

УДК 621.384.3

ПЛАНАРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ. ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОПОЛИМЕРА EPOSCORE

Алексей Валерьевич Кузовков ⁽¹⁾, Дарья Михайловна Кузищева ⁽²⁾,

Студент 4 курса ⁽¹⁾, студент 4 курса ⁽²⁾,

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва,

ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

В области телекоммуникаций давно намечена тенденция замены электрических соединений оптическими. Оптоволокно в этом случае используется для организации связи между устройствами. Подобный переход позволяет значительно увеличить полосу пропускания канала связи. Данное преимущество оптических соединений, а также отсутствие перекрёстных помех и низкие потери сигнала обуславливают следующий шаг интеграции оптики и электроники - создание оптических шин для реализации связей между узлами одного устройства. С примером подобной шины можно ознакомиться в работе [5]. Следующий уровень – использование планарных оптических волноводов (далее - ОВ) в качестве межсоединений в печатных платах и гибридных интегральных схемах. Совместно с уже перечисленными достоинствами ОВ отсутствие тепловыделения определяет перспективы их использования в теплонагруженных коммутационных платах. Подробное описание преимуществ оптических межсоединений приводится в работе [3].

Недостатком оптических линий связи является необходимость использования источников и приёмников излучения. В случае внешнего подвода сигнала источником может служить лазерный диод, при необходимости размещения источника непосредственно на плате используют поверхностно излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL). VCSEL представляет собой элемент, монтируемый по технологии флип-чип и имеющий габариты в среднем 200x200x150 мкм. Диаметр активной области лазера составляет 10 мкм, а угол расхождения пучка, как правило, не превышает 20°. Чаще используются не одиночные источники, а их массивы по 4 и 12 элементов. В качестве приёмников излучения используют фотодиоды и их массивы.

Следует отметить, что вместо источников излучения на плате могут применяться устройства, модулирующие внешний общий сигнал.

Планарный ОВ представляет собой канал (ядро) прямоугольного сечения, сформированный внутри оптически менее плотного материала (оболочки). Световой сигнал распространяется в канале за счёт полного внутреннего отражения от поверхности раздела ядро/оболочка (Рис.1). Роль оболочки может играть воздух, поскольку его коэффициент преломления меньше чем у любого оптического материала.

Распространение света в волноводе

Геометрическая оптика допускает распространение луча под любым углом к оси волновода в пределах определённого диапазона. Более точный анализ на основе волнового

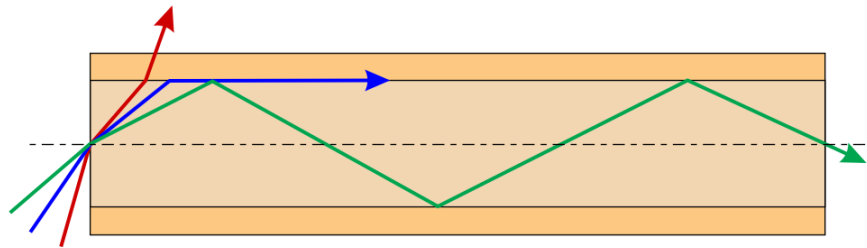


Рис. 1. Распространение света в оптическом волноводе

подхода показывает, что лучи в волноводе могут распространяться не под любым углом к оси, а только под углами, удовлетворяющими условию конструктивной интерференции [4]. Это означает, что после двух отражений волна должна воспроизвести сама себя (Рис.2). Лучи, распространяющиеся под углами, удовлетворяющими условию конструктивной интерференции, называются волноводными модами. Только для этих лучей распределение интенсивности не меняется вдоль волокна.

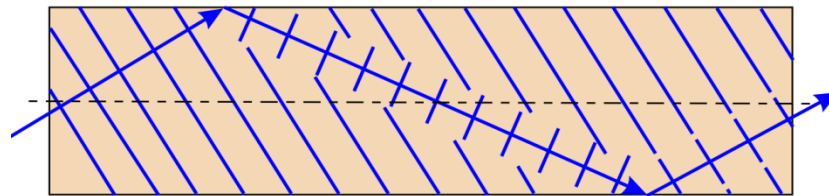


Рис. 2. Волновая мода

Ключевым фактором при передаче сигнала по оптическому каналу является дисперсия – расширение импульса. Выделяют три вида дисперсий: межмодовая, хроматическая и поляризационная модовая. Моды разных порядков, одновременно вошедшие в волновод, преодолевают различные расстояния (рис.3), из-за чего попадают на приёмник с разной задержкой. Так возникает межмодовая дисперсия. Очевидно, проблема решается использованием одномодовых волноводов, характерные размеры сечения для которых не превышают 5 мкм.

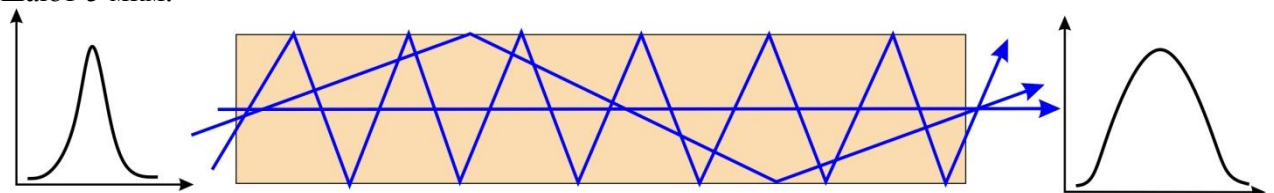


Рис. 3. Межмодовая дисперсия

Хроматическая дисперсия возникает из-за различия скоростей разных спектральных компонент светового сигнала и зависит от ширины спектра входного импульса. Таким образом, для снижения хроматической дисперсии необходимо использовать узкополосные источники излучения.

Физическая природа поляризационной модовой дисперсии заключается в различии скоростей распространения поляризационных компонент одной моды (рис. 4). Как видно, данный вид дисперсии характерен даже для одномодовых волноводов.

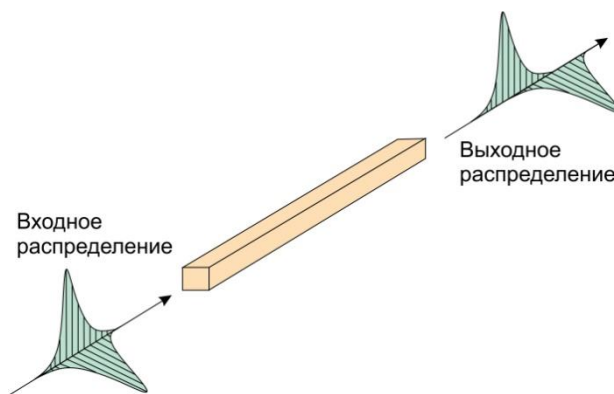


Рис. 4. Поляризационная модовая дисперсия

Следует отметить, что ОВ имеют большие потери по сравнению с оптоволокном. Волоконно-оптические линии связи имеют потери не более 1 Дб/км, в то время как полимерные планарные волноводы – от 0.2 до 1 Дб/см. Такие высокие значения потерь в планарных волноводах обусловлены в первую очередь прямоугольной формой поперечного сечения. Также вносит вклад несовершенство поверхности контакта ядро/оболочка.

Реализация оптических межсоединений

В изделиях интегральной оптики материалами волноводов служат полупроводниковые и металлические (для плазмонных волноводов) плёнки, стёкла, оптические ситаллы и композитные материалы [2]. Сами волноводы при этом изготавливаются методом фотолитографии. В изделиях же электроники устанавливается строгое требование: материалы как ядра, так и оболочки оптического канала должны быть диэлектриками.

Наиболее перспективными материалами для реализации обозначенной цели являются фоточувствительные полимеры. В случае их применения, отпадает необходимость в использовании фоторезиста при проведении фотолитографии – экспонируются и проявляются непосредственно сами полимеры. Их главные недостатки – низкая термическая устойчивость и высокий коэффициент термического расширения. Примером таких материалов являются негативные фотополимеры EpoCore и EpoClad компании Microresist technology. Их свойства приведены в таблице 1.

Табл. 1. Свойства полимеров EpoCore и EpoClad

Коэффициент преломления ($\lambda=830$ нм)	EpoCore 1.58 EpoClad 1.57
Температура стеклования	>180°C
Потери ($\lambda=830$ нм)	0.2 Дб/см
КТР	$50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Приведём в общих чертах технологический процесс формирования волноводов на основе этих полимеров (Рис5). На подложку центрифугированием наносится слой EpoClad, после чего сушится и экспонируется по всей площади. Те же действия производятся со слоем EpoCore, но на этапе экспонирования формируется топология волноводов. Производится проявка топологии, не засвеченные области удаляются растворителем mr-Dev 600. Затем формируется верхний слой EpoClad.

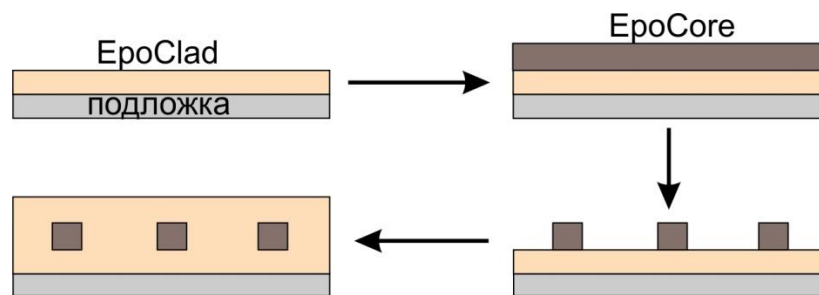


Рис. 5. Формирование планарных оптических волноводов

Пример конструктивного исполнения гибридной интегральной схемы с оптическими межсоединениями приведён на рисунке 6. Линейные размеры указаны в микрометрах. Данная конструкция имеет два уровня электрической коммутации. Нижний уровень 4 содержит только медные проводники, в то время как верхний уровень 5 наряду с проводниками включает активные и пассивные компоненты. Роль межслойного диэлектрика выполняет толстый слой EpoClad 2, являющийся также оболочкой оптических каналов 3. Связь между слоями коммутации осуществляется через столбики гальванической меди, сформированные в слое EpoClad. В качестве излучателя установлен массив VCSEL 6. Каждый элемент массива имеет два вывода, один из которых общий. Сигнал, генерируемый лазером, распространяется в вертикальном направлении, отражается от тонкой плёнки алюминия 8 и направляется в волновод 3. В конце волновода световой поток снова меняет направление и регистрируется фотодиодом 7.

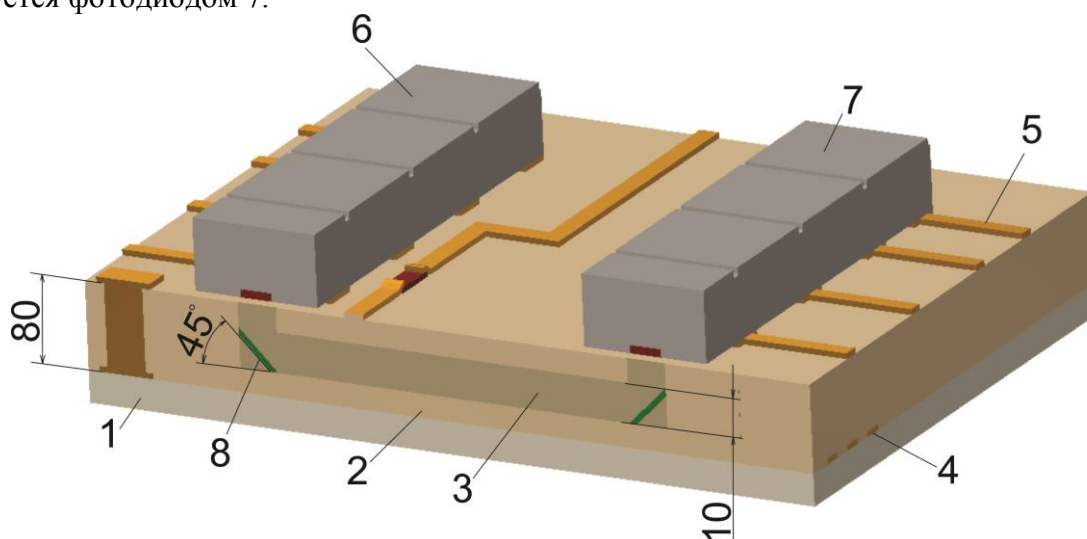


Рис. 6. Гибридная интегральная схема с оптическими межсоединениями

Как видно, полная замена медных проводников планарными ОВ в подобной конструкции не представляется возможной, так как требуется как минимум управление источниками излучения. В перспективе ожидаются разработки оптоэлектронных полупроводниковых интегральных схем, содержащих VCSEL в интегральном исполнении. Подобные разработки позволят соединять микросхему непосредственно с оптическим каналом, без промежуточных медных соединений.

Оценка разрешающей способности фотополимера EpoCore

Целью эксперимента было определение оптимальных технологических режимов формирования волноводов. В качестве параметра, количественно характеризующего качество волноводов, была выбрана разрешающая способность. Очевидно, что наибольшее влияние на данный параметр оказывают режимы технологических операций, связанных с обработкой слоя EpoCore. В связи с этим целесообразно провести эксперимент, направленный на построение математической модели данных операций и их последующую оптимизацию.

В качестве варьируемых факторов были приняты доза экспонирования и время проявления ErosCore. При завышенной дозе (времени) экспонирования рассеянное актиничное излучение, проникающее под тёмные области фотошаблона, вызывает полимеризацию данных участков, что препятствует их дальнейшему проявлению. При заниженной дозе экспонирования фоторезист экспонируется не на всю глубину. Оба указанных случая демонстрируют причины искажения профиля ОВ.

При проявлении важно проявить неэкспонированные участки фотополимера на всю глубину, сохранив при этом форму экспонированных. На основании вышесказанного можно сделать вывод о необходимости нахождения оптимального сочетания выбранных факторов.

Оборудование, использованное в эксперименте:

- ракель;
- термостол;
- установка контактного экспонирования AZ210 Mega Electronics;
- кювета пластиковая.

Средство контроля: цифровой оптический микроскоп KS-is DigiScope II.

Материалы:

- фотополимер ErosCore;
- Проявитель mr-Dev 600.

В ходе эксперимента ОВ формировались на ситалловых подложках (60x48 мм) с предварительно нанесённым, высушенным и проэкспонированным слоем Erosclad. Опишем порядок действий.

- 1 Нанесение ErosCore ракелем (толщина слоя в диапазоне 30-50 мкм).
- 2 Релаксация 15 мин.
- 3 Предэкспозиционная сушка на термостоле 50°C (5 мин), нагрев до 85°C (2 мин), 85°C (10 мин).
4. Экспонирование (в соответствии с выбранными уровнями варьирования).
5. Постэкспозиционная сушка на термостоле 50°C (5 мин), нагрев до 90°C (2 мин), 90°C (10 мин).
6. Погружное проявление в растворителе mr-Dev 600 (в соответствии с выбранными уровнями варьирования). В процессе проявления растворённый резист удаляется с поверхности кистью (Рис. 7).
7. Сушка на термостоле 120°C – 15 мин (Рис/ 8).

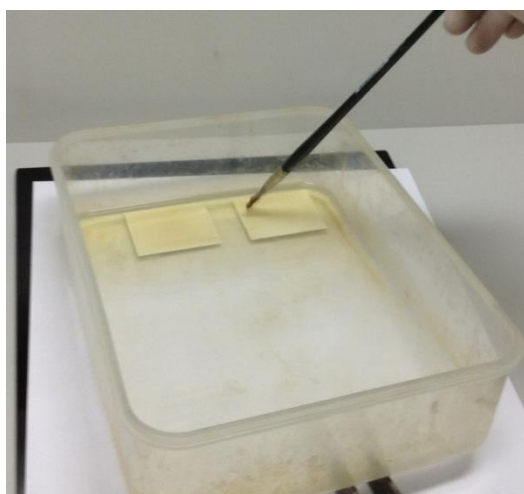


Рис. 7. Проявление



Рис.8. Сушка

Уровни варьирования факторов приведены в таблице 2. Один из полученных образцов показан на рисунке 9. Результаты, полученные в ходе эксперимента, продемонстрированы на рисунке 10.

Табл. 2. Уровни варьирования входных параметров

Доза экспонирования, мДж/см ²	60	20	80
Время проявления, с	20	50	80

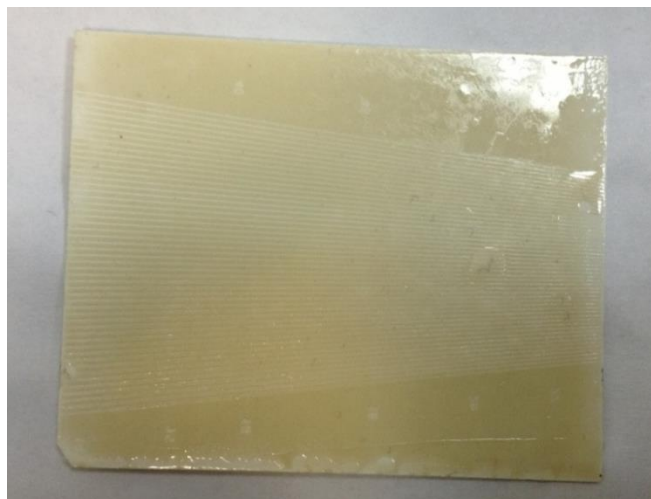


Рисунок 9 – Волноводы на сапфировой подложке

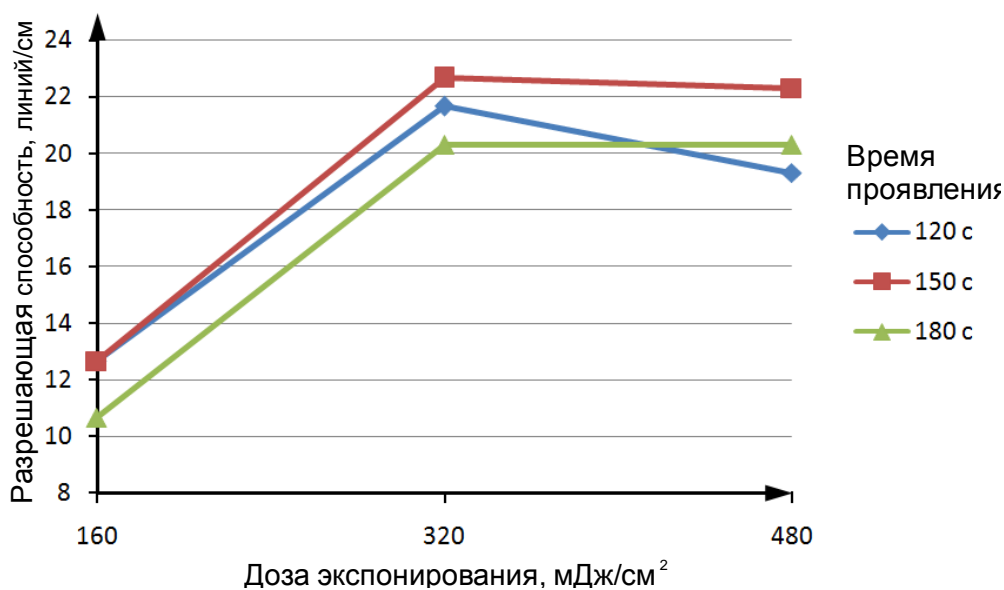


Рис.10. Зависимости разрешения от дозы экспонирования на установке AZ210 Mega Electronics для различных времён проявления

Полученные данные показывают, что независимо от времени проявления пик разрешения наблюдается при экспонировании в течение 160 с. Это говорит о том, что при меньших значениях времени экспонирования, дозы излучения недостаточно для полимеризации Erosoge на всю глубину, а при больших – полимеризуются затенённые участки. При этом наилучшие результаты наблюдаются при проявлении в течение 150 с. Ухудшение разрешения при изменении времени проявления вызвано «перетравом» и «недотравом» для 180 и 120 с соответственно.

На основе полученных результатов была составлена математическая модель:

$$Y(X_1, X_2) = 23.08 + 4.33X_1 - 5.49X_1^2 - 1.99X_2^2,$$

где X_1 и X_2 – доза экспонирования и время проявления в безразмерном виде соответственно. Средние значения уровней варьирования факторов соответствуют нулям (табл.2), крайние – плюс и минус единицам.

Математическая модель, предсказывает возможность получения максимального разрешения 24 линии/см при режиме: доза экспонирования – 384 мДж/см², время проявления – 150 с. Но даже при достижении теоретически предсказанного разрешения ширина волновода составляет сотни микрометров, в то время как для устранения межмодовой дисперсии требуется ширина в единицы мкм. Для достижения большего разрешения необходимо использовать более совершенные средства нанесения покрытий чем ракель, а также оборудование, обеспечивающее надёжный прижим фотошаблона к заготовке.

Заключение

Проведённый эксперимент определяет область оптимальных технологических режимов формирования волноводов. Однако для реализации полноценных устройств требуется решение ряда других технологических проблем, таких как адгезия металлических плёнок к полимерам, согласование термических коэффициентов расширения, формирование переходных отверстий между слоями коммутации. Задача преодоления вышеуказанных трудностей определяет вектор дальнейших исследований в данной области.

Литература

1. *Б. Салех, М. Тейх.* Оптика и фотоника. Принципы и применения. Пер. с англ.: Учебное пособие. В 2 т. Т. 2/ Б. Салех, М. Тейх – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. – 784 с.
2. *А.И. Сидоров, Н.В. Никоноров.* Материалы и технологии интегральной оптики. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 107 с.
3. *М. Белкин, А. Сигов.* Оптические межсоединения в интегральных схемах // Наноиндустрия. – 2012. - №1. – С. 8-14.
4. *О.Е. Наний.* Основы цифровых волоконно-оптических систем связи // Lightwave Russian edition. – 2003. - № 1. С. 48-52.
5. *Nikolaos Bamiedakis, Aeffendi Hashim, Richard V. Penty, Ian H. White.* A 40 Gb/s Optical Bus for Optical Backplane Interconnections// Journal of lightwave technology. - 2014. - №8. – С. 1526-1537.