

**ПЛАНАРНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РАСЩЕПИТЕЛИ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ**

Рассматриваются расщепители пучков света для формирования объемных межсоединений, использующие планарные световоды на основе эффекта полного внутреннего отражения и голографические решетки ввода/вывода излучения. Показано, что в таких расщепителях предпочтительны многопучковые решетки вывода излучения, поскольку с учетом реальных потерь света в материале голограммы они обеспечивают существенно больший (в десятки раз) коэффициент полезного использования мощности источника света, чем однопучковые решетки.

Введение. Одним из важных элементов трехмерных (3-D) оптических интегральных схем являются расщепители пучков света, предназначенные для мультиплицирования оптического сигнала как в пределах плоскости, так и между плоскостями (например, матричного модулятора света и линейки фотоприемников) [1]. Такие расщепители могут быть созданы с использованием волноводных голограмм [2] или планарных световодов на основе эффекта полного внутреннего отражения и голографических решеток ввода/вывода излучения [3—5]. Главные достоинства планарных световодов заключаются в соединении преимуществ интегральной оптики (компактность и жесткость конструкции) с возможностями оптических систем, работающих в свободном пространстве (трехмерные оптические связи без кросс-помех, умеренные требования к прецизионности стыковки элементов).

Основные проблемы при создании расщепителей рассматриваемого типа заключаются в обеспечении высокой эффективности ввода/вывода излучения в подложку, а также одинаковой интенсивности выходных пучков.

В идеальном случае входной пучок I_0 должен полностью трансформироваться в пучок подложечной моды, который, в свою очередь, по мере распространения частично выводится через голографические решетки (рис. 1). При этом дифракционная эффективность решеток должна изменяться по закону

$$\eta_n = 1/(N - n + 1),$$

где N — количество решеток, n — номер текущей решетки, а интенсивность любого из N выходных пучков равна I_0/N . Например, для $N = 64$ $\eta_1 = 1,5\%$, $\eta_N = 100\%$, $I_1 = I_n = I_{64} = I_0/64$.

Однако наличие потерь света в материале голограммы и подложки показывает, что реальная эффективность таких расщепителей существенно ниже расчетной [6].

В настоящей работе дано сравнение планарных расщепителей с однопучковыми и многопучковыми решетками и показано, что последние из них обладают более вы-

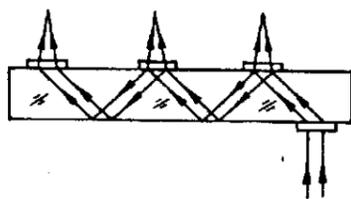


Рис. 1

соким коэффициентом полезного использования мощности источника света.

Однопучковые решетки ввода/вывода излучения. Пусть пучок света с длиной волны λ падает по нормали к плоскости решетки ввода. Необходимо, чтобы в результате дифракции на решетке пучок вошел в подложку под углом полного внутреннего отражения α . Примем для определенности $\alpha = 45^\circ$, а $n_c = 1,516$ и $n_h = 1,50$, где n_c и n_h — коэффициенты преломления стекла подложки

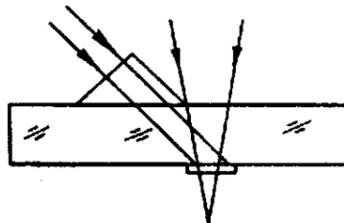


Рис. 2

и регистрирующей среды. Угол дифракции в среде голограммы α' должен удовлетворять соотношению $\sin \alpha / \sin \alpha' = n_c / n_h$, $\alpha' = 44,4^\circ$. Если длина волны излучения, используемого при записи решетки ввода, совпадает с λ , то очевидно, что угол падения опорного пучка в воздухе должен составлять $\sim 90^\circ$. В связи с этим целесообразно решетку ввода записывать со стороны подложки, а для ввода опорного пучка можно использовать стеклянную призму (рис. 2). Для обеспечения оптического контакта между призмой и подложкой в экспериментах использовалась иммерсионная жидкость.

Очевидно, что решетка вывода пучка из подложки аналогична решетке ввода, отличие состоит только в том, что теперь входным является пучок, распространяющийся в подложке.

Голографические решетки вывода записываются таким же образом, как и решетки ввода (т. е. со стороны подложки и с использованием призмы для ввода опорного пучка в подложку). Для получения N выводных пучков необходимо последовательно записать N решеток путем перемещения регистрирующей среды на расстояние $2(l_c + l_h)$, где l_c , l_h — соответственно толщины подложки и регистрирующего слоя.

Ранее отмечено, что в идеальном расщепителе для обеспечения равенства интенсивности выходных пучков дифракционная эффективность (ДЭ) решеток должна удовлетворять соотношению $\eta_n = 1 / (N - n + 1)$. Однако здесь не учтены потери при распространении света в подложке и регистрирующем слое. Пусть α_c , α_h и l_c , l_h — соответственно коэффициенты затухания света и длина пути пучка света между соседними решетками в материале подложки и регистрирующей среды. Тогда, полагая, что интенсивность света затухает по экспоненциальному закону, можно показать, что для обеспечения равенства интенсивности выходных пучков дифракционная эффективность решеток должна быть равна

$$\eta_n = \frac{\exp[z_0] - 1}{\exp[z_0(N - n + 1)] - 1},$$

а интенсивность I_n каждого из выходных пучков равна

$$I_n = \frac{I_0 \exp[-z_0(N + 1)](1 - \exp[-z_0])}{1 - \exp[-z_0 N]},$$

где $z_0 = \alpha_c l_c + \alpha_h l_h$, I_0 — интенсивность входного пучка, N — количество решеток. Эти соотношения получены в предположении, что ДЭ последней решетки равна 100% и другие виды потерь света (кроме затухания) не учитываются.

В табл. 1 приведены расчетные значения ДЭ первой решетки, интенсивности каждого из пучков, общей эффективности расщепителя Q (без учета потерь при вводе излучения) при нескольких значениях коэффициентов затухания α_c , α_h (первая пара чисел получена экспериментальным путем, вторая — соответствует лучшим литературным данным).

Из таблицы следует, что затухание света играет существенную роль и его необходимо учитывать при проектировании и изготовлении планарных расщепителей. Выясняется, что при большой величине затухания практически невозможно обеспечить необходимое значение дифракционной эф-

Таблица 1

N	$\eta_1, \%$	I_n , отн. ед.	$\Omega, \%$
8	6,6	0,048	38,4
	11,8	0,11	91,4
16	1,4	0,01	16,3
	5,5	0,055	87,8
32	0,1	$7 \cdot 10^{-4}$	2,2
	2,4	0,023	74,3
64	$5,2 \cdot 10^{-4}$	—	—
	0,9	$8,6 \cdot 10^{-3}$	55,4

$$\alpha_c = 0,1/0,01 \text{ см}^{-1}; \alpha_h = 6,35/0,635 \text{ см}^{-1};$$

$$t_c = 2,6 \text{ мм}; t_h = 0,05 \text{ мм}; \eta_N = 100 \%$$

фективности первой (и ближайшей к ней) решетки с достаточной точностью. Очевидно, что при подборе регистрирующей среды и подложки необходимо выбирать материалы с малым затуханием, вместе с тем ясно также, что при коэффициенте затухания среды $\alpha_h \geq 1 \text{ см}^{-1}$ (это соответствует примерно 3,7 дБ/см) расщепители на основе однолучковых решеток при $N > 32$ становятся малоэффективными.

Другое существенное ограничение таких расщепителей состоит в том, что расстояние между выходными пучками T зависит от толщины подложки

и регистрирующей среды. Например, при $t_c + t_h \geq 0,1 \text{ мм}$ $T \geq 0,25 \text{ мм}$.

Многочувковые решетки. Простейшая многочувковая решетка может быть получена путем записи нескольких наложенных с определенным сдвигом (шагом) однолучковых решеток (рис. 3). Здесь $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_K$ — наложенные со сдвигом T субголограммы. При одновременном восстановлении такой совокупности голограмм получим линейный растр из K пучков. Если расщепитель содержит M многочувковых решеток, общее количество пучков равно $N = (M \times K)$. Видно, что в этом случае T не зависит от толщины подложки и регистрирующей среды. Расстояние между группами пучков равно $T_0 = 2(t_c + t_h) - T(K - 1)$. Если необходимо обеспечить условие $T_0 = T$, толщины подложки и среды должны удовлетворять соотношению

$$t_c + t_h = TK/2,$$

например, при $T = 25 \text{ мкм}$, $K = 8$, $t_c + t_h = 100 \text{ мкм}$ диаметр отдельной субголограммы $d = 50 \text{ мкм}$, диаметр опорного пучка в направлении регистрации, совпадающий с размером многочувковой решетки, $D_h = 225 \text{ мкм}$, расстояние между решетками 200 мкм .

Рассуждая так же, как и в случае однолучковых решеток, получим, что эффективность многочувковых решеток должна удовлетворять соотношению

$$\eta_m = \frac{\exp[z_0] - 1}{\exp[z_0(M - m + 1)] - 1},$$

при этом интенсивность каждого из выходных пучков будет равна

$$I_n = \frac{I_0 \exp[-z_0(M + 1)](1 - \exp[-z_0])}{K(1 - \exp[-z_0M])},$$

где M — количество решеток, K — количество пучков в решетке, I_0 — интенсивность входного пучка, m — номер текущей решетки.

В табл. 2 приведены расчетные данные η_1, I_n и общей эффективности расщепителя при тех же значениях α_c и α_h , что и в табл. 1, и при $K = 8$.

Сравнивая табл. 1 и 2, видим, что с ростом потерь света расщепители на основе многочувковых решеток обеспечивают существенно большую интенсивность выходных пучков и общий ко-

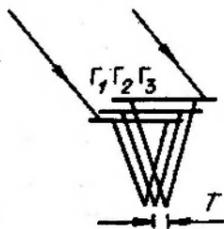


Рис. 3

Таблица 2					
16	2	49,5	0,06	96,0	$t_c = 2,6 \text{ мм}$ $t_h = 0,05 \text{ мм}$ $\eta_m = 100 \%$ $K = 8$
32	4	28,1	0,017	55,7	
		32,7	0,03	94,4	
64	8	19,25	0,006	38	
		24,3	0,014	91,5	
1024	128	0,41	$5 \cdot 10^{-4}$	52	$t_c = 0,05 \text{ мм}$ $\alpha_h = 0,635 \text{ см}^{-1}$ $\alpha_c = 0,01 \text{ см}^{-1}$

коэффициент полезного использования мощности входного пучка. Например, при $N = 32$ этот выигрыш составляет 25 раз (при $\alpha_c = 0,1 \text{ см}^{-1}$ и $\alpha_h = 6,35 \text{ см}^{-1}$).

Столь значительные потери света при применении однолучковых решеток в сравнении с многолучковыми обусловлены большой суммарной длиной взаимодействия света со средой голограммы. При общем количестве пучков N и толщине среды t_h эта длина составляет $l = N2\sqrt{2}t_h$, а для многолучковых решеток $l' = l/K$, где K — количество пучков в одной решетке.

Заключение. В работе сравниваются характеристики однолучковых и многолучковых планарных расщепителей света для организации межсоединений в 3-D оптических микросхемах. Показано, что в таких микросхемах предпочтительно применять многолучковые решетки вывода излучения, поскольку при учете потерь света в материале голограммы они обеспечивают существенно больший (в десятки раз) коэффициент полезного использования мощности источника света, чем однолучковые решетки. Если коэффициент затухания света составляет $\sim 3 \text{ дБ/см}$, то на основе многолучковых решеток можно изготовить расщепители с количеством выходных пучков $N = 1024$ и с коэффициентом полезного использования мощности лазера $\sim 50 \%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козик В. И., Твердохлеб П. Е. 3-D оптические интегральные схемы ассоциативной памяти // Автометрия. — 1993. — № 3.
2. Lin F., Strzeleski E. M., Jansson T. Optical multiplanar VLSI interconnects based on multiplexed waveguide holograms // Appl. Opt. — 1990. — 29, N 8.
3. Janus J., Huang A. Planar integration of free-space optical components // Appl. Opt. — 1989. — 28, N 7. — P. 1602.
4. Kubota T., Takeda M. Integrated-optical array illuminator // Optical Computing: Intern. Top. Meeting, Kobe, Japan, 1990. — P. 293.
5. Sauer F. Fabrication of diffractive-refractive optical interconnects for infrared operation based on total internal reflection // Appl. Opt. — 1989. — 28, N 2. — P. 386.
6. Pen E. F., Sinyukov A. M., Shelkovnikov V. V. High efficiency substrate mode holograms on photopolymer for interconnects // Optical Computing: Intern. Top. Meeting, Minsk, Republic of Belarus, 1992. — P. 30D15.

Поступила в редакцию 9 марта 1993 г.