

Преобразование поляризации света в асимметричных плазмонных волноводах

И.А.Пшеничнюк, С.С.Косолобов, А.И.Маймистов, В.П.Драчев

Гибридные плазмонные волноводы с внедренным слоем проводящего оксида могут быть использованы для создания быстрых и компактных электронно-оптических модулирующих устройств. Однако в силу ограничений, накладываемых плазмонными модами на поляризацию света, модуляторы данного класса оказываются не совместимыми с современными дифракционными решетками высокой эффективности, используемыми для ввода света в волновод. В нашей работе продемонстрировано, как простое асимметричное структурирование модулирующего сэндвича позволяет создать компактный преобразователь поляризации, устраняющий обозначенную несовместимость.

Ключевые слова: плазмонный волновод, прозрачный проводящий оксид, электронно-оптический модулятор, преобразователь поляризации, поверхностный плазмон-поляритон.

1. Введение

Характерные размеры электронных вычислительных устройств уменьшаются впечатляющими темпами уже несколько десятилетий, параллельно растет и их производительность. Современные транзисторы размером ~ 10 нм способны работать на частотах в несколько гигагерц. Перспективы их дальнейшей миниатюризации сталкиваются с рядом сложностей, главная из которых – переход от нанoeлектроники к молекулярной электронике [1,2]. Однако слабым местом современных вычислительных систем является не размер и производительность транзисторов, а коммуникация между различными элементами электронных схем [3]. Речь идет о связи не только между автономными элементами схем, например такими, как центральный процессор, устройства памяти и графический процессор, но и между элементами внутри чипов, например кэшем и вычислительными ядрами. Традиционным решением задачи быстродействующей связи, хорошо показавшим себя на больших расстояниях (от компьютера к компьютеру), является использование света. Интеграция элементов классической фотоники в нанoeлектронику и применение их на малых расстояниях ограничено длиной волны света и дифракционным пределом, не позволяющими сжать световой сигнал до размеров порядка десятков нанометров. Устранить проблему несоответствия размеров и обеспечить скоростную связь на малых расстояниях возможно благодаря технологиям субволновой оптики и новым материалам [3].

И.А.Пшеничнюк, С.С.Косолобов. Сколковский институт науки и технологий, Россия, 121205 Москва, ул. Нобеля, 3; e-mail: i.pshenichnyuk@skoltech.ru

А.И.Маймистов. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

В.П.Драчев. Сколковский институт науки и технологий, Россия, 121205 Москва, ул. Нобеля, 3; адрес в настоящее время: University of North Texas, USA, 76203 Texas, Denton, 1155 Union Circle

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

Одним из ключевых элементов нанофотоники является электронно-оптический модулятор, т.е. устройство, модулирующее оптический сигнал электрическим. В соответствии со сказанным выше, модулятор должен быть малых размеров, быстрым и потреблять как можно меньше энергии. Перспективным кандидатом на эту роль является плазмонный модулятор, описанный в работе [4]. Компактность устройства достигается за счет использования гибридных плазмонных волноводов [5], позволяющих перевести часть оптического сигнала в субволновую плазмонную моду. Для этого на обычный кремниевый волновод напыляются слои диэлектрика и металла. Для модуляции сигнала в сэндвич внедряется тонкий слой прозрачного проводящего оксида ИТО, действительная часть диэлектрической проницаемости которого может обращаться в нуль при достижении определенной концентрации носителей заряда [6]. Создавая область повышенной концентрации электронов в ИТО внешним полем, можно добиться ярко выраженного модулирующего эффекта.

Слабым местом данного модулятора является ограничение по поляризации модулируемого сигнала. Возбудить плазмонную моду в гибридном волноводе можно лишь светом, поляризованным перпендикулярно границе раздела металл–диэлектрик. Поскольку слои модулирующего сэндвича напыляются горизонтально, модулятор работает лишь с вертикально поляризованным светом. С другой стороны, наиболее удобным способом ввода света в волновод остаются дифракционные решетки, и наилучшие результаты (эффективность ввода $\sim 100\%$) достигнуты сейчас для горизонтально поляризованного света [7]. В настоящей работе мы демонстрируем, как, проведя лишь элементарное литографическое структурирование модулирующего сэндвича, можно создать компактный вращатель поляризации. При этом порядок слоев и состав материалов остаются неизменными, обеспечивая максимальную совместимость. Использование такого устройства вместе с плазмонным модулятором позволяет решить проблему поляризации.

2. Теория

В настоящей статье представлены расчеты, демонстрирующие работу плазмонного модулятора и преобразователя поляризации. При моделировании численно решаются уравнения Максвелла в пространстве частот:

$$\nabla \times \mathbf{E} = +i\omega\mu\mathbf{H}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega\epsilon\mathbf{E}, \quad (2)$$

где \mathbf{E} и \mathbf{H} – векторы напряженности электрического и магнитного полей; ω – частота света; μ и ϵ – магнитная (предполагается равной единице) и электрическая проницаемости среды. Последняя, очевидно, является функцией координат и частоты, т.е. $\epsilon = \epsilon(x, y, z, \omega)$, и уникальна для каждого из используемых материалов.

Модель диэлектрической проницаемости проводящих материалов (в нашем случае это золото, легированный кремний и ИТО) дается формулой Друде

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} + i \frac{\gamma\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)}, \quad (3)$$

где ϵ_∞ – асимптотическое значение диэлектрической проницаемости при больших частотах; γ – коэффициент затухания, являющийся функцией мобильности носителей заряда; ω_p – плазменная частота. Последняя зависит от плотности заряда n_c , а также от заряда электрона e и его эффективной массы m^* и выражается формулой

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_c e^2}{\epsilon_0 m^*}}. \quad (4)$$

Легко заметить, что действительная часть диэлектрической проницаемости обращается в нуль, когда концентрация электронов

$$n_{\text{enz}} = \frac{m^*}{e^2} \epsilon_\infty \epsilon_0 (\omega^2 + \gamma^2). \quad (5)$$

В таком материале, как ИТО, при длине волны света $\lambda = 1550$ нм обнуление диэлектрической проницаемости наступает при концентрации электронов $n_{\text{enz}} = 6.5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Учитывая, что исходный уровень легирования ИТО может лежать в диапазоне $10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$ [8], эффект обнуления оказывается применимым для переключения состояния модулятора.

Уравнения (1) и (2) решаются численно в 3D пространстве. Для построения моделей используются большие неоднородные сетки и, как следствие, требуется большое количество оперативной памяти (~400 Гб). Для расчетов, представленных в статье, использовался кластер Pardus (Сколтех, Москва). Моделирование проведено в коммерческом пакете Comsol Multiphysics с использованием дополнительного модуля Wave Optics. Необходимые материальные параметры получены из модуля Material Library, а также из литературы [9, 10].

3. Результаты расчетов и их обсуждение

На рис.1,а представлено поперечное сечение плазмонного модулятора, а на рис.1,б и в – поперечное сечение и полная 3D модель преобразователя поляризации. В обо-

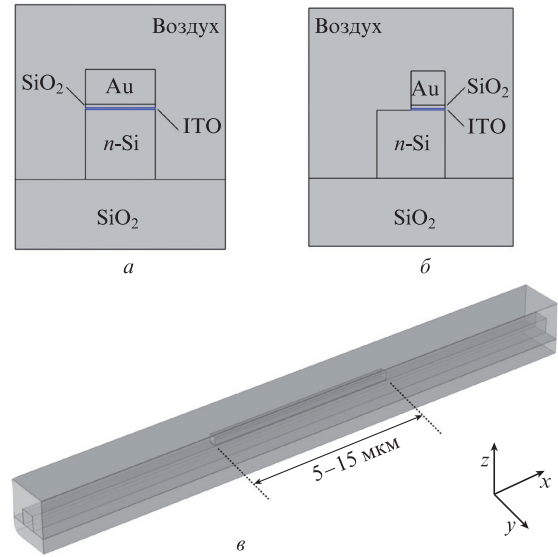


Рис.1. Геометрия моделируемых устройств: поперечное сечение плазмонного модулятора (а), поперечное сечение преобразователя поляризации (б) и трехмерная модель преобразователя поляризации (в).

их устройствах на кремниевый волновод сечением 400×400 нм наносится сэндвич, состоящий из слоев ИТО (10 нм), SiO_2 (20 нм) и Au (200 нм). Различие состоит в том, что в случае вращателя поляризации сэндвич покрывает не всю ширину волновода, а только половину (рис.1,б). Продольный размер сэндвича в наших расчетах варьировался от 5 до 15 мкм. Модулирующий СВЧ сигнал электронно-оптического модулятора подается на золотой контакт. Работа вращателя предполагает отсутствие напряжения, и золото играет лишь роль плазмонного материала, образующего гибридный волновод (хотя для полноты картины случай с ненулевым напряжением на контакте ротатора также рассмотрен ниже). Одинаковые последовательности и толщины слоев модулятора и вращателя являются важной конструктивной особенностью, обеспечивающей высокую совместимость обоих устройств и простоту изготовления, сводящуюся к литографическому структурированию напыленных слоев. В настоящей статье, в соответствии с рис.1, под горизонтальной поляризацией света мы подразумеваем направление, параллельное плоскости, на которой лежит волновод, и перпендикулярное самому волноводу (ось y), а вертикальной поляризации соответствует направление, перпендикулярное как плоскости, так и волноводу (ось z).

Результаты трехмерного моделирования прохождения света через модулятор представлены на рис.2, где показан квадрат электрического поля в вертикальном сечении устройства. В состоянии модулятора «вкл.» (рис.2,а) напряжение на золотом контакте отсутствует. Поскольку изначальный уровень легирования ИТО в наших расчетах составляет 10^{20} см^{-3} , материал в большой степени ведет себя как диэлектрик, проявляя лишь незначительные проводящие свойства. В этом случае волноводная мода, попадая в модулятор, конвертируется в гибридную плазмонную моду, а затем на выходе конвертируется обратно. Ослабление при этом обусловлено лишь оптическими потерями, которые составляют 24%. Поскольку гибридные моды возникают парами, в области действия модулирующего сэндвича наблюдаются биения. Свет в данном примере поляризован вертикально. Горизонтально поля-

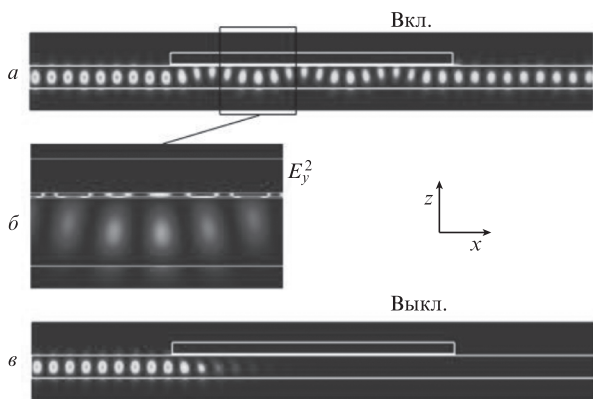


Рис.2. Результаты моделирования прохождения света через плазмонный модулятор в состояниях «вкл.» (а) и «выкл.» (в). Концентрации носителей заряда в активном слое ИТО составляют 10^{20} и $7.5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ соответственно (максимум резонанса в тонком слое ИТО немного смещается относительно своего объемного значения, полученного в разд.2). Свет поляризован вертикально (вдоль оси z , перпендикулярно модулирующему сэндвичу). В состоянии «вкл.» оптические потери составляют 24%. На рис.б крупным планом показано распределение поля плазмонной моды в сэндвиче (состояние «вкл.»).

ризованный сигнал проходит через модулятор практически без изменения.

При включении напряжения на слой ИТО начинает действовать электрическое поле, которое приводит к формированию слоя, обогащенного зарядами. При достижении критической концентрации n_{enz} в ИТО происходит обнуление диэлектрической проницаемости. Поскольку геометрия устройства такова, что активный слой находится в области максимума интенсивности плазмонной моды, он эффективно взаимодействует с проходящим светом. Требование непрерывности перпендикулярной проекции вектора электрической индукции на границе ИТО–диэлектрик приводит к тому, что интенсивность поля внутри слоя ИТО значительно возрастает. Поскольку при увеличении концентрации электронов в активном слое также значительно растет мнимая часть диэлектрической проницаемости, слой ИТО эффективно подавляет «захваченное» поле. Распределение поля при включенном напряжении на контакте показано на рис.2,в. Оптические потери в этом случае близки к 100%, и модулятор находится в состоянии «выкл.». На рис.2,б крупным планом показано распределение поля в плазмонной моде в состоянии модулятора «вкл.» (с максимальным пропусканием). Видно, что в гибридной моде максимум поля находится в плазмонной компоненте.

Результаты моделирования прохождения света через преобразователь поляризации представлены на рис.3. Входящая волноводная мода в данном примере поляризована горизонтально (в противовес предыдущему примеру), что соответствует свету, введенному через дифракционную решетку. На рис.3,а и в представлена горизонтальная проекция поля, а на рис.3,б и г – появляющаяся вертикальная проекция. Как и в случае модулятора, показано продольное вертикальное сечение устройства. На рис.3,а и б представлена картина поля в отсутствие напряжения на золотом контакте; видно, как необходимая для модуляции вертикальная проекция появляется, исчезает и затем снова появляется на выходе вращателя. Длина устройства, которая в данном примере составляет 15 мкм, оказывается достаточной, чтобы вместить 1.5 периода бие-

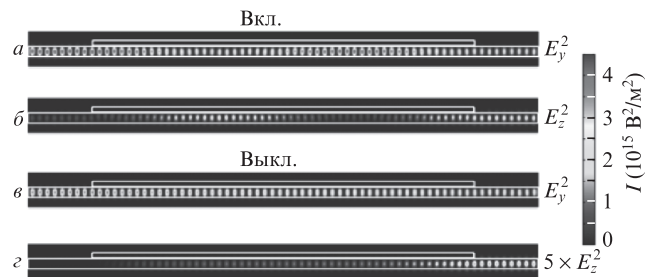


Рис.3. Распределения поля во вращателе поляризации в случаях без напряжения на золотом контакте (а, б) и при включенном напряжении (в, г) (по аналогии с модулятором последний случай обозначается «выкл.», что отвечает подавлению оптического сигнала). Показаны горизонтальная y -составляющая (а, в) и вертикальная z -составляющая поля (б, г). На рис.г сигнал увеличен в пять раз для лучшей визуализации.

ний. Очевидно, что при таком осциллирующем характере преобразования мод длина устройства будет непосредственно влиять на эффективность конверсии. В ротаторе, показанном на рис.3, около 50% интенсивности моды с изначально горизонтальной поляризацией переводится в вертикально поляризованную моду. Все происходящее имеет прямые аналогии с процессами в направленных ответвителях [11]. Анализ конверсии мод усложняется тем, что теория связанных волн, хорошо развитая для ответвителей, плохо работает в случае гибридных плазмонных волноводов [5]. Это объясняется сильным взаимодействием между плазмонной и волноводной модами и, как следствие, отсутствием малого параметра для построения приближений. Создание такой теории является важной задачей для будущих работ. С качественной точки зрения асимметричный модулирующий сэндвич (нанесенный не на всю ширину волновода) обеспечивает связь между не взаимодействующими иначе модами с горизонтальной и вертикальной поляризациями. Опосредованное взаимодействие мод приводит к показанным на рис.3 осцилляциям. На языке модового анализа и для других плазмонных материалов эффект описан в работе [12].

При включении напряжения картина преобразования мод меняется (рис.3,в и г), и на выходе в вертикальную моду переходит только 20% интенсивности исходного сигнала (z -компонента поля на рис.3,г увеличена в пять раз для лучшей визуализации). Прежде всего это связано с активизацией слоя ИТО, который начинает поглощать преобразуемую моду. Активный слой также влияет на характер связи между модами, что отражается на длине биеений (по-видимому, она становится значительно больше длины устройства). Зависимость поведения преобразователя поляризации от напряжения на контакте намекает на возможность объединения модулятора и вращателя в одно устройство, работающее с излучением произвольной поляризации. Однако в рассмотренной геометрии характеристики такого модулятора (в частности, коэффициент экстинкции) остаются достаточно слабыми. По этой причине на данном этапе уместнее говорить о двух самостоятельных устройствах – вращателе поляризации и электронно-оптическом модуляторе, сходными по строению сэндвича, но различающимися геометрией. Создание плазмонного модулятора, работающего с излучением произвольной поляризации, может стать темой будущих работ в этом направлении.

В заключение отметим, что в настоящей работе представлено простое решение проблемы поляризации плаз-

монных модуляторов. Предложена модель преобразователя поляризации, конструктивно сходного с самим модулятором, что упрощает его практическую реализацию. В работе выполнены трудоемкие 3D расчеты, подтверждающие предложенную концепцию и дающие ее количественную оценку.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект RFMEFI58117X0026).

1. Pshenichnyuk I.A., Cizek M. *Phys. Rev. B*, **83**, 165446 (2011).
2. Pshenichnyuk I.A., Coto P.B., Leitherer S., Thoss M. *J. Phys. Chem. Lett.*, **4**, 809 (2013).
3. Liu K., Ye C.R., Khan S., Sorger V.J. *Laser Photon. Rev.*, **9**, 172 (2015).
4. Sorger V.J., Lanzillotti-Kimura N.D., Ma R.M., Zhang X. *Nanophotonics*, **1**, 17 (2012).
5. Alam M.Z., Aitchison J.S., Mojahedi M. *Laser Photon. Rev.*, **8**, 394 (2014).
6. Alam M.Z., De Leon I., Boyd R.W. *Science*, **352**, 795 (2016).
7. Michaels A., Yablonovich E. *Opt. Express*, **26**, 4766 (2018).
8. Kulkarni A.K., Knickerbocker S.A. *J. Vac. Sci. Technol.*, **14**, 1709 (1996).
9. Melikyan A., Lindenmann N., Walheim S., Leufke P.M., Ulrich S., Ye J., Freude W. *Opt. Express*, **19**, 8855 (2011).
10. Sinatkas G., Ptilakis A., Zografopoulos D.C., Beccherelli R., Kriezis E.E. *J. Appl. Phys.*, **121**, 023109 (2017).
11. Harris N.C. Programmable nanophotonics for quantum information processing and artificial intelligence. PhD (MIT, USA, 2017).
12. Kim S., Qi M. *Opt. Express*, **23**, 9968 (2015).