



# Оптические модуляторы света

П. О. Якушенков, аспирант

ФГБУН ФИАН им. П. Н. Лебедева, lebedev.ru, Москва

Объем генерируемой и передаваемой информации увеличивается быстрыми темпами, его передача идет в основном по волоконным линиям связи. Для того чтобы обрабатывать такие объемы, нужны более высокоскоростные системы. Фотоника является оптимальным решением для их исполнения, и для его реализации необходим быстрый оптический переключатель. В статье рассматриваются оптические модуляторы света для СВЧ устройств приема, передачи и обработки сигнала, реализованные на разных физических эффектах и выполненные в различных материалах, приводится их сравнение, производительность и быстродействие. Сообщаются результаты по созданию перспективных магнитооптических модуляторов.

**Ключевые слова:** фотоника, оптический модулятор, показатель преломления, магнитооптический модулятор Маха-Цендера

Статья получена: 28.06.2019. Принята к публикации: 19.07.2019.

## Optical Light Modulators

P. O. Yakushenkov, postgraduate student

FSBIS Lebedev Physical Institute of the RAS, lebedev.ru, Moscow

The amount of generated and transmitted information is increasing rapidly, its proceeding is mainly via fiber communication lines. In order to handle such volumes, higher speed systems are needed. Photonics is the best solution for their execution. A fast optical switch is essential for its implementation. The article describes different types of optical modulators for SHF devices of detection, transmission and processing the signal is increasing, that based on different physical effects and materials, also their comparing, performance and processing speed are shown. The results of creating promising magneto-optical modulators are reported.

**Key words:** photonics, optical modulator, refractive index, magneto-optical Mach-Zehnder modulator

Received: 28.06.2019. Accepted: 19.07.2019.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о возможностях управления светом и его оптического переключения стоял уже в 20-м веке, а в первые десятилетия 21-го века приобрел еще более важное значение в связи с появлением новых технических устройств: оптических волокон, волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и фотонных интегральных схем (ФИС). В 21-м веке исследования в области радиофотоники приоб-

ретают приоритетный характер, поскольку в ряде технологических направлений электроника приблизилась к физическому пределу, а альтернативные, молекулярные и квантовые методы обработки информации пока недостаточно изучены для применения в широких масштабах.

Быстродействие кремниевых интегральных схем замерло на отметке порядка 3,5 ГГц, а увеличение производительности в последнее десятиле-

тие происходит преимущественно за счет реализации многопоточных вычислений. Транзисторы и металлические межсоединения вплотную приблизились к своим минимальным размерам, соответствующим выполнению термодинамических и квантовых соображений, доступным литографическим нормам и свойствам используемых материалов. При этом потребности в СВЧ устройствах приема, передачи и обработки сигнала неуклонно растут. Объем передаваемой информации за эти годы вырос в 50 раз, и 10% всей потребляемой мировой электроэнергии тратится на поддержание сетевой инфраструктуры. Требуются все более миниатюрные, энергоэффективные и высокопроизводительные устройства, работающие в жестких условиях эксплуатации (при экстремальных температурах, внешнем воздействии радиационного излучения).

Известно, что модуляционные устройства сигналов классифицируют на амплитудные, фазовые и частотные модуляторы. Преимущества оптической связи и оптического переключения основаны на возможностях оптической передачи большого объема информации на большие расстояния с малыми потерями за короткое время. Поэтому оптический модулятор света должен обладать высоким быстродействием. Принцип работы частотных модуляторов связан с гибелью одного фотона и рождением другого, что ограничивает быстродействие. В предлагаемом обзоре будут рассмотрены в основном амплитудные и фазовые модуляторы, их действие в основном базируется на изменении показателя преломления среды за счет перемещения зарядов. В свою очередь эффективность их действия связана с подвижностью зарядов, что также ограничивает быстродействие модуляторов, однако не столь жестко.

В полной мере эффект модуляции оптического сигнала в волноводе возможен путем реализации микромеханических, термооптических, электрооптических, магнитооптических, акустооптических и нелинейно-оптических эффектов. Микромеханические и акустооптические модуляторы обладают быстродействием в несколько мегагерц и в настоящее время не рассматриваются как технологически обоснованные.

В конце обзора речь пойдет о магнитооптических модуляторах, которые являются самыми перспективными. Так как их принцип действия не связан с подвижностью зарядов, то вызванное ею ограничение быстродействия переключения к магнитооптическим модуляторам не применимо.

## ЧАСТОТНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ

Самый простой оптический модулятор света известен с момента изобретения зеркала – можно взять зеркало и просто механически его крутить (как акустооптические модуляторы). Однако управлением светом можно достигнуть гораздо больших скоростей переключения. В любом модуляторе света световой поток модулируется управляющим сигналом. В большинстве современных модуляторов управляющим сигналом является электрический метод, однако самые быстрые и перспективные варианты управления – это полностью оптические переключатели. Электрический сигнал ограничен по частоте переключения подвижностью заряженных частиц, а также имеет физическое ограничение – высокочастотный электрический сигнал из-за шумов нельзя передать по проводу [1].

В частотных модуляторах света в основном используют ту же активную среду, которая применяется для лазерной генерации в лазерах или усилителях (рис. 1), с дальнейшим преобразованием частоты. Например, в качестве частотного модулятора можно использовать полупроводниковый лазер и менять ширину запрещенной зоны, либо – твердотельный, волоконный или плазмонный лазер и менять в нем уровни генерации. Однако при перестроении частоты проявляется инерционность активной среды, поэтому быстрых модуляторов сделать на таком рабочем принципе не получается. Или в 1984 году Б.Дженкинс из Университета Южной Калифорнии продемонстрировал жидkokристаллический пространственный модулятор, на заднюю поверхность которого был нанесен фотопроводник. При попадании света на фотопроводник локально изменяется потенциал, воздействующий на жидкий кристалл, что приводит к изменению пропускания элемента. Используя управляющий луч с одной стороны устройства и считывающий луч с другой стороны, можно

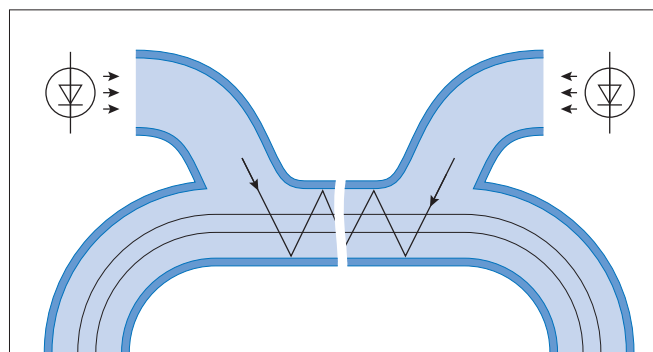
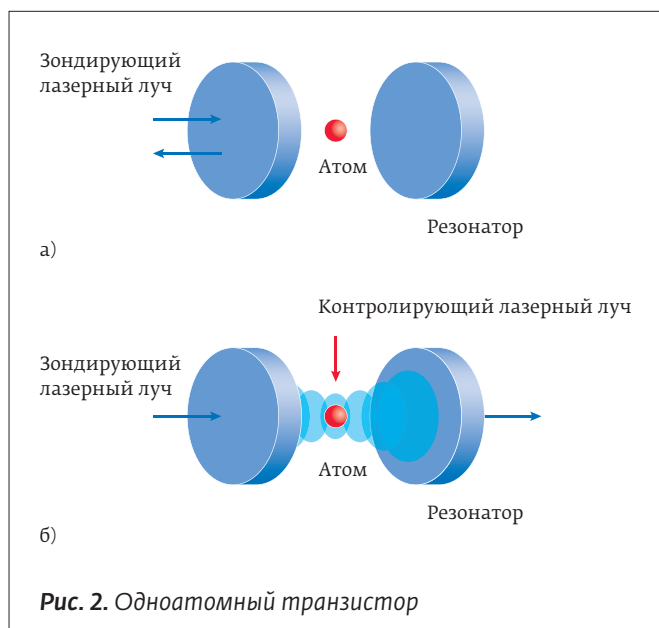


Рис. 1. Волоконный усилитель



создать бистабильный логический элемент и реализовать с его помощью булевскую логику. Следует отметить, что быстродействие данного устройства определялось инерционностью жидкого кристалла, и граничная частота следования импульсов составляла ~1 МГц [2].

Конечно, можно использовать одноатомную активную среду, чтобы не испытывать такой инерционности, но это будет дорого, а со всеми агрегатами, обеспечивающими стабильность работы такого одноатомного модулятора, громоздко. Так, например, недавно немецкие исследователи из Института квантовой оптики Макса Планка поместили атом рубидия в конструкцию между двумя тонкими зеркалами, находящимися на расстоянии полмиллиметра друг от друга. Затем они направили лазерный луч на данную конструкцию, настроив его таким образом, чтобы атом начал отражать свет. Затем направили на атом второй управляющий луч лазера с иной частотой под прямым углом к первому и настроили его таким образом, чтобы создать условия прозрачности для прохождения первого лазера через конструкцию (рис. 2). Таким образом, система стала иметь два состояния – прозрачное и непрозрачное, по аналогии с открытым и закрытым состоянием классического транзистора. Подобный квантово-механический транзистор (туннелированный транзистор с двойным электронным слоем, Double Electron Layer Tunneling Transistor, DELTT) был разработан командой Sandia в лаборатории Департамента энергии (DOE). По данным Sandia, устройство в состоянии исполнять триллион операций

в секунду – в 10 раз быстрее самых совершенных транзисторных схем, используемых в настоящее время [2].

## ФАЗОВЫЕ МОДУЛЯТОРЫ

При прохождении световой волны ( $\lambda$  – длина волны в вакууме) в веществе ( $L$  – пройденный путь,  $n$  – показатель преломления вещества) ее фаза меняется на величину  $\varphi = 2\pi nL/\lambda$ , то есть для того чтобы изменить фазу световой волны, обычно меняют показатель преломления. Вообще выделяют еще поляризационные модуляторы, которые поворачивают плоскость поляризации (либо вращают поляризатор), но по сути это фазовые модуляторы, потому что любую волну можно представить как сумму двух волн с правоциркулярной и левоциркулярной поляризацией, а вращение плоскости поляризации – это изменение фазы волн с циркулярной поляризацией. Например, так объясняется эффект Фарадея: правоциркулярная волна меняет фазу в веществе, левоциркулярная – меняет ее по-другому (из-за разницы показателей преломления для право- и левоциркулярной поляризации в магнитных средах). Обе волны интерферируют между собой, и в результате получаем вращение плоскости поляризации. Поляризационные модуляторы в основном магнитные, о чем речь пойдет ниже.

Изменения показателя преломления для фазовой модуляции можно добиться многими способами: механически (например, воздействуя на среду распространения акустическими волнами), термически (используя эффект Пельтье, например), электрически (например, на эффекте Поккельса), оптически (на эффекте Керра). Поскольку оптический модулятор должен обладать высокой скоростью, мы не будем рассматривать механические способы воздействия, а также термические, которые в основном применяются в магнитных модуляторах, так как при определенной температуре они размагничиваются.

Зависимость показателя преломления среды от электрического поля можно представить в виде функции, которую можно разложить в ряд Тейлора. Тогда коэффициент, стоящий при линейном члене, будет отвечать за эффект Поккельса, а стоящий при квадратичном – за эффект Керра. Устройства фазовых модуляторов работают таким образом: к участку оптического пути, по которому распространяется оптическое излучение, прикладывается либо электрическое поле, либо световой поток, меняющие на нем показатель преломления. Обычно пропускают ток или прикладывают

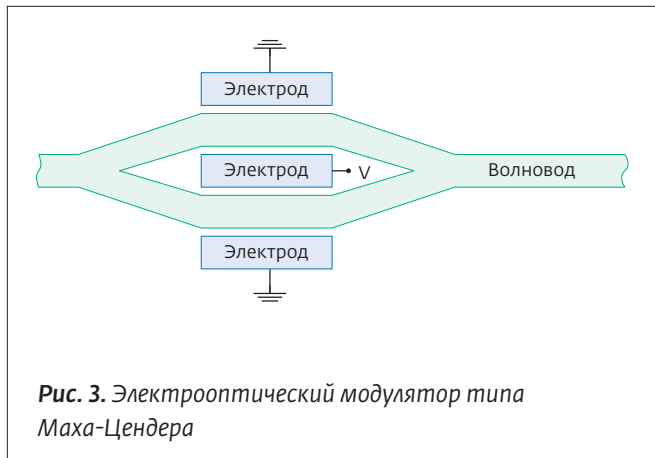


Рис. 3. Электрооптический модулятор типа Маха-Цендера

напряжение к напыленным на волновод электродам, либо пускают луч света через ячейку Поккельса. Также известны устройства, в которых для управления распространяющимся излучением используют эффект Керра, воздействуя световым потоком интенсивности  $I$  на кристалл. Эффект Поккельса связан с явлением перемещения зарядов, поэтому он связан с такой характеристикой, как подвижность  $\mu$ . Из-за ее величины также появляются ограничения, однако частоты модуляции в подобных устройствах могут достигать порядка 100 ГГц. Такими же ограничениями обладают и модуляторы, реализованные на квантовых точках. Эффект Керра более инерционен, а также менее эффективен по причине того, что  $n(I) = K \cdot I$ ,  $K \approx 10^{-16}$ , так что для оптических модуляторов он не очень пригоден. Эффект Керра также имеет свои недостатки, так как может вызвать нежелательные нелинейные эффекты (например, генерацию второй гармоники).

Приложив потенциал к электродам и создав электрическое поле вдоль кристаллографического направления [001] кристалла (направления  $z$ ), мы получим изменение показателя преломления:  $n_x = n_0 - \Delta n$ ,  $n_y = n_0 + \Delta n$ ,  $n_z = n_0$ . Если это направление [110], то при изменении показателя преломления вместо  $\Delta n$  будет  $\Delta n / \sqrt{2}$ , а если это направление [111], то вместо  $\Delta n$  будет  $+\Delta n / \sqrt{3}$ , а  $n_z = n_0 - 2\Delta n / \sqrt{3}$ . Изменение показателя преломления пропорционально величине электрического поля [3]:  $\Delta n = 0,5 r n_0^3 E$ , где  $r$  – электрооптический коэффициент ( $r \approx 1 \cdot 10^{-10}$  см/В). Или  $\Delta n = 0,5 r n_0^3 \iint E \cdot \varepsilon^2 dx dy / \iint \varepsilon^2 dx dy$ , где  $\varepsilon$  – поле оптической волны. Если использовать выражение для напряжения электрического поля ( $E = U/h$ ), то  $\Delta n = U r n_0^3 / 2h$ , или часто пишут  $\Delta n = U r n_0^3 \Gamma / 2h$ , где  $\Gamma$  – интеграл перекрытия,  $\Gamma = \frac{h}{U} \left( \iint E \cdot \varepsilon^2 dx dy \right)$ . Тогда

суммарный фазовый сдвиг проходящего оптического излучения будет  $\Delta\phi = \Delta\beta L = -\pi n^3 r \Gamma U L / \lambda h$ , где  $\vec{\beta}$  – волновой вектор.

## АМПЛИТУДНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ

Менять амплитуду можно, меняя параметры источника либо пропускание среды (например, эффект Франца-Келдыша), но это связано с инерционностью вещества, что снижает скорость работы модулятора. Поэтому используют принципы фазовой модуляции и интерференцию, как в модуляторе типа Маха-Цендера. Электрооптический модулятор типа Маха-Цендера годен в качестве оптического переключателя в интегральной фотонике. Он представляет собой одномодовый волновод, разветвиться, электроды в одном из плеч, соединитель.

Разветвитель и соединитель в задачах волоконной оптики часто располагают под углом около 80 градусов. Оптимальный угол можно выбрать, если учитывать потери на больших длинах, однако поиск оптимума в задачах для интегральной оптики не имеет смысла. Такие переходы называют «разветвитель 3 дБ», потому что каждая такая «рогатка» вносит потери 3 дБ, так как оптическая мощность делится пополам.

Электроды в одном из двух плеч интерферометра создают электрическое поле  $E$ , которое влияет на показатель преломления в этой области, влияя соответственно на оптический путь и на набег фазы в этом плече. Из-за этого волны, исходящие из двух плеч, интерферируют с различными фазами в зависимости от величины изменения фазы одной из них. Для эффективного преобразования энергии электроды делают как p-n переход, легируя полупроводник примесями (рис. 4).

В условии полной модуляции (100%)  $\Delta\phi = \Delta\beta L = \pi r$ ,  $UL = p\lambda h / n^3 r \Gamma$ ,  $p = 2m + 1$ . Если  $\Delta L$  – разница оптических путей в обоих плечах, то сдвиг фазы  $\Delta\phi = 2\pi n \Delta L / \lambda$ , и тогда интенсивность на выходе  $I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} \cos^2(\pi n \Delta L / \lambda)$  при ширине полосы по нулевому уровню сигнала  $\Delta\lambda = \lambda^2 / \Delta L$ . Если  $\phi_0 = \beta L n_0$ , а  $\phi = \beta L (n_0 + \Delta n)$ ,  $\Delta\phi = 2\pi L \Delta n(E) / \lambda$ , тогда интенсивность на выходе  $I_{\text{вых}} = 0,5 [I_{\text{вх}} + I_{\text{вх}} \cos \Delta\phi(E)] = 0,5 I_{\text{вх}} [1 + \cos \Delta\phi(E)]$  [4].

Максимальная частота модуляции зависит от того, насколько быстро перезаряжается емкость на электродах, то есть от подвижности материала. Таким образом, быстрые модуляторы (~100 ГГц) делают на  $A_3B_5$  материалах с высокой подвижностью, таких как InP, также их делают на ниобате лития. Параметрами модулятора являются: глубина модуляции, вносимые потери, частота модуляции, рабочая длина волны и т.д. Аналогичные



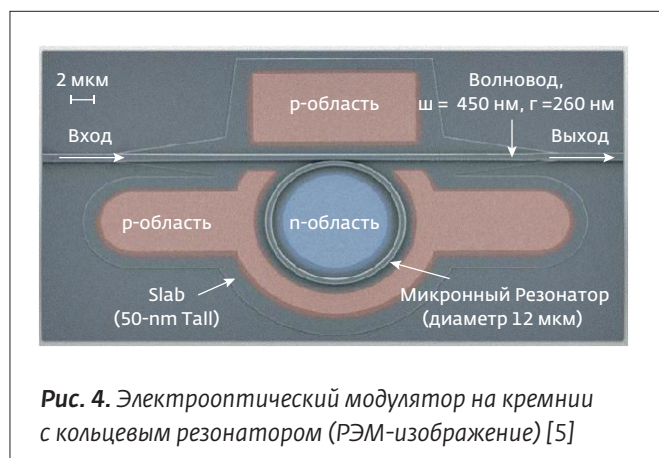


Рис. 4. Электрооптический модулятор на кремнии с кольцевым резонатором (РЭМ-изображение) [5]

модуляторы, но с кольцевым резонатором делают и на Si:SiO<sub>2</sub> (рис. 5, 6) [5].

Из всех вышеперечисленных методов для исполнения модуляторов света в КМОП совместимой технологии (англ. – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) интерес представляют лишь электрооптические и в последнее время магнитооптические и нелинейно-оптические модуляторы с Керровской нелинейностью второго порядка, индуцированной внешним полем. Нелегированный и механически не напряженный кремний по своей структуре это центросимметричный кристалл с оптической восприимчивостью третьего порядка  $\chi^{(3)} \approx 10^{-19} \text{ м}^2/\text{В}^2$ , значительным Керровским нелинейным индексом преломления  $n_2 \approx 3 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{Вт}$  и двухфотонным поглощением порядка  $\beta = 2 \cdot 10^{-11} \text{ м}/\text{Вт}$  в ИК-диапазоне.

Для формирования эффективного электрооптического взаимодействия в кремниевых волноводах используют структуры трех базовых типов: на основе МОП конденсаторной структуры, р-и-п структуры и обратно смещенного р-п перехода (рис. 7).

В первом случае при подаче напряжения на электроды достигается накопление заряда в области волновода, разделенного вертикальным слоем диэлектрика; во втором происходит инжектирование заряда из сильнолегированных р- и n- областей в область собственного (нелегированного) полупроводника (англ. – intrinsic, i-область) под действием приложенного прямого смещения; в третьем осуществляется обеднение области р-п диода при обратном смещении. Таким образом, управляющее напряжение изменяет плотность заряда свободных носителей в области пика интенсивности оптической моды в волноводе, модулируя коэффициент преломления.

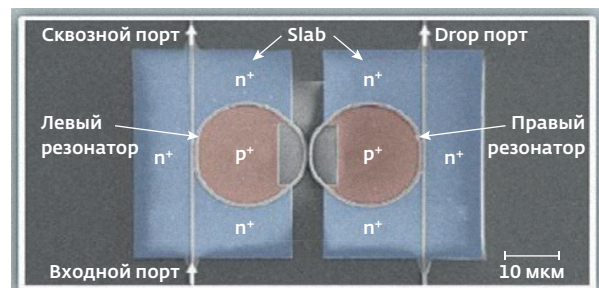


Рис. 5. Электрооптический переключатель из двух связанных модуляторов с кольцевым микрорезонатором на кремнии (РЭМ-изображение) [5]

Электрооптические ячейки второго и третьего типа самые простые и при производстве на КНИ-пластинах (кремний на изоляторе, кремний-диэлектрик-кремний, англ. – Silicon on insulator, SOI) требуют менее десяти технологических процессов: нанесения масок, травления, ионной имплантации и разводки металлизации. Однако им требуется напряжение питания в диапазоне 5–20 В, что труднодостижимо в КМОП драйверах питания. Для снижения напряжения питания и увеличения быстродействия создают сложные конфигурации легирования в области волновода (рис. 8) или используют волноводы с МОП структурой (рис. 7а). Таким структурам

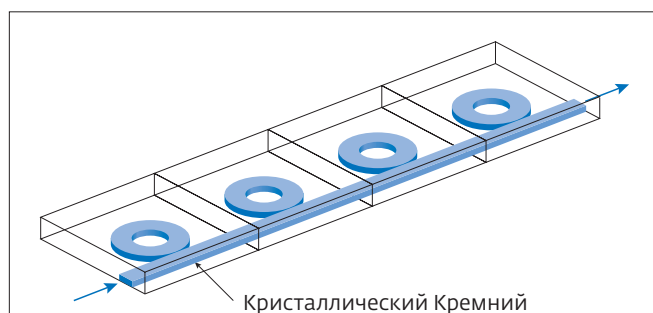
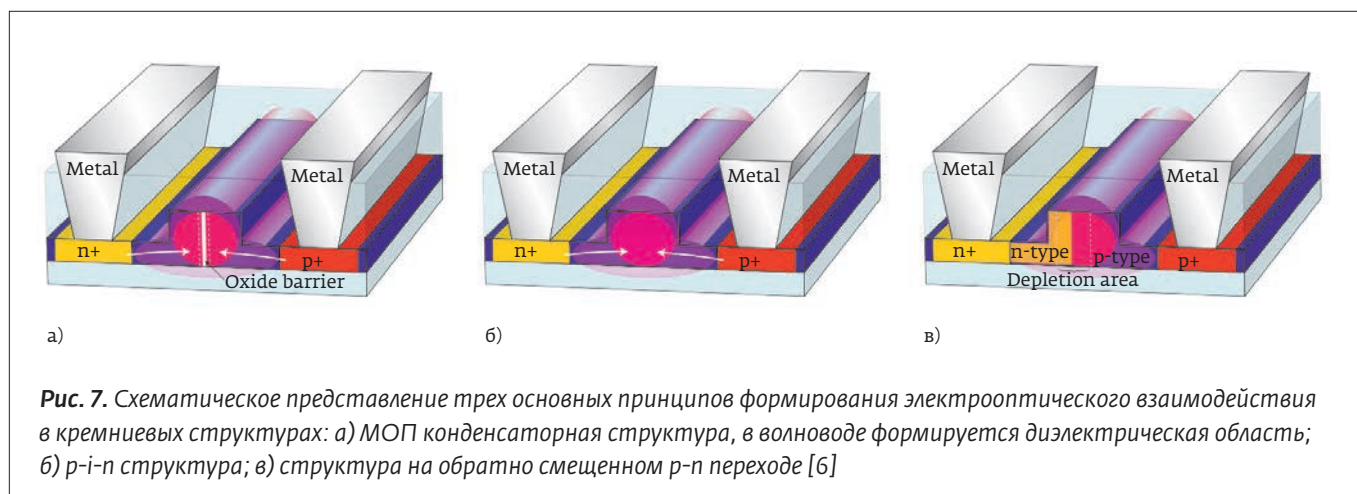


Рис. 6. Оптическая шина данных из кремниевых модуляторов в серверах Google (электрооптический массив модуляторов, образованный объединением нескольких модуляторов на кристаллическом кремниевом микрорезонаторе в серию; каждый модулятор в массиве соответствует каналу определенной длины волны; излучение источника в непрерывном режиме с набором разных длин волн подается на вход; каждый канал избирательно кодируется данными с помощью соответствующего модулятора на соответствующую длину волны; результирующий поток параллельных оптических данных подается на выход [5])



требуется напряжение от 0,8 до 5 В. Однако создание дополнительных перемежающихся областей легирования либо осаждение  $\text{SiO}_2$  и поликремния при изготовлении МОП структур увеличивает число операций до двадцати и приводит к низкому выходу годных элементов на пластине.

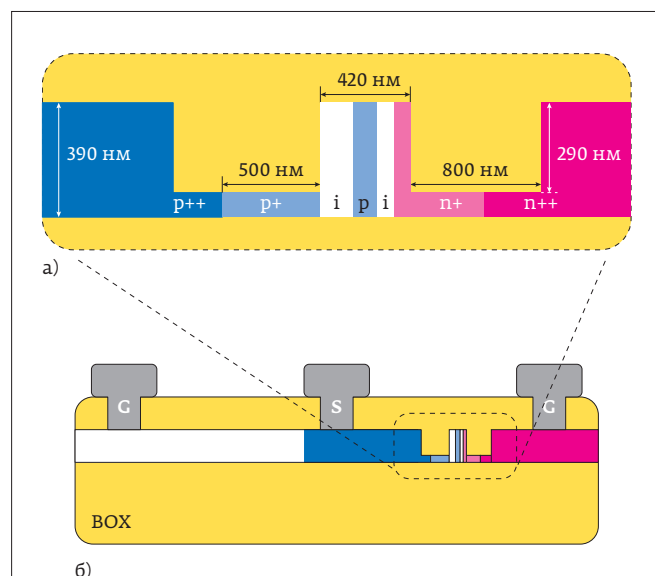
Если разместить электрооптические ячейки в плечах сбалансированного интерферометра Маха-Цендера, то интерференция двух сдвинутых по фазе волн, распространяющихся в различных плечах интерферометра, вызовет модуляцию интенсивности. Аналогично электрооптическая ячейка в резонансной структуре, кольцевом или дисковом резонаторах вызовет изменения резонансной частоты под действием модулирующего сигнала.

Наибольшее распространение получили модуляторы Маха-Цендера, поскольку они легче в реализации и стабильнее в производстве. Небольшие геометрические изменения волновода, шероховатость и наклон стенок или сглаживание поверхности при травлении не вызывают резких изменений характеристик в сравнении с кольцевыми резонаторами. Но для достижения нужной эффективности они должны обладать длиной в несколько миллиметров. И таким образом, занимая много места на интегральной пластине, становятся чувствительными к температурным перепадам, потребляют не менее 5 пДж/бит информации и работают с частотой 20–40 ГГц.

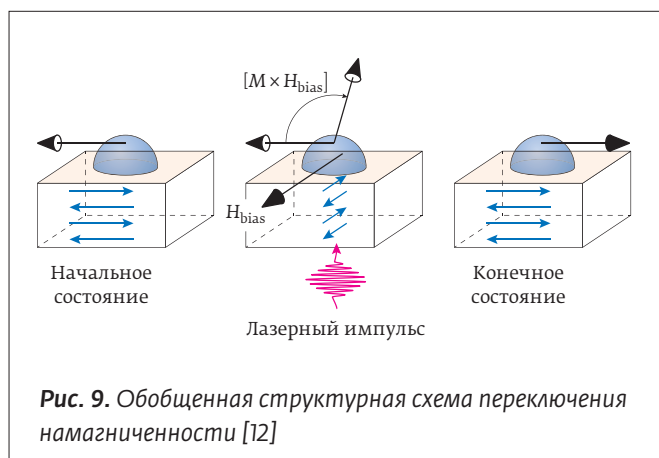
Резонаторные структуры намного меньше, от 10 до 100 мкм в диаметре, потребляют в среднем 3 пДж/бит и работают на частотах до 60 ГГц, однако чрезвычайно чувствительны к нарушениям технологического цикла производства и температурным колебаниям во время работы.

В настоящее время модуляция на частоте 170 ГГц является наиболее выдающимся результатом на текущий момент. Она была получена при использовании гибридных кремний-органических модуляторов Маха-Цендера [8]. Несмотря на значительный академический интерес, полученный модулятор сложно интегрировать с КМОП платформой. Однако данный результат показывает, что основное влияние оказывает грамотный выбор материала электрооптического волновода, а сама структура модулятора (кольцевого или интерференционного типа) вносит меньший вклад в быстродействие.

Несколько слов о нелинейнооптическом модуляторе. Областью интереса также является электро-



**Рис. 8.** Модулятор на p-i-p-i-p диоде с максимальной частотой 40 ГГц [7]



оптический модулятор, в котором нелинейность второго порядка создана приложенным постоянным полем (с помощью квадратичного электрооптического эффекта Керра).

Кремний, как уже упоминалось, центросимметричный кристалл, и наряду с другими широко используемыми КМОП материалами – SiN, SiO<sub>2</sub>, Ge, SiC – не обладает нелинейностью второго порядка  $\chi^{(2)}$ . Однако существуют способы разрушить симметрию и получить электрооптический эффект второго порядка. Ранее успешно исследовали генерацию второй гармоники, используя напряженный (strained) кремниевый волновод с эпитаксиально нанесенными тонкими пленками SiN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC и аморфного Si:H. В результате за счет эффекта Поккельса были достигнуты нелинейности  $\chi^{(2)}$  до 122 pm/V [9]. Однако в работе [10] впервые показано, что электрическое поле, приложенное к кремниевому волноводу, вызывает эффективную переориентацию диполь-

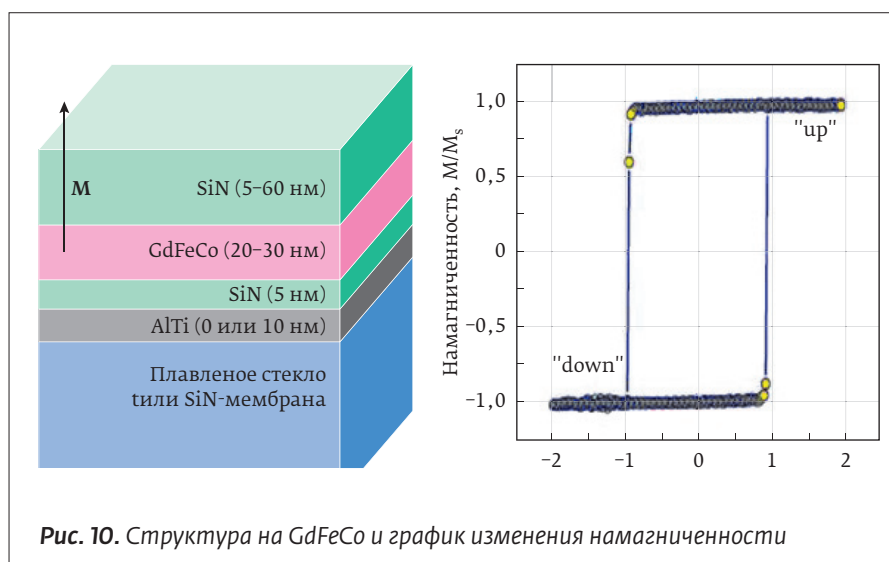
ных моментов и центросимметрия нарушается. При обратном смещении  $V_{dd} = -21$  В и токе 0,1 мкА был получен  $\chi^{(2)} = 41$  pm/V для ИК-излучения и показана возможность улучшения результата до 100–120 pm/V.

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ

Существуют целый ряд магнитооптических модуляторов [11], в основном они фазовые и основаны на эффекте Фарадея (вращение плоскости поляризации в магнитной среде). В них используются магнитные материалы и модулируется намагниченность: можно напылять магнитные пленки, например, на волновод или пропускать свет через магнитную среду. Намагниченность магнитных материалов можно переключать разными способами: магнитным полем, током, а также лазерными импульсами. Магнитное поле поворачивает намагниченность, что описывается уравнением Ландау-Лившица. Намагниченность у ферромагнетика создается в основном за счет того, что спины электронов одинаково ориентируются, создавая суммарное магнитное поле в определенном направлении. А переключение намагниченности (переориентация спинов) осуществляется либо поворотом вектора намагниченности во внешнем магнитном поле, либо за счет обменного взаимодействия при переключении намагниченности током, либо светом (поворот в магнитном поле спин-поляризованного тока или определенно поляризованных фотонов). При размагничивании появляется известная петля гистерезиса. По характеру петли материалы делятся на магнитомягкие и магнитожесткие. Для быстрого пере-

ключения намагниченности полем нужно высокочастотное магнитное поле, для переключения намагниченности спин-поляризованным током также нужны высокие частоты, однако можно достичь скоростей переключения порядка 10 ГГц.

Самый перспективный вариант устройства оптического модулятора – это переключение намагниченности в ферромагнетиках при взаимодействии различных структур с фемтосекундными импульсами лазерного излучения (рис. 9). Например, на



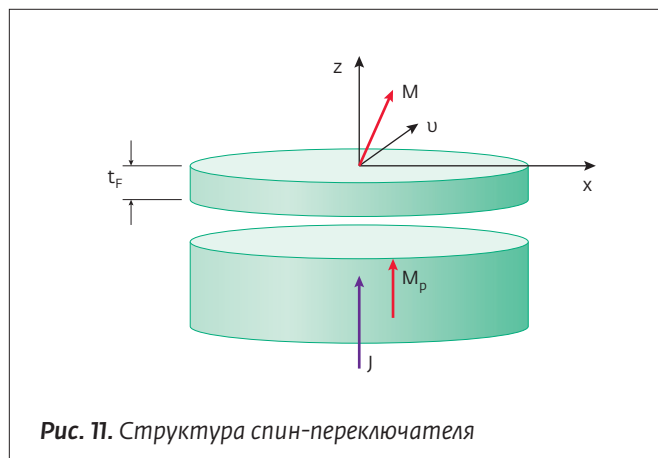


Рис. 11. Структура спин-переключателя

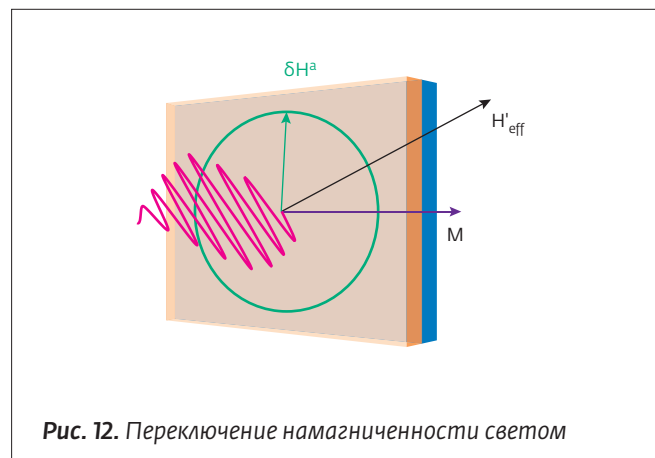


Рис. 12. Переключение намагниченности светом

MnFe, TmFeO<sub>3</sub>, FeVO<sub>3</sub> или на GdFeCo (рис. 10), однако эти материалы требуют большой мощности, в настоящее время ведутся разработки по маломощному переключению на феррите граната. Существует такой эффект, как обратное намагничивание с помощью одного циркулярно поляризованного лазерного импульса без какого-либо приложенного магнитного поля. Это полностью оптическое ультрабыстрое переключение. Существует такая память на ферромагнитных доменах структур с переключением

спина, которые обращают свою намагниченность током (спином электрона). Таким образом, тот же эффект, который мы можем использовать при вращении фотона, он также описывается уравнением Ландау-Лившица-Гильберта [13]

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma [\vec{M} \times \vec{H}_{eff}] + \frac{\alpha}{M} [\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}] + \gamma I G [\vec{M} \times [\vec{e}_z \times \vec{M}]],$$

$$\text{где } I = \frac{\hbar}{2et_F M^2} J, \quad \vec{H}_{eff} = -\frac{\delta E}{\delta \vec{M}} = \frac{2K}{M^2} \vec{e}_z (\vec{e}_z \cdot \vec{M}).$$

# XII

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

Белорусский государственный университет приглашает Вас принять участие в конференции по квантовой электронике (КЭ'2019, Минск), которая состоится **18–22 НОЯБРЯ 2019 Г.**

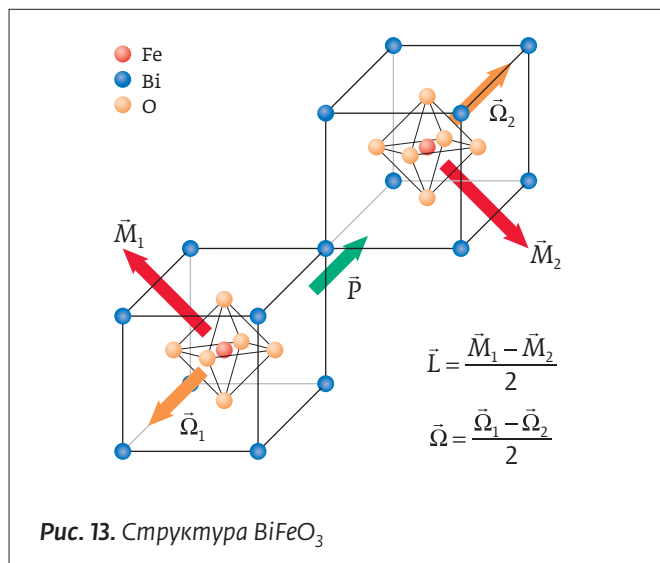
### РАБОТА КОНФЕРЕНЦИИ БУДЕТ ПРОХОДИТЬ ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ:

- ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ;
- ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ;
- СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ;
- КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ;
- ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ;
- МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕПОДАВАНИЯ.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ, НИИ ПРИКЛАДНЫХ  
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ  
ИМ. А.Н. СЕВЧЕНКО БГУ,  
МИНСК, УЛ. КУРЧАТОВА, 7

СРОКИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОЛУЧЕНИЯ УВЕДОМЛЕНИЙ:  
23 СЕНТЯБРЯ 2019 Г. – ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
21 ОКТЯБРЯ 2019 Г. – РАССЫЛКА ПРИГЛАШЕНИЙ УЧАСТНИКАМ





При переключении намагниченности светом поле лазерного излучения  $\delta \vec{H}^a$ , поворачивает намагниченность  $\vec{M}$  [14]:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma [\vec{M} \times (\vec{H}_{\text{eff}} + \delta \vec{H}^a)] = -\gamma [\vec{M} \times \vec{H}_{\text{eff}}] + \frac{\alpha}{M} [\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}].$$

Например, существует вариант реализации оптического переключателя на использовании эффекта переключения намагниченности фемтосекундными лазерными импульсами у ферромагнетиков с использованием лазера на ферромагнетике. Реализовать подобный лазер можно на такой ферромагнитной гетероструктуре, как  $\text{BiFeO}_3$  [15]. Лучше использовать мультиферроик, чтобы электрическая и магнитная система были сильно связаны. Легировав  $\text{BiFeO}_3$  какими-нибудь соединениями с  $\text{Hf}$  или  $\text{W}$  для создания полупроводника р-типа и п-типа соответственно (предположение, возможны лучшие варианты) и осуществив лазерную генерацию на таком р-п переходе, можно управлять ею, меняя намагниченность структуры светом. При переключении намагниченности меняется показатель преломления активной среды

$$n = \sqrt{\epsilon} : \hat{\epsilon} \begin{pmatrix} \epsilon_1 & i \cdot g & 0 \\ -i \cdot g & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{pmatrix},$$

где  $g = \alpha \vec{M}$ , а  $\vec{M}$  – намагниченность.

Наконец, разрабатывается вариант самого быстрого оптического модулятора – это модуля-

тор типа Маха-Цендера с магнитными пленками. Такой модулятор пока не создан, но находится в разработке. В нем вместо электродов предложено нанести на стенки волновода магнитные пленки. Переключение намагниченности в пленке излучением из другого волновода позволит моделировать показатель преломления магнитным полем. Таким образом, это модуляция света световым излучением, во-первых, станет самой быстрой, так как не будет связана с подвижностью зарядов, а будет связана только с переориентацией спинов. А, во-вторых, переключение намагниченности должно происходить за время взаимодействия с лазерным импульсом, то есть за единицы фемтосекунд. Данная разработка является предметом дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушников П. О., Балаклеяский Н. С. Фотонные интегральные схемы. VI Международная конференция «Фотоника и информационная оптика». Сборник докладов. М.: ННИЯУ «МИФИ». 2017; 146–148.
2. Yakushenkov P. O., Balakleyskiy N. S. Fotonnye integralnye shemy. VI International Conference «Photonics and Information Optics. Sbornik dokladov. M.: NNIYaU «MIFI». 2017; 146–148.
3. Белов П. А., Беспалов В. Г., Васильев В. Н., Козлов С. А., Павлов А. В., Симовский К. Р., Шполянский Ю. А. Оптические процессоры: достижения и новые идеи – 2006. URL: <http://textarchive.ru/c-2039426.html>.
4. Belov P. A., Bepalov V. G., Vasilev V. N., Kozlov S. A., Pavlov A. V., Simovskiy K. R., Shpolyanskiy Yu. A. Shpolyanskiy Opticheskie processory: dostizheniya i novye idei – 2006. URL: <http://textarchive.ru/c-2039426.html>.
5. Тамир Т. Волноводная оптоэлектроника. М.: МИР, 1991.
6. Jeong-Min Lee. Characterization, Simulation, and Modeling of Waveguide-Type GePhotodetectors on Si. The Graduate School Yonsei University. February 2017.
7. Biberman A., Bergman K. Optical interconnection networks for high-performance computing systems. Rep. Prog. Phys. 2012; 75. doi:10.1088/0034-4885/75/4/046402.
8. Reed G. T. et al. Silicon optical modulators. Nature photonics. 2010; 4(8): 518.
9. Ziebell M. et al. 40 Gbit/s low-loss silicon optical modulator based on a pipin diode. Optics express. 2012; 20(10): 10591–10596.
10. Hössbacher C. et al. Plasmonic modulator with > 170 GHz bandwidth demonstrated at 100 Gb/s NRZ. Optics Express. 2017; 25(3): 1762–1768.
11. Leuthold J. et al. Nat. Photon. 2010; 4(8).
12. Timurdogan E. et al. Nat Photon. 2017; 11: 200–206.
13. Аппатун Р. Оптические вычисления. М.: Мир. 1993.
14. Arratun R. Opticheskie vychisleniya. M.: Mir. 1993.
15. Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferromagnetic garnet films. Nature. 2005; 45 (047402): 1–4.
16. Попков А. Ф., Журавлев М. Н. Физические основы магнетизма и спинового транспорта в устройствах магнитной электроники. М.: ИПК МИЭТ. 2014; 189–212.
17. Popkov A. F., Zhuravlev M. N. Fizicheskie osnovy magnetizma i spinovogo transporta v ustroystvakh magnitnoy elektroniki. M.: IPK MIET. 2014; 189–212.
18. Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Laser-induced magnetization dynamics and reversal in ferromagnetic alloys. Rep. Prog. Phys. 2013; 76(2): (026501):1–35. doi: 10.1088/0034-4885/76/2/026501.
19. Якушников П. О. Модуляция излучения полупроводникового лазера изменением намагниченности среды. VII Международная конференция «Фотоника и информационная оптика». Сборник докладов. М.: ННИЯУ «МИФИ». 2018; 192–193.
20. Yakushenkov P. O. Modulyaciya izlucheniya poluprovodnikovogo lazera izmeneniem namagnichennosti sredy. VII Mezhdunarodnaya konferenciya «Fotonika i informacionnaya optika». Sbornik dokladov. M.: NNIYaU «MIFI». 2018; 192–193.

Впервые одновременно  
с Сибирским энергетическим форумом  
и выставкой «Нефть. Газ. Химия»

**20–22 НОЯБРЯ**

**XIV СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА**



- ♦ Машиностроение. Станкостроение
- ♦ Metallurgy. Metal processing
- ♦ Instruments. Metis
- ♦ Defectoscopy
- ♦ Casting. Welding
- ♦ Labor protection on enterprises
- ♦ Automation of production, commercial and residential objects
- ♦ Innovative processing of surfaces
- ♦ Logistics. Transport. Warehouse

Реклама

**МВДЦ «Сибирь»**

ул. Авиаторов, 19  
тел: (391) 200-44-00

912@krasfair.ru  
www.krasfair.ru



**4-6 КАЗАНЬ 2019  
ДЕКАБРЯ**

19-я международная специализированная выставка оборудования,  
приборов и инструментов для машиностроительной,  
металлообрабатывающей и сварочной отраслей промышленности

**МАШИНОСТРОЕНИЕ  
МЕТАЛЛООБРАБОТКА  
СВАРКА**

**КЛЮЧЕВОЕ СОБЫТИЕ ОТРАСЛИ**



Забронировать  
стенд



16+

ОРГКОМИТЕТ ВЫСТАВОК

Россия, 420059, г. Казань, Оренбургский тракт, д. 8,

Тел/факс: (843) 20-29-03, 202-29-92

ОАО «Казанская ярмарка»

www.expomach.ru, www.expokazan.ru

E-mail: expo-kazan@mail.ru





**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**100% ГАРАНТИЯ**  
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер  
Периодичность: 10 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость 1430 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)



Стоимость 1430 р. за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)

**ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ**

[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)



Стоимость 1056 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.lastmile.ru](http://www.lastmile.ru)



Стоимость 1287 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.ru](http://www.nanoindustry.ru)



Стоимость 1716 р. за номер  
Периодичность: 4 номера в год  
[www.stankoinstrument.ru](http://www.stankoinstrument.ru)