

УДК 535.317.2

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО МАТРИЧНОГО МИКРОЛИНЗОВОГО ДЕЛИТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Яковенко Н. А.¹, Романов А. А.²

USING OF OPTICAL INTEGRATED MICRO LENS MATRIX DIVIDER FOR OPTICAL SIGNALS POWER
MEASUREMENT

Yakovenko N. A., Romanov A. A.

The way of using optical integrated micro lens matrix divider as base for constructing optoelectronic analog-to-digital converter was described. The example of matrix topology divider on the bases of ray tracing is presented.

Keywords: integrated optic, micro lens divider, analog-to-digital converter, optoelectronic, ray tracing.

Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию и разработке датчиков физических величин, в основе которых лежат волоконно- и интегрально-оптические устройства [1]. Соответственно, растет потребность в создании систем опроса, обеспечивающих высокие скорости демодуляции и низкий уровень искажений оптических аналоговых сигналов, генерируемых оптическими датчиками.

В данной статье рассматривается способ применения интегрально-оптического матричного микролинзового делителя излучения, который позволит организовать высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь для измерения мощности оптического аналогового сигнала, выполняющий измерения одновременно по нескольким каналам.

На сегодняшний день одним из самых скоростных типов электронных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) являются АЦП параллельного типа. Высокая скорость преобразования таких АЦП обеспечивается тем, что измеряемое напряжение одновременно поступает на входы нескольких измерительных каналов, содержащих $2m - 1$ компараторов, где m — количество двоичных

разрядов выходного значения АЦП. Опорные напряжения каждого i -го компаратора при $i = \overline{0 \dots m-1}$ равно $i(U_{ref}/2m)$, где U_{ref} — опорное напряжение АЦП. В результате на выходах компараторов устанавливается набор логических уровней, формирующих так называемый «термометрический код» (англ. “thermometer code”) измеренного уровня. Значение измеренного напряжения, представленное в этом коде, преобразуется специальным приоритетным дешифратором в двоичный код.

Серьезным недостатком таких АЦП является высокая электрическая емкость измерительного тракта, обусловленная большим количеством измеряющих компараторов. Поэтому для предотвращения искажения входного сигнала требуется сложная система его буферизации, что значительно усложняет организацию параллельных АЦП большой разрядности.

При необходимости измерения мощности оптического сигнала можно существенно ослабить влияние входных емкостей компараторов, заменив электронную систему буферизации на оптическую и гальванически разделив их входы. Для этого необходим оптический разветвитель, на каждом из выходов которого необходимо установить

¹Яковенко Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: una@phys.kubsu.ru.

²Романов Александр Алексеевич, аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: tramborn@rambler.ru.

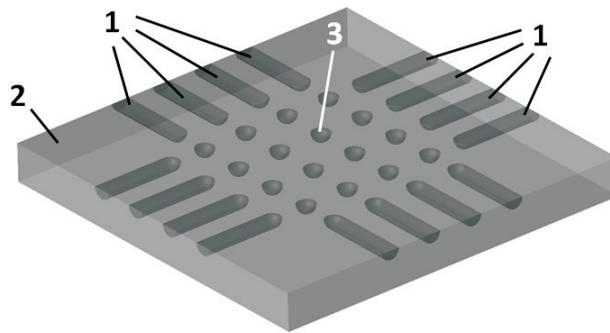


Рис. 1. Схематическое изображение матричного микролинзового делителя излучения: 1 — интегральные каналные волноводы; 2 — подложка; 3 — микролинза

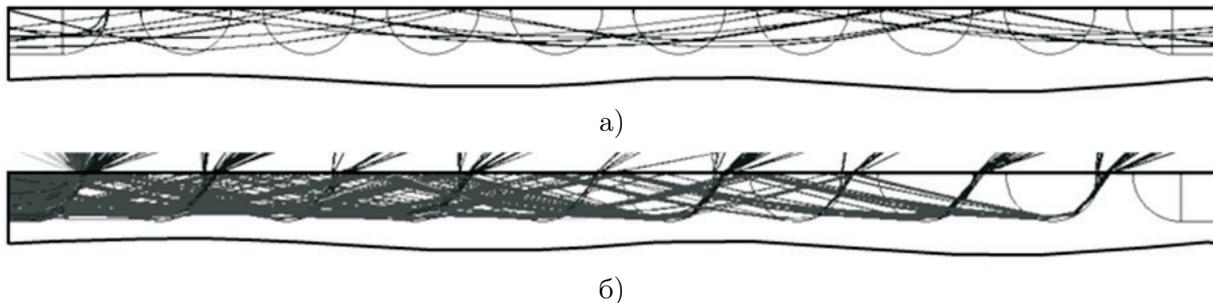


Рис. 2. Ход лучей в продольном сечении линии микролинз, построенный методом трассировки: а — лучи, распространяющиеся в линии микролинз без выхода на поверхность; б — лучи, ответвленные на поверхность

фоточувствительный элемент, преобразующий разветвленные сигналы в электрическую форму.

В данной статье предлагается использовать в качестве разветвителя оптического излучения интегрально-оптический матричный микролинзовый делитель [2]. Рассмотрим его конструкцию.

1. Конструкция интегрально-оптического матричного микролинзового делителя

Матричный микролинзовый делитель (рис. 1) представляет собой оптическую интегральную схему, состоящую из двух или четырех групп интегральных каналных волноводов, расположенных по периметру стеклянной подложки, и матрицы интегральных микролинз, сформированных таким образом, что каждая из них расположена на пересечении осей волноводов, находящихся на прилегающих сторонах подложки. Интегральная схема делителя изготавливается методом электростимулированного ионного обмена из расплава AgNO_3 , поэтому, в силу

особенностей данной технологии, волноводы и микролинзы имеют распределение показателя преломления (ПП) близкое к ступенчатому, а волноводы, обращенные к микролинзам, имеют закругленные окончания, радиусы кривизны которых равны радиусам микролинз [2].

Волноводы должны иметь размеры, обеспечивающие многомодовый режим работы на используемой длине волны. На практике были получены микролинзовые делители с радиусами микролинз в пределах 40–60 мкм. Диапазон размеров интегрально-оптических элементов делителя позволяет использовать для моделирования распространения света в них приближения геометрической оптики.

Входными портами матричного микролинзового делителя являются плоские торцы волноводов, выходящие на края подложки. При введении в любой из волноводов, свет будет распространяться сквозь линию микролинз, последовательно испытывая преломления на границах микролинз и подложки и отражаясь от плоскости подложки, в которой сформированы микролинзы. При этом за счет преломления, полного и неполного внутреннего отражения часть оптического излу-

чения будет выводиться на поверхность подложки у краев микролинз и закругленных окончаний волноводов. Области выхода излучения на поверхности подложки являются выходными портами данной оптической интегральной схемы.

На рис. 2а схематически показан ход лучей света в продольном сечении линии из 8 микролинз и двух волноводов, построенный методом трассировки. Для наглядности, на рисунке приведены только лучи, распространяющиеся в линии микролинз без выхода на поверхность подложки. На рис. 2б показан ход только тех лучей в линии микролинз, которые ответвляются на поверхность подложки.

Максимальная мощность ответвленного излучения наблюдается у закругленного окончания волновода. Это связано с тем, что для части оптического излучения, распространяющегося в волноводе, выполняются условия полного внутреннего отражения на его закругленном окончании в отличие от микролинз, где излучение выводится на поверхность в основном за счет преломления и неполного внутреннего отражения на границе микролинзы и подложки.

Мощность, ответвляемая закругленным окончанием волновода в воздух при разности Δn_1 микролинз/волноводов и подложки 0,07–0,1, составляет 2–5%, от мощности, введенной в волновод.

Мощность оптического излучения, ответвленного каждой из микролинз, зависит от ее положения в топологии интегральной схемы, значения Δn_1 и разности ПП Δn_2 микролинзы и среды над ней.

Следовательно, при проектировании устройства, в состав которого входит матричный микролинзовый делитель, необходимо рассматривать его в комплексе с конструктивными элементами, служащими для распределения его выходного оптического сигнала между приемниками. Рассмотрим конструктивные элементы, которые могут быть использованы для соединения выходных портов делителя и фотоприемников для гальванической развязки измерительных каналов АЦП параллельно типа.

2. Матричный микролинзовый делитель в составе АЦП параллельного типа

Современные технологии конструирования оптоэлектронных устройств позволяют

создавать многослойные печатные платы, в которых один или несколько слоев представляют собой оптическую интегральную схему, изготовленную в стеклянной или полимерной подложке [3]. Матричный микролинзовый делитель оптического излучения удобен для использования в составе многослойных печатных плат, поскольку его выходные порты распределены по большой площади плоской поверхности подложки. Таким образом, топология электрической схемы АЦП может быть сформирована на слоях печатной платы, расположенных над слоем, содержащим интегрально-оптическую схему матричного делителя.

Для передачи оптического излучения, ответвленного микролинзами делителя на поверхность печатной платы, можно использовать стандартные металлизированные переходные отверстия, повсеместно применяемые при изготовлении многослойных печатных плат. Металлизация стенок переходных отверстий, расположенных над микролинзами, будет выполнять функцию световодов, направляющих оптическое излучение к фотодетекторам. Для уменьшения отражения ответвляемого микролинзами излучения на границе подложки, металлизированное отверстие может быть заполнено иммерсионной средой с ПП близким к ПП микролинз.

На рис. 3 схематически изображены продольное сечение многослойной печатной платы, один из слоев которой содержит матричный микролинзовый делитель, и ход лучей в делителе и металлизированных отверстиях печатной платы, служащих для распределения оптического излучения между приемниками на поверхности платы.

На рис. 3 представлено продольное сечение стеклянной подложки 1, содержащей волновод 2 и линию микролинз 3. Над закругленным окончанием входного волновода 2 и каждой из микролинз 3 в материале подложки печатной платы 4 расположено переходное отверстие, стенки которого имеют слой металлизации 5, а полость отверстия 6 заполнена иммерсионной средой. На поверхности печатной платы напротив отверстий, располагаются фотодетекторы 7 выполняющие преобразование мощности ответвленного микролинзами оптического излучения в электрическую форму.

Рассмотрим работу АЦП параллельного типа с разрядностью $m = 3$, в состав которого входит матричный микролинзовый делитель. Для этого отдельно рассмотрим од-

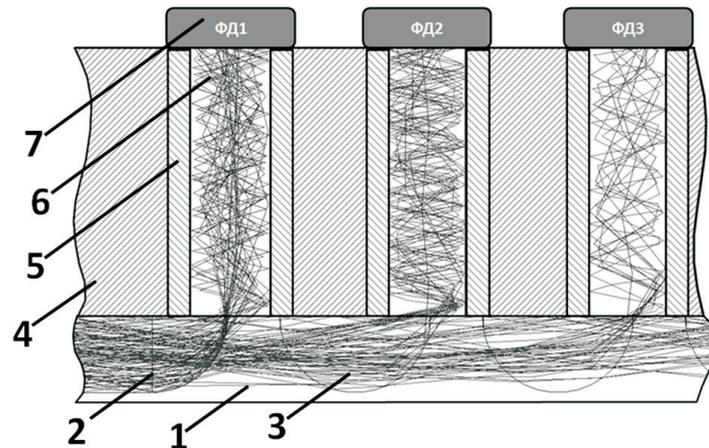


Рис. 3. Продольное сечение многослойной печатной платы с матричным микролинзовым делителем: 1 — стеклянная подложка; 2 — входной волновод; 3 — микролинза; 4 — материал подложки печатной платы; 5 — металлизация стенки переходного отверстия; 6 — полость переходного отверстия; 7 — фотодетекторы

ну из строк матрицы, состоящую из одного канального волновода и микролинз, количество которых $k = 3$. Над линией микролинз, как было описано выше, расположена печатная плата с металлизированными отверстиями, служащими для передачи оптического излучения, ответвленного микролинзами во входные апертуры 4-х фотодетекторов ФД0 — ФД3. К выходам фотодетекторов подключено $2^m - 1 = 7$ компараторов, как показано на рис. 4.

Пусть i — номер элемента делителя-микролинзы или волновода, т.е. $i = 0$ — окончание волновода, $i = 1 \dots k$ — номера микролинз при счете от окончания волновода. Измеряемый оптический сигнал, имеющий мощность $P_{вх0}$, вводится в канальный волновод и распространяется сквозь линию микролинз. При прохождении каждого участка подложки между элементами делителя на излучение теряется часть мощности оптического сигнала равная $P_{изл}^i$. Мощность излучения $P_{вх}^i$, падающая на поверхность i -ой микролинзы в подложке, равна

$$P_{вх}^i = \left(P_{вх0} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} P_{отв}^j + \sum_{j=1}^i -1 P_{изл}^j \right) \right),$$

где $P_{отв}^i$ — оптическая мощность, ответвляемая i -м элементом делителя.

Коэффициент ответвления M_i каждого из элементов делителя

$$M_i = \frac{P_{вх}^i}{P_{отв}^i}.$$

Значение M_i зависит от положения элемента в топологии оптической интегральной схемы и рассчитывается с помощью метода трассировки луча.

Мощности сигналов $P_{отв}^i$, ответвленных микролинзами, улавливаются фотодетекторами ФД $_i$, преобразуются в электрическую форму и поступают на входы компараторов. опорное напряжение каждого i -го компаратора $U_{оп}^i$ может быть рассчитано по формуле

$$U_{оп}^i = i I_i \left(\frac{U_{ref}}{2^{n-1}} \right),$$

где U_{ref} — опорное напряжение АЦП, а $I_i = P_{отв}^0 / P_{отв}^i$ — коэффициент ответвления каждой из микролинз.

Приведем пример расчета топологии матричного микролинзового делителя излучения для гальванической развязки 3-х разрядного АЦП.

Диаметры переходных отверстий печатной платы выбираются исходя из коэффициента ответвления волновода M_0 , выбор которого, в свою очередь, зависит от чувствительности применяемых фотодетекторов. Зависимости M_0 от соотношения радиуса кривизны окончания волновода R_k и радиуса переходного отверстия R_o для типичных значений разностей Δn_1 подложки и волноводов приведены на рис. 5а.

Выражение, аппроксимирующее зависимость M_0 от R_k/R_o и Δn_1 , имеет вид

$$M_0 = 10 \sqrt{\frac{R_k}{R_o}} - 140 \Delta n + 9.$$

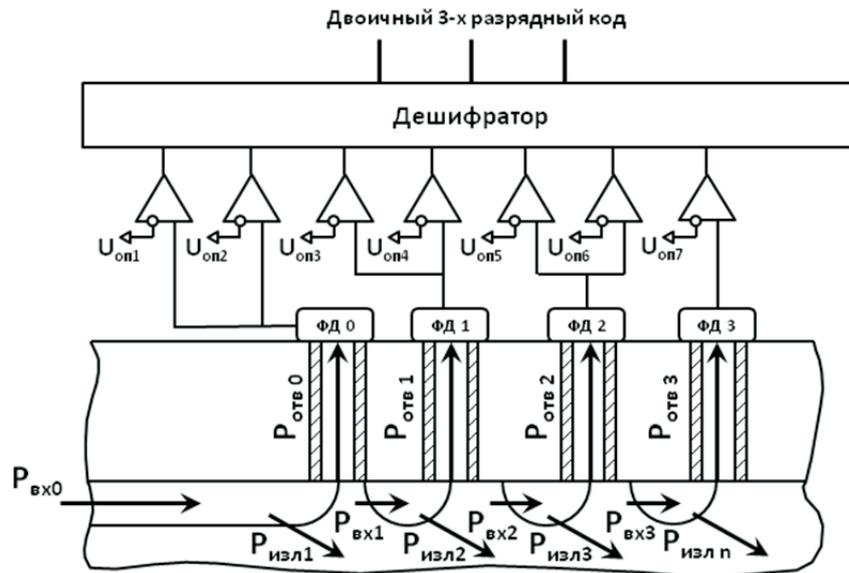


Рис. 4. Структурная схема АЦП на основе матричного делителя излучения

Для расчета, примем значение $M_0 = 10$, а $\Delta n_1 = 0,1$, что достигается при соотношении $R_k/R_o = 2$. Тогда при радиусе кривизны $R_k = 50$ мкм микролинз и окончаний волноводов радиус $R_o = 25$ мкм.

Соотношение коэффициентов деления элементов делителя I_i является определяющим фактором при расчете топологии микролинзового делителя. Выберем коэффициент деления микролинз $I_i = 2^i$. При таком распределении I_i ответвляемых микролинзами мощностей $P_{отв i}$, в случае, когда значения разности ПП Δn_1 микролинз и подложки лежат в диапазоне $0,07-0,1$, что обычно достигается при изготовлении оптических интегральных схем по технологии электростимулированной миграции ионов $AgNO_3$ в боросиликатных стеклах, расстояния S между центрами каждой i -ой микролинзы и центром кривизны окончания входного волновода может быть найдено из выражения

$$S_i = 0,5e^i - 0,62,$$

где i — номер микролинзы в линии. Данное выражение получено на основании метода трассировки луча. Гистограмма значений смещения S для линии из 5 микролинз с заданными выше параметрами приведена на рис. 5б.

Матричный микролинзовый делитель включает несколько линий микролинз, следовательно, объединив его с соответствующей топологией печатной платы, как было описано выше, можно организовать много-

канальный АЦП. При увеличении разрядности АЦП возрастает количество микролинз, требуемое для распределения оптического сигнала между его измерительными компараторами.

Для уменьшения размеров интегральной схемы многоразрядный АЦП может быть сформирован с помощью нескольких строк/столбцов матричного микролинзового делителя. В этом случае измеряемый оптический сигнал АЦП может поступать в линии микролинз через обычный Y-образный интегрально-оптический разветвитель, что позволит значительно уменьшить размеры топологии матричного делителя. Количество микролинз для формирования описанного АЦП может быть также уменьшено при увеличении количества компараторов, подключаемых к каждому фотодетектору, что определяет границы полосы частот измеряемых сигналов.

Заключение

Рассмотрен пример организации аналого-цифрового преобразователя параллельного типа для измерения мощности оптических сигналов. Преимуществами предложенной конструкции являются: во-первых, гальваническая развязка измерительных каналов АЦП, снижающая их электрическую емкость, расширяющая полосу частот измеряемого сигнала и позволяющая наращивать разрядность АЦП; во-вторых, высокая ско-

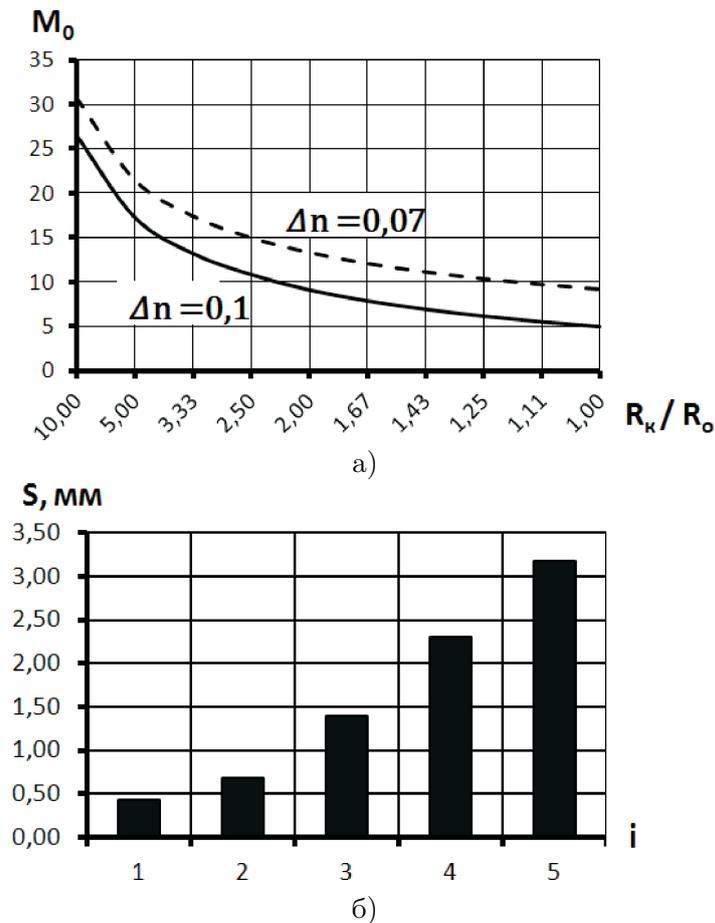


Рис. 5. Основные зависимости при расчете топологии матричного делителя: а — зависимость коэффициента ответвления линии микролинз M_0 от соотношения радиуса кривизны окончания волновода R_k и радиуса переходного отверстия R_0 ; б — гистограмма значений смещения каждой из линз линии для получения распределения мощностей ответвления $P_{отв i} = 2P_{отв i} + 1$

рость измерений, достигаемая архитектурой параллельного АЦП и ограниченная двумя факторами: полосой пропускания фотодетекторов, служащих для преобразования измеряемого сигнала в электрическую форму, задержкой срабатывания (временем распространения) логических элементов, формирующей выходной двоичный код.

Литература

1. Яковенко Н. А., Никитин В. А., Вежишин М. М., Романов А. А. №2010135561/28, заявл. 24.08.2010; опубл. 20.12.2010, Бюл. №3.
2. Wang X., Jiang W., Wang L., Bi H. Fully Embedded Board-Level Optical Interconnects From Waveguide Fabrication to Device Integration // Lightwave Technology. 2008. Vol. 26. Iss. 2. P. 243–250.
3. Daele P. Optical interconnections for short distances // 2008. [URL] http://www.opera2015.org/deliverables/D_4_3_CD-ROM_Wroclaw_Nieuw/6_Proceedings/54_Peter_Van_Daele.pdf.

Ключевые слова: интегральная оптика, делитель оптического излучения, аналого-цифровой преобразователь, оптоэлектроника, трассировка луча.