

*В. И. Наливайко<sup>1</sup>\*, М. А. Пономарева<sup>1</sup>*

## **Дифракционные интеграторы для объединения внешних лазерных пучков**

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

**Аннотация.** Представлены варианты устройств для суммирования внешних параллельных лазерных пучков – волноводный и дифракционный интеграторы. В основу первого устройства положена 3D-конструкция планарных волноводов с оптической развязкой входных элементов от общей шины. Дифракционный интегратор построен на основе фрагментов внеосевых зонных пластинок, формирующих суммирование входных лазерных пучков на боковой плоскости подложки. Возможные области применения интеграторов – создание на их основе оптических интегральных схем и получение мощных лазерных пучков.

**Ключевые слова:** халькогенидные слои, интегральная оптика, интегратор

*V. I. Nalivaiko<sup>1</sup>\*, M. A. Ponomareva<sup>1</sup>*

## **Diffraction Integrators for Combining External Laser Beams**

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

**Abstract.** Variants of devices for summing external parallel laser beams – waveguide and diffraction integrators are presented. The first device is based on a 3D design of planar waveguides with optical decoupling of input elements from a common bus. The diffraction integrator is based on fragments of off-axis zone plates that form the summation of input laser beams on the lateral plane of the substrate. Possible areas of application of integrators are creation of optical integrated circuits on their basis and production of high-power laser beams.

**Keywords:** chalcogenide layers, integrated optics, integrator

### ***Введение***

В устройствах обработки оптической информации для интегрирования информационных оптических потоков традиционно применяются оптические линзы. Цилиндрические и сферические линзы выполняют одномерные и двумерные преобразования Фурье. Предлагаемые в данной статье интеграторы оптических пучков предназначены для решения подобных задач в условиях представления информационных потоков в виде дискретных лазерных пучков и когда недопустимо применение объемных линз, например, в интегральной оптике. Интеграторы (оптические объединители), предназначенные для объединения световых пучков, применяются для суммирования двух и более световых пучков в целях их усиления. Применение интеграторов позволяет получить лазерные пучки большой мощности [1–3], осуществить значительное усиление слабых оптических сигналов, встречающихся в астрономии и микроскопии [4, 5], а также обес-

печивает возможность выполнения вектор-матричных оптических преобразований в устройствах ассоциативной памяти и коммутирующих схемах [6–8].

В нашем случае основной элемент оптического интегратора – это линейное устройство, выполняющее объединение  $N$  параллельных лазерных пучков. Количество  $M$  основных линейных элементов определяет разрядность матрицы интегратора с  $N \times M$  входов.

Предлагается два варианта интеграторов лазерных пучков. Это волноводный интегратор на основе общего волновода, матрицы волноводно-дифракционных элементов ввода и линейки дифракционных элементов вывода [9, 10] и объемный дифракционный интегратор. Последний конструктивно более прост в изготовлении и имеет некоторые преимущества по сравнению с волноводным. В объемном интеграторе отсутствуют планарные волноводы, функционально интегратор не требует задания определенных расстояний в линейном массиве входных оптических пучков, и нет выводных дифракционных элементов.

### *Многослойный волноводный интегратор*

Интегратор выполнен в виде тонкопленочной многослойной 3D-конструкции (рис. 1). Интегратор включает в себя общую оптическую шину, представляющую собой тонкопленочный планарный волновод, и системы вводных и выводных элементов, основанных на рельефных дифракционных решетках. Технология изготовления интегратора подробно изложена в [9].

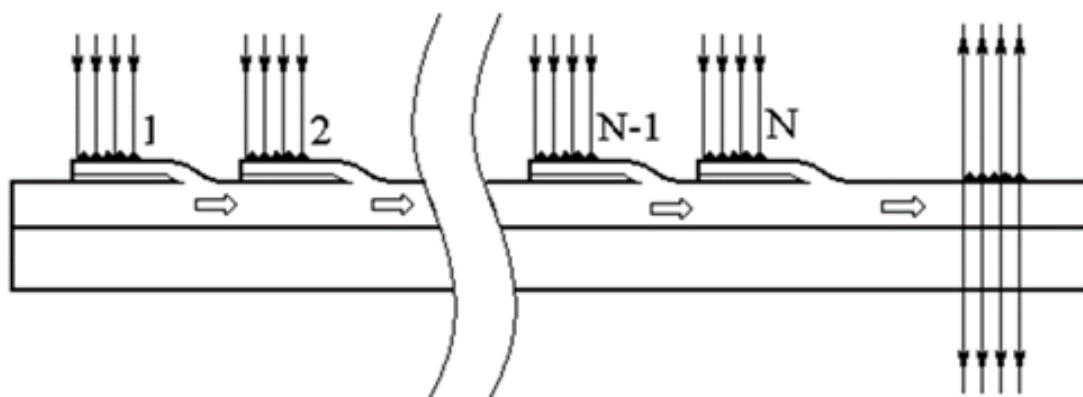


Рис.1. Интегратор  $N$  световых пучков на основе планарного волновода с оптической развязкой

Для исключения рассеяния волноводной моды шины на вводных дифракционных элементах мы применили оптическую развязку в виде буферного диэлектрического слоя. Вводной элемент интегратора детально представлен на рис. 2.

Буферный слой является препятствием для волноводной моды основного волновода, не позволяя ей выводиться через вводные решетки. На внешней поверхности буферного слоя формируются вводные волноводы для связи с основным волноводом. Для совпадения угла распространения волноводной моды в вводном волноводе с углом распространения моды в основном волноводе необходим подбор толщины этих волноводов, исходя из условия фазового согласо-

ния [10]. Подробный анализ характеристик волноводного интегратора для объединения внешних оптических пучков проведен в [11].

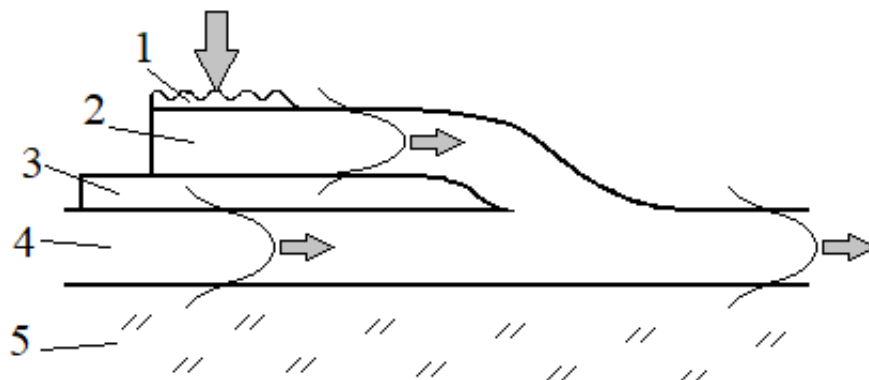


Рис. 2. Элемент 3D – интегратора лазерных пучков: 1 – решетчатый элемент ввода ( $As_2S_3$ ); 2 – вводной волновод ( $As_{20}S_{80}$ ), 3 – буферный слой ( $MgF_2$ ), 4 – основной волновод ( $As_{20}S_{80}$ ), 5 – подложка (стекло K8)

Ранее предложенная нами конструкция интегрально-оптического делителя оптических пучков также включает в себя общую оптическую шину в виде планарного волновода, а также линейки вводных и выводных элементов, основой которых являются рельефные дифракционные решетки [12]. Поскольку предполагается совместное использование делителей и интеграторов при вектор-матричных преобразованиях [13], то единая технология их изготовления позволит упростить процесс создания на их основе оптических интегральных схем.

### *Дифракционный интегратор*

Дифракционный интегратор представляет собой набор одинаковых фрагментов внеосевых зонных пластинок, сформированных в слое фоторезиста на поверхности подложки из оптического стекла (рис. 3).

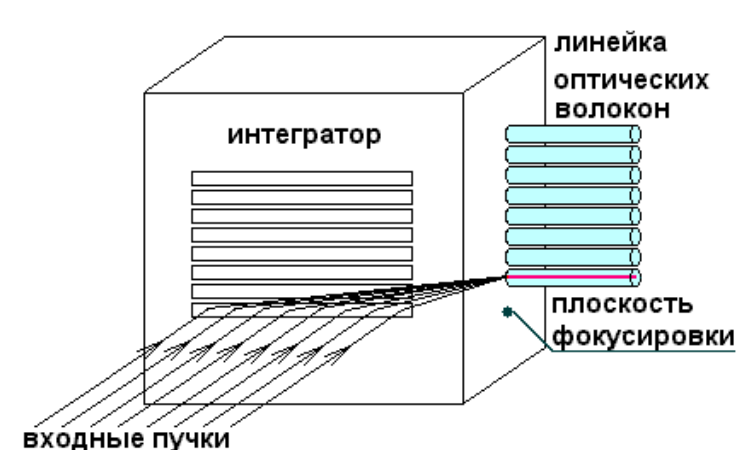


Рис.3. Дифракционный интегратор оптических пучков

Число фрагментов внеосевых зонных пластинок определяет разрядность матрицы входных пучков по количеству строк.

Когда массив параллельных входных пучков падает на поверхность дифракционной структуры, пучки дифрагируют и фокусируются вблизи торцевой плоскости подложки в линейку выходных пучков, каждый из которых по интенсивности равен сумме интенсивностей пучков в данной строке. В выходной плоскости на боковой грани подложки осуществляется ввод сфокусированных пучков в линейку оптических световодов.

### *Голографическая запись фрагментов внеосевых зонных пластинок*

Фокусирующая внеосевая дифракционная решетка интегратора изготавливалась в слое фоторезиста. В качестве фоторезиста использовались халькогенидные слои трисульфида мышьяка  $As_2S_3$  ( $n = 2,5$ ) толщиной 5 мкм, полученные термическим испарением на подложки из оксидного стекла К8.

Оптическая схема голографической записи фрагментов внеосевых зонных пластинок приведена на рис. 4.

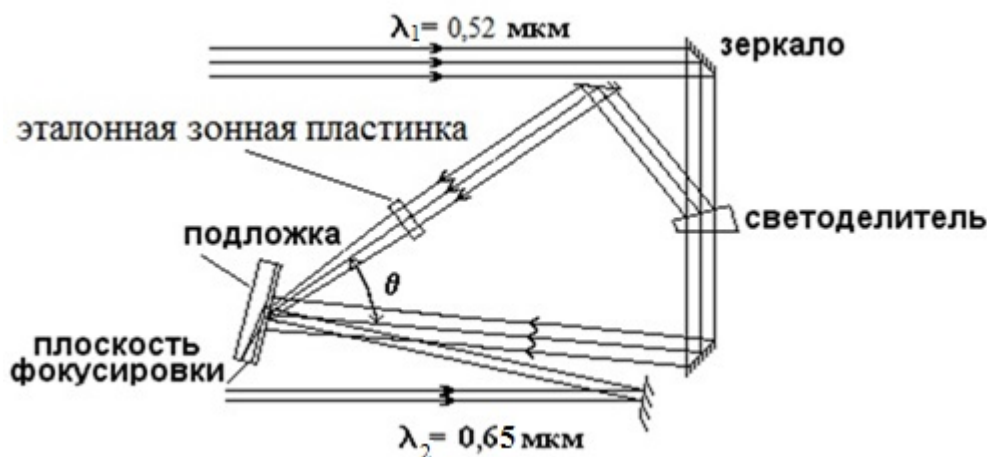


Рис.4. Оптическая схема записи внеосевых зонных пластинок

Запись дифракционных структур проводилась коллимированным пучком аргонового лазера ( $\lambda_1 = 0,52$  мкм). В процессе записи проводился контроль качества регистрации дифракционной структуры в фоторезисте с помощью пучка He-Ne лазера ( $\lambda_2 = 0,65$  мкм). Для формирования сферического волнового фронта применена рельефная зонная пластинка с фокусным расстоянием  $F = 250$  мм и диаметром 60 мм, синтезированная нами ранее на лазерном фотопостроителе [14]. Такая зонная пластинка является эталоном волнового фронта и формирует при фокусировке плоского волнового фронта дифракционно ограниченный диаметр кружка Эйри. Углы падения на подложку с фоторезистом плоского и сферического волновых фронтов составляли  $5^\circ$  и  $68^\circ$  соответственно.

Для создания набора полосок из узких фрагментов внеосевых зонных пластинок в регистрирующем материале использовалась маска с размерами

2 x 30 мм. Относительные положения образца и маски во время записи фрагментов зонных пластин устанавливались с помощью шагового двигателя, управляемого компьютером с помощью соответствующего программного обеспечения. Таким образом было последовательно изготовлено 8 фрагментов интегратора размером 2 x 30 мм каждый на расстоянии 1 мм друг от друга.

Около 50% интенсивности входных лазерных пучков было объединено одним из фрагментов интегратора, и порядка 60% этой интенсивности было введено в многомодовое волокно.

Использование машинного литографического синтеза вводных дифракционных элементов интегратора с контролируемым фазовым рельефом фрагментов зонных пластинок позволит существенно увеличить эффективность предлагаемых интеграторов лазерных пучков.

### ***Результаты эксперимента с дифракционным интегратором***

Были получены экспериментальные образцы дифракционного интегратора на подложках с размерами 40 x 40 x 15 мм. Диаметр входных лазерных пучков – 1,5 мм. Рабочая длина волны дифракционного интегратора – 650 нм. Шаг расположения ячеек – непрерывный по оси *X* и 2 мм по оси *Y*. Размерность интегратора – 8 x 8 входных пучков.

Оптическая эффективность макета дифракционного интегратора (вход /выход) ~ 50%. Разброс интенсивности при вводе в волокно для световых пучков от разных ячеек не превышал 5 %.

### ***Заключение***

В настоящее время отработаны все технологические этапы для практической реализации интеграторов оптических пучков обоих предлагаемых типов на основе халькогенидных резистов – нанесение халькогенидных волноводов и буферных слоев в высоком вакууме, получение вводных и выводных голографических решеток рельефного типа. Формируются технические задания на возможные параметры интеграторов для различных приложений.

### ***Благодарности***

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

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Shi P., Zhang X. In: Asia Comm. and Phot. Conf. (Optica Publishing Group, 2017), Su2A.90. DOI: 10.1364/acpc.2017.su2a.90.
2. Choi I. S., Park J., Jeong H., Kim J. W., Jeon M. Y., Seo H.-S. Opt. Expr. – №26 (23). – 30667 (2018). DOI: 10.1364/oe.26.030667.
3. Thielen P. A., Ho J. G., Burchman D. A., Goodno G. D., Rothenberg J. E., Wickham M. G., Rowland K. B. / Opt. Lett. – №37 (18). – 3741 (2012). DOI: 10.1364/ol.37.003741.
4. Benisty M., Berger J. P., Joco L., Labeye P., Malbet F., Perraut K., Kern P. / Astronomy and Astrophysics. – №498 (2). – 601 (2009). DOI: 10.1051/0004-6361/200811083.
5. Goldsmith H.-D. K., Cvetojevic N., Ireland M., Madden S. / Opt. Expr. – №25 (4). – 3038 (2017). DOI: 10.1364/oe.25.003038.

6. Семенов А.С. Оптические волноводные процессоры / Квантовая электроника // А.С. Семенов, В.Л. Смирнов, А.В. Шмалько. – 1987. – №14 (7). – С.1319–1360.
7. Vlasov Y. A. Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100G / IEEE Commun. Mag. – 2012. – №50 (2). – P. 67–72. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6146487.
8. Козик В. И., Твердохлеб П. Е. 3-D оптические интегральные схемы ассоциативной памяти // Автометрия. – 1993. – №3. – С. 44–48.
9. Каменев Н. Н., Наливайко В. И. Интегратор световых пучков // Патент РФ на изобретение № 2167445 по заявке № 99111038 с приоритетом от 19.05.1999.
10. Волноводная оптоэлектроника, под ред. Т. Тамира – М., Мир. – 1991. – С. 339.
11. Наливайко В. И., Пономарева М. А. Анализ характеристик волноводного устройства для объединения внешних оптических пучков // Оптика и спектроскопия. – 2023. – № 131, вып. 1. – С. 95–100. DOI: 10.21883/OS.2023.01.545444.4035-22.
12. Каменев Н. Н., Наливайко В. И. Дифракционные демультимплексоры для трехмерных интегрально-оптических микросхем // Автометрия. 1993. – №3. – С. 114–119.
13. Gigailenko M. A. Waveguide 3D optical integrated circuits / M.A. Gigailenko, N.N. Kamenev, V.I. Nalivaiko, P.E. // Tverdokhlebs Proc. SPIE. – 1999. – 3900. – P. 187.
14. Ведерников В. М. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов / В. М. Ведерников, В. Н. Вьюхин, В. И. Наливайко, Ю. Н. Юрлов // Автометрия. – 1981. – №3. – С. 3–16.

© В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, 2023