

Магнито-индуцированная невзаимность в резонансных кремниевых волноводах с высокой степенью поперечного вращения электрического поля

Н. Г. Юхтанов¹, М. В. Рыбин^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Невзаимные устройства в реализации на чипе очень важны для управления световыми сигналами в современной фотонике. Невзаимность часто вызвана магнитооптическими эффектами, но реализовать не сонаправленные магнитные поля в масштабе чипа сложно. Удобно прикладывать внешнее магнитное поле в направлении перпендикулярном плоскости чипа (геометрия Фойгта), что приводит к модам с поперечным вращением электрического поля в плоскости. В нашей работе мы изучаем резонансные кремниевые волноводы, которые не содержат магнитных материалов и поддерживают подобные моды. Такие наноструктуры основаны на коммерчески доступных SOI пластинах со стандартной высотой 220 нм. Змеевидное изгибание изучаемых волноводов позволяет использовать их в качестве фазовых накопителей и предложить схему оптического изолятора на чипе.

Ключевые слова: Резонансные волноводы, Фотонные интегральные схемы, Магнито-индуцированная невзаимность, Фазовращатель, Фотонный кристалл.

Цитирование: Юхтанов, Н. Г. Магнито-индуцированная невзаимность в резонансных кремниевых волноводах с высокой степенью поперечного вращения электрического поля / Н. Г. Юхтанов, М. В. Рыбин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 74–77.

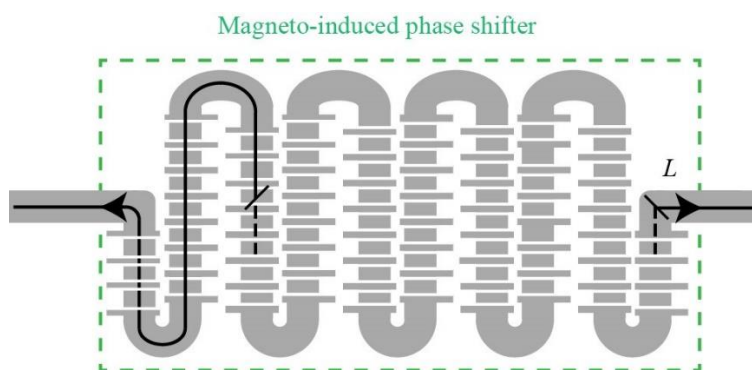
Введение

Разработка интегрированных на чип Оптических Изоляторов (ОИ) на основе платформы кремний на изоляторе (SOI) является перспективной задачей для развития высокоскоростных схем интегральной фотоники. Для реализации невзаимных устройств на чипе используют магнитооптические (МО), электрооптические, нелинейные, и акустооптические эффекты. В подходе с МО эффектами используются материалы с высоким показателем вращения Фарадея, а именно, пленки на основе железо-иттриевого граната [1, 2]. Это позволяет интегрировать устройство на чип с площадью интеграции менее 1 мм² [2]. Благодаря временной модуляции эффективного показателя преломления в подходе с электрооптическими эффектами обеспечивается различное значение коэффициента пропускания для распространения света в прямом и обратном направлении [3]. Невзаимная передача импульсов наблюдается в схемах с нелинейными эффектами, к примеру эффект Керра [4]. Также для достижения невзаимности используется прямая акустооптическая модуляция в кремниевых волноводах с использованием поверхностных акустических волн

(SAWs) [5]. Но технологически простого решения для создания интегрированного на чип ОИ в кремниевой фотонике еще не было предложено.

Основная часть

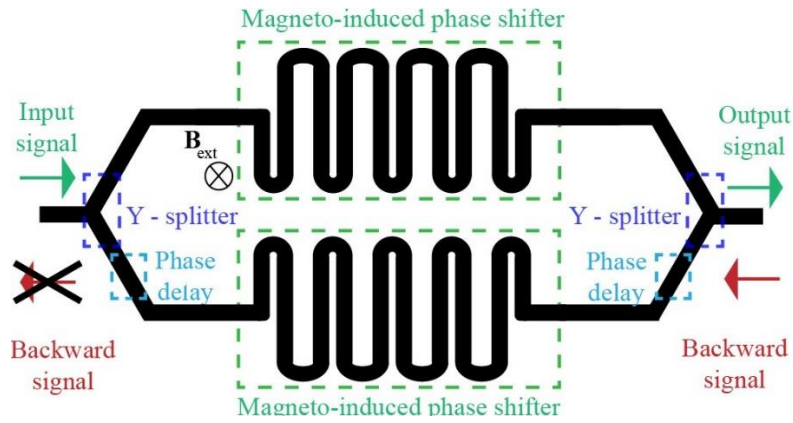
В текущей работе мы изучаем эффект поперечного вращения электрического поля в резонансных кремниевых волноводах, который позволяет нам моделировать магнито-индуцируемые фазовращатели в удобной для реализации на чипе геометрии Фойгта. Мы рассмотрели три возможных дизайна элементарной ячейки периодического кремниевого волновода. За счет приложенного перпендикулярно волновому вектору магнитного поля (геометрия Фойгта) и нарушению зеркальной симметрии в продольной плоскости волноводов накапливается удельная фаза. Таким образом, рассматриваемые волноводы работают как фазовращательные элементы, которые можно свернуть в компактную геометрию, как показано на рис. 1. Более того, такие магнито-индуцируемые фазовращатели можно использовать в схеме ОИ на основе интерферометра Маха-Цендера.



L — длина резонансного кремниевого волновода.

Рис. 1. Схема компактного магнито-индуцируемого фазовращателя на основе одного из трех дизайнов предлагаемых резонансных кремниевых волноводов.

При рассмотрении собственных мод однородного диэлектрического волновода с прямоугольным сечением наблюдается локальное вращение электрических полей. Рассматривая основную TE моду в продольной плоскости центрального сечения, было обнаружено существенное вращение электрических полей в верхней и нижней полуплоскости по часовой и против часовой стрелке, соответственно [6]. Используя нарушение симметрии в кремниевом волноводе, можно добиться ненулевого интегрального вращения электрического поля по объему кремния. Внешнее магнитное поле в геометрии Фойгта приводит к накоплению разности удельной фазы вращения при распространении света по волноводу в прямую и обратную стороны. Используя интерферометр Маха-Цендера с предлагаемым фазовращателем на основе кремниевого волновода с нарушенной симметрией и его зеркальной копией в плечах интерферометра, можно достичь пропускания света только в одну сторону, как показано на рис. 2.



Зеленая стрелка – распространение света в одну сторону,
красная стрелка – распространение света в противоположную сторону.

Рис. 2. Схема интерферометра Маха-Цендера на основе предлагаемых магнето-индуцируемых фазовращателей (один из вариантов показан на рис. 1). Симметричный Y-splitter делит сигнал на два идентичных. Дополнительные элементы фазовой задержки (phase delay) $\pi/4$ в нижнем плече интерферометра нужны для синфазной конструктивной интерференции при распространении в одну сторону и деструктивной интерференции при распространении в обратную сторону.

Ожидаемая эффективная длина кремниевых волноводов в фазовращательном элементе (рис. 1.) лежит в диапазоне $3 < L < 10$ см для получения необходимой фазы $\pi/4$ в плече интерферометра Маха-Цендера. Однако используемая геометрия Фойгта позволяет сворачивать кремниевые волноводы в компактную структуру на чип. Преимуществом такой конфигурации является тот факт, что внешнее магнитное поле остается перпендикулярным направлению распространения света при любом направлении волновода на поверхности.

Для магнето-индуцируемого накопления удельной фазы мы предлагаем использовать только статическое внешнее магнитное поле (от доступных и дешевых постоянных магнитов), которое не требует никаких источников питания. Еще одним преимуществом является то, что предлагаемое устройство простое в изготовлении. Магнето-индуцируемый фазовращатель основан на периодически структурированном кремниевом волноводе и может быть реализован на стандартных пластинах SOI с использованием литографии (без каких-либо специальных магнитных материалов). Таким образом, ожидается, что интеграция в любую оптоэлектронную схему будет простой благодаря совместимости со стандартной электронной технологией КМОП. Более того, предлагаемая технология ожидается дешевой из-за низкой цены неодимовых магнитов, которые используются для создания внешнего магнитного поля.

Заключение

В данной работе предложены три варианта дизайна кремниевых волноводов для создания компактных магнето-индуцируемых фазовращателей, интегрированных на чип. На основе предлагаемых фазовращателей может быть реализован оптический изолятор на чипе с использованием интерферометра Маха-Цендера. В результате моделирования были получены эффективные показатели интегрального поперечного вращения электрических

полей в одну сторону в кремниевых волноводах, которые позволяют сворачивать волноводы в змеевидную форму на чип с площадью менее 1 мм² по нашим оценкам. Для магнитоиндуцируемого накопления фазы использовалась величина магнитного поля 1 Т, которая достигается в коммерчески доступных неодимовых магнитах. Толщина кремниевых волноводов фиксировалась на величине 220 нм, что позволяет изготавливать образцы, используя стандартные SOI пластины.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российским Научным Фондом (грант 21-19-00677). Авторы выражают благодарность Александру Юрьевичу Петрову за плодотворные дискуссии по теме текущей работы.

Список источников

- [1] **Shoji Y.**, Mizumoto T. Silicon waveguide optical isolator with directly bonded magneto-optical garnet //Applied Sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 3. – С. 609.
- [2] **Zhang Y.** et al. Monolithic integration of broadband optical isolators for polarization-diverse silicon photonics //Optica. – 2019. – Т. 6. – №. 4. – С. 473-478.
- [3] **Lira H.** et al. Electrically driven nonreciprocity induced by interband photonic transition on a silicon chip //Physical review letters. – 2012. – Т. 109. – №. 3. – С. 033901.
- [4] **Kittlaus E. A.**, Weigel P. O., Jones W. M. Low-loss nonlinear optical isolators in silicon //Nature Photonics. – 2020. – Т. 14. – №. 6. – С. 338-339.
- [5] **Kittlaus E. A.** et al. Electrically driven acousto-optics and broadband non-reciprocity in silicon photonics //Nature Photonics. – 2021. – Т. 15. – №. 1. – С. 43-52.
- [6] **Coles R. J.** et al. Chirality of nanophotonic waveguide with embedded quantum emitter for unidirectional spin transfer //Nature communications. – 2016. – Т. 7. – №. 1. – С. 11183.

Magneto-induced non-reciprocity in resonant silicon waveguides with a high degree of transverse electric field rotation

N. G. Iukhtanov¹, M. V. Rybin^{1,2}

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

² Ioffe Institute of the RAS, Saint Petersburg, Russia

Non-reciprocal devices in on-chip implementation are high important for governing light signals in modern photonics. Non-reciprocity is often caused by magneto-optical effects, but implementing non-codirectional magnetic fields on the chip scale is difficult. It is convenient to apply the external magnetic field in the direction normal to the chip plane (Voigt geometry), which leads to modes with in-plane electric field transverse rotation. Here we propose studying resonant magnetic-material-free silicon waveguides that support such modes. These nanostructures are based on standard 220nm commercially available SOI wafers. Their serpentine folding allows using waveguides as on-chip phase shifters and proposing optical isolator scheme.

Keywords: Resonant waveguide, Photonic integrated circuit, Magneto-induced non-reciprocity, Phase shifter, Photonic crystal.