

07;12

Плазмон-поляритонный поляризатор на поверхности канальных оптических одномодовых волноводов в ниобате лития

© И.В. Ильичев, Н.В. Тогузов, А.В. Шамрай

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: ntw_05@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 апреля 2009 г.

Были проведены детальные экспериментальные исследования плазмон-поляритонных поляризаторов на поверхности канальных одномодовых волноводов в ниобате лития. Разработана оригинальная технология, позволяющая изготавливать поляризатор в одном технологическом цикле. В качестве материалов для изготовления поляризаторов было предложено использовать металлическую пленку алюминия с диэлектрическим буферным слоем Al_2O_3 . Для одномодовых волноводов, согласованных со стандартным оптическим волокном (SMF-28), определена оптимальная конфигурация поляризатора. Изготовлен опытный образец поляризатора с коэффициентом выделения поляризации 19 dB/mm и вносимыми потерями 0.1 dB/mm.

PACS: 42.82.Bq

В практических применениях, связанных с высокочувствительными интерференционными волоконно-оптическими датчиками [1], используется линейно поляризованный свет с высокой степенью выделения заданной поляризации. Лучшие характеристики с точки зрения как коэффициента выделения поляризации, так и оптических потерь были получены на волноводных поляризаторах, принцип работы которых основан на резонансном возбуждении плазмон-поляритонной волны в тонкой металлической пленке на поверхности волновода [2]. В работе [3] было показано, что при подборе оптимальной толщины буферного диэлектрического слоя (Si_3N_4), введенного между металлической пленкой и поверхностью волновода, а также толщины металлической пленки (Au или Ag) можно достичь беспрецедентно высоких коэффициентов выделения поляризации (более 100 dB/cm) на длине волны 633 nm. Однако полученные в работе [3] результаты не могут быть напрямую применены для большинства практических применений. На практике

обычно используется длина волны 1550 nm, соответствующая минимуму потерь стандартного кварцевого волокна. Кроме того, материалы металлической пленки и буферного слоя должны обеспечивать низкую стоимость и простоту технологии изготовления.

Цель данной работы — провести исследования, направленные на поиск оптимальной конфигурации плазмон-поляритонного поляризатора на поверхности одномодовых канальных волноводов в кристалле ниобата лития, согласованных со стандартным волокном (SMF-28).

Оптический волновод формировался на кристаллической подложке LiNbO_3 с использованием стандартной технологии термической диффузии титана [4,5]. Были изготовлены одномодовые оптические волноводы на длину волны 1550 nm, имеющие хорошее согласование с оптическим волокном типа SMF-28 (типичная величина сквозных оптических потерь „волоконно-волоконно“ составляла 2–2.5 dB).

В качестве материалов для изготовления плазмон-поляритонного поляризатора были выбраны металлическая пленка алюминия и диэлектрический буферный слой Al_2O_3 . Данная комбинация материалов позволяет изготавливать поляризатор в одном технологическом цикле в установке вакуумного магнетронного напыления. На первом этапе на поверхности волновода формировался диэлектрический буферный слой Al_2O_3 путем реактивного распыления металлической алюминиевой мишени в атмосфере аргон–кислород. На втором этапе поверх диэлектрического буферного слоя напылялась пленка металлического алюминия в атмосфере чистого аргона. Использование одного цикла напыления обеспечивает высокую чистоту напыляемых материалов и малую погрешность толщины отдельных слоев ($\pm 5\%$). Низкая стоимость алюминия и простота изготовления делают предлагаемую технологию весьма привлекательной для массового производства.

В экспериментальных исследованиях проводились измерения коэффициента выделения поляризации на единицу длины (K) и вносимых оптических потерь поляризатора (L) при различных толщинах металлической пленки (d_m) и диэлектрического буферного слоя (d_b) (рис. 1, *a*). Экспериментальная установка состояла из полупроводникового лазера с волоконным выходом, излучающего линейно поляризованный свет, волоконного поляризационного контроллера, позволяющего выставлять заданную линейную поляризацию на входе образца и измерителя оптической мощности, измеряющего значение световой мощности на выходе образца (рис. 1, *b*). Коэффициент выделения поляризации определялся

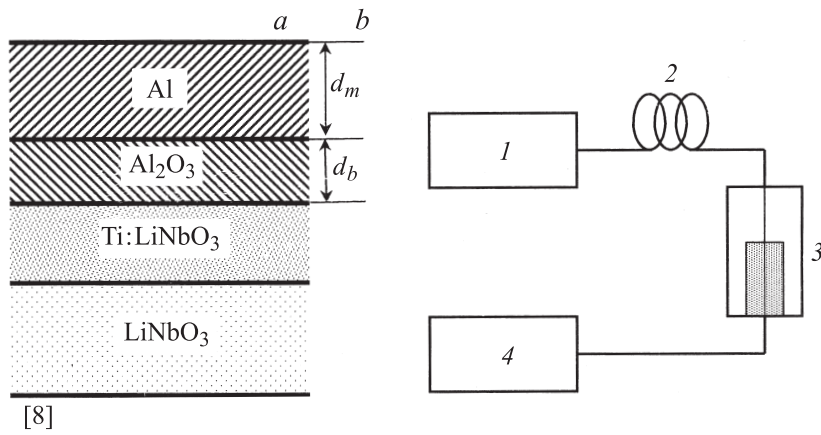


Рис. 1. *a* — структура плазмон-поляритонного поляризатора на основе металлической пленки Al и диэлектрического буферного слоя Al_2O_3 ; *b* — схема экспериментальной установки: 1 — лазер с волоконным выходом, 2 — поляризационный контроллер, 3 — каналный оптический волновод с поляризатором, 4 — измеритель оптической мощности.

как отношение значения оптической мощности на выходе образца при настройках поляризационного контроллера, соответствующих минимуму пропускания, к значению оптической мощности на выходе образца при настройке поляризационного контроллера на максимум пропускания. Потери определялись как отношение оптической мощности на выходе образца, при настройках поляризационного контроллера, соответствующих максимуму пропускания к оптической мощности на входе образца.

На рис. 2, *a* показана зависимость коэффициента выделения поляризации на единицу длины от толщины диэлектрического буферного слоя, при толщине металлической пленки алюминия, значительно превышающей толщину скин-слоя (3 nm на длине волны 1550 nm). В экспериментальных образцах толщина пленки составляла 120 nm. В этом случае можно считать, что окружающая среда не оказывает никакого влияния на распространение плазмон-поляритонной волны и ее взаимодействие с собственными модами оптического волновода. Качественные эксперименты с нанесением на поверхность металла различных диэлектрических жидкостей, подтвердили данное предположение.

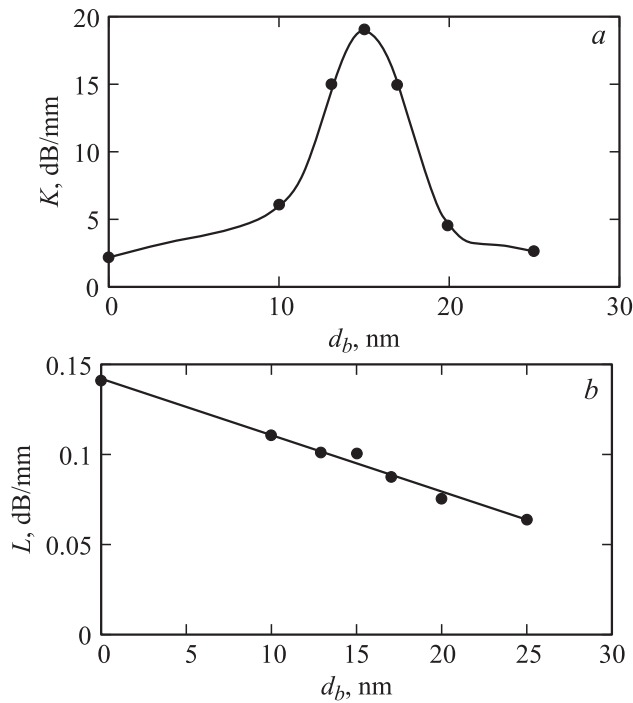


Рис. 2. *a* — зависимость коэффициента выделения поляризации на единицу длины от толщины диэлектрического буферного слоя; *b* — зависимость вносимых оптических потерь поляризатора для прохождения TE -моды от толщины диэлектрического буферного слоя. В обоих случаях толщина металлической пленки больше 100 нм; точками показаны экспериментальные данные; сплошные линии проведены для удобства восприятия.

Зависимость коэффициента выделения поляризации на единицу длины имеет максимум (19 dB/mm), который соответствует оптимальной толщине диэлектрического буферного слоя Al_2O_3 ($d_b = 15$ nm). При данной толщине обеспечивается эффективная резонансная связь TM -моды с поверхностными плазмонами в металлической пленке, которая достигается за счет хорошего согласования фазовой скорости TM -моды в оптическом волноводе с фазовой скоростью плазмон-поляритонной волны, распространяющейся вдоль границы металл–диэлектрик.

Рис. 2, *b* показывает зависимость оптических потерь поляризатора для прохождения TE -моды.

Граничные условия для TE -моды таковы, что она не проникает в металлическую пленку и не взаимодействует с плазмон-поляритонной волной. Поэтому теоретически TE -мода не должна испытывать дополнительных потерь, вызванных поляризатором, при распространении по волноводу [6]. Однако металлический слой вызывает искажение формы профиля интенсивности TE -моды (максимум интенсивности смещается в глубь подложки), что приводит к возникновению потерь, связанных с рассогласованием мод волновода. Чем толще буферный слой, тем слабее искажения TE -моды, следовательно, с ростом толщины диэлектрического буферного слоя происходит уменьшение потерь для TE -моды, что и подтвердили проведенные экспериментальные исследования.

Дополнительно нами были проведены исследования зависимости характеристик плазмон-поляритонного поляризатора от толщины металлической пленки. Измерения зависимости выделения поляризации и потерь на прохождение проводились при толщине диэлектрического буферного слоя $d_b = 15$ nm, являющейся оптимальной для толщины металлической пленки более 100 nm.

Из рис. 3, *a* видно, что при увеличении толщины металлической пленки происходит монотонное увеличение коэффициента выделения поляризации, а при толщинах больше 100 nm он приближается к своему предельному значению и практически не изменяется с увеличением толщины. Поэтому область значений толщины металлической пленки > 100 nm мало восприимчива к погрешностям в толщине напыленного металла.

В области малой толщины металлической пленки (сопоставимой с толщиной скин-слоя) коэффициент выделения поляризации резко падает при уменьшении толщины металла. Кроме того, при данных толщинах плазмон-поляритонная волна начинает взаимодействовать с окружающей средой, что потенциально может быть использовано для создания поляризационно-чувствительных интегрально-оптических датчиков [7].

На рис. 3, *b* показана зависимость оптических потерь поляризатора для прохождения TE -моды от толщины металла при толщине диэлектрического буферного слоя 15 nm. Из рис. 3, *b* видно, что происходит существенный рост вносимых поляризатором оптических потерь при

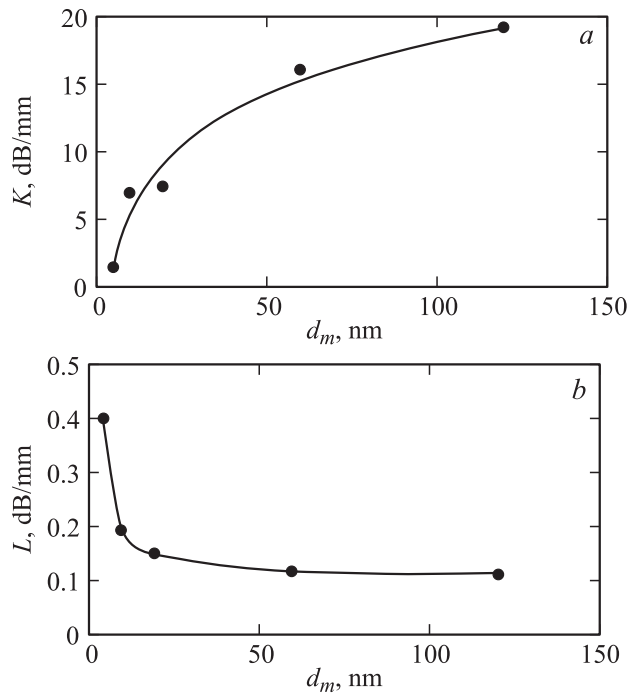


Рис. 3. *a* — зависимость коэффициента выделения поляризации на единицу длины от толщины слоя металла; *b* — зависимость вносимых оптических потерь поляризатора для прохождения *TE*-моды от толщины металла. В обоих случаях толщина диэлектрического буферного слоя равна 15 nm; точками показаны экспериментальные данные; сплошные линии проведены для удобства восприятия.

приближении толщины металлической пленки к толщине скин-слоя. Это связано с тем, что при малых толщинах металлической пленки *TE*-мода начинает проникать в металл и эффективно поглощается в нем. Поэтому при создании поляризационно-чувствительных интегрально-оптических датчиков, с целью получения максимальной чувствительности, необходимо выбирать некий компромисс, между эффективным взаимодействием с внешней средой и малыми оптическими потерями.

Таким образом, проведены детальные экспериментальные исследования плазмон-поляритонных поляризаторов на поверхности канальных

одномодовых волноводов в ниобате лития. В качестве материалов для изготовления поляризаторов было предложено использовать металлическую пленку алюминия с диэлектрическим буферным слоем Al_2O_3 . Была разработана оригинальная технология, позволяющая изготавливать поляризатор в одном технологическом цикле. Были определены оптимальные технологические параметры для изготовления поляризатора на одномодовых оптических волноводах для длины волны света 1550 nm, согласованных со стандартным оптическим волокном SMF-28. При толщине металлической пленки алюминия более 100 nm и толщине диэлектрического буферного слоя Al_2O_3 15 nm коэффициент выделения поляризации на единицу длины составляет 19 dB/mm, а вносимые поляризатором оптические потери 0.1 dB/mm, что находится на уровне лучших мировых аналогов. Поляризатор данного типа был использован при разработке многофункциональной интегрально-оптической схемы для волоконно-оптического гироскопа высокого класса точности (0.01 deg/h), показал свою эффективность. Кроме того, в работе были исследованы конфигурации плазмон-поляритонных поляризаторов с толщиной металлической пленки, близкой к толщине скин-слоя, которые потенциально могут быть использованы для создания поляризационно-чувствительных интегрально-оптических датчиков.

Работа была частично профинансирована из средств программы фундаментальных исследований президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] *Giallorenzi T.G., Buraco J.A. et al. // IEEE J. Quantum Electron. 1981. V. 18. P. 626–661.*
- [2] *Burke J.J., Stegeman G.I., Tamir T. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. P. 5186–5201.*
- [3] *Eberhard D., Bulow H. // Proc. Third European Conf. on Integrated Optics. Berlin, 1985 / Ed. by H.P. Nolting and R. Ulrich. Berlin: Springer Verlag, 1985. P. 202; Proc. Third European Conf. on Integrated Optics. Berlin. 1985. P. 48 / Ed. by H.P. Nolting, R. Ulrich (Springer Series in Optical Science).*
- [4] *Kaminow I.P., Stulz L.W., Tumer E.H. // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 27. P. 555–557.*
- [5] *Kip D., Hukriede J. // Appl. Phys. 2002. V. 86. P. 111–130.*
- [6] *Suematsu Y., Hakuta M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1972. V. 21. P. 291–293.*
- [7] *Czyroky J., Abdelmalek F. // Opt. Quantum Electron. 1999. V. 31. P. 927–941.*