

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ  
КОЛЕСОВ, АНДРЕЙ  
МИХАЙЛОВИЧ ЛИТМАНОВИЧ

# ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОНИКА

# **Андрей Михайлович Литманович Александр Александрович Колесов Интегральная Фотоника**

*[http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=69759307](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=69759307)*

## **Аннотация**

В этой книге мы рассмотрим основные технологии интегральной фотоники, показывая соответствующие аспекты материалов и технологий изготовления. Также мы кратко описываем некоторые базовые компоненты, присутствующие в интегральных фотонных устройствах. Мы приведем некоторые примеры интегральных фотонных устройств чтобы показать изящное решение, которое эта технология предлагает для разработки передовых устройств. Эта книга – попытка ознакомить читателя с основами интегральной фотоники и рассмотреть ее потенциал для решения актуальных проблем и создания новых технологий.

# **БИБЛИОТЕКА ЮНОГО ТРЕНДВОТЧЕРА**

**Александр А Колесов Андрей Литманович**

## **Интегральная Фотоника**

Оглавление

Вступление

Экскурс

Оптоэлектронная технология как предварительное условие интегральной фотоники

Оптикоэлектронная технология

Интегральная фотоника

Актуальное состояние и ближайшие перспективы

Современные серийные решения на базе фотонных микросхем

Крупные производители Интегральных оптических модулей (ИОМ)

Finisar

Lumentum

NeoPhotonics

Oclaro

Broadcom

Современные устройства на базе ОИМ

Оптические трансиверы

Когерентные приемо-передатчики

100G/400G PAM4

Интегральные волноводы

Устройства для связи внутри платы

Коммутационная матрица

Кросс-бар

Матрица временного перемещения (MTM)

Матрица пространственного перемещения (MSP)

Базовые элементы Фотонных микросхем (PDK)

Материалы и структуры PDK

Технологические правила PDK

Базисные модели PDK

Символьная библиотека PDK

Инструменты проектирования

Фотонные микросхемы

Оптический транзистор

Фотонная ячейка памяти

Фотонные волноводы

Фотонные планарные (полосковые) волноводы

Фотонные волоконные волноводы (фибры)

Фотонные кристаллические волноводы

Фотонные поверхностно-плазмонные волноводы

Пространственные волноводные решения

Решетчатый соединитель

Многомодовый интерференционный соединитель

Конический линейный волновод

Y-ветвь

Конвертер размеров пятна

Фотонные волоконные делители

Фотонные разветвители

Фотонные мультиплексоры (MUX) и демультимплексоры (DEMUX)

Фотонные азимутальные разветвители  $1 \times N / N \times M$

Фотонные кросс-соединители

Фотонные волоконные делители

Фотонные интерферометры

Фотонный интерферометр Майкельсона

Фотонный творческий интерферометр

Фотонный Мач-Цехнера интерферометр

Фотонные резонаторы

Фотонный кольцевой резонатор

Фотонные микроволновые полости

Фотонный Фабри-Перо интерферометр

Фотонные смесители

Нелинейный кристаллический смеситель

Фотонный волноводный смеситель

Фотодетекторный смеситель

Фотонные активные элементы

Фотонные модуляторы

Поляризационный вращатель

Фазовращатели

Перестраиваемые соединители  $2 \times 2$

Высокоскоростные модуляторы и фотодетекторы

Оптические переключатели

Фотонные повторители

Фотонные усилители

Технологические приемы и материалы для производства фотонных чипов

Технические методы интегральной фотоники

Материалы и технологии производства фотонных микросхем

Полупроводники

Квантовые ямы

Сверхструктуры Гратта

Матрицы кремния

Фотонные печатные платы

Фотонные чиплеты

Фоторезистивный фотонный чиплет (PRC)

Фотоэффективный фотонный чиплет (PEC)

Фотоинжекционный фотонный чиплет (PIC)

Фоторезонансный фотонный чиплет (PRC)

Материалы фотонных микросхем

Технология на основе фосфида индия (InP)

Кремний на изоляторе (SOI)

Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Селенид кадмия ( $\text{CdSe}$ )

Индий-арсенид галлия ( $\text{InGaAs}$ )

Индий-фосфид галлия ( $\text{InPGa}$ )

Фосфид индия (InP)

Арсенид алюминия ( $\text{AlAs}$ )

Фосфид галлия ( $\text{GaP}$ )

Программируемая интегральная фотоника

Многопортовые интерферометры

Волноводные сетки.

Квантовые вычисления и квантовая фотоника.

Квантовые источники

Фильтры с высокой селективностью

Квантовые однофотонные детекторы

Квантовая логика

Нейроморфные вычисления и искусственный интеллект

Сенсорика и Биомедицина

Направления применения фотонных микросхем.

Оптические коммуникационные системы

Оптическая интерконнектная технология.

Лазерная технология

Биомедицинская оптика

Квантовая информатика

Энергоэффективность

Вызовы, стоящие перед интегральной фотоникой и перспективы развития

Заключение

## **Вступление**

Добро пожаловать в увлекательный мир интегральной фотоники, где свет и технология объединяются для создания невероятных возможностей. В этой книге мы отправимся в захватывающее путешествие по пространству фотонных схем, оптическим коммуникациям и передовым приложениям.

ям, которые преобразуют нашу жизнь.

В мире, где свет является не только источником освещения, но и ключевым строительным блоком для передачи информации и преобразования энергии, находится скрытый потенциал. В этой удивительной эпохе интегральной фотоники мы погружаемся в мир чудесных возможностей, где сливаются оптика и электроника в единое целое.

Свет удивлял людей с самого начала существования цивилизации. Человечество победило темноту тьму, изобретая огонь, со временем изобретя различные источники света и люди попытались управлять ими.

Оптическое волокно является одним из самых мощных носителей информации на протяжении всего существования нашей цивилизации. Впервые термин был использован Американской компанией NS Карану в 1956г.

Термин "интегральная фотоника" относится к изготовлению и интеграции нескольких фотонных компонентов на одном кристалле. Эти компоненты – блоки, которые лежат в основе интегральных фотонных чипов, описаны в данной книге. Эти компоненты могут быть использованы в качестве строительных блоков для создания более сложных устройств, которые могут выполнять широкий спектр функций и найти широкое применение в оптических системах связи, измерительной технике, сенсорах и квантовых вычислениях. Технология объединяет принципы оптики и электроники, открывая новые возможности для передачи, обра-



ботки и хранения информации. В последние десятилетия интегральная фотоника стала неотъемлемой частью современной науки и технологий, находя применение в различных областях, от телекоммуникаций до медицины и космических исследований.

В этой книге мы рассмотрим основные технологии интегральной фотоники, показывая соответствующие аспекты материалов и технологий изготовления. Также мы кратко описываем некоторые базовые компоненты, присутствующие в интегральных фотонных устройствах. Мы приведем некоторые примеры интегральных фотонных устройств чтобы показать изящное решение, которое эта технология предлагает для разработки передовых устройств.

Эта книга – попытка ознакомить читателя с основами интегральной фотоники и рассмотреть ее потенциал для решения актуальных проблем и создания новых технологий. Мы предлагаем углубиться в мир фотоники и изучить основные концепции и методы, используемые в интегральных фотонных системах.

Независимо от того, являетесь ли вы студентом, исследователем или инженером, эта книга предлагает вам возможность погрузиться в увлекательный мир интегральной фотоники и расширить свои знания об этой захватывающей и быстроразвивающейся области. Мы надеемся, что она станет полезным ресурсом для всех, кто интересуется фотоникой и стремится применить ее в своей работе или исследованиях.

Элементарные частицы света оказываются способными переносить информацию по невидимому проводнику из стекла или других материалов. Используя разветвленные сети, волноводы и модуляторы, интегральная фотоника позволяет создавать устройства с невероятной производительностью и эффективностью.

Мы рассмотрим не только основные концепции интегральной фотоники, но также раскроем потенциал данной технологии в различных областях: от высокоскоростных коммуникаций до медицины, от квантовых вычислений до сенсорных систем, от высокопроизводительных решений до энергоэффективности.

Интегральная фотоника – это не только технология будущего, но и реальность сегодня. В этой книге вы откроете для себя потрясающие возможности этой уникальной науки.

*Que votre chemin illumine le mot*

***Ваши Авторы***

Экскурс

Фотоника наука, которая начала активно развиваться в 20-м веке. Первое революционное событие в современной оптике было, безусловно, изобретение лазера Т.Х. Мейманом в 1960 году, это открытие позволило получать когерентные источники света с исключительными свойствами,

такими как высокая пространственная и временная когерентность и очень высокая яркость. Именно это прорывное изобретение открыло новую эру исследований и приложений, связанных с использованием света. Лазеры стали основой для множества новых технологий и революционизировали различные области жизни. Например, оптические волокна были одной из таких технологий, которые значительно повлияли на передачу данных.

До развития технологий интегральной фотоники существовали сложности в интеграции лазерного источника излучения и схем обработки на одном чипе. Это связано с тем, что лазерный источник излучения требует особой структуры, которая несовместима с традиционными полупроводниковыми материалами и технологиями изготовления микроэлектронных устройств.

Создание лазерного источника излучения требует использования специальных материалов и технологий, таких как эпитаксиальный рост, литография высокого разрешения и т.д. Эти процессы достаточно сложны и требуют высокой точности и чистоты. Кроме того, лазерные источники излучения имеют высокую тепловую нагрузку, что усложняет интеграцию на одном чипе с другими компонентами.

С другой стороны, схемы обработки оптического сигнала также представляют сложности в интеграции на одном чипе. Это связано с тем, что оптические схемы обработки требуют использования различных оптических компонентов, та-

ких как световоды, модуляторы, фотодетекторы и т.д. Каждый из этих компонентов имеет свою специфическую структуру и требует особой обработки при изготовлении.

## **Оптоэлектронная технология как предварительное условие интегральной фотоники**

Интегральная фотоника является одним из самых многообещающих направлений в сфере оптоэлектроники. Однако, перед тем как перейти к рассмотрению интегральной фотоники, необходимо обратить внимание на развитие оптоэлектронной технологии. Оптоэлектронная технология представляет собой комбинацию оптических и электронных компонентов, которые используются для создания устройств, способных генерировать, передавать и обрабатывать оптические сигналы. Оптоэлектронные компоненты, такие как лазеры, фотодетекторы и оптоволоконна, являются ключевыми элементами оптоэлектронной технологии. Они обеспечивают возможность создания и передачи оптических сигналов, что является основой для разработки интегральных фотонных устройств. Без оптоэлектронной технологии, интегральная фотоника не смогла бы достичь своего полного потенциала. Применение оптоэлектронной технологии в интегральной фотонике: Интегральная фотоника представляет собой совокупность технологий, которые позволяют интегрировать оптоэлектронные компоненты на одном чипе. Это открывает новые возможности для разработки компактных и эффективных оптических устройств, таких как оптические

мультиплексоры, модуляторы и фотодетекторы. Оптические мультиплексоры, например, используются для комбинирования нескольких оптических сигналов на одном волокне, что позволяет значительно увеличить пропускную способность системы передачи данных. Модуляторы, в свою очередь, позволяют изменять интенсивность или фазу оптического сигнала, что является основой для оптической коммуникации и обработки информации. Фотодетекторы, в свою очередь, используются для преобразования оптического сигнала в электрический сигнал.

**Оптикоэлектронная технология** и технология интегральной фотоники являются двумя различными подходами к использованию оптической энергии. Вот некоторые отличия между ними:

Оптикоэлектронная технология основана на использовании электронных устройств, таких как фотодиоды и лазерные диоды, для обработки и передачи оптического сигнала. Интегральная фотоника, с другой стороны, использует фотонные компоненты, такие как волноводы и световоды, для управления и манипулирования светом.

Оптикоэлектронная технология имеет более широкий спектр применений, включая оптические системы связи, оптическую память и оптические датчики. Интегральная фотоника, с другой стороны, чаще всего применяется в оптических схемах, интегрированных на чипе, для обработки и передачи информации.

Оптикоэлектронная технология требует использования материалов с электронными свойствами, таких как полупроводники. Интегральная фотоника, напротив, использует материалы с оптическими свойствами, такие как фотонные кристаллы или полимеры.

Оптикоэлектронные устройства обычно имеют более низкую эффективность и скорость работы по сравнению с фотонными устройствами. Интегральная фотоника позволяет создавать компактные и быстрые фотонные устройства, которые могут быть интегрированы на одном чипе.

Оптикоэлектронные системы могут быть более уязвимыми к электромагнитным помехам и потерям сигнала, связанным с проводниками и соединениями. Интегральная фотоника, благодаря использованию световодов, может обеспечивать более надежную передачу и обработку оптического сигнала.

В целом, оптикоэлектронная технология и интегральная фотоника предлагают различные подходы к использованию оптической энергии. Каждая из этих технологий имеет свои преимущества и ограничения, и их выбор зависит от конкретных требований и приложений.

**Тем не менее,** оптикоэлектронные технологии обеспечивают создание оптических компонентов, таких как лазеры, фотодетекторы, фильтры и модуляторы, которые являются основой для интегральной фотоники. Например, лазе-

ры обеспечивают источник света, а фотодетекторы позволяют измерять и регистрировать световые сигналы. Модуляторы и фильтры позволяют управлять и изменять световые сигналы на кремниевом чипе. Они являются основой для разработки и создания оптических компонентов, которые позволяют управлять и манипулировать светом на чипах, и интеграции этих компонентов с электроникой для создания компактных и эффективных устройств.

Развитие технологий интегральной фотоники позволяет решить эти проблемы, создавая интегрированные схемы, которые объединяют лазерные источники излучения и оптические схемы обработки на одном чипе. Это делает производство и использование оптических устройств более простым и эффективным.

Оптические волокна представляют собой тонкие провода из специального стекла или пластика, которые используются для передачи информации посредством модулированного света. Благодаря высокой скорости передачи данных и минимальным потерям, оптические волокна являются основой для широкополосных интернет-соединений и телекоммуникаций на большие расстояния.

Кроме того, фотоника оказывает огромное влияние на различные области, такие как медицина, наука о материалах и энергетика. Оптические методы диагностики и лечения стали более точными и невредными для пациентов. Воз-

возможность изучать свойства материалов с помощью фотонных техник привела к созданию новых материалов со специальными свойствами. Кроме того, фотоника играет важную роль в разработке возобновляемых источников энергии.

Всего этого было бы невозможно без появления лазера – ключевого компонента в фотонике. С его помощью мы расширяем границы знаний о свете и используем его потенциал для создания инноваций, которые меняют наш мир.

В то время как растущий спрос на более быструю и эффективную передачу данных стал вызовом для традиционных электронных систем, интегрированная фотоника пришла на помощь.

Эта научная область позволяет создавать оптические схемы, которые объединяют различные компоненты и функциональности на одном чипе. Она использует свет вместо электричества для передачи информации, что открывает новые возможности для более высоких скоростей передачи данных и большей пропускной способности.

Интегрированная фотоника имеет широкий спектр применений. Например, в области оптических коммуникаций она играет ключевую роль в создании высокоскоростных сетей и центров обработки данных. Также она может быть использована в датчиках для измерения различных параметров окружающей среды или контроля качества продукции. Медицинские устройства также могут воспользоваться преимуществами интегрированной фотоники, например,



для разработки точных и миниатюрных оптических датчиков или систем наблюдения.

Будущее этой технологии полно потенциала для создания еще более быстрых, эффективных и компактных систем передачи данных и других приложений.

Интегрированная фотоника о стала ключевой технологией во многих отраслях.

В сфере телекоммуникаций интегрированная фотоника играет решающую роль в передаче данных на большие расстояния. Она позволяет создавать высокоскоростные оптические сети связи, которые обеспечивают быстрый и надежный обмен информацией. Это особенно актуально в наше время, когда поток данных стремительно растет.

В медицине интегрированная фотоника имеет огромный потенциал для диагностики и лечения различных заболеваний. Фотонные сенсоры позволяют измерять параметры в режиме реального времени, что является критически важным при контроле состояния пациента или проведении операции.

Автомобильная промышленность также воспользовалась преимуществами интегрированной фотоники. Она используется для создания передовых систем освещения и оптической связи, обеспечивая безопасность и комфорт водителям.

Более того, эта технология находит применение не только в упомянутых отраслях, но и в других сферах жизни. Например, ее использование расширяется на производство солнеч-

ных элементов или дисплеев высокого разрешения.

Интегрированная фотоника открывает огромные возможности для разработки квантовых компьютеров и других типов квантовых устройств. Эта технология позволяет использовать свет вместо электрических сигналов, что значительно ускоряет передачу информации и повышает ее производительность.

Квантовые компьютеры представляют собой новый класс вычислительных систем, способных решать сложнейшие задачи гораздо быстрее, чем классические компьютеры. Они основаны на принципах квантовой механики и используют "кьюбиты" вместо битов для обработки данных. Благодаря интегрированной фотонике, передача информации между кьюбитами может быть выполнена посредством света, что делает такие системы еще более эффективными.

Это открытие имеет потенциал изменить всю сферу вычислений и решения самых сложных проблем в научных исследованиях, оптимизации процессов в промышленности, разработке новых лекарств и много другого. Квантовые устройства также могут применяться в криптографии для обеспечения более надежной защиты информации.

## **Интегральная фотоника**

Фотонные интегральные схемы представляют собой специализированные оптико-электронные устройства, которые объединяют различные компоненты, такие как излучатели

(в частности, лазерные), фотодетекторы, волноводы и схемы обработки на одном чипе.

Отличия между высокоинтегрированными фотонными интегральными схемами и полупроводниковой (кремниевой) технологией при создании оптических устройств, включая сенсорные системы человеко-машинного взаимодействия, следующие:

– Фотонные интегральные схемы обладают меньшим размером и более компактной конструкцией по сравнению с полупроводниковыми отозелктронными устройствами. Это позволяет создавать малогабаритные и легкие оптические системы, что особенно важно, например для сенсорных систем, где требуется минимизировать размер и вес устройства и для телекоммуникационных решений где требуется высокая производительность и скорость передачи данных в том числе и при построении систем на кристалле.

– Скорость и пропускная способность: обсуждаемые системы обладают высокой скоростью передачи данных и большей пропускной способностью по сравнению с полупроводниковыми устройствами. Это позволяет создавать системы с потенциалом обрабатывать бОльшие объемы данных быстрее и эффективнее.

– Высокоинтегрированные фотонные интегральные схемы потребляют меньше энергии по сравнению с полупроводниковыми устройствами. Это позволяет увеличить эф-

фективность энергопотребления и продлить время работы устройства.

Фотонные системы обладают высокой устойчивостью к помехам, таким как электромагнитные воздействия, по сравнению с полупроводниковыми устройствами.

Одним из ключевых аспектов развития интегральной фотоники является разработка и использование базовых элементов, обеспечивающих возможность интеграции различных функциональных компонентов на одном чипе. Мы рассмотрим современные технологии, находящиеся в фокусе данной книги, которые позволяют достичь высокой эффективности интегрированных фотонных устройств. Эти технологии включают в себя использование волноводов, микрорезонаторов, модулирующих элементов и фотодетекторов, основанных на различных материалах и структурах. Исследования в области базовых элементов интегральной фотоники открывают новые перспективы для создания компактных и энергоэффективных оптических систем, способных решать широкий спектр задач в сферах связи, информационных технологий и медицины.

С развитием технологий и появлением новых потребностей, стало очевидно, что для достижения еще большей гибкости и эффективности требуется переход к программируемой интегральной фотонике. Это новое направление исследований и разработок позволяет создавать оптические систе-

мы, которые можно программировать и перестраивать на лету, открывая новые возможности для коммуникаций, вычислений и сенсорики. Программируемая интегральная фотоника представляет собой следующий этап в эволюции оптических технологий, который обещает революционизировать наши возможности в области передачи информации и обработки данных.

В данной книге мы отдельно затронем концепцию программируемой интегрированной фотоники. Это технология позволяет создавать интегрированные фотонные схемы, которые могут быть перепрограммированы для выполнения различных задач. Это означает, что оптические компоненты могут быть настроены на определенные функции с помощью программного обеспечения, что делает их более гибкими и адаптивными к различным приложениям.

В области фотоники, подход программируемой интегральной фотоники призван дополнить доминирующий в последние годы подход, основанный на ASPIC. Это позволит использовать универсальные свойства данного подхода и достичь преимуществ, аналогичных тем, которые предоставляют ПЛИС по сравнению с ASIC в электронике.

Программируемая интегральная фотоника вызывает интерес многих исследовательских групп по всему миру благодаря появлению новых приложений, которые требуют гибко-

сти, реконфигурируемости, а также недорогих, компактных и малопотребляющих устройств.

Одной из областей, в которой проведены значительные работы, является квантовые информационные технологии. Программируемая интегральная фотоника может открыть путь к крупномасштабным квантовым затворам и схемам выборки бозонов на основе унитарных матричных преобразований.

В области телекоммуникаций программируемая интегральная фотоника может быть использована для реализации ряда функций обработки сигналов. Например, для создания преобразователей произвольных мод, устройств сопряжения с волоконно-оптическими сетями и широкополосных коммутаторов. Эти устройства также могут стать основой для компьютерных соединений.

В области сенсорики программируемая интегральная фотоника может привести к созданию общего класса программируемых измерительных устройств. Они могут быть успешно интегрированы в качестве составных элементов в будущий Интернет вещей

Вот несколько преимуществ фотонных микросхем по сравнению с кремниевыми микросхемами:

Высокая скорость передачи данных: Интегральная фотоника позволяет передавать данные на гораздо большие рас-

стояния и со значительно более высокой скоростью, чем кремниевые микросхемы. Это особенно полезно для коммуникаций на большие расстояния или при работе с огромными объемами данных.

Низкое потребление энергии: Поскольку световые сигналы имеют намного меньшую диссипацию энергии по сравнению с электрическими, фотонные микросхемы потребляют гораздо меньше энергии при выполнении вычислений или передаче данных. Это может быть особенно важным для устройств, работающих от батарей или требующих минимального потребления энергии.

Большая пропускная способность: фотонные микросхемы обеспечивает большую пропускную способность данных, что означает возможность передавать и обрабатывать гораздо большие объемы информации одновременно. Это особенно полезно в сферах высокоскоростной связи, облачных вычислений и научных исследований.

Меньше электромагнитных помех: Световые сигналы не подвержены электрическим или магнитным помехам, которые могут возникать в кремниевых микросхемах. Это позволяет более надежно передавать данные без потерь или искажений из-за воздействия внешних факторов.

Использование новых материалов: Интегральная фотоника открывает двери для использования новых материалов со свойствами оптики, таких как наночастицы или квантовые точки. Это может привести к развитию более компакт-

ных устройств с расширенными функциональными возможностями.

В целом, интегральная фотоника представляет собой перспективную технологию со значительными преимуществами в компактности, скорости передачи данных и широких возможностях применения.

### **Актуальное состояние и ближайшие перспективы**

Международная исследовательская группа под руководством профессора Павлоса Лагудакиса из лаборатории гибридной фотоники Сколтеха создала чрезвычайно энергоэффективный оптический переключатель, который не требует охлаждения и демонстрирует скорость около 1 триллиона операций в секунду, что примерно в 100-1000 раз быстрее современных высококачественных коммерческих транзисторов.

Фотонные транзисторы имеют потенциал быть значительно более эффективными и быстрыми по сравнению с традиционными коммерческими транзисторами. Это связано с использованием фотопроводимости и контролем пропускания света для управления потоком носителей заряда.

Хотя путь предстоит долгий, но перспективы фотоники выглядят многообещающе. По сути, фотоника представляет собой аналог электроники, только вместо электронов используются кванты электромагнитного поля – фотоны.



**Процессы в фотонных микросхемах проходят с существенно меньшим энергопотреблением, а значит бóльшим потенциалом миниатюризации.**

Новый фотонный переключатель может выступать в роли транзистора или устройства передачи данных на оптических каналах связи (на порядок увеличивая пропускную способность канала). Он также может служить в качестве усилителя, повышая интенсивность входящего лазерного луча в 23 000 раз, сказано в научной работе.

## **Современные серийные решения на базе фотонных микросхем**

На сегодняшний день на рынке доступны различные серийные микросхемы, основанные на технологиях интегральной фотоники. Некоторые из них включают:

Интегральные оптические модули (ИОМ): компактные устройства, объединяющие несколько оптических компонентов, таких как лазеры, модуляторы и фотоприемники, на одном чипе. Они широко используются в оптической связи для передачи данных с высокой скоростью.

Интегрально-оптические коммутаторы: микросхемы, которые позволяют переключать или маршрутизировать оптический сигнал по различным каналам или портам. Они обладают высоким быстродействием и эффективностью и при-

меняются в системах связи и коммутации данных.

**Фотонные процессоры:** микросхемы, способные выполнять операции обработки сигнала непосредственно в оптическом домене без конвертирования его в электрическую форму. Они имеют большой потенциал для обработки больших объемов данных с высокой скоростью и применяются в областях, таких как оптическая коммуникация и вычислительные системы.

**Интегрально-оптические фильтры:** микросхемы, которые позволяют выбирать определенный диапазон частот или длины волны из оптического спектра. Они используются в различных приложениях, включая спектроскопию, медицинскую диагностику и световую сигнализацию.

**Фотонные усилители:** Это микросхемы, которые усиливают слабый оптический сигнал без его конвертирования в электрическую форму. Они широко применяются в оптической связи для компенсации потерь на расстояниях передачи.

Развитие этой технологии продолжается, и ожидается появление новых продуктов и решений для различных приложений в будущем.

## **Крупные производители Интегральных оптических модулей (ИОМ)**

**Finisar:** Finisar является одним из крупнейших производителей оптических компонентов и модулей, включая ИОМ.

Они предлагают широкий спектр продуктов для различных приложений в сферах связи, хранения данных и промышленности.

**Lumentum:** Lumentum также является крупным поставщиком оптических технологий и продуктов, включая ИОМ. Они предоставляют инновационные решения для области связи, лидара, медицины и других отраслей.

**NeoPhotonics:** NeoPhotonics специализируется на разработке и производстве высокоскоростных оптических компонентов и модулей, включая ИОМ. Они предлагают широкий ассортимент продукции для передачи данных на длинах волн от 100 Гб/с до 400 Гб/с.

**Oclaro:** Oclaro также является лидером на рынке оптической коммуникации и предоставляет различные ИОМ для широкого спектра приложений. Они известны своими прецизионными оптическими компонентами и модулями высокой производительности.

**Broadcom:** Broadcom является крупнейшим в мире поставщиком полупроводниковых решений, включая интегральную фотонику. Они предлагают различные ИОМ для использования в сетях передачи данных и других коммуникационных системах.

Существуют также ряд других компаний, которые предоставляют подобные продукты и технологии.

**Finisar** предлагает ряд изделий высокой степени интегра-

ции на базе кристалла интегрального оптического модуля (ИОМ). Некоторые из них включают:

Волоконные трансиверы: Finisar производит различные типы волоконных трансиверов, такие как SFP, QSFP и CFP модули, которые объединяют функции передатчика и приемника в одном компактном корпусе.

Коммутаторы: Фирма также предлагает коммутаторы с высокой плотностью портов на основе ИОМ. Эти коммутаторы обеспечивают быстрый и эффективный обмен данными между множеством устройств или серверов.

Активные оптические кабели: Finisar производит активные оптические кабели (АОС) с использованием ИОМ для высокоскоростной передачи данных на коротких расстояниях. Это позволяет достичь более низкой задержки и потерь сигнала по сравнению со стандартными медными кабелями.

Пассивная оптика: Организация предлагает различные пассивные оптические компоненты, такие как сплиттеры и световодные делители на базе ИОМ. Эти компоненты позволяют разделить или комбинировать оптический сигнал без потери качества.

Модули передачи данных: Finisar также производит модули передачи данных для высокоскоростной связи внутри центров обработки данных (ЦОД) и других сетевых приложений. Эти модули основаны на ИОМ и предоставляют быструю и надежную передачу информации.

**Lumentum** является ведущим производителем изделий высокой степени интеграции на базе кристалла интегрально-го оптического модуля (ИОМ).

**Волоконные трансиверы:** Lumentum предлагает широкий спектр волоконных трансиверов, таких как SFP, QSFP и CFP модули. Они обеспечивают передачу данных на высоких скоростях и поддерживают различные протоколы связи.

**Туннельные диоды:** Компания производит ИОМ с использованием туннельных диодов для генерации мощных оптических импульсов или формирования лазерных пучков с узким спектром.

**Лазерные модули:** Lumentum разрабатывает и поставляет лазерные модули различной мощности, работающие в видимом или ближнем ИК-диапазонах. Эти модули используются во многих приложениях, таких как связь на большие расстояния или точное позиционирование.

**Фотоприемники:** Компания предлагает фотоприемники на базе ИОМ, которые преобразуют оптический сигнал в электрический. Они обладают высокой чувствительностью и широким диапазоном рабочих частот.

**Коммутационные матрицы:** Lumentum также производит коммутационные матрицы на основе ИОМ для управления и маршрутизации оптического трафика в сетях связи или центрах обработки данных.

**NeoPhotonics** является ведущим производителем изделий высокой степени интеграции на базе кристалла интегрального оптического модуля (ИОМ).

Интегральные оптические трансиверы: NeoPhotonics предлагает широкий спектр оптических трансиверов, таких как SFP, QSFP и CFP модули. Они обладают высокой плотностью интеграции и поддерживают передачу данных на высоких скоростях.

Когерентные приемо-передатчики: Компания разрабатывает когерентные приемо-передатчики на базе ИОМ для использования в системах связи с более сложными формами модуляции. Эти устройства обеспечивают высокую пропускную способность и дальность передачи.

Модули переменных амплитудных решеточных фильтров (VLC): NeoPhotonics производит ИОМ с VLC фильтрами для многовариантной передачи сигнала по одному каналу связи. Это позволяет повышать эффективность использования оптического спектра.

Интегральные волноводы: Компания предлагает различные типы интегральных волноводов на базе ИОМ, такие как сгибаемые или многослойные структуры. Это позволяет эффективно управлять и направлять оптический сигнал.

**Oclaro** является ведущим производителем изделий высо-

кой степени интеграции на базе кристалла интегрального оптического модуля (ИОМ).

**Интегральные оптические трансиверы:** Oclaro предлагает широкий спектр оптических трансиверов, таких как SFP, QSFP и CFP модули. Они обладают высокой плотностью интеграции и поддерживают передачу данных на высоких скоростях.

**Когерентные приемо-передатчики:** Компания разрабатывает когерентные приемо-передатчики на базе ИОМ для использования в системах связи с более сложными формами модуляции. Эти устройства обеспечивают высокую пропускную способность и дальность передачи.

**Модули переменных амплитудных решеточных фильтров (VLC):** Oclaro производит ИОМ с VLC фильтрами для многовариантной передачи сигнала по одному каналу связи. Это позволяет повышать эффективность использования оптического спектра.

**Интегральные волноводы:** Компания предлагает различные типы интегральных волноводов на базе ИОМ, такие как сгибаемые или многослойные структуры. Это позволяет эффективно управлять и направлять оптический сигнал.

**Broadcom** является ведущим производителем изделий высокой степени интеграции на базе кристалла интегрального оптического модуля (ИОМ).

**Оптические трансиверы:** Broadcom предлагает широкий спектр оптических трансиверов, таких как SFP, QSFP и CFP модули. Эти устройства обладают высокой плотностью интеграции и обеспечивают передачу данных на высоких скоростях.

**Когерентные приемо-передатчики:** Компания разрабатывает когерентные приемо-передатчики на базе ИОМ для использования в системах связи с более сложными формами модуляции. Это позволяет достигать высокой пропускной способности и дальности передачи.

**100G/400G PAM4 модули:** Broadcom выпускает ИОМ с поддержкой PAM4 (четверичное амплитудно-манифестное кодирование) для передачи данных со скоростями 100 Гбит/с и 400 Гбит/с. Это позволяет повышать эффективность использования оптического спектра.

**Интегральные волноводы:** Компания предлагает различные типы интегральных волноводов на базе ИОМ, такие как сгибаемые или многослойные структуры. Это позволяет эффективно управлять и направлять оптический сигнал.

## **Современные устройства на базе ОИМ**

**Оптические трансиверы** – это устройства, которые комбинируют функции оптического передатчика и приемника в одном модуле. Они являются ключевыми компонентами для передачи данных по оптоволокну в сетях связи.

Принцип работы оптических трансиверов основан на пре-



образовании электрического сигнала в оптический и обратно. Вот основные этапы работы:

**Преобразование электрического сигнала:** Оптический трансивер получает электрический сигнал от активного элемента (например, микросхемы или процессора) через электрический интерфейс. Это может быть стандартный интерфейс Ethernet, InfiniBand или другой протокол связи.

**Модуляция света:** Электрический сигнал затем подается на лазерный диод или полупроводниковый лазер внутри оптического трансивера. Лазер генерирует когерентную световую волну, которая представляет собой носитель информации.

**Предварительная обработка и усиление:** Оптический сигнал проходит через различные оптические компоненты, такие как модуляторы и усилители, чтобы повысить его мощность и качество передачи.

**Передача по оптоволокну:** Интенсивность световой волны изменяется в соответствии с электрическим сигналом данных. Оптическая волна затем направляется на оптоволокно, где она распространяется на большие расстояния без значительных потерь.

**Принятие и декодирование:** На другом конце оптоволоконного кабеля приемник трансивера принимает световую волну и превращает ее обратно в электрический сигнал. С помощью фотоприемника (фотодиода или фотодетектора) свет преобразуется в электричество.

Обработка полученного сигнала: Электрический сигнал подвергается дальнейшей обработке для удаления шума, увеличения амплитуды или регенерации данных перед отправкой на активное устройство назначения.

Описанный выше процесс повторяется для каждого бита данных, передаваемого по оптоволокну. Оптические трансиверы позволяют достичь высоких скоростей передачи данных и обеспечить надежную связь в сетях связи.

**Когерентные приемо-передатчики** – это устройства, используемые в оптической связи для передачи и приема сигналов по оптоволокну с использованием техники когерентного детектирования. Они позволяют достичь высоких скоростей передачи данных и обеспечить более эффективное использование пропускной способности оптоволоконных каналов.

Принцип работы когерентных приемо-передатчиков основан на модуляции и детектировании фазы и амплитуды оптического сигнала. Вот основные этапы работы:

**Генерация лазера:** Когерентный приемо-передатчик содержит генератор лазера, который создает стабильную когерентную световую волну нужной частоты и мощности.

**Модуляция света:** Электрический сигнал данных подается на модулятор, который изменяет фазу или амплитуду создаваемой лазером оптической волны в соответствии с передаваемыми данными.

**Усиление и расширение спектра:** Однопрочностная (single-sideband) моделировка использует так называемый амплитудный манифест. После модуляции сигнала оптическая волна проходит через усилитель для повышения его мощности и затем подвергается расширению спектра, что позволяет более эффективно использовать пропускную способность канала.

**Передача по оптоволокну:** Измененная оптическая волна направляется на оптоволоконный кабель, где она передается на большие расстояния без значительных потерь.

**Принимаемый сигнал:** На другом конце оптоволоконного кабеля приемник трансивера получает измененную световую волну и использует фотодиод или фотодетектор для детектирования ее фазы и амплитуды.

**Когерентное детектирование:** Используя специальные методы обработки сигнала, такие как гомодинная демодуляция или цифровая обработка сигнала (DSP), полученный оптический сигнал превращается в электрический формат данных для последующей обработки.

**Обработка и извлечение информации:** Электрический сигнал проходит через различные этапы обработки, включая фильтрацию, усиление и декодирование данных. Затем информация извлекается и передается на активное устройство назначения.

Когерентные приемо-передатчики позволяют достичь высокой скорости передачи данных, а также обеспечить более

эффективное использование пропускной способности оптоволоконных каналов благодаря возможности детектирования и использования фазовой информации сигнала.

**100G/400G PAM4** модули являются одним из ключевых элементов современных оптических коммуникационных систем. Они используют технику модуляции PAM4 (Pulse Amplitude Modulation with 4 levels) для передачи данных на скоростях 100 Гбит/с и 400 Гбит/с.

Принцип работы этих модулей основан на изменении амплитуды импульсов света, чтобы кодировать информацию. В отличие от более простой техники двоичной амплитудной модуляции (BAM), где каждый символ представлен одним уровнем амплитуды, в PAM4 каждый символ представлен четырьмя уровнями амплитуды.

Для достижения этого используются высокоскоростные лазерные диоды или лазерный источник света, способные создавать короткие и интенсивные импульсы света. Эти импульсы проходят через оптическое волокно и приходят к фотоприемнику, который обратно преобразует оптический сигнал в электрический сигнал.

На стороне приемника сигнала проводится обработка и демодуляция сигнала PAM4, чтобы извлечь передаваемую информацию. Для этого используются специальные алгоритмы обработки сигнала, такие как линейное сочетание (linear equalization) и решающее устройство (decision device), кото-

рые позволяют достичь высокой скорости передачи данных.

100G/400G PAM4 модули имеют большую пропускную способность по сравнению с более старыми технологиями модуляции, такими как NRZ (Non-Return to Zero). Они могут быть использованы в различных приложениях связи, включая центры обработки данных (data centers), телекоммуникационные системы и другие высокоскоростные оптические коммуникационные системы.

**Интегральные волноводы** являются ключевыми компонентами фотоники, которые позволяют управлять и направлять поток света на кристаллическом чипе. Они основаны на принципе распространения оптической энергии в виде электромагнитных волн по специально созданным структурам.

Принцип работы интегральных волноводов базируется на использовании оптического явления, называемого полным отражением. Полное отражение происходит при переходе света из среды с более высоким показателем преломления (обычно это материал подложки) в среду с более низким показателем преломления (например, слой фоторезиста). В результате этого явления свет остается запертым и может быть направлен по определенной траектории.

Основная конструкция интегрального волновода состоит из двух или более слоев материала с различными показателями преломления. Обычно используются методы литогра-

фии и химической обработки для создания этих структур на поверхности кристаллического чипа. В результате получается плоский волновод, где свет распространяется вдоль определенной траектории.

Интегральные волноводы могут быть различных типов, таких как прямые (straight), изгибаемые (bent) или спиральные (spiral). Это позволяет создавать разнообразные схемы и компоненты на основе этих структур, такие как делители мощности, фазовращатели, модуляторы и детекторы.

Принцип работы интегральных волноводов заключается в передаче и управлении светом по заданной траектории без значительных потерь. Они играют ключевую роль в современной фотонике для достижения высокой скорости передачи данных и минимизации помех при обработке оптических сигналов.

**Устройства для связи внутри платы**, также известные как Co-packaged Optics (CPO), представляют собой технологию, которая интегрирует оптические модули непосредственно на поверхности чипа электронного устройства. Они обеспечивают высокую пропускную способность и малую задержку передачи данных на коротких расстояниях.

Принцип работы CPO основан на использовании компактных оптических модулей, которые содержат лазерный и фотодетекторный элементы, а также необходимую оптическую систему для направления светового потока. Эти моду-

ли размещены близко к процессорам или другим активным элементам на самой плате.

В процессе работы СРО использует волноводы для руководства светом от лазера до приемника. Волноводы могут быть выполнены из материалов с высоким показателем преломления, чтобы минимизировать потери сигнала. Лазер генерирует оптический сигнал, который затем направляется через волновод к фотодетектору. Фотодетектор преобразует оптический сигнал обратно в электрический, который затем может быть обработан процессором или другими устройствами на плате.

Преимущества работы СРО включают высокую пропускную способность, низкую задержку и малый размер. Они также позволяют достичь более компактного дизайна системы, что особенно важно для современных вычислительных устройств с большой плотностью компонентов. Кроме того, использование оптической связи помогает снизить потребление энергии и повысить производительность системы.

Принцип работы СРО отличается от традиционной оптики, где оптические модули располагаются отдельно от чипов на фотонических модулях. Вместо этого СРО интегрирует оптические функции прямо на самой плате или кристаллическом чипе, что делает его более эффективным и экономичным решением для коротких расстояний передачи данных внутри устройства.

Кроме основных принципов работы, можно дополнить описание устройств для связи внутри платы (СРО) следующими деталями:

**Интеграция и упаковка:** СРО-модули обычно интегрируются непосредственно на поверхности чипа или кристаллического модуля электронного устройства. Это может быть достигнуто с использованием различных техник микроэлектроники и оптической фотолитографии. Подходящая система связи может быть разработана таким образом, чтобы соответствовать требованиям конкретной аппаратной платформы.

**Пассивное параллельное соединение:** Одной из ключевых особенностей СРО является возможность создания массивных параллельных соединений, то есть одновременная передача нескольких оптических каналов данных между активными элементами на плате. Это значительно повышает пропускную способность и эффективность передачи данных внутри системы.

**Управление сигналами:** Для эффективного функционирования СРО требуются методы управления и контроля оптических сигналов. Это включает в себя мониторинг и регулировку мощности оптического сигнала, компенсацию потерь на расстоянии передачи и управление модуляцией для достижения требуемой скорости передачи данных.

**Охлаждение:** При высоких скоростях передачи данных



может возникать проблема нагрева СРО-модулей. Для обеспечения надежной работы необходимы эффективные методы охлаждения, которые могут быть интегрированы в конструкцию платы или чипа.

**Стандартизация:** В настоящее время активно разрабатываются стандарты для СРО, чтобы обеспечить интероперабельность и совместимость различных производителей. Это поможет ускорить внедрение технологии и расширить ее применение в широком диапазоне приложений.

Устройства для связи внутри платы (СРО) представляют перспективную технологию для повышения производительности систем связи на коротких расстояниях. Их комбинация с другими новаторскими решениями, такими как фотонные кристаллы и метаматериалы, может привести к созданию более эффективных и компактных систем связи в будущем.

**Коммутационная матрица** (или коммутатор) – это устройство, используемое в телекоммуникационных и сетевых системах для управления потоками данных или сигналов между различными портами или каналами.

Принцип работы коммутационной матрицы основан на перенаправлении данных от одного порта к другому. Когда данные поступают на входную сторону коммутатора, он анализирует адрес назначения и принимает решение о передаче

этих данных на соответствующий выходной порт. Для этого коммутационная матрица обычно имеет таблицу маршрутизации, которая содержит информацию о связях между входными и выходными портами.

Существуют разные типы коммутационных матриц, такие как:

**Кросс-бар:** Это самый распространенный тип коммутационной матрицы. Он состоит из двумерного массива переключателей (как правило, электромеханических или полупроводниковых), где каждый переключатель соединяет определенный входной порт с определенным выходным портом.

**Матрица временного перемещения:** Этот тип коммутационной матрицы используется в системах с временными мультиплексорами. Он основан на использовании временно-го разделения каналов, где каждый входной порт имеет свой временной слот для передачи данных на выходные порты.

**Матрица пространственного перемещения:** Этот тип коммутационной матрицы используется в оптических сетях и основан на использовании пространственного разделения каналов. Он позволяет одновременно обрабатывать несколько оптических потоков данных, например, при помощи чередующихся лучей или фазовых модуляторов.

Коммутационные матрицы играют важную роль в построении эффективных коммуникационных систем. Они обес-

печивают быструю и надежную пересылку данных между устройствами или сегментами сети, что является ключевым элементом для достижения высокой скорости передачи данных и минимальных задержек при обмене информацией.

**Кросс-бар** на базе интегрированного фотонного чипа представляет собой коммутационную матрицу, где переключение оптических сигналов осуществляется с использованием компонентов фотоники на одном единственном кремниевом чипе.

Конструкция такого кросс-бара включает несколько ключевых элементов. Во-первых, на чипе присутствуют оптические волноводы, которые служат для направления световых сигналов от входных портов к выходным портам. Эти волноводы могут быть реализованы как полосковые (strip) или облачные (slot) структуры.

Во-вторых, на чипе располагаются переключатели или модуляторы фазы/интенсивности света. Они выполняют функцию управления потоками данных и позволяют перенаправлять оптический сигнал из одного входного порта в желаемый выходной порт. Переключатели могут быть реализованы различными способами, например при помощи электрооптического эффекта или активной модуляции индекса преломления.

Другим важным компонентом кросс-бара на фотонном чипе являются фотодетекторы, которые служат для преоб-

разования оптического сигнала обратно в электрический. Они располагаются на выходных портах и позволяют получить информацию после прохождения через коммутационную матрицу.

Для управления работой кросс-бара может использоваться специальная электроника, такая как микроконтроллер или программируемая логическая схема (ПЛИС). Эти устройства предоставляют интерфейсы для программирования таблицы маршрутизации и контроля состояния переключателей.

Кросс-бар на базе интегрированного фотонного чипа обладает рядом преимуществ. Во-первых, он позволяет достичь высокой скорости передачи данных благодаря свойствам оптических коммуникаций. Во-вторых, такие системы имеют низкую потерю сигнала и шумность, что обеспечивает хорошее качество передачи данных. Кроме того, интеграция всех компонентов на одном чипе делает систему компактной, экономичной и удобной в использовании.

Таким образом, кросс-бар на базе интегрированного фотонного чипа представляет собой передовое решение для коммутации оптических сигналов, обеспечивая высокую производительность и эффективность в системах связи.

**Матрица временного перемещения (МТМ)** на базе интегрированного фотонного чипа представляет собой устройство, используемое в фотонике для манипулирования

и переключения оптических сигналов. Она позволяет изменять временные задержки световых импульсов внутри чипа, что открывает возможности для реализации различных функций в системах обработки информации.

Конструкция МТМ состоит из нескольких ключевых компонентов. В основе её работы лежит массив элементарных ячеек, каждая из которых состоит из оптического интерферометра и электро-оптического модулятора. Интерферометр обычно реализован на основе волноводной структуры и служит для деления и комбинирования оптического сигнала. Модулятор же контролируется электрическим полем и используется для изменения фазы или амплитуды световой волны.

На практике МТМ может быть выполнена как на кремниевой подложке, так и на других материалах, таких как полупроводник или стекло. Использование интегрированных технологий позволяет уменьшить размеры и повысить интеграцию компонентов на одном чипе.

Кроме того, МТМ обычно имеет систему управления, которая может программно изменять временные задержки световых импульсов в каждой ячейке. Это позволяет создавать сложные операции с оптическими сигналами, такие как перемещение и коммутация информации между различными каналами или линиями связи.

Таким образом, конструкция Матрицы временного перемещения на базе интегрированного фотонного чипа объединя-

ет интерферометры и модуляторы в массив элементарных ячеек для эффективной манипуляции оптическими сигналами. Она предоставляет гибкость и контроль над передачей информации в фотонных системах обработки данных.

**Матрица пространственного перемещения (MSP)** на базе интегрированного фотонного чипа – это устройство, которое позволяет манипулировать и переключать оптические сигналы в пространственном измерении. Оно использует массив элементов для изменения направления световых лучей, что открывает возможности для реализации различных функций в фотонных системах.

Конструкция MSP состоит из нескольких ключевых компонентов. В основе её работы лежит матрица активных элементов, каждый из которых представляет собой электро-оптический модулятор или другое подобное устройство. Эти элементы контролируются электрическим полем и позволяют изменять фазу или амплитуду светового луча.

На практике MSP может быть выполнена на интегральной кремниевой подложке или других материалах, таких как полупроводник или стекло. Использование интегрированных технологий позволяет создавать компактные и высокоинтегрированные устройства.

Каждый элемент матрицы имеет набор электродов для управления его поведением и координатами перемещения светового луча. Эти электроды могут быть управляемыми

непосредственно или с использованием системы управления на основе программного обеспечения.

Таким образом, конструкция Матрицы пространственного перемещения на базе интегрированного фотонного чипа объединяет массив активных элементов для изменения направления оптических лучей. Она предоставляет гибкость и контроль над передачей информации в пространственном измерении, что может быть полезным для решения различных задач в фотонике и оптической коммуникации.

Принцип работы Матрицы пространственного перемещения (MSP) на базе интегрированного фотонного чипа основывается на управлении световыми лучами с помощью электро-оптического эффекта.

Каждый элемент матрицы состоит из оптического волновода и электродных структур, которые позволяют изменять параметры световой волны, такие как фаза или амплитуда. Это достигается путем применения электрического поля к элементу матрицы.

Когда на элемент MSP подается оптический сигнал, он проходит через оптический волновод и затем проходит через активный элемент – модулятор. Посредством контроля напряжения или тока на электродах модулятора меняется его рефракция, что приводит к изменению фазы или амплитуды световой волны.

Управление каждым элементом MSP может осуществляться независимо друг от друга посредством системы

управления на основе программного обеспечения. Это позволяет создавать сложные шаблоны для переключения и манипулирования оптическими сигналами в пространственном измерении.

Таким образом, Матрица пространственного перемещения на базе интегрированного фотонного чипа позволяет управлять световыми лучами с помощью электро-оптического эффекта. Она предоставляет возможность изменять параметры оптических сигналов и манипулировать ими в пространственном измерении, что может быть полезно для решения различных задач в фотонике и оптической коммуникации.

## **Базовые элементы Фотонных микросхем ( PDK )**

Набор проектирования процесса – PDK (англ. Process Design Kit) для интегральной фотоники – это набор базовых компонентов, созданных фабрикой для открытого доступа к их общему процессу производства. Эти компоненты представлены технически и геометрически в наборах проектирования процесса, и могут использоваться дизайнерами для создания различных фотонных интегральных схем.

Этот подход аналогичен таковому при производстве микроэлектронных схем и заключается в том, что PDK можно рассматривать как набор строительных блоков, где каждый



компонент в библиотеке является отдельным блоком. Как и в случае с микроэлектроникой, дизайнер может использовать эти блоки для создания многих типов фотонных схем для различных приложений.

Как и в случае с микроэлектроникой, создание собственных компонентов возможно только при соблюдении правил фабрики. Эти правила включают в себя такие параметры, как стек материала, минимальное расстояние между оптическими компонентами, максимальная глубина травления и т.д.

В настоящее время производство современных оптических интегральных схем происходит на предприятиях, занимающихся производством микроэлектронных компонентов. Это связано с тем, что процесс создания фотонного чипа включает в себя использование схожих технологических процессов, которые используются в производстве микроэлектроники.

В процессе создания фотонного чипа используются такие технологические процессы, как литография, напыление металла, травление и другие. Однако, в отличие от микроэлектроники, в фотонике используются оптические материалы, такие как кремний и нитрид кремния, а также специальные технологии для создания оптических компонентов, таких как волноводы и связывающие элементы.

Разработчики фотонных чипов также используют блоки, как и в случае с разработкой кремниевых микросхем.

Для этого они используют набор проектирования процесса (PDK), который предоставляется фабрикой.

PDK можно сравнить с набором строительных блоков, где каждый фотонный компонент в библиотеке является отдельным блоком. Дизайнер может использовать эти блоки для создания многих типов фотонных схем для различных приложений. Общая технология полезна для снижения затрат, когда дизайнер использует predetermined, протестированные фотонные компоненты на выбранной им платформе.

Этот PDK содержит базовые компоненты, такие как волноводы, связывающие элементы и другие, которые могут быть использованы для создания различных фотонных интегральных схем. Разработчики могут выбирать нужные компоненты из библиотеки PDK, чтобы создавать свои фотонные устройства.

Однако, как и в случае с микроэлектроникой, создание собственных компонентов возможно только при соблюдении правил фабрики. Для этого разработчикам необходимо следовать определенным параметрам, таким как стек материала, минимальное расстояние между оптическими компонентами и другие, чтобы использовать настраиваемый компонент из определенной фабрики.

Таким образом, использование PDK в интегральной фотонике позволяет разработчикам быстрее и эффективнее

создавать новые фотонные интегральные схемы, а также уменьшить затраты на разработку и производство. Дизайнеры могут проектировать широкий спектр фотонных интегральных схем (PIC), используя фотонные компоненты фабрики, которые технически и геометрически представлены в их наборах проектирования процесса.

Дизайнер также может создавать свои собственные строительные блоки, но он должен следовать правилам изготовления фабрики, чтобы использовать настраиваемый компонент из определенной фабрики. Правила обычно включают для проектирования определяют стек материала (типы слоев и толщина), минимальное расстояние между оптическими компонентами (например, зазоры между волноводами), максимальная глубина травления, металлизация и электрические зонды (как разместить металл, разрешенные металлические слои) и размер особенностей (размер волноводов, отверстий, активных зон и т.д.).

**Материалы и структуры PDK** содержит информацию о доступных материалах и структурах, которые можно использовать при проектировании фотонных микросхем.

Важными материалами, используемыми в фотонных микросхемах, являются полупроводники с широкой запрещенной зоной, такие как кремний (Si), германий (Ge) или соединения III-V-группы (например, GaAs). Эти материалы обла-

дают свойством поглощать свет определенной длины волны и генерировать пару электрона-дырка под его воздействием.

Структуры PDK фотонных микросхем обеспечивают контур активной области или пространства для расположения основных компонентов транзистора. Некоторые из наиболее распространенных структур включают:

Волноводы – структуры оптического проводников, которые направляют свет. Они могут быть одномодовой или многомодовой, в зависимости от требуемых свойств передачи сигнала.

Полупроводниковые p-переходы – структуры, которые образуются при соединении полупроводников разных типов проводимости (p и n). Они играют роль предельных контактов фотонного транзистора и служат для подключения к внешней цепи.

Контролирующие электроды. Фотонные микросхемы могут иметь дополнительные электрические контакты или электроды, которые используются для изменения напряжения или тока в базовом слое и, следовательно, для управления пропусканием света через активную область.

PDK является необходимым компонентом при разработке фотонных микросхем, поскольку он предоставляет инженерам все необходимые данные и инструменты для создания и оптимизации устройств на основе принципов фотопроводимости.

**Технологические правила PDK** определяет технологические правила, которые необходимо соблюдать при разработке фотонной микросхемы. Они указывают на минимальный размер элементов, допустимое расстояние между ними, требования к выравниванию и другую техническую информацию.

В основном, технологические правила PDK включают следующие аспекты:

**Геометрия элементов:** Это определяет размеры и форму каждого компонента на фотонной микросхеме. Эти данные помогут разработчику создать точный дизайн с учетом требуемых габаритных размеров.

**Материалы:** Технологические правила указывают используемые материалы для каждого слоя структуры фотонной микросхемы. Например, это может быть полупроводниковый материал или покрытия для защиты от окружающей среды.

**Параметры процесса:** Важная часть PDK – это набор параметров процесса изготовления, таких как толщина слоя материала, температура обработки и время. Эти параметры определяют точность изготовления и электрические характеристики фотонной микросхемы.

**Шаблоны масок:** Технологические правила PDK также включают информацию о шаблонах масок, которые используются для создания различных элементов на фотонной микросхеме. Они определяют форму и расположение каж-

дого компонента на субстрате.

**Электрические характеристики:** Технологическое PDK также может содержать информацию о ключевых электрических характеристиках, таких как проходимость света через устройство или коэффициент усиления для усилителей световой энергии.

**Условия работы:** В некоторых случаях технологическое PDK может указывать условия работы фотонной микросхемы, например допустимый диапазон рабочего напряжения или частоту переключения.

Этот раздел PDK является основой для разработчиков при создании фотонных микросхем и позволяет им соблюдать определенные стандарты и требования при проектировании и изготовлении устройств на основе фотонных транзисторов.

**Базисные модели PDK** предоставляет базисные модели для описания электрического поведения элементов фотонной микросхемы. Эти модели позволяют проводить симуляции работы устройств на основе данных об электромагнитном поле и зарядно-транспортном поведении. Они определяют основные характеристики материалов, структур и компонентов, используемых в фотонной интегральной схеме.

В базисных моделях PDK обычно содержатся следующие элементы:

**Модели компонентов:** Базисные модели описывают поведение каждого компонента в фотонной микросхеме, таких как волоконно-оптические связи, резонаторы или каналы передачи света. Эти модели определяют электрическую и оптическую характеристику каждого компонента.

**Параметры материала:** Базисная модель PDK содержит информацию о свойствах используемых материалов – показатель преломления, коэффициент распределения потерь по длине волны и другие параметры.

**Технологические правила:** В базисном PDK указывается набор технологических правил для разработки фотонных микросхем. Это может быть минимальная ширина полоски, минимальное расстояние между компонентами и другие правила, обеспечивающие корректную работу устройства.

**Базовые элементы:** PDK содержит базовые элементы, такие как волоконные разъемы, гнезда для светоизлучателей и фотодетекторы. Эти элементы являются основой для создания более сложных структур на фотонной микросхеме.

Базисные модели PDK предоставляют инженерам-разработчикам необходимые инструменты для проектирования и оптимизации фотонных микросхем. Они позволяют смоделировать поведение устройств перед изготовлением реального прототипа, что помогает сэкономить время и ресурсы при разработке новых продуктов в области фотоники.

**Символьная библиотека PDK** включает символьную библиотеку, которая содержит графическое представление элементов фотонной микросхемы. Это позволяет разработчикам создавать схематические исходники и проводить верификацию функциональности устройства.

Она обычно включает в себя следующие элементы:

**Символы:** представляют каждый отдельный компонент или устройство на оптической микросхеме. Это может быть фотодетектор, фоторезистор, светодиод или другие оптические элементы. Символы обычно имеют графическое представление со специфическими символами и контактными площадками для подключения к другим компонентам.

**Модели компонентов:** Каждый символ в символьной библиотеке также имеет ассоциированную модель компонента, которая описывает его электрические и оптические характеристики. Модели могут быть созданы на основании экспериментальных данных или расчетов с использованием специализированных программ для моделирования физических процессов.

**Параметры:** В символьной библиотеке PDK также могут быть указаны параметры каждого компонента, такие как размеры, материалы и другие характеристики. Эти параметры необходимы для правильного размещения и связывания символов в схеме.

Символьная библиотека PDK облегчает процесс разра-



ботки оптических интегральных схем, предоставляя готовые символы и модели компонентов, которые можно использовать при создании собственных схем. Она позволяет инженерам быстро прототипировать и анализировать оптические системы на уровне дизайна перед фабрикацией реальной микросхемы.

## **Инструменты проектирования**

PDK также может включать интегрированные инструменты для разработки фотонных микросхем, такие как программное обеспечение для моделирования электромагнитного поля или симуляции работы устройств.

Ниже приведены основные инструменты проектирования PDK для фотонных микросхем:

**Моделирование среды:** Эти инструменты позволяют создавать виртуальную среду для моделирования поведения света в материале на основе эффекта фотопроводимости. Они обеспечивают возможность оценивать характеристики передачи света через различные слои материала и оценивать потери.

**Разработка линз:** Для управления распространением световых лучей используются специализированные программы по разработке линз. Они позволяют оптимизировать форму и параметры линз для достижения требуемых результатов при переносе или изменении направления светового потока.

**Моделирование электрических характеристик:** Эти ин-

струменты позволяют моделировать и анализировать электрические характеристики компонентов фотонных микросхем, таких как транзисторы или волоконные связи. Они помогают определить производительность устройства и его эффективность.

**Верификация дизайна:** Инструменты верификации используются для проверки правильности разработанного дизайна фотонной микросхемы с целью обнаружения ошибок или несоответствий требованиям проекта. Они проводят различные виды анализов, включая статическую и динамическую проверку соответствия правилам проектирования.

**Симуляция светопропускания:** Данные инструменты позволяют имитировать передачу света через фотонную микросхему с учетом всех параметров материалов и компонентов устройства. Это помогает предсказывать поведение системы при различных условиях эксплуатации и оптимизировать ее работоспособность.

**Разработка лэйаута:** Эти инструменты предоставляют средства для создания физического размещения компонентов на поверхности микросхемы. Они позволяют оптимизировать расположение и соединение элементов, чтобы минимизировать потери света и улучшить эффективность работы.

**Интеграция с другими инструментами:** PDK-системы также обеспечивают возможность интеграции с другими

инструментами проектирования, например, программными пакетами для моделирования электрических цепей или виртуального прототипирования.

Использование всех этих инструментов проектирования PDK помогает разработчикам создавать фотонные микросхемы с высокой производительностью, точностью и надежностью. Они ускоряют процесс разработки и оптимизации устройств фотонной технологии, что является ключевым аспектом успеха в данной отрасли.

Далее опишем типовые элементы фотонной микросхемы и принципы их функционирования.

## **Фотонные микросхемы**

интегральные схемы, основанные на использовании фотонных транзисторов и других оптических компонентов для передачи и обработки информации в виде света. Они представляют собой перспективную технологию, которая может быть использована для создания высокоскоростных и энергоэффективных оптических систем.

Основными принципами построения фотонных микросхем являются:

**Интеграция фотонных транзисторов:** Фотонные транзисторы играют ключевую роль в фотонной микроэлектронике. Они используются для управления потоком света через

материал на основе эффекта фотопроводимости. Важно достичь наномасштабного размера активной области и обеспечить низкое потребление энергии.

Добавление оптических путей: Функциональность фотонной микросхемы может быть расширена путем добавления различных оптических элементов, таких как волноводы, сплиттеры, модуляторы и детекторы света. Это позволяет управлять и обрабатывать световой сигнал на различных этапах.

Интеграция электроники: Фотонные микросхемы часто содержат не только оптические компоненты, но и электронные элементы для контроля работы фотонных транзисторов. Это может включать усилители, резисторы, конденсаторы и другие компоненты, которые позволяют регулировать поток света.

Управление сигналами: Для обработки информации на фотонной микросхеме требуется разработка архитектуры управления сигналами. Это включает в себя создание логической системы для передачи данных через оптический интерфейс и принятие соответствующих действий на основе полученной информации.

Оптимизация производства: Построение фотонных микросхем также требует определенного подхода к проектированию и производству. Нанолитография и другие методы изготовления используются для создания наномасштабных структур и интегрированных цепей.

Фотонная микросхемы обычно состоят из нескольких слоев материалов с различными оптическими и электрическими свойствами.

Основные компоненты фотонной микросхемы включают.

**Волноводы:** Это тонкие слои материала, которые направляют свет по заданному пути на чипе. Волновод может быть выполнен из полупроводникового материала или других оптических материалов с высокой пропускной способностью для света.

**Фоторезисторы:** Это элементы, которые регистрируют интенсивность света и преобразуют его в электрический сигнал. Фоторезистор состоит из полупроводникового материала, который меняет свое сопротивление под действием освещения.

**Фотодетекторы:** Элементы, способные обнаруживать фотоны и генерировать соответствующий электрический сигнал. Фотодетектор может быть выполнен на основе полупроводниковых материалов, таких как кремний или индий-арсенид.

**Оптические модуляторы:** Элементы, которые изменяют свойства света под действием электрического сигнала. Они используются для переключения и модуляции интенсивности света на фотонной микросхеме.

**Интерфейсы:** Фотонные микросхемы часто имеют электронные интерфейсы для взаимодействия с другими устрой-

ствами или системами, такие как электроника управления и коммуникационные порты.

Фотонные микросхемы представляют огромный потенциал для различных приложений в оптической коммуникации, информационных системах и других областях. Их основные принципы построения позволяют создавать компактные, быстрые и энергоэффективные устройства для передачи и обработки световых сигналов.

Ряд конструктивных требований к фотонным микросхемам, в обеспечение эффективной работы и надежности.

Интегрированная оптика: Фотонные микросхемы должны быть спроектированы с интегрированной оптикой, то есть они должны содержать встроенные волноводы или другие структуры для направления света по нужному пути. Это позволяет минимизировать потери света и повысить эффективность работы устройства.

Миниатюрность: Фотонные микросхемы должны быть компактными и миниатюрными, чтобы удобно помещаться на чипе или другом носителе. Это особенно важно при разработке интегрированных оптических систем, где необходимо объединение большого количества функциональных элементов на небольшой площади.

Высокая точность изготовления: Поскольку фотонные микросхемы работают на очень высоких частотах и требуют точности до долей длины волны света, их изготовление должно быть очень точным. Это включает использование пе-

редовых технологий нанофабрикации для создания микронных структур и поверхностей с высокой резкостью.

**Материалы с высоким коэффициентом преломления:** Для эффективной работы фотонных микросхем необходимы материалы с высоким коэффициентом преломления. Выбор таких материалов позволяет достичь более эффективного направления света, уменьшить потерю света и повысить скорость передачи данных.

**Управляемость:** Фотонные микросхемы должны иметь возможность контроля параметров света, таких как интенсивность или длина волны. Для этого требуется наличие специальных элементов управления, таких как пьезоэлектрические актуаторы или электродинамические модуляторы для изменения характеристик света.

**Надежность:** Из-за сложности конструкции и особенностей работы фотонных микросхем, особое внимание следует обращать на надежность устройства. Они должны быть спроектированы и изготовлены с учетом возможных факторов, таких как тепловые расширения, вибрации или электростатические разряды.

**Совместимость с другими элементами:** Фотонные микросхемы должны быть совместимы с другими компонентами оптической системы, такими как светоисточники, детекторы и волоконные соединения. Это позволяет создавать сложные оптические системы с высокой производительностью.

Рассмотрим типовые блоки фотонных микросхем – основные строительные единицы, которые используются для создания сложных оптических систем. Каждый блок выполняет определенную функцию и играет важную роль в обеспечении эффективной передачи светового сигнала.

## **Оптический транзистор**

устройство, которое позволяет контролировать пропускание света через оптический канал с помощью внешнего электрического сигнала. Конструкция оптического транзистора обычно состоит из трех основных компонентов: источника света, фоточувствительного элемента и регулирующего элемента.

Источник света может быть представлен лазером или светодиодом, который генерирует оптический сигнал для передачи данных или информации.

Фоточувствительный элемент – фотоприемник, который преобразует падающий на него световой сигнал в соответствующий электрический сигнал. Он состоит из полупроводниковых материалов, таких как кремний или германий, которые способны генерировать электричество при воздействии на них фотонов.

Регулирующий элемент является ключевым компонентом оптического транзистора и позволяет управлять прохождением светового потока. Этим регулирующим элементом может служить полупроводниковый переключатель или моду-



лятор, который изменяет оптические свойства материала под воздействием электрического сигнала. Например, это может быть полупроводниковая структура с эффектом Эйнштейна-Парселла (ЭП), когда приложение электрического поля меняет показатель преломления и/или поглощение света.

Вместе эти компоненты образуют конструкцию оптического транзистора, который способен контролировать прохождение световых сигналов в зависимости от внешнего электрического сигнала. Такие устройства широко используются в фотонике и оптической коммуникации для управления световыми потоками и реализации функций аналогичных традиционным электронным транзисторам.

Оптический транзистор без использования электричества – это устройство, которое позволяет контролировать пропускание света через оптический канал с помощью других физических явлений. Вместо использования электрического сигнала для регулирования прохождения световых сигналов, такой транзистор может основываться на оптическом или механическом воздействии.

Например, одним из возможных устройств является оптический переключатель на основе эффекта Фарадея-Керра. В этом случае используется материал со свойствами изменения показателя преломления под воздействием магнитного поля. Различные компоненты такого устройства включают источник света, модулятор (обычно состоящий из материала

с высоким коэффициентом Керра), и детектор для обнаружения проходящего светового потока.

Подачей магнитного поля к модулятору достигается изменение его показателя преломления. Это создает разницу в скорости распространения светодневной замедленной группы (group velocity) и, следовательно, изменяет фазу света. Устройство может использовать интерференцию для контроля прохождения оптического сигнала через модулятор.

Таким образом, в отсутствие электричества устройства на основе эффекта Фарадея-Керра позволяют регулировать пропускание световых сигналов посредством магнитного поля. Это предоставляет альтернативный подход к созданию оптических транзисторов без необходимости использования электрических сигналов для управления светом.

Оптический транзистор позволяет управлять прохождением света через оптический канал с использованием различных физических явлений. Существует несколько типов оптических транзисторов, включая следующие:

- **Фотонный транзистор:** Этот тип транзистора основан на эффекте фотопроводимости и используется для контроля пропускания света через материал. Он состоит из полупроводникового материала с двумя р-п переходами. При поглощении фотона в активной области создается пара электрон-дырка, что меняет проводимость материала и регули-

рует прохождение света.

- **Акустооптический транзистор:** В этом случае изменение интенсивности светового потока достигается за счет модуляции показателя преломления под действием акустической волны. Устройство состоит из кристалла или волновода, где акустическая волна создает периодическую модуляцию показателя преломления, что изменяет характер распределения светодневной замедленной группы и, следовательно, управляет пропусканием светового сигнала.

- **Фотонный транзистор на основе плазмона:** Это новое направление в оптических транзисторах, которое использует возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов для контроля прохождения света через металлические структуры. Использование эффекта плазмона позволяет достичь высокой скорости работы и низкого энергопотребления.

- **Оптический транзистор на основе квантовых точек:** Квантовые точки – это наноструктуры полупроводниковых материалов с размерами порядка нескольких нанометров. В таких устройствах изменение интенсивности или длины волны светодневногo потока может быть регулируемо с помощью избирательного перекрытия квантовых состояний или изменения энергии перехода между состояниями.

Это лишь несколько примеров различных типов оптических транзисторов, которые используются для контроля и модуляции прохождения света через оптические каналы. Каждый тип имеет свои уникальные принципы работы и ха-

рактеристики, что позволяет широкий спектр возможностей в области фотоники.

## **Фотонный транзистор**

устройство в фотонике, которое используется для контроля пропускания света через материал на основе эффекта фотопроводимости. Он состоит из полупроводникового материала с двумя р-п переходами.

Основными компонентами фотонного транзистора являются:

**Активная область:** Это область полупроводника между двумя р-п переходами, где происходит поглощение света и создание пары электрона-дырки под действием фотона. Размер активной области может быть наномасштабным или микроскопическим.

**Предельные контакты:** Фотонный транзистор имеет контакты к активной области, которые позволяют подключить его к внешней цепи источника питания или другому устройству.

**Базовый слой:** Это слой полупроводника между активной областью и предельными контактами, который регулирует поток носителей заряда посредством изменения проводимости материала при определенных условиях.

Работа фотонного транзистора основана на эффекте фотопроводимости. Когда свет падает на активную область, энергия фотонов возбуждает электроны из валентной зоны

в зону проводимости, создавая пары электрон-дырка. При этом увеличивается проводимость материала и происходит пропускание света через транзистор.

Ключевой особенностью фотонного транзистора является возможность контроля пропускания света с помощью изменения напряжения или тока в базовом слое. Путем изменения условий работы можно регулировать количество носителей заряда и, следовательно, управлять интенсивностью прохождения света через устройство.

Фотонные транзисторы широко используются в оптических коммуникационных системах для модуляции сигналов высокой скорости и переключения между различными состояниями (полупроводниковый лазер – открыто/закрыто). Они также имеют потенциал для использования в оптических компьютерных системах и других приложениях фотоники.

### **Акустооптический транзистор**

это устройство, которое использует акустическую волну для модуляции пропускания светового сигнала через оптический канал. Оно основывается на явлении, известном как акустооптический эффект.

Устройство состоит из кристаллического материала или волновода, который обладает свойством изменять показатель преломления при прохождении через него акустической волны. Обычно таким материалом является полупроводник

или диэлектрик.

Принцип работы акустооптического транзистора заключается в следующем:

Генерация и распространение активной акустической волны: В устройстве создается механическая колебательная энергия, которая генерирует активную акустическую волну. Эта волна распространяется сквозь оптический материал и вызывает периодические изменения его показателя преломления.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.