

07

Модулятор Маха-Цендера на основе InP с управляемым коэффициентом экстинкции

© С.В. Ишуткин,^{1,2} В.С. Арыков,² И.В. Юнусов,² М.В. Степаненко,² В.С. Смирнов,¹
П.Е. Троян,² Ю.С. Жидик^{2,3}

¹Научно-производственная фирма „Микран“,
634041 Томск, Россия

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: zhidikyur@mail

Поступило в Редакцию 8 июля 2023 г.

В окончательной редакции 13 сентября 2023 г.

Принято к публикации 14 сентября 2023 г.

Представлены результаты разработки электрооптического модулятора Маха-Цендера с управляемым коэффициентом экстинкции, что обеспечивается электрической перестройкой входного делителя на основе многомодового интерферометра. Электрооптическая полоса пропускания изготовленных модуляторов превышала 32 GHz, модуль коэффициента отражения электрического сигнала от входа не превышал -12 dB в диапазоне до 43 GHz, полувольтное напряжение составило 2.8 V на длине волны 1550 nm. При этом электрическая перестройка входного делителя позволила расширить коэффициент экстинкции модулятора с начальных 21.5 до 29.5 dB.

Ключевые слова: оптический делитель, дисбаланс делителя, волноводы, амплитудная модуляция.

DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56494.172-23

Введение

В настоящее время интегральная оптоэлектроника продолжает оставаться динамически развивающейся областью. Фотонные интегральные схемы находят широкое применение при построении телекоммуникационных сетей, в высокоскоростных вычислениях, создании источников когерентного и некогерентного света, биофотоники, обработке оптических сигналов и др. Рынок телекоммуникаций является одним из основных драйверов развития радиофотоники. Быстрое глобальное распространение носимых устройств с беспроводным доступом в интернет, разработка и внедрение мобильных сетей 4G и 5G, экспансия видеосервисов и интернет вещей экспоненциально увеличивают сетевой трафик [1,2]. Традиционные электрические линии связи давно перестали удовлетворять потребностям в пропускной способности. Передача между пользователями постоянно возрастающего объема данных, которые скачиваются и передаются на удаленные серверы в центрах обработки, является основным источником загрузки волоконно-оптических линий связи. Это требует наличия инфраструктуры, построенной на соответствующей компонентной базе.

Электрооптический модулятор (ЭОМ) Маха-Цендера на основе InP является одним из ключевых элементов радиофотоники [3–5]. Обладая способностью к управлению амплитудой оптической волны, данное устройство позволяет конвертировать электрический сигнал в оптический для его последующей обработки и/или

передачи. Коэффициент экстинкции (КЭ) модулятора количественно определяет способность устройства к управлению мощностью оптической волны. Значение КЭ, в первую очередь, ограничивается несимметричностью деления мощности в оптическом делителе на входе модулятора. Это связано с тем, что технологические процессы изготовления устройств характеризуются точностью воспроизведения, так называемыми технологическими допусками, что приводит к разбросу параметров модуляторов. В массовом производстве однородность устройств от партии к партии более важна, нежели значения отдельных параметров. От этого зависит выход годных устройств и их конечная стоимость.

Однородность параметров устройств, в свою очередь, определяется величинами технологических допусков процессов, используемых в производстве. Для решения проблемы однородности могут быть применены разные подходы. Одним из подходов является переоборудование фабрики на оборудование, обеспечивающее меньшие допуски. Это позволяет решить проблему, но может быть неоправданно дорого. Другой подход предполагает расширение технологических допусков за счет обеспечения возможности подстройки устройств после изготовления, что позволяет использовать уже имеющееся технологическое оборудование.

Лазеры с распределенной обратной связью (РОС) являются примером успешного применения перестраиваемых устройств в интегральной оптоэлектронике.

В РОС-лазерах длина волны выходного оптического излучения может электрически перестраиваться [6–8]. Это реализуется путем подстройки полосы пропускания внутреннего фильтра на основе решетки Брэгга. Диапазон перестройки обычно невелик — $\pm 1\text{--}4\text{ nm}$, но такой подход позволяет избавиться от необходимости создавать лазеры под строго определенную длину волны. Упрощается номенклатура устройств и, как следствие, снижается себестоимость.

В ряде работ ранее были представлены перестраиваемые оптические делители на основе многомодовых интерферометров (ММИ) [9], как отдельно, так и в составе более сложных устройств. В работе [10] представлена общая модель для прогнозирования диапазона перестройки коэффициента деления оптических делителей на основе симметричных и ассиметричных ММИ. Авторы продемонстрировали диапазон перестройки в 20% на примере симметричного ММИ (2×2). В другом исследовании [11,12] представлена конструкция и процесс изготовления перестраиваемого ММИ (2×2) делителя. Авторами был достигнут широкий диапазон перестройки коэффициента деления от 90:10 до 30:70. В работах [13,14] описан интегральный балансный фотоприемник с перестраиваемым ММИ (2×2) делителем. Перестраиваемый делитель позволял обеспечить баланс мощности на фотодиодах приемника. В работе [15] показаны результаты разработки перестраиваемого в широком диапазоне лазера на основе ММИ (1×1). Экспериментально была продемонстрирована возможность перестройки длины волны лазера в диапазоне 38 nm. В исследовании [16] была разработана модель компактного электрооптического модулятора на основе перестраиваемого ММИ (1×1). Расчет показал возможность достижения КЭ 35 dB при длине устройства 350 μm (без учета электроадсорбционных эффектов). Авторы работы [17] предложили конструкцию двойного параллельного модулятора Маха-Цендера с тремя ММИ делителями, один из которых был перестраиваемым.

Целью настоящей работы является создание электрооптического модулятора Маха-Цендера, обладающего возможностью динамического управления коэффициентом экстинкции. Это позволит осуществлять подстройку коэффициента экстинкции модуляторов после изготовления, тем самым улучшая их однородность. Управление планируется осуществить посредством размещения на входе модулятора электрически перестраиваемого ММИ (1×2) делителя. Тогда как обычно это неуправляемый элемент, и его коэффициент деления фиксируется на этапе формирования оптических волноводов модулятора.

1. Материалы и методы

В настоящей работе были использованы двухдюймовые полуизолирующие подложки InP со сформированной на их поверхности *p-i-n* InP/InGaAsP-гетероструктурой. *p*- и *n*-области были сформированы с

переменным профилем легирования. *p*-InP-область была легирована Zn с максимальным уровнем легирования $2\cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, *n*-InP-область была легирована Si с максимальным уровнем легирования $5\cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$. В *i*-области *p-i-n*-структуры были сформированы множественные квантовые ямы (МКЯ) на основе InP/InGaAsP-сверхрешетки. С целью формирования омических контактов поверх слоев гетероструктуры был сформирован контактный слой *p*-InGaAs. Общая толщина эпитаксиальных слоев составляла около 3.5 μm (исключая полуизолирующий буферный слой).

На рис. 1 представлен технологический маршрут изготовления электрооптических модуляторов. Конструкция слоев и технология изготовления перестраиваемого ММИ делителя на входе модулятора были аналогичны таковым для активных участков оптических волноводов (элементы с верхним омическим контактом Ti/Pt/Au на рис. 1). Технологический маршрут состоял из следующей последовательности технологических блоков:

- формирование диэлектрической маски SiN_x для последующего формирования оптических волноводных структур;
- первое плазмохимическое травление *p*-слоев гетероструктуры по диэлектрической маске;
- удаление части диэлектрической маски с пассивных элементов электрооптического тракта;
- второе плазмохимическое травление *p*- и *i*-слоев гетероструктуры по модифицированной диэлектрической маске с последующим удалением остатков маски;
- формирование второй диэлектрической маски SiN_x , для последующего формирования межэлементной изоляции;
- плазмохимическое травление *n*-слоев гетероструктуры по диэлектрической маске для обеспечения межэлементной изоляции;
- формирование омического контакта к *n*-InP-слою гетероструктуры на основе тонкопленочной композиции Ni/Ge/Au;
- планаризация поверхности пластины слоем бензочиклобутена;
- формирование омического контакта к *p*-InGaAs-слою гетероструктуры на основе тонкопленочной композиции Ti/Pt/Au;
- формирование тонкопленочных NiCr-резисторов;
- формирование межэлементной металлизации на основе Ti/Au;
- разделение подложки на кристаллы методами дисковой резки и раскалывания.

Формирование топологии модулятора проводилось с использованием метода проекционной *i*-line-литографии. Элементы оптических волноводов и межэлементная изоляция формировались методом реактивного ионного травления в индуктивно связанной плазме с использованием газовой смеси $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$ (10/20/20 cm^3/min). В процессе травления величины мощности индуктивного разряда, мощности смещения, а также давление процесса составляли 400 W, 90 W и 15 mTorr соответственно.

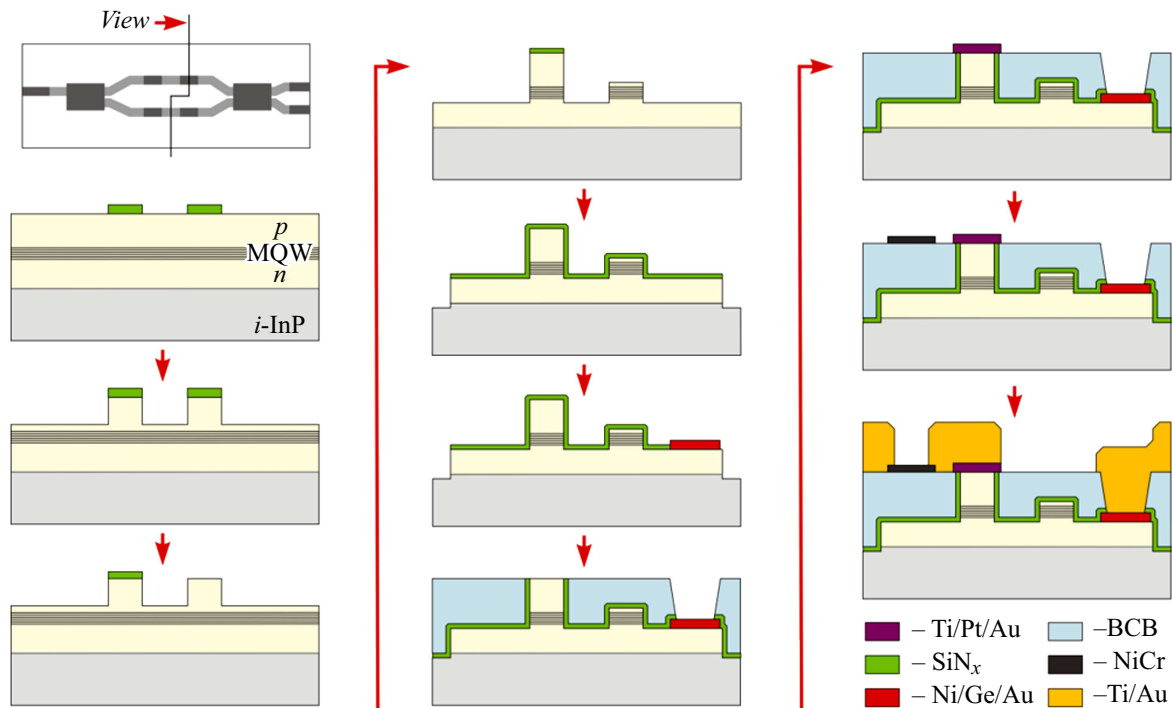


Рис. 1. Технологический маршрут изготовления электрооптического модулятора Маха-Цендера на основе InP.

Перед каждым процессом травления носитель с подложкой охлаждались до комнатной температуры (21°C). Для очистки поверхности подложки от продуктов травления, после травления проводилась промывка в деионизованной воде в течение 2 min.

Плазмохимическое травление слоев гетероструктуры проводилось через однослойную маску SiN_x . Пленка SiN_x толщиной $0.6\text{--}0.8\ \mu\text{m}$ формировалась на поверхности пластины методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. После литографии топология элементов диэлектрической маски формировалась методом реактивного ионного травления в плазме на основе SF_6 .

Планирование поверхности подложки проводилось с использованием пленки фоточувствительного бензоциклобутена, в дополнение пленка SiN_x использовалась в качестве адгезионного подслоя. После операций литографии и термозадувания избыточная толщина пленки бензоциклобутена удалялась методом реактивного ионного травления в индуктивно связанной плазме с использованием газовой смеси SF_6/O_2 .

Омические контакты к слоям гетероструктуры, подслою для формирования межэлементной металлизации, а также NiCr-тонкопленочные резисторы формировались методом электронно-лучевого испарения в вакууме. В качестве металлизации омических контактов к $p\text{-InGaAs}$ - и $n\text{-InP}$ -слоям гетероструктуры были использованы тонкопленочные композиции Ti/Pt/Au ($50/25/400\ \text{nm}$) и Ni/Ge/Au ($10/30/200\ \text{nm}$) соответственно. Отжиг омических контактов проводился на горячей плите в атмосфере азота. Межэлементная металлизация

формировалась методом электрохимического осаждения слоя Au толщиной $3\ \mu\text{m}$. В качестве подслоя для осаждения была использована двухслойная композиция Ti/Au ($30/80\ \text{nm}$).

Разделение подложки на отдельные кристаллы выполнялось методами дисковой резки и раскалывания. Антиотражающее покрытие на торцы кристаллов не осаждалось.

Для моделирования элементов электрооптического тракта модулятора использовалось программное обеспечение Photon Design.

После изготовления на оптическом стенде проводилась характеристика параметров модуляторов. В качестве источника оптического излучения был использован полупроводниковый лазер PPCL550, перестраиваемый в диапазоне $1530\text{--}1560\ \text{nm}$. Для контроля оптической мощности на выходе модулятора в низкочастотных измерениях использовался измеритель оптической мощности PM20CH. СВЧ измерения выполнялись с использованием векторного анализатора цепей MS46122B, в качестве фотоприемника был использован калибровочный модуль MN4765B. Ввод и вывод оптического излучения в тестовые модуляторы проводились с использованием линзованного SMF28 волокна.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлен расчет максимально достижимого коэффициента экстинкции ЭОМ Маха-Цендера от несимметричности деления оптической мощности во

входном делителе. Расчет выполнен в допущении, что не происходит внесения дополнительных искажений в плечах интерферометра и выходном оптическом сумматоре модулятора. На практике в большинстве случаев случайно вносимые дефекты изготовления и неточности в проектировании могут дополнительно снижать эффективность модуляции оптического излучения. Как видно из рисунка, значение КЭ модулятора в 10 dB достигается при дисбалансе на выходе делителя менее 0.9 dB. Это не является рекордным значением, в коммерчески доступных модуляторах КЭ в низкочастотных измерениях обычно заявляется на уровне 20 dB или более [18–22]. А это значение обеспечивается при дисбалансе входного делителя уже менее 0.09 dB. Более высокие значения КЭ предъявляют еще более жесткие требования как к проектированию конструкции, так и к технологическому процессу изготовления элементов электрооптического тракта ЭОМ в целом и входного делителя в частности.

В настоящей работе в качестве входного оптического делителя был использован асимметричный ММИ (1×2) делитель. Выбор данной конструкции объясняется целью разработки normally off-state-модулятора. На выходе ЭОМ был использован ММИ (2×2) в качестве оптического сумматора. В данном случае normally off-state-состояние достигается при разности фаз на входах ММИ (2×2) сумматора, равной 90°. В свою очередь, входной асимметричный ММИ (1×2) делитель обеспечивает на

Таблица 1. Параметры модели ММИ (1×2) делителя

Параметр	Значение
Эффективный коэффициент преломления, n_{eff}	3.273
Ширина, μm	5.99
Длина, μm	156
Смещение входа от оси, μm	2
Смещение выходов от оси, μm	2
Коэффициент деления	48.9:51

своих выходах начальную разность фаз оптических волн, равную 90°, что упрощает управление и уменьшает длину ЭОМ. Выбор размеров элементов делителя обусловлен, с одной стороны, минимизацией размеров и оптических потерь в делителе, с другой — ограничениями используемого технологического процесса. На рис. 3 представлена визуализация модели делителя, параметры модели представлены в табл. 1. При заданных параметрах расчетный коэффициент деления оптической мощности на выходах делителя составил 48.9:51.

Поскольку длина тела делителя в десятки раз превышает его ширину, при одинаковых абсолютных значениях технологического ухода его размеров в относительных величинах изменение длины тела делителя будет в десятки раз меньше. Поэтому изменение длины тела делителя будет оказывать существенно меньшее влияние на изменение интерференционной картины в ММИ и соответствующее изменение коэффициента деления. Также положения входного и выходных волноводов делителя однозначно зафиксированы на этапе изготовления фотошаблона. Поэтому в процессе изготовления оптических волноводных структур модулятора наиболее критичным из геометрических размеров делителя является воспроизведение ширины его тела.

На рис. 4, *a* показаны расчетные зависимости относительных значений мощности оптических волн на выходах в разработанной модели ММИ (1×2) делителя от величины технологического ухода ширины тела делителя. А на рис. 4, *b* показаны соответствующие им значения максимально достижимого коэффициента экстинкции в модуляторе. Из зависимостей видно, что коэффициент экстинкции модулятора ограничивается уровнем в 10 dB уже при технологическом уходе ширины тела делителя на 80–90 nm. Это предъявляет достаточно жесткие требования к процессу его изготовления. Кроме того, при технологическом уходе ширины от оптимального значения происходит дополнительное падение суммарной мощности на выходах делителя. Но в данном случае технологические требования значительно мягче, потеря 10% мощности оптической волны происходит при уходе ширины тела делителя как минимум на 200–250 nm.

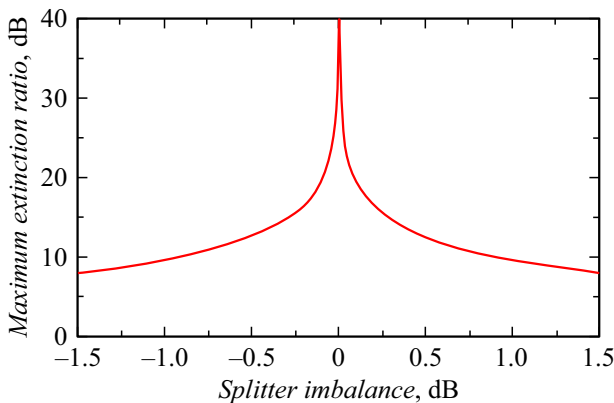


Рис. 2. Расчетная зависимость максимально достижимого коэффициента экстинкции ЭОМ от уровня дисбаланса мощности на выходах оптического делителя на входе модулятора.

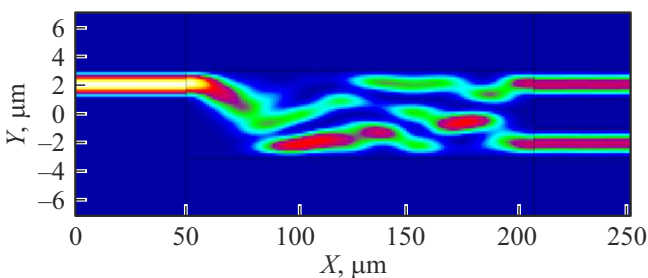


Рис. 3. Визуализация модели ММИ (1×2) делителя.

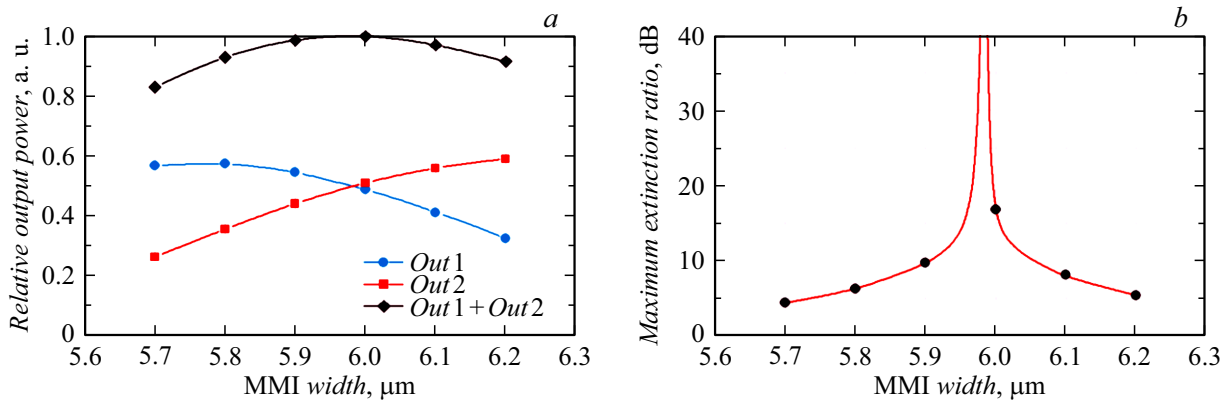


Рис. 4. Расчетные зависимости (а) нормированной оптической мощности на выходах модели ММИ (1×2) делителя и (b) максимально достижимого коэффициента экстинкции ЭОМ от ширины тела ММИ (1×2) делителя при фиксированной длине 156 μm .

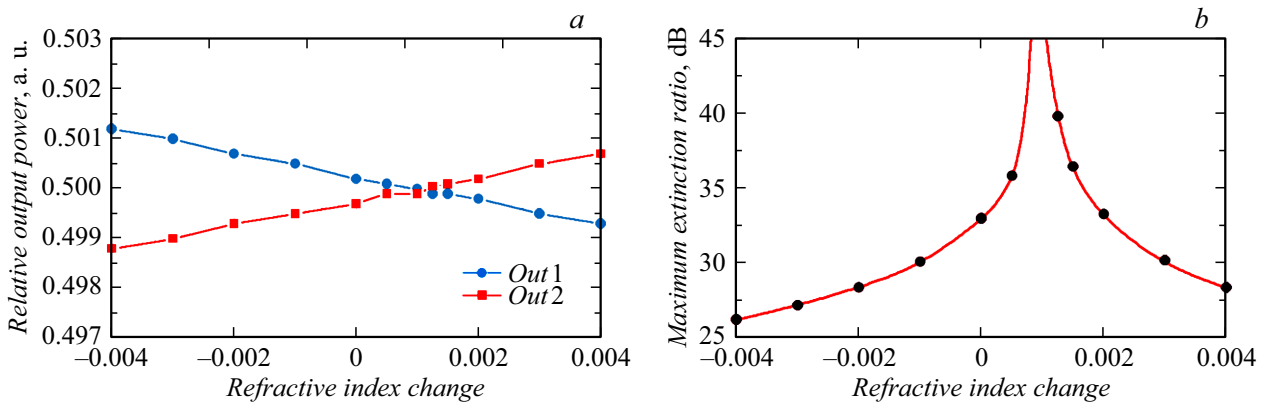


Рис. 5. Расчетные зависимости (а) нормированной оптической мощности на выходах модели ММИ (1×2) делителя и (b) максимально достижимого коэффициента экстинкции ЭОМ от изменения показателя преломления оптической среды в ММИ (1×2) 5.99×156 μm делителе.

Коэффициент деления ММИ делителя зависит как от геометрических размеров элемента, так и от коэффициента преломления среды, в которой распространяется оптическая волна. Если геометрические размеры делителя фиксируются на этапе изготовления элемента и не могут быть использованы для динамического управления коэффициентом деления, то коэффициент преломления среды может изменяться при приложении внешних воздействий (электрическое поле, нагрев и т.д.) к гетероструктуре. На рис. 5, а представлена расчетная зависимость относительных значений мощности оптических волн на выходах в разработанной модели ММИ (1×2) делителя от изменения показателя преломления среды. На рис. 5, b показаны соответствующие им изменения максимально достижимого коэффициента экстинкции в модуляторе. Из зависимостей видно, что изменение показателя преломления в диапазоне (-0.004) – (+0.004) позволило динамически изменять коэффициент экстинкции модулятора в широком диапазоне.

На рис. 6 показано микроскопическое изображение изготовленных модуляторов. Исследуемый модулятор был

спроектирован по push-pull-схеме. В качестве входного оптического делителя был использован представленный выше ММИ (1×2) делитель. Фазосдвигающая секция модулятора разделена на основную высокочастотную и вспомогательную низкочастотную части. На выходе высокочастотная часть нагружена на тонкопленочный резистор (50 Ω), размещенный на кристалле модулятора по монолитной технологии. Вспомогательная низкочастотная часть фазосдвигающей секции предназначена для установки рабочей точки модулятора и представляет собой сплошные электроды. Микрополосковые линии в обеих частях нагружены на *p-i-n*-диоды, одновременно являющиеся отрезками оптических волноводов модулятора. На выходе модулятора располагается ММИ (2×2) сумматор, спроектированный аналогично входному делителю.

На рис. 7 представлено микроскопическое изображение ММИ (1×2) делителя, размещенного на входе модулятора. Он был совмещен с *p-i-n*-диодом для обеспечения возможности управлять показателем преломления в оптической среде делителя.

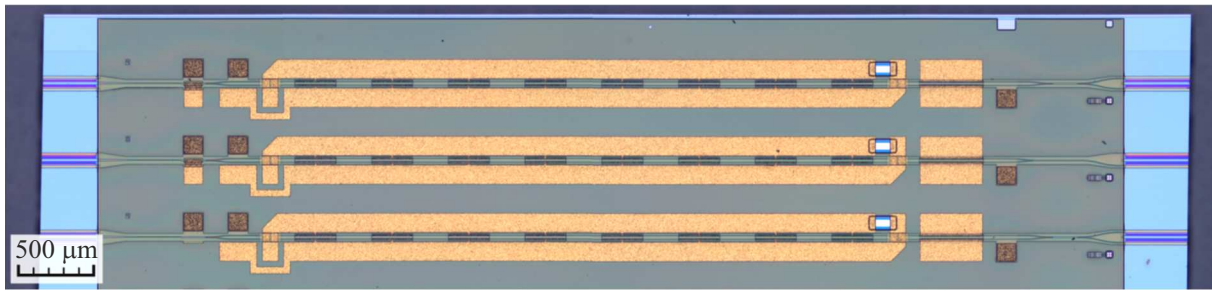


Рис. 6. Микроскопическое изображение блока изготовленных ЭОМ Маха-Цендера.

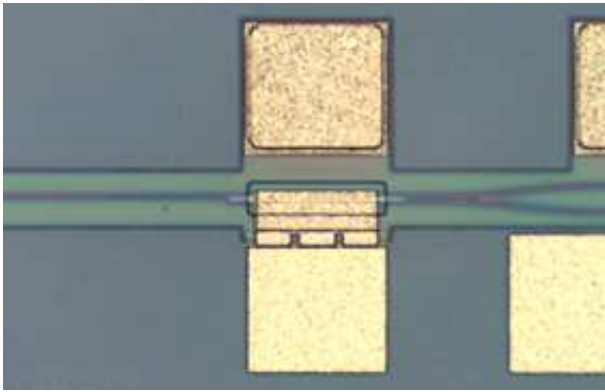


Рис. 7. Микроскопическое изображение ММИ (1×2) делителя с электродами подстройки.

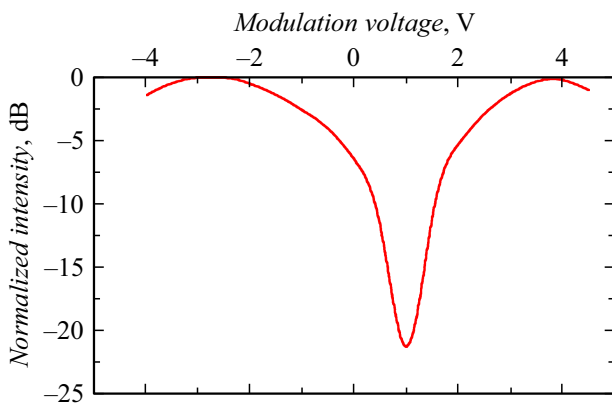


Рис. 8. Результаты измерения передаточной функций ЭОМ при напряжении смещения -1 V на длине волны 1550 nm.

Вначале была проведена характеристика параметров ЭОМ без перестройки коэффициента деления входного делителя. На рис. 8 представлены результаты измерения передаточной функции модулятора при напряжении на электроде смещения -1 V и длине волны входного оптического излучения 1550 nm. Полуволновое напряжение модулятора составило 2.8 V, КЭ достигал 21.5 dB. Вносимые потери модулятора составили 6.8 – 7.9 dB без учета потерь на ввод/вывод оптической волны.

Результаты СВЧ измерений представлены на рис. 9. Электрооптическая полоса пропускания модулятора по уровню -3 dB превышала 32 GHz. При этом во всем диапазоне измерений модулятор демонстрировал хорошее согласование электрического сигнала. Модуль коэффициента отражения электрического сигнала от входа не превышал -12 dB.

В финале были проведены измерения КЭ модулятора при разных напряжениях смещения на электродах подстройки входного ММИ (1×2) делителя. Результаты представлены на рис. 10. Из них видно, что при подаче отрицательного смещения на p - i - n -структуру делителя не наблюдалось значительного изменения КЭ модулятора. С исходных 21.5 dB он незначительно снижался до 20.7 dB при достижении напряжением смещения уровня -6 V. Напротив, при приложении прямого смещения наблюдалась существенно более яркая зависимость. При прямом смещении 3 V КЭ модулятора возрастал до 29.5 dB.

Для объяснения полученной зависимости необходимо разделить области приложения прямого и обратного смещений, так как в них наблюдалась существенно различная картина. При приложении обратного смещения к p - i - n -структуре концентрация носителей в МКЯ мала, и изменение показателя преломления в теле ММИ делителя происходит в основном за счет квантоворазмерного эффекта Штарка. Так как приложение обратного напряжения не приводило к существенному изменению КЭ модулятора, очевидно, что изменения коэффициента преломления здесь были незначительны. Текущей длины тела ММИ не достаточно для существенного изменения интерференционной картины на выходе ММИ и изменения коэффициента деления. Вероятно, кратное увеличение протяженности тела ММИ позволит существенно повысить чувствительность изменения коэффициента деления за счет квантоворазмерного эффекта Штарка и соответственно позволит управлять коэффициентом экстинкции модулятора в большем диапазоне.

При приложении прямого смещения к p - i - n -структуре концентрация носителей в МКЯ увеличивается по экспоненциальному закону. Здесь, помимо квантоворазмерного эффекта Штарка, начинают действовать эффекты, связанные с инжекцией носителей заряда, и термооптический эффект. В сумме они оказывают более значи-

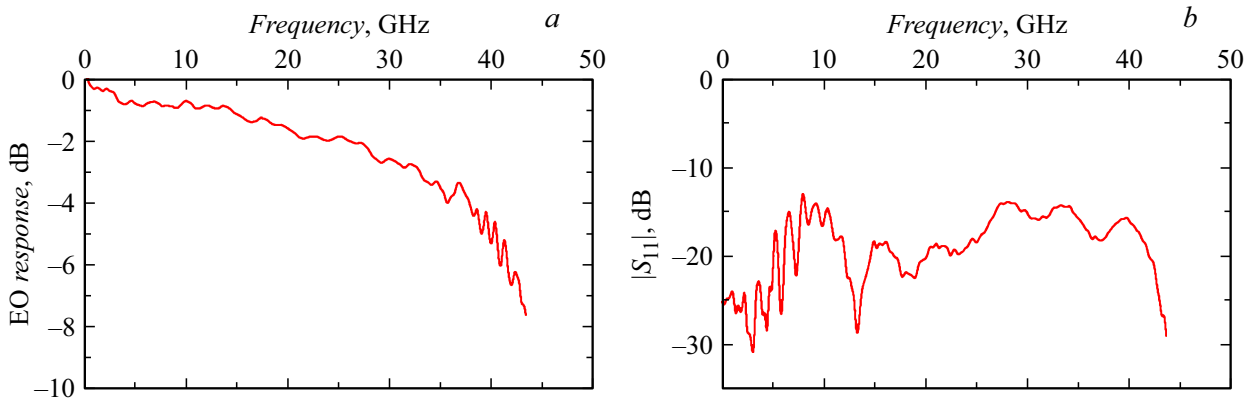


Рис. 9. Результаты измерения (а) электрооптической полосы пропускания ЭОМ и (б) модуля коэффициента отражения электрического сигнала от входа модулятора при напряжении смещения -1 V на длине волны 1550 nm .

Таблица 2. Параметры модели ММИ (1×2) делителя

Сылка	Год	Длина волны, nm	$f_{\text{зdB}}$, GHz	КЭ (НЧ), dB	КЭ (ВЧ), dB	V_{π} , V	Потери, dB	Длина, mm
[18] ¹	—	1550	35	> 20	> 10 на 56 Gbaud	2.5	—	—
[23]	—	1310	58	> 20	—	3.5	4	5.5
[24]	2019	1550	31	20	—	3	2	2
[25]	2015	2000	< 9	9	—	3.2	—	6.5
[26]	2016	1550	> 67	27	> 10 на 100 Gbit/s	2	2	—
[27]	2022	1550	45	> 25	5.9 на 80 Gbit/s	3	—	—
[28]	2016	1550	44	25	—	2	6	—
Настоящая работа	2022	1550	32	21.5–29.5 изменяема	—	2.8	6.8–7.9	7.4

Примечание. ¹ Измерения в модуле.

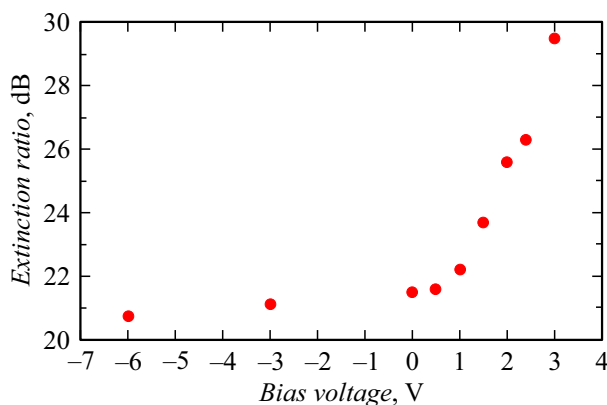


Рис. 10. Зависимость коэффициента экстинкции ЭОМ от напряжения смещения на входном ММИ (1×2) делителе на длине волны 1550 nm .

тельное влияние на изменение показателя преломления, что обеспечило значительное увеличение КЭ модулятора. Как и в случае с обратным смещением, кратное

увеличение протяженности ММИ, вероятно, могло бы расширить диапазон регулировки коэффициента экстинкции модулятора или снизить требуемую мощность управляющего сигнала.

В табл. 2 представлено сравнение результатов параметров разработанного модулятора с результатами, представленными в недавних работах. По основной части параметров модулятор демонстрирует средние значения. Относительно высокие вносимые потери могут быть снижены посредством оптимизации топологии модулятора (посредством уменьшения его длины).

Заключение

В работе представлены результаты разработки электрооптического модулятора Маха-Цендера на основе InP с управляемым коэффициентом экстинкции. Управление было организовано за счет электрической перестройки коэффициента деления входного ММИ делителя. Электрооптическая полоса пропускания (по уровню -3 dB)

модуляторов превышала 32 GHz, модуль коэффициента отражения электрического сигнала от входа не превышал -12 dB в диапазоне до 43 GHz, а полуволновое напряжение составило 2.8 V на длине волны 1550 nm. Электрическая перестройка входного ММИ делителя позволила продемонстрировать увеличение коэффициента экстинкции модулятора с начальных 21.5 до 29.5 dB. Диапазон регулировки может быть значительно расширен путем оптимизации конструкции входного ММИ делителя. На практике динамическое расширение коэффициента экстинкции может быть использовано как для улучшения параметров модулятора, так и для упрощения технологического процесса их изготовления с целью снижения конечной стоимости изделий.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (название проекта: Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических информационных систем и СВЧ-фотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки, договор № 075-03-2020-237/1 от 05.03.2020, внутренний номер проекта FEWM-2020-0040).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Электронный ресурс: „Cisco Annual Internet Report“ <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [2] Электронный ресурс: „NOKIA Who will satisfy the desire to consume?“ https://www.iot.gen.tr/wp-content/uploads/2017/03/160531-Nokia_Bell_Labs_Mobility_Traffic_Report.pdf
- [3] M. Smit, K. Williams. *J. Tol. APL Photon.*, **4** (5), 050901 (2019). DOI: 10.1063/1.5087862
- [4] M. Smit, X. Leijtens, H. Ambrosius, E. Bente, J. Tol, B. Smalbrugge, T. Vries, E.J. Geluk, J. Bolk, R. Veldhoven, L. Augustin, P. Thijs, D. D'Agostino, H. Rabbani, K. Lawniczuk, S. Stopinski, S. Tahvili, A. Corradi, E. Kleijn, D. Dzibrou, M. Felicetti, E. Bitincka, V. Moskalenko, J. Zhao, R. Santos, G. Gilardi, W. Yao, K. Williams, P. Stabile, P. Kuindersma, J. Pello, S. Bhat, Y. Jiao, D. Heiss, G. Roelkens, M. Wale, P. Firth, F. Soares, N. Grote, M. Schell, H. Debregeas, M. Achouche, J.-L. Gentner, A. Bakker, T. Korthorst, D. Gallagher, A. Dabbs, A. Melloni, F. Morichetti, D. Melati, A. Wonfor, R. Penty, R. Broeke, B. Musk, D. Robbins. *Semicond. Sci. Technol.*, **29** (8), 083001 (2014). DOI: 10.1088/0268-1242/29/8/083001
- [5] F.M. Soares, M. Baier, T. Gaertner, N. Grote, M. Moehrl, T. Beckerwerth, P. Runge, M. Schell. *Appl. Sci.*, **9** (8), 1588 (2019). DOI: 10.3390/app9081588
- [6] Электронный ресурс: „1550 nm DFB Laser Diode, PM Output, High Performance. Data Sheet.“ https://lenlasers.ru/upload/iblock/b31/DFB_1550_PM_HP.LLS.pdf
- [7] Электронный ресурс: „DFB & DBR Laser Diodes. DFB stock list.“ https://www.toptica.com/fileadmin/Editors_English/14_stocklists/DFB-Stock-list.pdf
- [8] Электронный ресурс: „1550 nm laser diode — DFB. Data Sheet.“ <https://www.aerodiode.com/wp-content/uploads/2020/05/1550-nm-laser-diode-Model-1-Datasheet-4.pdf>
- [9] L.B. Soldano, E.C.M. Pennings. *J. Lightwave Technol.*, **13** (4), 615 (1995). DOI: 10.1109/50.372474.
- [10] J. Leuthold, C.H. Joyner. *J. Lightwave Technol.*, **19** (5), 700 (2001). DOI: 10.1109/50.923483
- [11] D.A. May-Arrijoja, P. LiKamWa, C. Velasquez-Ordonez, J.J. Sanchez-Mondragon. *Electron. Lett.*, **43** (13), 714 (2007). DOI: 10.1049/el:20071070
- [12] D.A. May-Arrijoja, P. LiKamWa, J.J. Sanchez-Mondragon, R.J. Selvas-Aguilar, I. Torres-Gomez. *Meas. Sci. Technol.*, **18** (10), 3241 (2007). DOI: 10.1088/0957-0233/18/10/S29
- [13] J. Klamkin, L.A. Johansson, A. Ramaswamy, H.F. Chou, M.N. Sysak, J.W. Raring, N. Parthasarathy, S.P. DenBaars, J.E. Bowers, L.A. Coldren. In: *2006 Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices* (Perth, Australia, 2006), p. 184. DOI: 10.1109/COMMAD.2006.4429911
- [14] J. Klamkin, A. Ramaswamy, L.A. Johansson, N. Nunoya, J.E. Bowers, S.P. DenBaars, L.A. Coldren. In: *2009 International Topical Meeting on Microwave Photonics* (Valencia, Spain, 2009), https://coldren.ece.ucsb.edu/sites/default/files/publications/klamkin_-_uni-traveling-carrier_balanced_photodiode.pdf
- [15] H.G. Bukkems, R.C. Strijbos, J.J.M. Binsma, H. Vrieze, M.C. Larson, M.K. Smit, E.A.J.M. Bente, B.H. Verbeek. *J. Quantum Electron.*, **43** (7), 614 (2007). DOI: 10.1109/JQE.2007.899406
- [16] D.A. May-Arrijoja, P. LiKamWa, R.J. Selvas-Aguilar, J.J. Sanchez-Mondragon. *Opt. Quant. Electron.*, **36** (15) 1275 (2004). DOI: 10.1007/s11082-005-0317-2
- [17] B. Mao, P. Yue, F. Hou, Z. Liu. *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid.*, **10**, 15004 (2015). DOI: 10.2971/jeos.2015.15004
- [18] Электронный ресурс: „C-band 56GBaud InP Mach-Zehnder-Modulator. Data sheet.“ https://www.hhi.fraunhofer.de/fileadmin/PDF/PC/MOD/datasheet_module_MZM_1550_56GBaud_TECincl_v2.pdf
- [19] Электронный ресурс: „Lithium Niobate Electro-Optic Modulators, Fiber-Coupled (1260 nm–1625 nm). Specifications.“ https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918
- [20] Электронный ресурс: „Lithium Niobate Electro Optic Modulator. Specifications.“ <https://www.ixblue.com/photonics-space/intensity-modulators/>
- [21] Электронный ресурс: „40G Intensity Modulator Sumitomo T.MXH1.5-40PD-ADC.“ http://www.hltoptical.com/page420?product_id=249&_l=en
- [22] Электронный ресурс: „100G IQ-QAM Modulator Oclaro PM100.“ http://www.hltoptical.com/page420?product_id=337&_l=en
- [23] Электронный ресурс: „O-band 100GBaud InP Mach-Zehnder-Modulator. Data sheet.“ https://www.hhi.fraunhofer.de/fileadmin/PDF/PC/MOD/datasheet_chip_MZM_1300_100GBaud_v2.pdf

- [24] G. Qian, B. Niu, W. Zhao, Q. Kan, X. Gu, F. Zhou, Y. Kong, T. Chen. *Chin. Opt. Lett.*, **17** (6), 061301 (2019). DOI: 10.3788/COL201917.061301
- [25] M.U. Sadiq, M.R. Gleeson, N. Ye, J. O'Callaghan, P. Morrissey, H.Y. Zhang, K. Thomas, A. Gocalinska, E. Pelucchi, F.C.G. Gunning, B. Roycroft, F.H. Peters, B. Corbett. *Opt. Express*, **23** (9), 10905 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.010905
- [26] Y. Ogiso, J. Ozaki, N. Kashio, N. Kikuchi, H. Tanobe, Y. Ohiso, M. Kohtoku. *Electron. Lett.*, **52** (22), 1866 (2016). DOI: 10.1049/el.2016.2987
- [27] Y.D. Gupta, G. Binet, W. Diels, J.A. Heibach, J. Hogan, M. Baier, M. Schell. In: 2022 *European Conference on Optical Communication* (Basel, Switzerland, 2022), https://ict-poetics.eu/wp-content/uploads/2022/07/MZMs_ECOC_2022_v1-ydg-10052022.pdf
- [28] S. Lange, M. Gruner, C. Meuer, R. Kaiser, M. Hamacher, K.-O. Velthaus, M. Schell. *J. Light. Technol.*, **34** (2), 401 (2016). DOI: 10.1109/JLT.2015.2496426