

К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма.

Часть 2. Воплощение идей Тамма в современной электронике

Виктор Алексеев

В первой части статьи (Современная электроника. 2025. № 7) были рассмотрены основные работы Игоря Евгеньевича Тамма, ставшие со временем классикой теоретической физики. Сегодня, спустя столет, теоретические разработки Игоря Тамма воплощаются в реальные современные электронные устройства. В этой части коротко описаны некоторые современные быстродействующие электрооптические модуляторы (EOM, TFLN, HW MZM, IQ MZM, SOH MZM), в основе которых лежит эффект изменения коэффициента преломления в некоторых оптических средах при наложении внешнего электрического поля. Этот эффект, обнаруженный Фридрихом Погкельсом в 1893 году, позднее получил его имя (Pockels Effect – PE). Тамм и Манделъштам в 1924 году дали строгое теоретическое обоснование этих явлений, которое остаётся актуальным и в настоящее время.

1. Электрооптические модуляторы на основе анизотропных кристаллов и тонких плёнок

В работах И.Е. Тамма и Л.И. Манделъштама по оптическим свойствам анизотропных кристаллов были предложены уравнения электродинамики, которые стали фундаментом для разработки электрооптических модуляторов ЭОМ (Electro-Optic Modulators).

Основной принцип действия современных ЭОМ основан на эффекте изменения показателя преломления кристалла под действием электрического поля, описанным Таммом в 1924 году [1].

Детально эта работа рассмотрена в первой части статьи. Тамм и Манделъштам, в частности, показали, что внешнее напряжение, приложенное к некоторым анизотропным нелиней-

ным кристаллам, вызывает изменение показателя преломления « n ».

Необходимо особо подчеркнуть, что уравнения электродинамики Тамма – Манделъштама описывают общие принципы взаимодействия электромагнитного поля с анизотропной средой. Эти уравнения универсальны и применимы к любым анизотропным средам, включая: неорганические кристаллы (LiNbO_3 , BaTiO_3); органические кристаллы; поляризованные органические полимеры с ориентированными хромофорами.

В этой статье автору хотелось бы обратить внимание на то, каким образом теоретические основы, заложенные Таммом и Манделъштамом почти столетие назад, продолжают находить практическое применение в современных высокотехнологичных устройствах; при этом, следуя манере объяснения сложных физических явлений, которую использовал Игорь Тамм, опираться на простые структурные рисунки, избегая доскональных принципиальных схем.

Свет как электромагнитная волна характеризуется тремя взаимно перпендикулярными векторами: направления распространения (\mathbf{k}), электрического поля (\mathbf{E}) и магнитного поля (\mathbf{H}). Линейно поляризованный свет отличается тем, что вектор электрического поля \mathbf{E} колеблется в одной плоскости с неизменной ориентацией (рис. 1) [2].

Если световой пучок направлен вдоль оптической оси кристалла, то без приложенного электрического напряжения плоскость поляризации света после прохождения его через кристалл сохраняет своё положение в пространстве.

Если на кристалл, не обладающий центром симметрии, подать электрическое напряжение, то его внутренняя структура деформируется, что приводит к изменению оптических

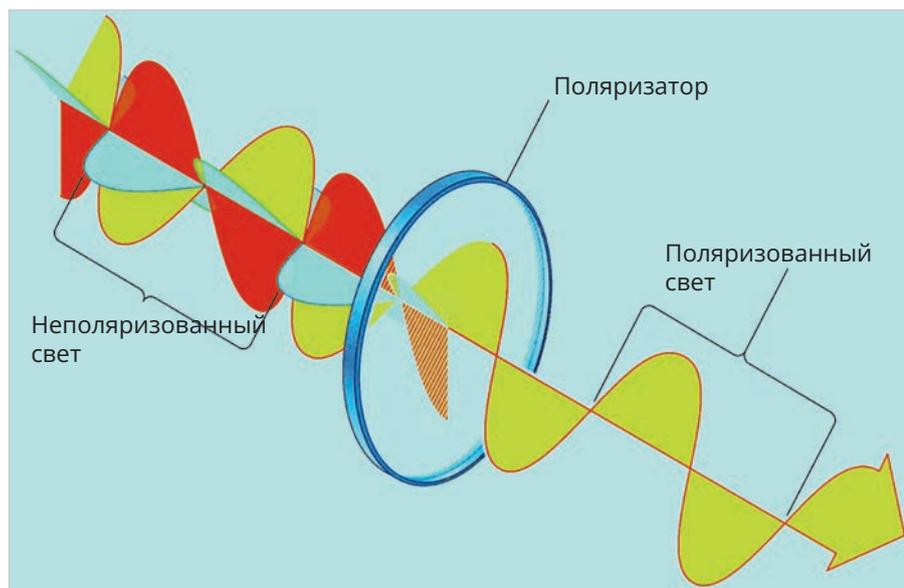


Рис. 1. В поляризованном световом луче вектор электрического поля во всех точках волны направлен вдоль одной и той же прямой



Рис. 2. Структурная схема электрооптического амплитудного модулятора с двумя поляризаторами и ячейками Поккельса (PC)

свойств материала, то есть показателя преломления. Этот эффект, обнаруженный Фридрихом Поккельсом в 1893 году, позднее получил его имя (Pockels Effect – PE).

Поккельс экспериментально обнаружил и описал ярко выраженные изменения оптических свойств кристаллов под действием электрического поля. Тамм и Манделъштам в 1924 году дали строгое теоретическое обоснование этих явлений в рамках теории относительности и электродинамики сплошных сред. Их вклад заключался в создании универсальной теоретической базы для понимания электрооптических эффектов в анизотропных средах.

Универсальность и актуальность уравнений Тамма-Манделъштама особенно ярко проявляется при анализе конкретных электрооптических эффектов. Классическим примером служит эффект Поккельса, который хотя и был экспериментально обнаружен ещё в начале XX века, получил полное теоретическое обоснование именно благодаря работам советских физиков. Основным элементом современных электрооптических модуляторов является нелинейный анизотропный кристалл, содержащий электроды для подачи внешнего напряжения. Для простоты такую конструкцию принято называть «ячейкой Поккельса» (Pockels Cell – PC).

Простейшим типом ЭОМ является фазовый электрооптический модулятор ЭОФМ, содержащий только одну ячейку PC.

При изменении показателя преломления под действием внешнего поля также изменяется скорость прохождения света через кристалл, что приводит к изменению фазы. Кроме того, фазовая задержка зависит от направления поляризации, типа и ориентации нелинейного кристалла, а также

от направления приложенного электрического поля [3].

В зависимости от типа и ориентации нелинейного кристалла, а также от направления приложенного электрического поля фазовая задержка может быть обусловлена направлением поляризации. Таким образом, ячейку PC можно рассматривать как управляемую напряжением волновую пластинку, и её можно использовать для модуляции состояния поляризации. При линейной входной поляризации (часто ориентированной под углом 45° к осям кристалла) выходная поляризация, как правило, будет эллиптической, а не просто линейной поляризацией с повернутым направлением. Электрооптические фазовые модуляторы (ЭОФМ) применяются в сложных оптических системах, таких как: высокоточные лазерные интерферометры; устройства квантовой криптографии и распределения ключей; блоки стабилизации частоты лазеров; волоконно-оптические гироскопы и кольцевые лазерные гироскопы для навигации; другие устройства радиофотоники.

Ячейки PC могут использоваться для амплитудной модуляции в сочетании с другими оптическими элементами, такими, например, как поляризаторы. На рис. 2 показана структурная схема подобного электрооптического амплитудного модулятора.

ЭОАМ, показанный на рис. 2, представляет собой конструкцию из двух согласованных ячеек PC на базе кристаллов ниобата лития, размещённых между линейными поляризаторами.

Поляризаторы пропускают только колебания, параллельные плоскости поляризации, и полностью задерживают ортогональные колебания. Если пропустить через такой прибор пучок света, то на выходе он будет линейно поляризованным. При вращении

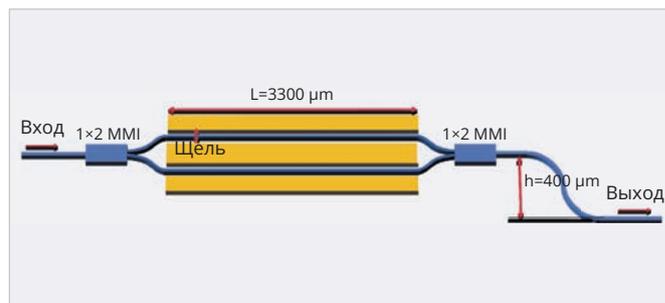


Рис. 3. Структурная схема модулятора на базе TFLN с интегрированным поляризатором поперечной электрической моды

вокруг направления луча интенсивность выходящего света будет изменяться от максимального до минимального значения. При изменении напряжения, подаваемого на кристалл модулятора, можно практически реализовать 100% модуляцию светового потока.

В целом электрооптический амплитудный модулятор действует как управляемая волновая пластинка (Variable Waveplate) с задержкой, зависящей от приложенного электрического поля.

Если на вход подать неполяризованный свет, то кристалл будет «перемешивать» случайные компоненты, и модуляция будет нестабильной. Первый поляризатор делает входной пучок строго линейно поляризованным (обычно под 45° к осям кристалла). Это обеспечивает предсказуемую работу ячейки.

Если оставить одну ячейку, то при модуляции возникает не только изменение интенсивности, но и «сопутствующий» сдвиг фазы и поворот поляризации, что также приводит к искажениям.

Этот недостаток устраняется с помощью второй ячейки в балансной конфигурации. Ячейки включаются таким образом, что их электрические поля направлены противоположно друг другу. При подаче модулирующего напряжения в одной ячейке показатель преломления увеличивается, а в другой – уменьшается на ту же величину. Это приводит к тому, что фазовые сдвиги в плечах модулятора имеют противоположные знаки и взаимно компенсируются, оставляя только чистую амплитудную модуляцию без паразитного изменения фазы выходного сигнала.

Второй поляризатор «отбирает» только ту компоненту света, которая меняется под действием электриче-

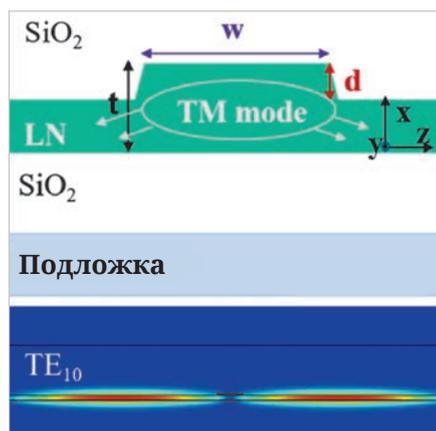


Рис. 4. Структура поперечного сечения поляризатора на основе LNOI, использованного в [13]

ского поля. Когда напряжение равно нулю, свет проходит через него почти без потерь. Когда подано напряжение, фаза и поляризация в ячейках изменяются, и на втором поляризаторе возникает подавление сигнала, вплоть до полной блокировки. Таким образом, реализуется амплитудная модуляция, близкая к 100% [4].

Типичные рабочие параметры современных электрооптических модуляторов варьируются в зависимости от конструкции и назначения. Для ячеек Поккельса на основе ниобата лития характерны управляющие напряжения от единиц до десятков вольт при полуволновом напряжении V_{π} порядка 2–10 В. Частоты модуляции могут достигать от мегагерц для простых амплитудных модуляторов до десятков гигагерц (20–100 ГГц) для высокоскоростных интегральных модуляторов, о которых речь пойдет в следующих разделах.

Современные ЭОМ выпускаются во многих странах мира, в том числе и в РФ [5].

В табл. 1 приведён список пяти наиболее заметных российских производителей электрооптических модуляторов.

В последние годы всё большую популярность получают модуляторы, получившие название ЭОМ Маха-Цендера (MMC). Конструкция такого модулятора базируется на принципе действия интерферометра «Mach-Zehnder Interferometer – MZI».

Модуляторы MZM в основном используют интегрально-оптические схемы на кристалле ниобата лития LiNbO_3 (аббревиатура – LN), содержащую систему канальных оптических волноводов и систему электродов.

Таблица 1. Российские производители ЭОМ

Компания	Тип модуляторов	Особенности	URL
АО «ЛЛС»	Амплитудные и фазовые (LiNbO_3 , 1520–1560 нм)	Интегральные, до 40 ГГц	[6]
«Т8»	BPSK-модулятор 40 Гбит/с, DWDM-компоненты	Первые в РФ лабораторные и коммерческие образцы	[7]
«ТУСУР»	400 Гбит/с на основе эффекта Штарка на тонкоплёночном ниобате лития с нитридом кремния	Интегрируется в 5G/6G, компактные, высокоскоростные системы	[8]
«Сколтех»	Сверхвысокочастотный интегральный ЭОМ	Планарная технология, перспективы до сотен ГГц, для 6G	[9]
ПАО «ПЕРМСКАЯ НП ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ»	Сверхвысокочастотный интегральный ЭОМ для конвертации электрического СВЧ-сигнала в оптический в диапазоне от 1,45 до 1,60 мкм	Для магистральных радиодетонных систем	[10]

Упрощённая структурная схема модулятора MZM LN показана на рис. 3.

Разность показателей преломления между LN (~2,2) и SiO_2 (~1,45) позволяет создавать волноводы с сильной локализацией света.

В основе архитектуры схемы (рис. 3) использована классическая модель интерферометра Маха – Цендера (ММЦ).

В этих ЭОМ входное лазерное излучение разделяется на два пути, которые образуют два плеча интерферометра. В настоящее время для разделения на входе и объединения на выходе оптических сигналов применяется так называемый многомодовый интерференционный преобразователь (Multimode Interference Coupler – MMI), который использует интерференцию волн в многомодовом волноводе. Эти устройства обеспечивают более равномерное разделение мощности между плечами, а также расширенную полосу модуляции и снижение погрешностей модуляции.

Волновод одного из плеч изготавливают из кристаллов с сильной зависимостью коэффициента преломления от приложенного напряжения (LN).

С помощью специальных электродов к волноводу подводится модулирующее напряжение, при подаче которого изменяется показатель преломления. Теоретическая электродинамика этого процесса описана в отмеченной выше работе Игоря Тамма. На выходе оба луча смешиваются в один. В результате интерференции образуется выходной сигнал с изменённой фазой.

Более подробно эти вопросы рассмотрены в опубликованном недавно (2025) обзоре [12].

В настоящее время выпускаются различные типы электрооптических модуляторов Маха – Цендера, предназначенных для высокоскоростных оптических приложений. Наиболее интересные типы ЭОМ-модуляторов рассмотрены в следующих разделах.

2. Тонкоплёночные модуляторы на основе ниобата лития

Несмотря на то что ниобат лития (LiNbO_3) обладает большими электрооптическими коэффициентами, широким окном прозрачности и химической стабильностью, ЭОМ на основе объёмных кристаллов LN имеют существенные ограничения. Из таких недостатков можно отметить следующие: большие размеры (сантиметры); высокие управляющие напряжения (десятки вольт); ограниченная интеграция с другими фотонными компонентами и электронными схемами; архитектура, ограничивающая полосу модуляции.

Появление технологии с использованием тонкоплёночного ниобата лития на изоляторе (Thin-Film Lithium Niobate on Insulator – TFLNOI) кардинально изменило ситуацию. Эта технология создаёт структуру, аналогичную кремнию на изоляторе (SOI), но использует монокристаллическую плёнку ниобата лития толщиной несколько сотен нанометров, размещённую на диэлектрической подложке (обычно SiO_2).

По сравнению с ЭОМ на основе объёмных кристаллов ниобата лития модуляторы TFLNOI имеют следующие преимущества:

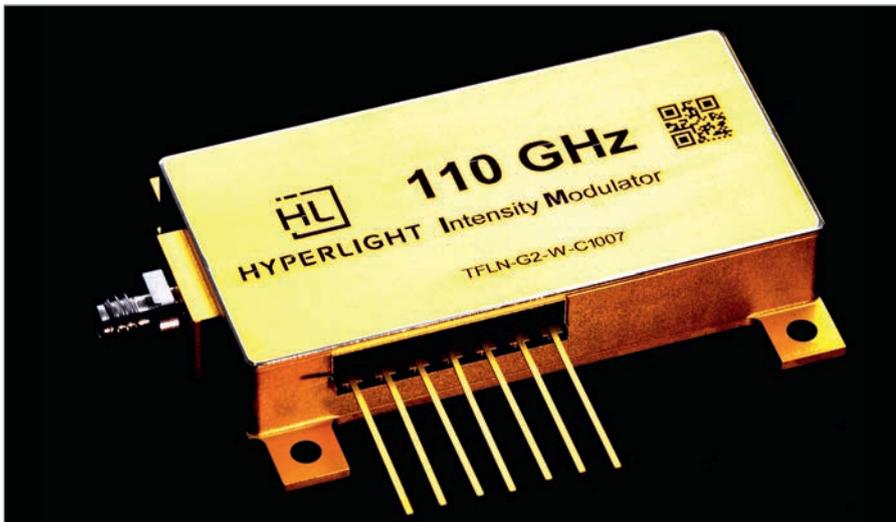


Рис. 5. Первый коммерческий TFLN модулятор «Chiplet™», представленный в марте 2025 года фирмой HyperLight

- размеры устройств уменьшаются с сантиметров до миллиметров или даже микрометров;
- локализация поля позволяет снизить управляющие напряжения до единиц вольт;
- улучшенная электродная архитектура обеспечивает полосы модуляции свыше 100 ГГц;
- совместимость с технологиями кремниевой фотоники открывает путь к сложным интегрированным схемам.

В качестве примера конструкции современных ЭОМ на базе TFLN на рис. 4 показана структура поперечного сечения поляризатора, описанного в одной из последних опубликованных в 2025 году работ [13].

Модулятор в этой работе изготовлен с использованием 4-дюймовой пластины TFLN с х-образным срезом, состоящей из кремниевой подложки толщиной 450 мкм, слоя SiO₂ толщиной 4,7 мкм и линейных нанопроводников толщиной 350 нм.

Как отмечают сами авторы, одна из главных целей разработки новой конструкции модулятора заключалась в увеличении коэффициента экстинкции (Polarization Extinction Ratio – PER), который определяет отношение мощности света в «открытом» состоянии модулятора к мощности в «закрытом» состоянии.

Ключевым нововведением стал интегрированный поляризатор поперечной электрической моды (TE-поляризатор).

Одним из главных источников, вызывающих заметное уменьшение коэффициента экстинкции ER, явля-

ется паразитная поперечная магнитная поляризация (Transverse Magnetic Polarization – TM), которая модулируется иначе, чем полезный сигнал.

Регулируя ширину (w) и глубину (d) волновода, можно добиться одномодового пропускания только TE₀₀ на длине волны 1310 нм. При этом условии мода TE₁₀ находится в области отсечки. Из-за ступенчатого разрыва на стенке ребра, когда мода TM₀₀ наклонно падает на границу гребня, может происходить преобразование мод из TM в TE. Это явление, при котором направляемая мода просачивается в ортогонально поляризованную пластинчатую моду, получившее название «боковое просачивание», приводит к значительным потерям поляризации полезного сигнала.

Устранить этот недостаток удалось с помощью размещения проходного волноводного поляризатора поперечной электрической моды (ППЭМ) непосредственно на чипе.

Принцип работы этого ППЭМ основан на использовании эффекта «утечки» нежелательных мод из волновода. При определённой ширине и глубине волновода мода поперечной магнитной поляризации (ПМП) имеет большой коэффициент утечки в подложку. При этом поперечная электрическая мода (ПЭП) остаётся хорошо локализованной. За счёт использования встроенного поляризатора ППЭМ удалось достигнуть величины коэффициента экстинкции поляризации 38 дБ. Также следует отметить ещё одно нововведение в конструкции модулятора: небольшое смещение между входным и выходным волноводами. Такое сме-

щение позволило уменьшить связь паразитных мод с выходным оптоволоконном, улучшить подавление нежелательного излучения, увеличить значение общего коэффициента ER.

Из уникальных параметров своего модулятора авторы отметили:

- общий ER – 41 дБ;
- поляризационный коэффициент экстинкции PER интегрированного поляризатора – 38 дБ;
- полуволновое напряжение – (V_{π}): 7,9 В при длине модулирующего плеча 3,3 мм;
- произведение напряжение×длина – 2,6 В·см (показатель эффективности модуляции).

В настоящее время модуляторы TFLN являются наиболее популярными. В качестве базовой идеи используются конструкции MZM, показанные на рис. 3, 4. Характерно, что в последних публикациях 2024–2025 годов основные различия наблюдаются в материалах, технологиях и специфических отличиях, обусловленных специальными приложениями. Так, в работе [14] описан модулятор TFLN MZM, изготовленный на 8-дюймовой кремниевой подложке. Это заметное инновационное технологическое решение, поскольку прежде такие модуляторы изготавливались в основном на пластинах размером 4,6 дюйма. Модулятор, описанный в этой работе, показал потери на кристалле менее 1 дБ и потери в волноводе менее 0,5 дБ/см. Полуволновое произведение напряжения на длину ($V_{\pi} \cdot L$) составляло 3,12 В·см в С-диапазоне. При этом соответствующая полоса пропускания электрооптического отклика по уровню 3 дБ не превышала 67 ГГц.

Технологические аспекты изготовления TFLN-модуляторов рассмотрены в статье [15]. В частности, было показано, что релаксацию электрооптического тока можно замедлить более чем в сто раз с помощью управления интерфейсом LN–металл и последующего отжига. Такое изменение обеспечивает прогресс в достижении стабильного на протяжении всего срока службы электрооптического тока. Кроме того, надёжное электрооптическое напряжение позволяет применять TFLN-устройства в областях, где критически важны перекрёстные помехи, мощность и ширина полосы тока смещения: таких, например, как квантовые устройства, высокоплотная интегральная фотоника и системы связи.

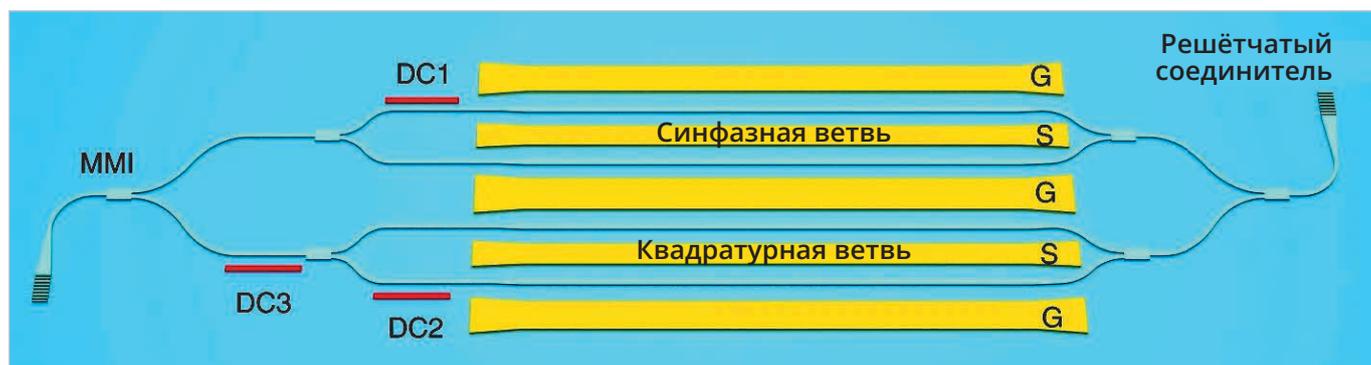


Рис. 6. Схема синфазно-квадратурного модулятора Маха – Цендера (IQ FMLN MZM):

- G, S, G – электроды для модулирующего сигнала (Ground–Signal–Ground);
- DC1, DC2, DC3 – термооптические фазовращатели – оптические делители/сумматоры;
- In-Phase Branch – синфазная ветвь

Наибольший интерес в этой категории ЭОМ вызвал первый коммерческий TFLN, модулятор «Chiplet™», представленный в марте 2025 года американской фирмой HyperLight [16]. Эта модель, оснащённая стандартными оптоволоконными и микроволновыми разъёмами, имеет полосу 110 ГГц при низких значениях V_{π} , всего 1,4 В (рис. 5).

Это первое в отрасли коммерческое устройство значительно расширяет возможности электрооптической модуляции для критически важных приложений, включая тестирование со скоростью 400 Гбит/с на линию, калибровку фотодиодов с частотой более 100 ГГц, высокочастотные системы передачи радиосигнала по оптоволокну и ряд других передовых технологий.

Сочетая сверхнизкое V_{π} с минимальными вносимыми потерями и широким диапазоном длин волн в оптических диапазонах O, C и L, устройство легко интегрируется с генераторами сигналов произвольной формы со скоростью передачи данных более 200 Гбод. Его производительность существенно упрощает высокоскоростные испытательные установки, снижая или полностью устраняя необходимость во внешнем усилителе ВЧ-сигнала.

Расширяя свой ассортимент продукции, HyperLight одновременно представила первый в отрасли IQ-модулятор с частотой 110 ГГц, предназначенный для когерентного тестирования на скоростях выше 240 Гбод, а также усовершенствованный однополосный модулятор с частотой 110 ГГц и выше, охватывающий диапазоны C, L и O. Эти новые модели дополняют обширное семей-

ство TFLN-модуляторов HyperLight, включающее модуляторы интенсивности с частотой 65 ГГц, субвольтовые V_{π} -модуляторы, фазовые модуляторы с частотой 110 ГГц и модуляторы со сверхнизким V_{π} с частотой 40 ГГц, предлагая комплексные решения, адаптированные к различным отраслевым требованиям [17].

Новинку высоко оценили потенциальные покупатели, такие, например, как мировой лидер в производстве сверхбыстрых оптических приборов и оборудования – компания Thorlabs [18].

Необходимо отметить, что все приведённые выше краткие описания реальных конструкций ЭОМ являются амплитудно-фазовыми модуляторами. Поэтому они могут быть использованы только в простых устройствах стандарта ОКК, где с помощью лазера и модулятора передаётся оптическая символическая информация на уровне «сильный свет» или «слабый свет», аналогично «ноль/единица» в простых устройствах цифровой электроники. Проблема заключается в том, что в одном символе передаётся слишком мало информации. Кроме того, в таких устройствах очень слабая помехоустойчивость на больших скоростях.

В когерентных устройствах нового поколения оптических систем передачи данных для кодировки информации задействованы амплитуда, фаза и поляризация световой волны. Иными словами, оптический сигнал анализируется как «полный комплексный вектор», а не как «сильный/слабый свет». При этом для повышения эффективности передачи данных используется синфазно-квадратурная (IQ) модуляция. Оптический сигнал разделяется на две ортогональные компоненты: I (синфазную) и Q (квадратурную,

сдвинутую на 90°). Это позволяет кодировать несколько бит в одном символе: QPSK – 2 бита, 16-QAM – 4 бита, 64-QAM – 6 бит и т.д.

Применительно к оптике схема передачи данных реализуется следующим образом. На передающей стороне находится IQ-модулятор (рис. 4). Одна ветвь модулятора управляет компонентой I, а другая ветвь – компонентой Q. Фазовращатель устанавливает разность фаз в 90°.

На приёмной стороне с помощью «эталонного лазера» выделяют I и Q составляющие, а затем информация обрабатывается с помощью цифрового DSP (как в SDR-радио).

Для работы в современных когерентных системах передачи данных были разработаны специальные типы IQ-модуляторов. В качестве примера на рис. 6 показана схема синфазно-квадратурного модулятора Маха – Цендера (IQ FMLN MZM), базовая часть которой стала общепринятой для данного типа [19].

Главное отличие от классического однобитового варианта заключается в том, что вместо одного модулятора Маха – Цендера здесь используются два вложенных MZM, объединённых по схеме «I+Q». Каждый MZM управляет своим компонентом оптической волны: синфазная составляющая (I-ветвь); квадратурная (Q-ветвь), сдвинутая на 90°.

В схеме на рис. 6 входные оптические делители (MMI) разделяют свет на два потока, поступающие затем на два модулятора TFLN MZM, которые управляют компонентами I и Q. Управление фазой реализуется через электрооптический эффект (ЕС) в LiNbO_3 по описанной выше схеме для однобитового модулятора.

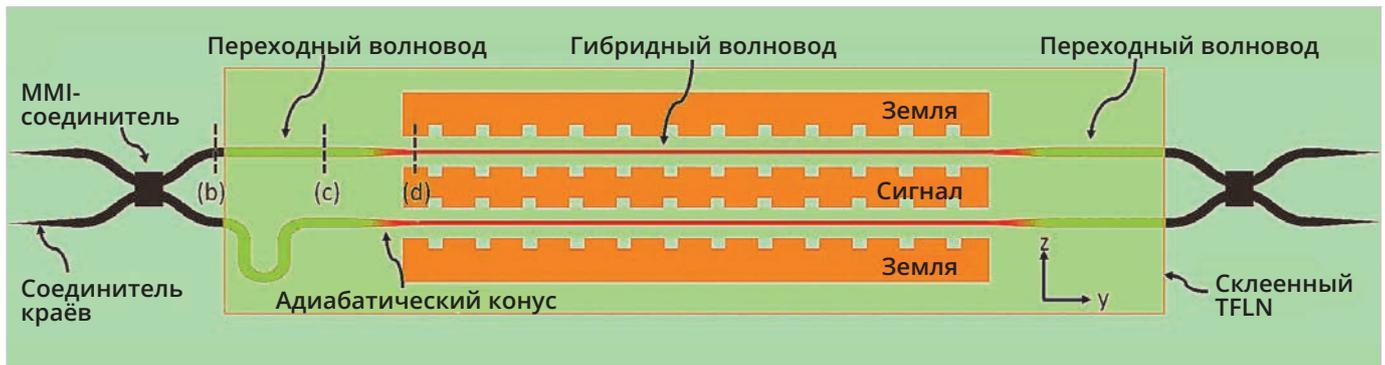


Рис. 7. Структурная схема гибридного кремний-ниобат лития модулятора Маха – Цендера (вид сверху):

- многомодовый интерференционный ответвитель (ММИ);
- волокно-чиповый ответвитель (Edge Coupler);
- переходный волновод (Transition Waveguide);
- адиабатический конусный переходный волновод (Adiabatic Taper);
- гибридный фазосдвигающий элемент (Hybrid Waveguide);
- металлические контакты (Ground, Signal)

Термооптические фазовращатели DC1 и DC2 устанавливают рабочие точки обоих МЗМ. Третий фазовращатель DC3 задаёт разность фаз $\pi/2$ между ветвями I и Q, реализуя квадратурную модуляцию.

Выходной ММИ-сумматор складывает ветви и формирует модулированный по фазе, амплитуде и поляризации окончательный сигнал.

Ценность этой работы заключается в том, что авторы предложили реальный рабочий вариант IQ-модулятора с очень хорошими характеристиками: $V_{\pi L} \approx 2,3$ В·см; широкая полоса передачи радиосигналов > 67 ГГц; низкие оптические потери $\sim 1,5\text{--}1,8$ дБ на чипе.

Практические эксперименты по передаче данных с использованием многобитной модуляции продемонстрировали возможность работы по этой схеме с символическими скоростями 110 Гбит (QPSK) и 80 Гбит (16-QAM). Эти цифры, означающие количество изменений одного или нескольких информационных параметров несущего сигнала в секунду, соответствуют эквивалентной скорости передачи данных 220 Гбит/с и 320 Гбит. Это происходит потому, что QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), например, кодирует 2 бита информации на каждый символ, удваивая эффективную скорость передачи данных.

Кроме того, DSP в приёмнике может компенсировать хроматическую дисперсию, поляризационные искажения и фазовый шум.

В целом эта работа показала, что интегральный TFLN способен заменить дискретные «классические» LN-модуляторы в когерентных IQ-системах, обеспечивая

при этом рекордные показатели. Предложенная структурная схема стала своего рода стандартом IQ-модуляторов.

Технологии TFLN имеют свои недостатки, сдерживающие дальнейшее развитие ЭОМ. Прежде всего, это технологические сложности изготовления. При попытках массового изготовления выяснилось, что возникают проблемы, связанные с недостаточной механической надёжностью, большими оптическими потерями, а также трудностями прямого травления. Кроме того, используемый процесс «объёмного склеивания» достаточно дорог и сложно масштабируем.

Все эти недостатки вынуждают искать новые технологические и конструкторские решения, такие как отказ от «прямого травления», вызывающего сильный наклон боковых стенок, или методы формирования воздушных траншей в кремниевой подложке под активной областью модулятора.

Необходимо также подчеркнуть, что отмеченные публикации не оспаривают рассмотренные выше базовые структурные схемы FMLN-модуляторов (рис. 3 и рис. 6). При этом внимание разработчиков сместилось с самих базовых схем на материалы и платформы, на которых она реализуется (тонкоплёночные на LN, кремнийорганические, плазмон-поляритонные). Эти новые разработки рассмотрены в следующих разделах.

3. Гибридные модуляторы Маха – Цендера на основе кремния и ниобата лития

В последние годы наблюдается значительный рост разработок так назы-

ваемых гибридных волноводных модуляторов Маха – Цендера (Hybrid Waveguide – HW MZM), в которых используются многокомпонентные конструкции фазовращателей, позволяющие значительно улучшить параметры MZM на тонких плёнках.

Гибридные модуляторы Маха – Цендера на основе кремния и тонких плёнок ниобата лития (Si TFLN MZM) используют конструкции, в которой слой LN интегрирован на кремниевой платформе.

Структурная схема одного из характерных гибридных кремний-ниобат лития модуляторов Маха – Цендера показана на рис. 6 [20].

Волокно-чиповый соединитель (Edge Coupler) предназначен для согласования стандартного оптического волокна с блоком сдвига фазы оптического сигнала. Адиабатический конус (Adiabatic Taper – AT) используется для плавного перевода оптической моды из одного волновода в другой, обеспечивая её сохранение на основном режиме и предотвращая возбуждение нежелательных мод более высокого порядка. В рассматриваемой схеме AT имеет плавное сужение кремниевого волновода от 650 нм до 275 нм на длине 300 мкм.

Принцип действия аналогичен описанному выше (рис. 3, 4) с той разницей, что фазовый сдвиг обеспечивается гибридным волноводом Si-LN.

Гибридный фазосдвигающий элемент представляет собой кремниевый волновод с тонкой плёнкой ниобата лития, размещённый на подложке SiO_2 .

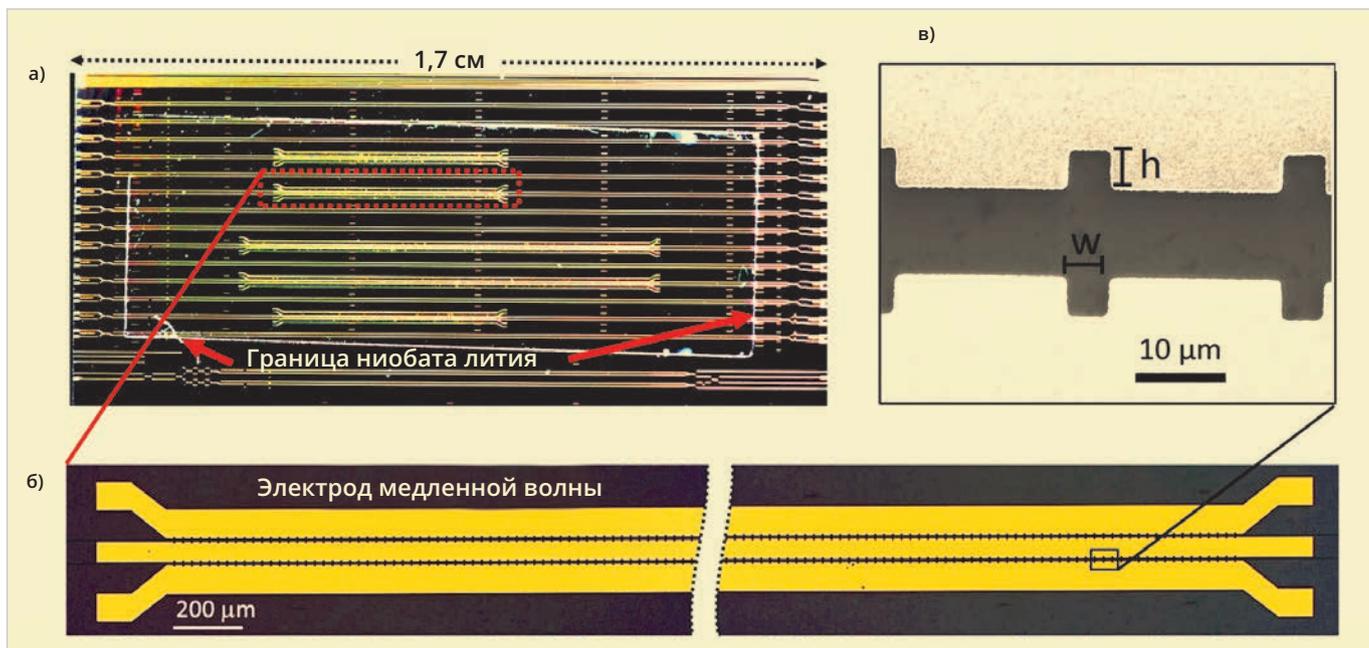


Рис. 8. Изображения элементов гибридного сращенного Si/LN MZM модулятора:

а) изображение, полученное с помощью оптического микроскопа, кристалла гибридного, сращенного Si/LN с золотым SWE;

б) шитое изображение, полученное с помощью оптического микроскопа, кристалла SWE длиной 5 мм;

в) изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, индуктивно нагруженных пазов

Принцип действия этого гибридного TFLN заключается в том, что разделённые с помощью MMI пучки света под действием внешнего поля проходят по разным волноводам разный путь.

Два электрода Ground и Signal (рис. 7) создают поперечное электрическое поле в плёнке ниобата лития.

По нижнему опорному плечу свет идёт постоянно по кремниевому волноводу. В верхнем фазосмещающем волноводe свет сначала проходит кремниевый участок, а потом переходит на участок ниобата лития.

Когда подаётся напряжение на электроды, за счёт внешнего возникающего поля изменяется показатель преломления LN. При этом, по приблизительным оценкам, около 84% световой моды в гибридном волноводe уже находится в зоне ниобата лития. Поскольку показатель преломления LN крайне чувствителен к внешнему полю, изменяется скорость распространения света в этой гибридной части волновода.

Наглядно этот процесс можно представить так, что в этой области свет идёт «немного медленнее» по сравнению с нижним опорным плечом кремниевого волновода, показатель преломления которого малочувствителен к воздействию внешнего поля. Этот эффект эквивалентен удлинению оптического

пути, приводящему к сдвигу фазы оптического сигнала. В результате фаза в верхнем волноводe меняется, поскольку электрическое поле изменяет оптические свойства LN, через которые проходит световая мода в верхнем плече на гибридном участке волновода.

Важно обратить внимание на то, что этот процесс может быть успешно описан с помощью теоретической модели зависимости коэффициента преломления света от внешнего электромагнитного поля, предложенной Игорем Таммом в 1924 году.

Имеет смысл отметить основные моменты технологического процесса производства этого гибридного TFLN MZM. При производстве Si/LN MZM был использован метод прямого гидрофильного склеивания. Детали Si-волновода были получены методом глубокой УФ-литографии с последующим реактивным ионным травлением. При этом SiO₂ был нанесен поверх деталей Si-волновода, а затем поверхность была выровнена с помощью процесса CMP. Далее были последовательно реализованы следующие процессы: плазменная активация поверхностей; отжиг при 300°C под давлением; удаление Si-подложки LNOI селективным травлением XeF₂; формирование электродов. Более подробно эти моменты описаны в оригинальной статье. На рис. 8 приведены

изображения элементов этого гибридного Si/LN MZM модулятора, полученного методом прямого гидрофильного склеивания [22].

Особое внимание следует обратить на форму полосковых проводников Ground/Signal, выполненных в форме «гребёнки». Основная цель такой конструкции заключается в согласовании скоростей прохождения света в гибридном волноводe и модулирующего СВЧ-сигнала [20].

Свет в гибридном волноводe (Si FTLN) идёт со скоростью примерно 0,6–0,7 скорости света в вакууме (эффективный показатель преломления n в диапазоне 2,1–2,4). При этом радиочастотный сигнал по металлической линии обычно идёт быстрее ($n < 2,0$ и меньше). Если эти скорости не совпадают, то электрический и оптический сигналы «расходятся» по фазе, и эффективность модуляции падает.

Поэтому электрический сигнал замедляют с помощью добавления в RF-линию «искусственной индуктивности», которая представляет собой периодические прорезы (Slotted Electrodes). Такая структура получила название «Inductively Loaded Transmission Line».

Данная конструкция позволила получить рекордные на тот момент времени: скорость около 110 ГГц при полосе пропускания 3 дБ на длине вол-

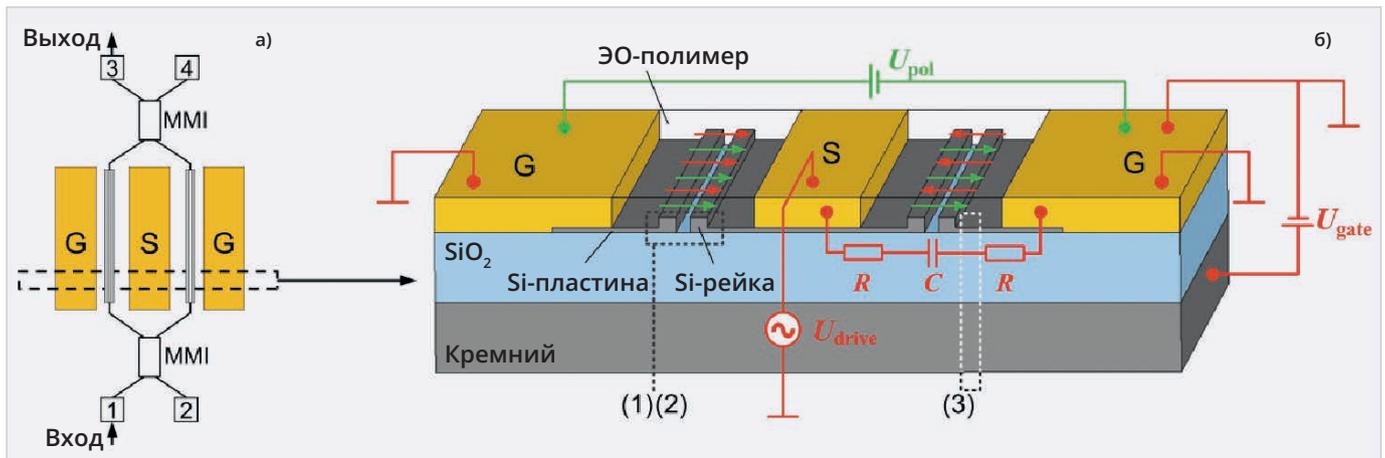


Рис. 9. Структурная схема гибридного кремнийорганического модулятора Маха – Цендера [26]:

9а) общий вид сверху на модулятор SOH – MZM:

- две фазосдвигающие секции (серый цвет);
- копланарные контакты: G – заземление и S – сигнал (жёлтый цвет);
- многомодовые интерференционные волноводы MMI in, MMI_out;

9б) поперечное сечение гибридной фазосдвигающей секции (SOH):

- копланарные контакты: G – заземление и S – сигнал (жёлтый цвет);
- Si_{rail} кремниевые дорожки шириной 240 нм, по которым идёт световой поток (серый цвет);
- Si_{slot} узкие промежутки между Si_{rail} шириной 160 нм, в которые заливается органический электрооптический материал (серый цвет)

ны 1550 нм; обработку оптической мощности до 110 мВт; потери на чипе 1,8 дБ; производство $V\pi \cdot L = 3,1$ В·см.

Такая высокая мощность обработки и широкая полоса пропускания были получены за счёт локализации большей части оптического поля в LN, а не в кремнии.

Годом позже эта же группа авторов опубликовала описание новых гибридных модуляторов TFLN MZM, которые были разработаны с металлическими копланарными волноводными электродами, заглублёнными в кремний на изоляторе (SOI). Эти ЭОМ с длиной волны 1310 нм показали схожие характеристики с модуляторами, в которых золотые электроды нанесены поверх слоя TFLN. Оба устройства достигают электрооптической полосы пропускания по уровню 3 дБ более 110 ГГц и коэффициента оптического затухания, управляемого напряжением, более 28 дБ. Измеренные полуволновые произведения напряжения на длину волны ($V\pi \cdot L$) для вариантов с заглублённым металлическим электродом длиной 0,5 и 0,4 см и верхним золотым электродом составили соответственно 2,8 и 2,5 В·см [21].

Аналогичную проблему согласования скоростей света в волноводе со скоростью распространения модулирующего сигнала другая группа китайских разработчиков решила с помощью использования комбинированной конструкции электродов, кото-

рая получила название T&U Traveling Wave Electrodes – TU-TWE.

Гибридный нагруженный электрод бегущей волны TU-TWE сочетает в себе преимущества электродов Т-типа и U-типа и позволяет расширить полосу, а также снизить управляющее напряжение.

Для создания высокоскоростных электрооптических модуляторов на основе тонкоплёночного ниобата лития (TFLN) на кремниевых подложках в данной работе предлагается гибридная нагруженная структура электрода бегущей волны типа TU (TU-TWE). Суть TU-TWE заключается во введении механизма компенсации индуктивности, который позволяет эффективно снизить показатель преломления микроволнового излучения и ослабить эффект «медленного света», тем самым согласуя групповую скорость света со скоростью микроволнового излучения. Эта конструкция позволила получить полосу пропускания более 110 ГГц и полуволновое напряжение 1,35 В [22].

Значимым событием этого года стала конференция OFC 2025 (Optical Fiber Communications Conference and Exhibition), проходившая с 30 марта по 3 апреля 2025 года [23]. Это основная мировая площадка для обмена достижениями в области оптических технологий связи, объединяющая исследователей, инженеров и промышленников.

В конференции OFC 2025 приняли участие:

- технологические гиганты: Nokia Bell Labs, Google, Microsoft, Meta (Facebook), NVIDIA, Amazon Web Services, Huawei Technologies, Cisco Systems;
- телекоммуникационные операторы: Verizon, AT&T, Deutsche Telekom, NTT, KDDI Research;
- академические центры: MIT, Stanford, Columbia University, University of California, Chalmers University, Technical University of Munich.

В рамках OFC 2025 была проведена среди прочих секция «Оптическая обработка и микроволновая фотоника», на которой были заслушаны доклады по новым разработкам гибридных модуляторов.

Например, в докладе [24] был продемонстрирован гибридный электрооптический модулятор Маха – Цендера на основе SiN/TFLN с полосой пропускания 3 дБ на частотах свыше 110 ГГц и 67 ГГц. Эта модель предназначена для работы в диапазонах С и О. Особое внимание было уделено процессу изготовления с использованием технологии ионного сращивания на уровне пластины. Важно то, что при этом ниобат лития не подвергался травлению.

Подробно все представленные доклады будут опубликованы в трудах конференции.

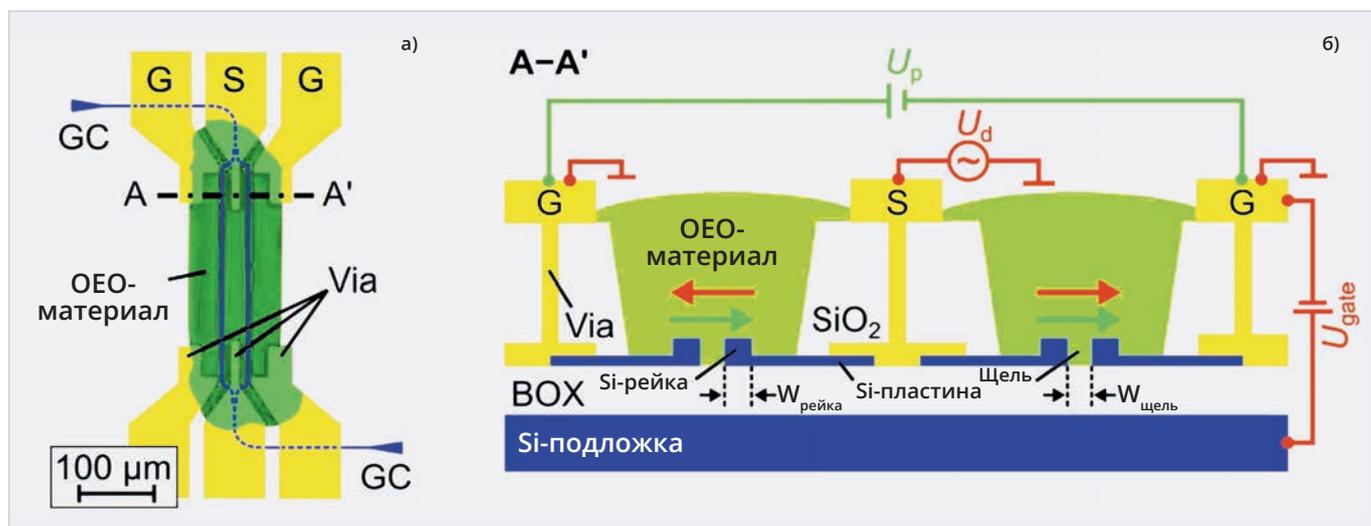


Рис. 10. Поперечное сечение гибридного фазосдвигающего волновода (SOHFS) микросхемы модулятора с укороченным элементом [27]

Заканчивая этот раздел, нужно подчеркнуть, что характерной чертой новых разработок является то, что полоса около 100 ГГц стала привычным, никого не удивляющим параметром.

Другой важный момент, на который стоит обратить внимание, это создание TFLN-модуляторов на стандартных 8-дюймовых кремниевых подложках. Такие устройства сохраняют высокую эффективность ($V_{\pi}L$ около 3 В·см), имеют низкие потери (< 1 дБ на чипе) и обеспечивают полосу > 70 ГГц без заметного спада АЧХ. Подобные параметры открывают путь к масштабируемому промышленному производству TFLN-модуляторов с использованием CMOS-совместимых технологий.

Гибридные Si-TFLN модуляторы демонстрируют успешное объединение преимуществ кремниевой фотоники и электрооптических свойств ниобата лития. Достигнутые параметры (полоса > 100 ГГц, $V_{\pi}L \sim 3$ В·см) подтверждают перспективность данного направления для высокоскоростных оптических систем связи.

По данным [25] мировой рынок модуляторов на основе тонкопленочного ниобата лития оценивался в \$356 млн в 2024 году, и прогнозируется, что он достигнет \$3829 млрд к 2031 году с совокупным годовым темпом роста 41%.

4. Кремнийорганические гибридные модуляторы Маха – Цендера

Кремнийорганические гибридные ММЦ (Silicon-Organic Hybrid Mach-

Zehnder Modulators) объединяют хорошо разработанную технологию кремниевых фотонных микроэлектронных компонентов с эффективной модуляцией света новыми органическими материалами.

Теоретические работы Игоря Тамма по электрооптическим эффектам в некоторых типах кристаллов с помощью внешнего поля, опубликованные в начале 1900-х, оказались применимы к ряду органических соединений, открытых в начале 2000-х.

В качестве примера SOH можно привести гибридный кремнийорганический модулятор ММЦ, разработанный группой немецких учёных под руководством Кристиана Кооса (Технологический институт Карлсруэ). Структурная схема этого SOH MZM показана на рис. 9 [26].

В конструкции данного модулятора использованы кремниевые волноводы и органический электрооптический фазовращатель с очень сильным откликом на электрическое поле. Гибридная конструкция «кремнийорганика» (SOH) сочетает простоту технологии CMOS с высокой оптической чувствительностью органического наполнителя.

Для объяснения принципа действия этого типа гибридных модуляторов можно использовать четыре рисунка. На рис. 9а показан вид сверху, а на рис. 9б вид сбоку на конструкцию модулятора [26]. Рис. 10 взят из более поздней работы этих же авторов, где они описали модернизированный вариант микросхемы гибридного SOH-модулятора [27]. На рис. 10а показан вид сверху на гибридный

SOH-модулятор, полученный с помощью электронного микроскопа. На рис. 10б приведено сечение изображения гибридного SOH-модулятора, показывающее послойную структуру модернизированного варианта микросхемы гибридного SOH-модулятора.

В статье [26] 2018 года был описан SOH-модулятор Маха – Цендера (MZM) длиной 1,1 мм с π -напряжением 0,9 В, способный генерировать передачу сигналов ООК со скоростью до 100 Гбит/с. В этом варианте использована общая стандартная схема ЭОМ на базе интерферометра MZM (рис. 9а, рис. 10а), которая содержит два фазовращателя (SOH Phase Shifter – SOHPS), копланарную линию передачи «земля–сигнал–земля» (G–S–G) и два многомодовых (2×2 MMI) коммутатора.

Свет, попадающий во входной волновод 2×2 MMI_in, разделяется с формированием двух лучей, которые поступают на плечи интерферометра MZM. Фазосдвигающий волновод содержит органический материал с сильными электрооптическими свойствами (Organic Electro-Optical Materials – OEOM), который под действием внешнего электрического поля меняет свой коэффициент преломления. При этом изменяется фаза оптического сигнала в этом плече. Модулирующее напряжение подаётся с помощью электродов G–S–G. Разные по фазе сигналы двух плеч суммируются на выходном MMI_out. Если фазы совпадают, то интенсивность светового пучка усиливается. В случае противофазы интенсивность гасится. Таким обра-

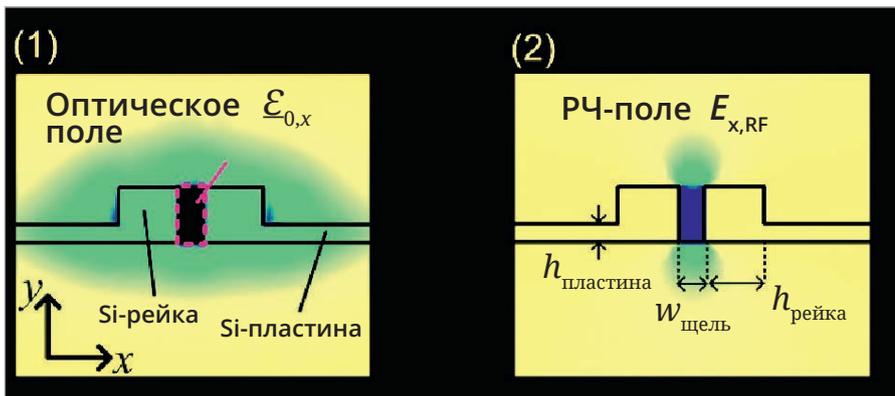


Рис. 11. Схема взаимодействия электромагнитных полей модулирующего сигнала и «полезного» оптического сигнала в гибридном SOH волноводе типа «рельсы плюс щели»:

- $\varepsilon_{0,x}$ – продольная составляющая электромагнитного поля светового сигнала;
- $E_{x,RF}$ – продольная составляющая внешнего модулирующего поля;
- A_{slot} – «рабочее пространство» щели SOHFS

зом, реализуется простейший двоичный способ передачи данных On-Off Keying – ООК.

Ключевыми особенностями данной конструкции является так называемый щелевой волновод (Slot Waveguide) и органические электрооптические материалы (ОЕОМ).

Органические электрооптические материалы – это специальные органические соединения, содержащие молекулы-хромофоры с сильно выраженной асимметрией электронной плотности. В нормальном состоянии эти молекулы ориентированы хаотично. Под действием электрического поля электронная структура этих молекул деформируется, что приводит к изменению коэффициента преломления материала (линейный электрооптический эффект Поккельса). При нагреве до «температуры стеклования» материал становится подвижным, и молекулы могут свободно вращаться.

Приложение сильного электрического поля вызывает ориентацию хромофоров в одном направлении. При охлаждении под напряжением молекулы «замораживаются» в выровненном состоянии. Важно, что при снятии напряжения ориентация сохраняется. Этот процесс получил название «поляризация ОЕОМ». После поляризации материал приобретает макроскопическую анизотропию и электрооптическую активность, то есть свойства, которые делают его аналогичным анизотропным кристаллам, описанным Игорем Таммом в начале 1920-х годов. Эффект EP в органических материалах

описывается теми же фундаментальными соотношениями, что и в кристаллах.

Другой отличительной чертой SOH MZM, как уже было отмечено, является щелевой волновод (Slot Waveguide), структура которого показана на рис. 11б [26]. На рис. 10а, взятом из более поздней работы этих авторов [27], показано сечение модернизированного SOH, в котором использован практически тот же самый принцип действия, что и на рис. 9.

Чёрная штрихпунктирная линия А–А' на рис. 10а обозначает плоскость поперечного сечения, которому соответствует рис. 10б.

Принцип работы в обоих случаях одинаковый. Поэтому для понимания того, как работает SOH MZM, можно рассматривать обе схемы (рис. 9б и рис. 10б).

Фазовращатель (SOHPS) изготовлен на подложке из кремниевого изолятора толщиной 2 мкм. Основными рабочими элементами этого гибридного волновода являются кремниевые рельсовидные рейки (Rails) и щелевые промежутки между этими «рейками» (Slots). В каждом плече имеются две кремниевые рельсовидные рейки шириной $W_{rail} \approx 240$ нм, которые образуют оптический щелевой волновод шириной $W_{slot} \approx 160$ нм. В первом приближении «rails» можно представить себе как «стенки коридора», по которым идёт световой поток.

Щели шириной 160 нм играют роль «чувствительной зоны», где электрическое внешнее поле взаимодействует с электромагнитным полем светового луча. Щель заполняется специальным

органическим электрооптическим материалом ОЕОМ, имеющим очень сильную зависимость коэффициента преломления от внешнего поля. В данной работе использовался органический субстрат SE0100, разработанный компанией ChemOptics [28].

Щель соединена с алюминиевыми (Al) линиями передачи тонкими n -легированными кремниевыми пластинами и алюминиевыми переходными отверстиями. Для компенсации недостаточной концентрации легирования в кремниевых пластинах применяется напряжение затвора U_{gate} , которое индуцирует слой накопления электронов в кремниевых пластинах.

Как видно (рис. 9б и рис. 10б), электронная полоса пропускания SOH MZM ограничена собственной характеристикой RC-фильтра нижних частот, обусловленной ограниченной проводимостью n -легированных кремниевых пластин и ёмкостью щели. Ширина полосы модулятора увеличивается за счёт уменьшения сопротивления (R) пластин, вызванного слоем накопления заряда, который может быть создан «напряжением затвора» U_{gate} между объёмным кремнием и заземляющими электродами.

В процессе упорядочивания ориентации молекул напряжение поляризации U_{pol} приложенное к (плавающим) заземляющим электродам при повышенной температуре, близкой к температуре стеклования материала, выравнивает хромофоры ОЕОМ в щели (зелёные стрелки на рис. 9б и рис. 10б).

При охлаждении хромофоры ОЕОМ фиксируются в выровненной ориентации, и напряжение поляризации снимается. Теперь при приложении модулирующего напряжения все хромофоры реагируют согласованно, вызывая заметное изменение коэффициента преломления.

Модулирующее напряжение U_d индуцирует электрические поля в щелях (красные стрелки на рис. 9б и рис. 10б), параллельные направлению поляризации в одном плече и антипараллельные в другом плече, что обеспечивает эффективную работу MZM в режиме «Push-Pull Mode».

Как видно из левой части рис. 11, на начальном пути луча в волноводе в пространстве щели A_{slot} доминирует продольная составляющая электромагнитного поля светового сигнала

Таблица 2. Сравнение основных характеристик SOH MZM (2024–2025)

Платформа	Полоса, ГГц	Упл, В·мм	Потери, дБ	Скорость передачи	Особенности	URL
KIT-SOH 0-диапазон (Schwarzenberger et al.)	> 110	< 0,5 (Упл = 0,92 В)	~0,7 (фазо-смещение)	384 Гбит/с, 192 Гбод PAM4	Рекордная скорость для кремниевой платформы	[30]
KIT-SOH низковольтный (Schwarzenberger et al.)	н.д.	< 0,46 (265 мВ управление)	н.д.	112 Гбит/с PAM4	Прямое управление CMOS SerDes, без усилителей	[31]
KIT-SOH термостабильный (Eschenbaum et al.)	н.д.	< 0,5 (750 мкм длина)	н.д.	280 Гбит/с 140 GBd PAM4	Термостабильный органический материал Gen5A/APC	[32]
KIT-SOH криогенный (Schwarzenberger et al.)	н.д.	< 0,46 (Упл = 0,92 В)	н.д.	140 Гбит/с 70 GBd PAM4 при 4К	Работа при криогенных температурах	[33]
NLM Photonics Selerion-HTX	> 100	~0,5 (коммерческий)	< 1,0	1,6 Тбит/с DR8 PIC (photonic integrated circuits)	Первый коммерческий SOH многоканальный PIC, стабильность > 120°C	[34]
NLM Photonics Selerion-BHX	> 100	0,038	< 0,5	> 400 Гбит/с на канал	Рекордный $r_{33} = 1000$ пм/В для применений > 100 ГГц, космос/спутники	[35]
KIT-SOH сверхскоростной	> 110	~0,4	~0,7	500+ Гбит/с Single-carrier IMDD	Демонстрация возможности 1 Тбит/с передач	См. выше

($\epsilon_{o,x}$). Правая часть рис. 11 демонстрирует, как по мере продвижения луча по волноводу продольная составляющая внешнего поля $E_{x,rf}$ начинает эффективно взаимодействовать с полем оптического сигнала $\epsilon_{o,x}$, реализуя необходимую модуляцию.

В этой работе впервые для кремниевых модулей была показана скорость передачи 100 Гбит/с в стандарте ООК даже при полосе модулятора 25 ГГц. Это стало возможным благодаря «сжатую амплитуды», когда большие колебания сглаживаются.

Управляющее напряжение для этого модулятора составляло 1,4 В. Для сравнения отметим, что традиционные кремниевые модуляторы требуют 5 В и больше. Уникальное энергопотребление около 98 фемтоджоулей на бит впервые было получено для MZM такого класса.

Рассмотренная конструкция, предложенная в 2018 году, оказалась очень удачной, поскольку использовала стандартные кремниевые технологии, позволяя при этом получать рекордные параметры за счёт уникальных электрооптических параметров органических ОЕОМ, которые в десятки раз больше, чем у кристаллических материалов.

Как уже упоминалось выше, в 2020 году эта же группа немецких учёных под руководством Кристиана Кооса опубликовала результаты испытаний своего нового варианта микросхемы SOH-модулятора. Конструкция этой микросхемы показана на рис. 10 [27].

Общая концепция структурной схемы модулятора осталось такой же, как показано на рис. 8. Изменения в основном коснулись размеров и конфигурации некоторых элементов. Например, в новом варианте SOHFS MZM был использован сверхминиатюрный фазосдвигающий элемент длиной всего 280 мкм. В каждом плече имеются две кремниевые рельсовидные рейки шириной $W_{rail} \approx 240$ нм и высотой $H_{rail} \approx 220$ нм, которые образуют оптический щелевой волновод (ширина щели $W_{slot} \approx 130$ нм), заполненный ОЕОМ-материалом.

В этой работе использован другой тип органического электрооптического полимера «JRD», оптимизированный для высокой эффективности при относительно низкой температуре стеклования (82°C) [29].

Материал ОЕОМ, показанный на рис. 10 зелёным цветом, служит оболочкой для щелевого волновода SOH.

Одним из основных достижений этой разработки стало рекордное значение $Upl \approx 0,41$ В·мм и крайне низкие потери фазовращателя (около 0,7 дБ). Эти улучшения были достигнуты за счёт уменьшения ширины W_{slot} щелевого волновода, снижения оптических потерь, более равномерного распределения поля в органическом материале, а также применения новых технологических приёмов формирования электродов.

В результате авторам удалось достигнуть рекордных на тот момент времени характеристик: длина фазовращателя 280 мкм; $Upl \approx 1,5$ В; $Upl \approx 0,41$ В·мм;

оптические потери $\approx 0,7$ дБ; нетто-пропускная способность ≈ 187 Гбит/с. Эти параметры позволили перейти от простого ООК-модулирования (On-Off Keying) с одним битом на символ к многоуровневому формату передачи PAM4.

Четырёхуровневый формат PAM4 (4-level Pulse Amplitude Modulation), предназначенный для амплитудной модуляции с четырьмя уровнями оптической мощности, обеспечивает 2 бита на символ (00, 01, 10, 11). Однако для этого формата необходим «чёткий» многоуровневый управляющий сигнал. Каждый дополнительный уровень мощности должен быть однозначно идентифицирован. Поэтому PAM4 требует более высокого отношения сигнал/шум. Полученные в данной работе низкие потери и высокая эффективность обеспечили необходимую глубину модуляции.

В эксперименте использовался произвольный генератор сигналов (AWG) с полосой 45 ГГц и RF-усилитель с полосой 55 ГГц для создания многоуровневого управляющего сигнала. Именно качество управляющей электроники и низкие потери модулятора позволили реализовать 4 чётко различимых уровня оптической мощности. Была продемонстрирована успешная передача сигналов 100 Гбод PAM4 (линейная скорость до 200 Гбит/с).

Таким образом, переход от ООК к PAM4 стал возможен благодаря улучшенным характеристикам самого модулятора, а не изменению его принципа работы.

Авторскому коллективу из Технологического института Карлсруэ удалось получить уникальные параметры для кремниевой платформы. Крайне важно то, что модулятор был изготовлен на обычной линии кремниевой фотоники. Таким образом было показано, что предложенная конструкция вполне пригодна для массового производства на стандартном CMOS-оборудовании.

Эта работа открыла путь к интеграции высокоэффективных когерентных модуляторов на основе органических материалов с кремниевой фотоникой.

В табл. 2 показаны характеристики модуляторов этого класса, описанные в публикациях за период 2024–2025 гг.

Подробный разбор этих работ выходит за рамки данной статьи. Отметим лишь основные тенденции, наметившиеся в разработках последних лет:

- новые разработки органических электрооптических материалов, связанные с гибридными полимерными и сшиваемыми системами, позволяют эффективно решать проблемы термостабильности и долговечности OEOM;
- старт промышленного производства PIC (Photonic Integrated Circuits) SOH MZH, NLM Photonics;
- достигнуты беспрецедентные скорости 400 Гбит/с на канал;
- сверхнизкие напряжения управления (< 1 В) обеспечивают совместимость с технологиями CMOS.

Органические электрооптические материалы (ЭОМ) обладают высоким электрооптическим коэффициентом (~ 1000 пм/В), что позволяет использовать их при массовом производстве в масштабе кристалла.

Однако практическое применение ЭОМ сталкивается с техническими узкими местами. Получение органического электрооптического хромофора с большим электрооптическим коэффициентом, термической устойчивостью и долговременной стабильностью сдерживало до настоящего времени рост коммерческого производства.

Развитие в последние годы методов молекулярной инженерии позволило найти приемлемые решения описанных проблем. Так, например, в работе [36] рассмотрены возможности интеграции полимерных систем с кремниевой фотоникой при организации массового производства.

Высокоэффективные ЭОМ-материалы с улучшенной долговременной стабильностью и высокими электрооптическими коэффициентами обсуждаются в статье [37].

Третье направление, по которому развивается направление ЭОМ, получило название «технология сшивания» (Cross-Linking). В контексте органических электрооптических материалов – это создание химических связей между отдельными молекулами полимера, в процессе которого они объединяются (сшиваются) в единую трёхмерную сетку.

После «сшивания» ЭОМ становится единой жёсткой структурой, которая не может деформироваться тем или иным способом. В приложении к SOH «сшивание» обеспечивает термостабильность, когда «сшитый» материал не размягчается при нагреве. Кроме того, молекулы не могут перемещаться и менять ориентацию со временем. Поэтому электрооптические характеристики могут оставаться стабильными в течение многих лет.

Результаты экспериментов с методиками сшивания органических электрооптических материалов сверхвысокой производительности, предназначенных для гибридных модуляторов, приведены в работе [38].

Было показано, что технология сшивания позволяет значительно улучшить термическую и фотохимическую стабильности материалов, что критично для практических применений.

Крайне важным событием 2025 года стала презентация компанией NLM Photonics первого в мире коммерческого гибридного кремнийорганического модулятора с пропускной способностью 1,6 Тбит/с, выполненного на многоканальной фотонной интегральной схеме (PIC) [35].

Основу технологии составляет патентованный OEOM-материал Selerion-NTX, защищённый патентом США [39].

Этот сшиваемый термореактивный органический материал сохраняет все свои свойства вплоть до температуры 120°C . Уникально высокий коэффициент качества открывает широкие перспективы для использования Selerion-NTX в различных коммерческих приложениях: от передачи данных в ЦОД до современных квантовых технологий.

Параллельно был разработан материал следующего поколения Selerion-VNH с рекордным электрооптическим коэффициентом $r_{33} = 1000$ пм/В, специально предназначенный для приложений с ограничениями по площади, требующих полос пропускания свыше 100 ГГц.

Детальные эксперименты показали рекордную эффективность модуляции $V_{\pi L} = 0,038$ В·мм на длине волны 1550 нм в слотовом волноводе, что обеспечивает меньшие размеры устройств и повышенную энергоэффективность на высоких частотах.

Архитектура нового модулятора 1,6T DR8 PIC, позволяющая разместить 8 каналов на одном кристалле, обеспечивает пропускную способность 200 Гбит/с на канал. При этом отмечаются пониженные требования к управляющему напряжению и «повышенные коэффициенты экстинкции» по сравнению с обычными кремниевыми модуляторами. Однако конкретные цифры не приводятся.

Конструктивно в этом модуляторе на одной кремниевой подложке размещён массив из 8 параллельных волноводных структур, каждая из которых образует отдельный модулятор Маха – Цендера с нанесённым органическим материалом Selerion-NTX. Общая структурная схема подобных SOH MZM рассмотрена выше (рис. 8 и рис. 10). Оптический сигнал разделяется на входе с помощью разветвителей (Splitters) на восемь каналов и объединяется на выходе через мультиплексоры. При этом каждый канал управляется независимо своими электродами [34].

Размер этой микросхемы PIC на 40% меньше стандартной кремниевой фотонной схемы аналогичной пропускной способности. При этом производительность модулятора более чем в 10 раз выше, а потребление энергии на 20–30% ниже по сравнению с существующими в настоящее время традиционными кремниевыми фотонными модуляторами. Следует отметить, что энергопотребление крайне критично для центров обработки данных, столкнувшихся с проблемой ограничения по энергопотреблению [40].

Хотя точные цифры для модулятора 1.6T DR8 не раскрываются в коммерческих материалах, исследовательская документация NLM показывает впечатляющие результаты. В лабораторных модуляторах на основе Selerion-

НТХ достигнуто напряжение всего $U_{\text{пл}} = 210$ мВ при длине устройства 1,5 мм, что даёт произведение напряжения на длину $U_{\text{пл}}L = 320$ В·мкм. Это один из лучших показателей среди диэлектрических волноводных модуляторов [41].

Первые образцы массового производства показали, что терморезистивная технология совместима с существующими кремниевыми технологическими линиями, позволяя интегрировать материалы семейства Selerion в действующие процессы с минимальными изменениями. Система включает полный технологический стек от кремния до нанесения материалов и инкапсуляции с возможностью серийного производства на уровне пластин.

Эти технические достижения ещё раз демонстрируют, как современные разработки электрооптики воплощают принципы, заложенные в работах Игоря Евгеньевича Тамма, и переводят их на качественно новый уровень коммерческого применения.

Заключение

В данной статье рассмотрены современные высокотехнологичные устройства электрооптики, в основе которых лежат фундаментальные теоретические работы Игоря Евгеньевича Тамма и Леонида Исааковича Мандельштама, выполненные в 1924 году. Спустя сто лет эти теоретические разработки находят воплощение в передовых электрооптических модуляторах различных типов.

Проведённый анализ показывает, что уравнения электродинамики Тамма-Мандельштама сохраняют свою актуальность и универсальность, применяясь к широкому спектру современных материалов и технологий:

- традиционные кристаллические модуляторы на основе ниобата лития остаются важным сегментом, но уступают место более совершенным решениям;
- тонкоплёночные модуляторы TFLN демонстрируют революционные улучшения по сравнению с объёмными кристаллами, достигая полос модуляции свыше 100 ГГц при снижении управляющих напряжений до единиц вольт;
- гибридные Si-TFLN модуляторы успешно объединяют преимущества кремниевой фотоники и элект-

трооптических свойств ниобата лития, обеспечивая масштабируемость производства;

- кремнийорганические SOH-модуляторы открывают принципиально новые возможности благодаря сверхвысоким электрооптическим коэффициентам органических материалов (до 1000 пм/В) и совместимости с CMOS-технологиями.

Особого внимания заслуживает коммерциализация технологий SOH, представленная компанией NLM Photonics с их материалами семейства Selerion. Это знаменует переход от лабораторных исследований к массовому промышленному производству устройств с рекордными характеристиками.

Достигнутые в 2024–2025 годах параметры впечатляют:

- полосы модуляции превышают 100–200 ГГц;
- скорости передачи данных достигают сотен гигабит и терабит в секунду;
- управляющие напряжения снижены до долей вольта;
- энергопотребление минимизировано для применения в центрах обработки данных.

Универсальность теоретических основ, заложенных Игорем Таммом, проявляется в том, что они одинаково успешно описывают электрооптические эффекты как в традиционных неорганических кристаллах, так и в современных органических полимерах с ориентированными хромофорами. Это подтверждает глубину и фундаментальность научного вклада выдающегося советского физика.

Прогнозируемый рост мирового рынка TFLN модуляторов с \$356 млн в 2024 году до \$3,829 млрд к 2031 году демонстрирует огромный коммерческий потенциал технологий, основанных на идеях Тамма.

В следующей части статьи планируется рассмотреть модуляторы и другие устройства, в которых используются «поверхностные состояния» и «плазмон-поляритоны» Тамма, что ещё раз подчеркнёт многогранность и актуальность научного наследия великого физика.

Литература

1. Тамм И., Мандельштам Л. Кристаллооптика теории относительности в связи с геометрией

биквадратичной формы // Журнал Русского физико-химического общества. 1924. Т. 56, вып. 2–3. URL: https://elib.bibliotom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1-1975/p33/.

2. Polarization // Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/polarized-light>.
3. Electro-optic Modulators // RP Photonics. URL: https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html.
4. Electro Optic Modulators // Meet Optics. URL: <https://www.meetoptics.com/academy/electro-optic-modulators>.
5. Фазовые пространственные электрооптические модуляторы российского производства // LenLasers. URL: <https://lenlasers.ru/novosti-i-stati/elektro-opticheskie-modulyatory-rossiyskogo-proizvodstva/>.
6. АО «ЛЛС» Лабораторная лазерная система. URL: <https://lenlasers.ru/company/>.
7. Компания «Т8». URL: <https://t8.ru/ru/>.
8. ТУСУР. URL: <https://tusur.ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-v-tusure-razrabotali-integralnyy-opticheskiy-modulyator-dlya-sfery-telekommunikatsiy>.
9. Skoltech makes a technological leap to 6G by developing a microwave integrated electro-optical modulator // Skoltech. URL: <https://www.skoltech.ru/archived-news/skoltech-makes-a-technological-leap-to-6g-by-developing-a-microwave-integrated-electro-optical-modulator>.
10. ПАО «Пермская НП приборостроительная компания». URL: <https://100best.ru/content/tovary-ipredpriyatiya?i1=195&i2=49303>.
11. Mach-Zehnder modulator (MZM) // Luceda Photonics Academy. URL: https://academy.lucedaphotonics.com/training/topical_training/mzm/mzm.
12. Emerging Modulator Technologies in Silicon Photonics // IEEE Nanotechnology Magazine. 2025. Vol. 19, Issue 3. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10955750>.
13. Yudan Zhang et al. High extinction-ratio thin-film lithium niobate modulator integrated with TE-pass waveguide polarizer // Optics Express. 2025. Vol. 33, Issue. 3. P. 6455–6465. URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-33-3-6455&id=567899>.

14. *Jingjie Zhou et al.* High-Performance Thin-Film Lithium Niobate Mach-Zehnder Modulator on 8-inch Silicon Substrates *IEEE Photonics Technology Letters*. 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10613783>.
15. *Holzgrafe J. et al.* Relaxation of the electro-optic response in thin-film lithium niobate modulators. *Optics Expre* 2024 Jan 29;32(3):3619-3631. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38297579/>.
16. HyperLight Launches 110GHz Intensity Modulator with Record low V_{π} Leveraging Its TFLN Chiplet™ Platform. CAMBRIDGE, Mass. BUSINESS WIRE, Mar 25, 2025. URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20250325461709/en/HyperLight-Launches-110GHz-Intensity-Modulator-with-Record-low-V-Leveraging-Its-TFLN-Chiplet-Platform>.
17. TFLN Chiplet™ RELIABLE PERFORMANCE AT SCALE URL: <https://hyperlightcorp.com/>.
18. Thorlabs pioneers photonics technologies to accelerate scientific research and product development. URL: <https://www.thorlabs.com/>.
19. *Mengyue Xu et al.* High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform. *Nature Communications* volume 11, Article number: 3911 (2020). URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17806-0>.
20. *Valdez, Forrest et al.* 110 GHz, 110 mW hybrid silicon-lithium niobate Mach-Zehnder modulator. *Sci Rep* 12, 18611 (2022). URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-23403-6>.
21. *Valdez, Forrest et al.* Buried-Electrode Hybrid Bonded Thin-Film Lithium Niobate Electro-Optic Mach-Zehnder Modulators. *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 35 Issue 11. 2023. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10105559>.
22. *Yingbo Liu.* High-speed electro-optic modulator with group velocity matching on silicon substrate. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 30 June 2025. *Sec. Nanobiotechnology* Volume 13 – 2025. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1626017>.
23. 2025 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/11046334/proceeding>.
24. *Zhuoyun Li et al.* Hybrid Silicon Nitride-Lithium Niobate Electro-Optical Modulator with Wide Optical Bandwidth and High RF Bandwidth Based on Ion-cut Wafer-level Bonding Technology. 2025 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11047104>.
25. Thin Film Lithium Niobate (TFLN) Modulator Market to Hit USD 3.8 Billion by 2031 – Driven by Optical Communication, Data Centers, and 5G | Valuates Reports. URL: <https://bit.ly/46MhIzz>.
26. *Koos Ch., Stefan W. et al.* Silicon-Organic Hybrid (SOH) Mach-Zehnder Modulators for 100 Gbit/s on-off Keying // *Nature Scientific reports*. 2018. 8:2598. URL: https://www.researchgate.net/publication/319524701_Silicon-Organic_Hybrid_SOH_Mach-Zehnder_Modulators_for_100_Gbits_on-off_Keying.
27. *Koos Ch. et al.* Silicon-organic hybrid (SOH) Mach-Zehnder modulators for 100 GBd PAM4 signaling with sub-1 dB phase-shifter loss // *Optics Express*. 2020. Vol. 28, No. 17. August 17. URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-17-24693&id=434266>.
28. Organic EO material SEO100. Huang, S. et al. Enhanced temporal stability of a highly efficient guest – host electro-optic polymer through a barrier layer assisted poling process // *J. Mater. Chem.* 2012. 22. P. 20353–20357. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/jm/c2jm33979j>.
29. *Jin W. et al.* Benzocyclobutene Barrier Layer For Suppressing Conductance in Nonlinear Optical Devices During Electric Field Poling // *Appl. Phys. Lett.* 2014. 104(24), 243304. URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/104/24/243304/385454/Benzocyclobutene-barrier-layer-for-suppressing?redirectedFrom=fulltext>.
30. OFC 2024, Th4B.6 // Optica. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ofc-2024-Th4B.6>.
31. OFC 2024, M3K.6 // Optica. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OFC-2024-M3K.6>.
32. ECOC 2022, Th3B.2 // Optica. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=eceoc-2022-Th3B.2>.
33. CLEO 2023, STh5C.7 // Optica. URL: https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=CLEO_SI-2023-Sth5C.7.
34. NLM Photonics to Demonstrate Industry-First Commercial Silicon-Organic Hybrid Modulator // NLM Photonics. March 2025. URL: <https://www.nlmphotonics.com/2025/03/31/ofc-50-demo-industry-first-commercial-silicon-organic-hybrid-modulator/>.
35. NLM Photonics Announces Organic Electro-Optic Material with Record-Breaking Performance // NLM Photonics. June 2025. URL: <https://www.nlmphotonics.com/2025/06/04/nlm-photonics-announces-organic-electro-optic-material-with-record-breaking-performance/>.
36. *Yan Wang et al.* Organic electro-optic polymer materials and organic-based hybrid electro-optic modulators // *Journal of Semiconductors*. 2022. Vol. 43, № 10. URL: <https://doi.org/10.1088/1674-4926/43/10/101301>.
37. *Shuhui Feng et al.* Organic Electro-Optic Materials with High Electro-Optic Coefficients and Strong Stability. *Molecules*, 2024, Vol. 29, № 13. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules29133188>.
38. *Huajun Xu et al.* Ultrahigh Performance Cross-Linkable Organic Electro-Optic Material for Hybrid Modulators. *Chemistry of Materials*, Vol 37, Issue 12, 2025. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.5c00027>.
39. US Patent № 12187827 «Crosslinkable Nonlinear-Optical Chromophore System», University of Washington, January 7, 2025. URL: <https://patents.google.com/patent/US12187827B2/en>.
40. NLM to Demonstrate Industry-First Commercial Silicon-Organic Hybrid Modulator on a Multi-Channel PIC // NLM Photonics Press Release, March 31, 2025. URL: <https://www.nlmphotonics.com/2025/03/31/ofc-50-demo-industry-first-commercial-silicon-organic-hybrid-modulator/>.
41. NLM Photonics Announces Organic Electro-Optic Material with Record-Breaking Performance // Optica Corporate News, June 5, 2025. URL: https://www.optica.org/about/newsroom/corporate_member_news/2025/nlm_photonics_announces_organic_electro-optic_material_with_record-breaking_performance/.

