

А. В. КАЗАКЕВИЧ, А. В. МИРОНОС, В. Л. СМЕРНОВ  
(Куйбышев)

### ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ ФОТОПРИЕМНИК

Интегрально-оптические (ИО) устройства, решающие задачи оптической обработки информации, уже давно привлекают внимание исследователей возможностью параллельной обработки данных, высоким быстродействием, малыми габаритами, надежностью и помехозащищенностью. Однако разработанные в последнее время устройства выполняют специализированные прикладные операции, основанные главным образом на аналоговых вычислениях [1, 2]. Хотя такие устройства имеют высокую скорость аналоговой обработки сигналов, число выполняемых ими операций незначительно и точность вычислений низка. Одна из возможностей преодоления указанных недостатков заключается в формировании гибридных оптоэлектронных вычислительных комплексов [3], где оптическими методами осуществляют предварительную обработку высокоинформативных сигналов и изображений. Для гибридных процессоров наиболее перспективным представляется применение кремния [4], так как в этом случае технологически возможно изготовление на единой подложке как оптической, так и электронной части схемы. При этом связь между последними осуществляется посредством волноводной детектирующей системы — оконечного элемента оптической части процессора.

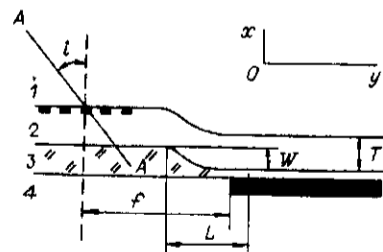
В данной работе приведены результаты испытания наиболее простого оконечного ИО-элемента, состоящего из волноводной линзы и фотодиода, выполненных на основе структуры  $As_2S_3-SiO_2-Si$  (рис. 1), где  $SiO_2$  ( $n_3 = 1,46$ ) выступает в качестве буферного слоя, так как показатель преломления полупроводящего слоя  $As_2S_3$  ( $n_2 = 2,48$ ) меньше показателя преломления кремниевой подложки ( $Re(n_4) = 4,24$  на длине волны 0,63 мкм).

На кремниевой подложке сформирована линейка из 50 последовательно включенных фотоприемников с размерами активной области вдоль оси  $y$  100 мкм каждый и расстоянием между ними также 100 мкм по технологии, описанной в [5]. Методом термического напыления на поверхность предварительно изготовленного буферного слоя  $SiO_2$  наносилась волноводная пленка  $As_2S_3$  с оптическими потерями  $\sim 2$  дБ/см. Для того чтобы избежать излучательных оптических потерь на изгибе изолирующего слоя  $SiO_2$  в области фотодиода формировалось плавное изменение его толщины. Однако с уменьшением толщины буферного слоя возрастают потери мощности волноводного пучка, обусловленные проникновением поля моды в кремниевую подложку с большим показателем преломления. В связи с этим для регистрации света, туннелирующего в кремниевую подложку, часть приемной площадки фотодетектора располагают в области плавного перехода. Следует отметить, что с уменьшением градиента толщины изолирующего слоя возрастает общая протяженность фотодиода, необходимая для детектирования всего светового потока, распространяющегося в волноводе.

Для того чтобы оценить протяженность плавного перехода, проводился анализ влияния параметров рассматриваемой волноводной структуры  $As_2S_3-SiO_2-Si$  с плавно меняющейся толщиной буферного слоя в области фотодиода на потери мощности волноводного пучка. При этом считалось, что толщина пленки  $SiO_2$  меняется по закону  $\Delta = W/2(1 + \cos(\pi z/L))$ , где  $W$  — диапазон изменения толщины слоя  $SiO_2$ ;  $L$  — длина переходной области. На рис. 2 представлены зависимости интегральных потерь мощности излучения от протяженности плавного перехода  $L$  для  $TE_0$  и  $TE_2$  мод, рассчитанные с помощью выражений для излучательных потерь на изгибе и потерь, вызванных наличием подложки  $Si$  с большим показателем преломления, приведенных в [6 и 7] соответственно. С ростом  $L$  снижаются потери мощности волноводного пучка на изгибе (экспоненциально спадающие части кривых на рис. 2) и возрастают потери, связанные с поглощением проникающего в  $Si$ -подложку поля моды (монотонно возрастающие части зависимостей). Увеличение потерь с ростом индекса моды обусловлено, с одной стороны, увеличением коэффициента связи волноводных мод с излучательными модами, а с другой — увеличением локализации полей мод с большим номером в области подложки. В результате экстремум кривой для моды с наибольшим индексом будет определять минимальную длину плавного перехода, а протяженность фотодиода будет оцени-

Рис. 1. Схема оконечного интегрально-оптического элемента:

1—4 — воздух,  $As_2S_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Si$  соответственно;  $W$  — диапазон изменения толщины буферного слоя;  $L$  — область изменения плавного перехода;  $T$  — толщина волноводной пленки;  $f$  — фокусное расстояние волноводной линзы;  $A-A'$  — плоскость; область фотодиода заштрихована



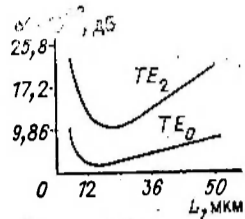


Рис. 2. Интегральные потери волноводного пучка на плавном переходе с  $W = 1$  мкм для  $TE_0$ - и  $TE_2$ -мод

ваться по наименьшему из модовых коэффициентов связи для связанных сред  $As_2S_3$  и Si. На основании полученных расчетных данных по определению параметров плавного перехода сформирована волноводная структура с  $T = 0,9$ ,  $L = 15$ ,  $W = 1$  мкм.

Составной частью описываемого ИО-фотоприемника является волноводная линза, позволяющая сфокусировать, сколлимировать волноводный световой пучок, осуществить фурье-анализ оптического сигнала. Существуют различные способы формирования интегрально-оптических линз [8–10]. В данной работе используется собирающая голографическая линза, которая, наряду с фокусировкой, выполняет функции элемента ввода. Запись линзы проводится внешними пучками ( $\lambda = 0,51$  мкм) с углами падения опорного и предметного пучков  $80$  и  $26^\circ$  соответственно в фоточувствительной волноводной пленке  $As_2S_3$ . Место расположения волноводной линзы выбирается таким образом, чтобы линейка фотоприемников находилась в фокальной плоскости волноводной линзы. Для увеличения дифракционной эффективности линзы, которая по оценкам составляет  $\sim 24\%$ , использовалось селективное травление в растворе KOH. Рабочая площадь ИО-линзы  $\sim 115$  мм<sup>2</sup>, ее фокусное расстояние  $f$  и размер пятна в фокусе в направлении  $y$  для  $TE_0$ -моды  $12,3$  мм и  $\sim 25$  мкм соответственно при диаметре падающего на линзу пучка  $D = 5$  мм. Измерения указанных параметров фокусирующей ИО-линзы выполнены на длине волны  $0,63$  мкм с помощью установки ПТУ-53 и набора микрообъективов, позволяющих получить на экране увеличенное изображение поверхности волноводной структуры и распространяющегося в волноводе светового пучка.

Экспериментально исследовалась угловая селективность волноводного элемента. При сканировании плоским считывающим пучком в плоскости  $XOZ$  (см. рис. 1) получены значения чувствительности ИО-элемента для различных мод тонкопленочного волновода:

Индекс моды	0	1	2
Угол ввода, град.	21,6	17,1	5,82
Чувствительность, А/Вт	0,3	0,13	0,09

Как видно, чувствительность детектирующего элемента относительно падающего пучка падает при увеличении индекса волноводной моды. Это связано с уменьшением степени локализации поля моды в области фазового профиля голографической структуры и с увеличением потерь на плавном переходе и в волноводном тракте. Коэффициент передачи световой энергии в фотодиод на  $TE_0$ -моду  $\sim 43\%$ .

При изменении угла падения светового пучка в плоскости  $A-A$ , расположенной под углом ввода  $TE_0$ -моды (см. рис. 1), получена зависимость дифракционной эффективности волноводной линзы от угла падения считывающего внешнего пучка  $\gamma$  (рис. 3, а). Так как при изменении угла  $\gamma$  изменяется направление распространения вводимого в волновод светового пучка, то для определения пространственно-угловых характеристик оконечного ИО-элемента используются все фотодиоды детектирующей линейки. При этом учитывается разброс чувствительности фотоприемников, измеренный с помощью нормально падающего светового пучка. При изменении кривизны волнового фронта  $\rho$  считывающего пучка, падающего на вол-

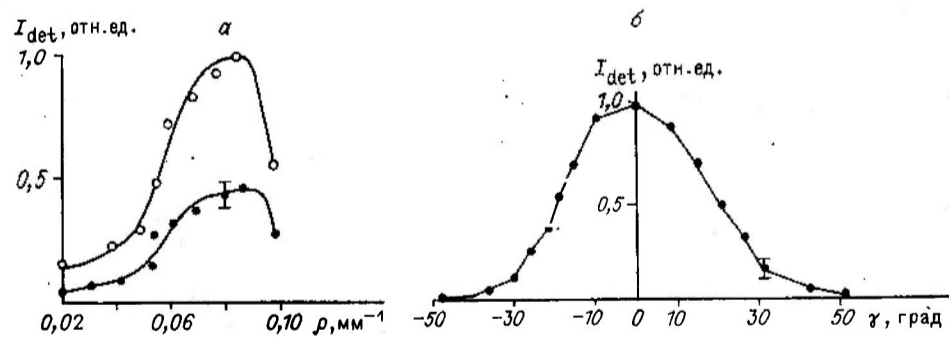


Рис. 3. Зависимость величины детектируемого сигнала от угла падения светового пучка  $\gamma$  в плоскости  $A-A$  (см. рис. 1) для  $TE_0$ -моды (а) и кривизны волнового фронта  $\rho$  считывающего пучка (б):

○ —  $TE_0$ , ● —  $TE_2$

поводную линзу, выявлена достаточно узкая резонансная зависимость дифракционной эффективности волноводной линзы от кривизны волнового фронта  $\rho$  (рис. 3, б). При измерениях зависимости  $I_{det}(\rho)$  параметры считывающего гауссова пучка варьируются с помощью системы линз в свободном пространстве таким образом, чтобы апертуры пучка в областях голограммы и фотодетектора не превышали размеры линзы и фотодиода соответственно. Для определения радиуса кривизны волнового фронта лазерного пучка используются известные преобразования гауссова пучка в свободном пространстве [11]. Контроль за соотношением размеров линзы, фотодиода и светового пучка осуществляется с помощью устройства ПТУ-53.

Зависимость дифракционной эффективности волноводной линзы от кривизны волнового фронта считывающего пучка объясняется, с одной стороны, зависимостью, приведенной на рис. 3, а, а с другой — тем, что при изменении  $\rho$  размер светового пучка в области фотодиода, имеющего конечный размер, изменяется и при определенных  $\rho$  начинает превышать размер приемной площадки фотоприемника. В результате с уменьшением размера фотодиода до размера фокусного пятна зависимость  $I_{det}(\rho)$  становится более узкой и точность идентификации кривизны считывающего пучка, а следовательно, и положение источника повышаются.

Важной характеристикой оконечного ИО-элемента является его разрешающая способность, которая, как правило, определяется поперечным размером фотодиода и периодом детектирующей линейки. Однако разрешение элемента может быть улучшено. Это достигается уменьшением периода линейки фотодиодов до величины предельного разрешения оптической части схемы (в данном случае волноведущего тракта и линзы). Последнее принято оценивать по величине, обратной размеру изображения точечного источника, которое для описанного устройства составляет  $\sim 40$  лп/мм. В [12] авторы показали, что ИО-линзы позволяют формировать изображение точечного источника с размером до нескольких микрон. Однако шумовые эффекты, возникающие на нерегулярностях волноводного тракта, могут накладывать существенные ограничения на разрешающую способность волноводного фотоприемного элемента, причем с увеличением индекса волноводной моды уменьшается значение отношения сигнал/шум [13].

Следует отметить, что основной недостаток описанного ИО-элемента заключается в том, что формирование плавного перехода представляет собой сложный технологический процесс. Эта проблема может быть решена путем выращивания пленки материала детектора в заранее сформированном окне буферного слоя с последующим отжигом. Длина фотодиода будет определяться туннельной связью волноведущими средами  $As_2S_3$  и Si, которая зависит от толщины изолирующего слоя. Потери, вызванные рассеянием на неоднородностях показателя преломления, можно оценить по френелевскому отражению от поверхности раздела соответствующих сред с показателями преломления  $n^*$  и  $n^* + \delta n^*$ , где  $\delta n^*$  обусловлено возмущением, вносимым Si в области диода. Так, для волноводной системы с толщиной буферного слоя в области детектора  $\sim 0,7$  мкм коэффициент отражения  $\sim 0,01\%$  для  $TE_n$ -моды и  $\sim 0,05\%$  для  $TE_4$ -моды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mergerian D. e. a. Advances in integrated optical spectrum analyser's // Proc. SPIE.— 1981.— 269.— P. 129.
2. Verber C. M., Kenan R. P., Busch J. R. Design and performance of an integrated optical digital correlator // J. Lightwave Tech.— 1983.— 1.— P. 256.
3. Морозов В. Н. Оптоэлектронные матричные процессоры.— М.: Радио и связь, 1986.
4. Boyd J. T., Chen C. Z. An integrated optical waveguide and chargecoupled device image array // IEEE J. Quantum Electron.— 1977.— QE-13, N 4.— P. 282.
5. Marx G. E., Gottlieb M., Brandt G. B. Integrated optical detector array, waveguide, and modulator based on silicon technology // IEEE J. Solid-State Circuits.— 1977.— SC-12, N 1.— P. 10.
6. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы.— М.: Мир, 1980.
7. Быковский Ю. А., Кульчин Ю. Н., Розовский М. О. и др. Исследование потерь световой мощности в тонкопленочном волноводе на подложке из кремния // Изв. вузов. Радиофизика.— 1980.— 23, № 1.
8. Anderson D. B., Davis R. L. e. a. Comparison of optical-waveguide lens technologies // IEEE J. Quantum Electron.— 1977.— QE-13, N 4.— P. 275.
9. Suhava T., Nishihara H., Koyama Y. Waveguide holograms: a new approach to hologram integration // Opt. Commun.— 1976.— 19, N 3.— P. 353.
10. Molesini G. Shaped Bragg gratings from circular fringe patterns for planar holographic lenses // J. Non-Cryst. Sol.— 1982.— 47, N 2.— P. 275.
11. Ярич А. Квантовая электроника.— М.: Сов. радио, 1980.
12. Yao S. K., Thompson D. E. Chip-grating lens for guidedwave optics // Appl. Phys. Lett.— 1987.— 33, N 7.— P. 635.
13. Kolbas R. M., Carney, Longebone M. D., Kalweit E. Z., Reimer S. T. Planar monolithic fiber optic receiver chip on GaAs semi-insulating substrate // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.— 1984.— V. 466: Opt. Interface Digit. Circuits and Syst. Proc. Conf.— Los Angeles, Calif., 1984.— P. 59.

Поступило в редакцию 6 декабря 1989 г.