

09.5

Перераспределение оптической мощности в плечах волноводного Y-разветвителя при локальной внешней засветке подложки ниобата лития

© М.В. Парфенов^{1,2}, А.В. Тронев^{1,3}, И.В. Ильичев¹, П.М. Агрозов¹, А.В. Шамрай¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mvparfenov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 16 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 16 сентября 2019 г.

Принято к публикации 26 сентября 2019 г.

Исследована оптическая перестройка коэффициента деления мощности в интегрально-оптическом Y-разветвителе, изготовленном на подложке фоторефрактивного кристалла ниобата лития (LiNbO_3). Определены области Y-разветвителя, наиболее чувствительные к локальной внешней засветке. Экспериментально продемонстрирована перестройка коэффициента деления на 2%, что может быть эффективно использовано для повышения контраста модуляции в модуляторах Маха–Цендера.

Ключевые слова: интегральная оптика, фоторефрактивный эффект, оптический модулятор, коэффициент контраста, Y-разветвитель.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48855.18040

Волноводные делители оптической мощности являются одними из базовых элементов интегральной оптики [1], а их характеристики во многом определяют параметры интегрально-оптических устройств, в состав которых они входят. Одно из наиболее широко используемых интегрально-оптических устройств — модулятор Маха–Цендера [2], где делители оптической мощности применяются для деления между плечами интерферометра Маха–Цендера и последующего сведения оптических волн вместе. В идеальном случае, если оптические волны, интерферирующие на выходе модулятора, имеют одинаковые амплитуды, контраст модуляции интенсивности стремится к бесконечности [3]. В реальных модуляторах такого типа значение коэффициента контраста лежит в пределах 20–30 dB и определяется дефектами, возникающими при изготовлении волноводных элементов интегрально-оптического интерферометра. В то же время для современных практических приложений, связанных с распределением квантовых ключей [4] и опросом распределенных систем прецизионных волоконно-оптических датчиков [5], контраст модуляции должен быть на уровне 50 dB и выше.

Одним из предложенных авторами методов повышения характеристик интегрально-оптических схем, изготовленных на подложке ниобата лития (LiNbO_3), является внесение в их топологию компенсирующих дефектов [6]. Для этих задач можно использовать фоторефрактивный эффект, локальное возбуждение которого в подложке ниобата лития уменьшает показатель преломления на величину порядка 10^{-3} [7]. Работоспособность метода была показана на примере изменения

коэффициента деления направленного X-ответвителя [6], работа которого основана на делении амплитуды за счет связи двух близкорасположенных оптических волноводов. В модуляторах Маха–Цендера обычно используют другой вид делителя оптической мощности — Y-разветвитель. Принцип действия Y-разветвителя основан на эффекте деления волнового фронта, что делает его характеристики (в отличие от характеристик X-ответвителя) мало зависящими от длины волны света и изменения температуры. Отличаться будет и отклик на локальное изменение показателя преломления, который будет связан с возбуждением асимметричной моды.

Цель настоящей работы — провести теоретические и экспериментальные исследования фоторефрактивной перестройки коэффициента деления Y-разветвителя на подложке ниобата лития, определить наиболее чувствительные к локальному изменению показателя преломления места топологии и оценить возможное повышение контраста модуляции в интегрально-оптическом интерферометре Маха–Цендера при фоторефрактивной подстройке одного из Y-разветвителей.

Для исследований был выбран Y-разветвитель (рис. 1, а) на основе оптических волноводов, изготовленных на монокристаллической подложке ниобата лития (x-срез) методом термической диффузии титана. Такие волноводы стабильны и имеют низкие оптические потери [8]. В общем случае они поддерживают распространение двух ортогонально поляризованных групп мод: ТЕ- и ТМ-типа. Для оптимальной работы модулятора подбирают условия, при которых волноводы работают в одномодовом режиме, а при помощи интегрального

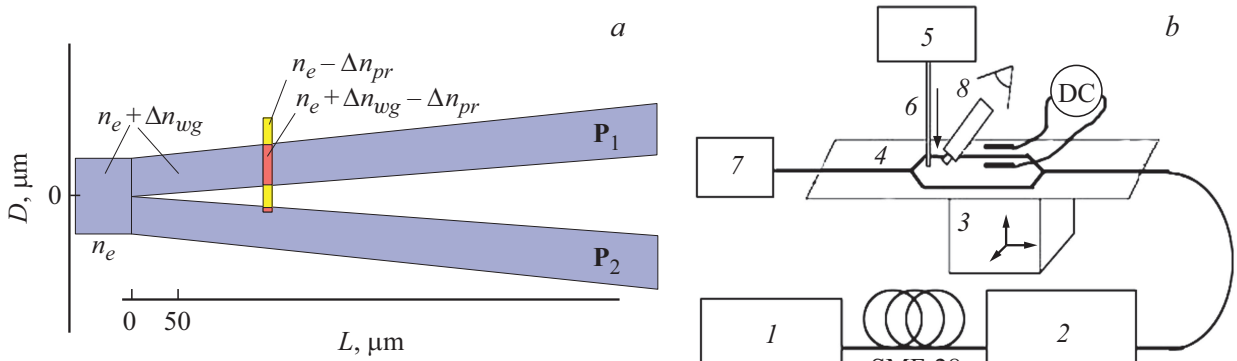


Рис. 1. *a* — схема Y -разветвителя, использованного при моделировании; *b* — экспериментальная установка: 1 — DFB-лазер ($\lambda = 1550 \text{ nm}$), 2 — контроллер поляризации, 3 — трехосевая координатная подвижка, 4 — интегрально-оптический модулятор, 5 — He-Ne-лазер ($\lambda = 633 \text{ nm}$), 6 — одномодовое оптическое волокно, 7 — фотоприемник, 8 — микроскоп.

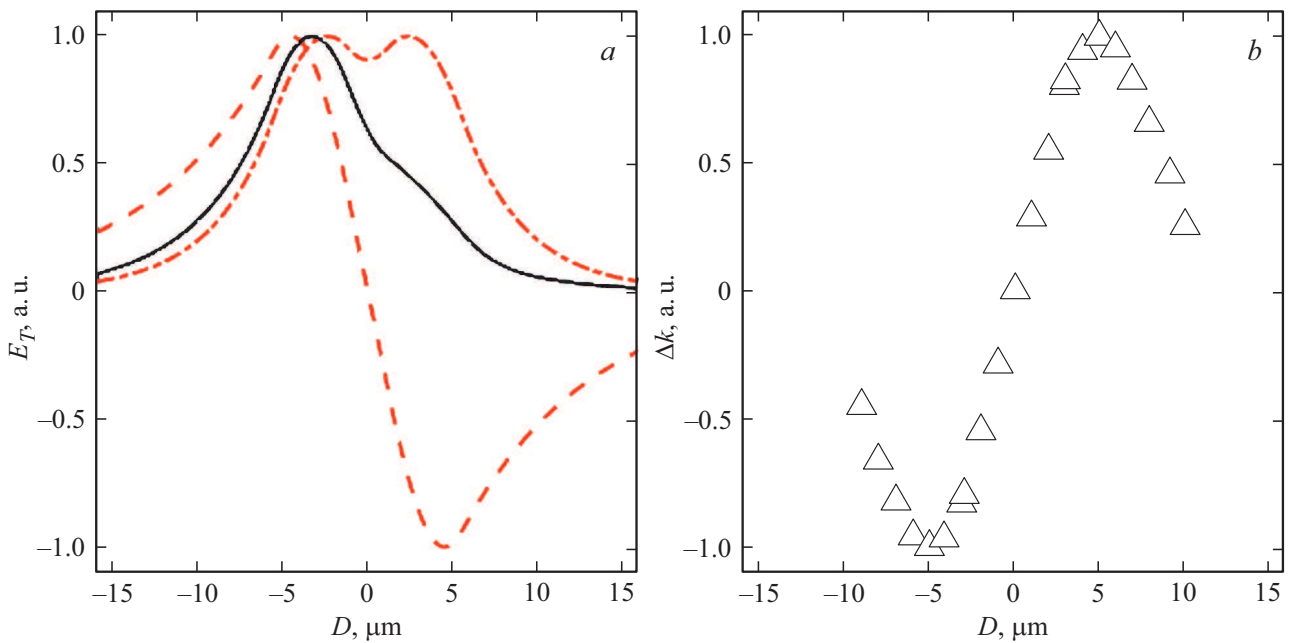


Рис. 2. *a* — распределение тангенциальной напряженности поля мод по поперечной координате (штриховая и штрихпунктирная линии соответствуют модам до засветки, сплошная линия — моде после засветки); *b* — зависимость рассчитанного изменения коэффициента деления Y -разветвителя от расположения области фоторефрактивной засветки по поперечной координате. Обе части рисунка соответствуют продольной координате $L = 650 \text{ nm}$.

поляризатора оставляют только ТЕ-моду [9], чувствительную к распределению необыкновенного показателя преломления.

Методом ВРМ (beam propagation method) было проведено численное моделирование и получены теоретические зависимости коэффициента деления мощности от расположения области локального уменьшения показателя преломления. Для упрощения моделирование проводилось для оптических волноводов со ступенчатым профилем показателя преломления и приращением относительно подложки $\Delta n_{wg} = 2 \cdot 10^{-3}$. Область локальной внешней засветки представлялась в виде квадрат-

ного пятна размером $10 \times 10 \mu\text{m}$, вызывающего за счет фоторефрактивного эффекта равномерное уменьшение показателя преломления на $\Delta n_{pr} = 1 \cdot 10^{-3}$ на всю толщину подложки. Положение пятна относительно топологии Y -разветвителя менялось по обеим координатам в плоскости подложки.

Основной параметр Y -разветвителя — коэффициент деления — высчитывался как

$$k = \frac{P_2}{P_1 + P_2}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 — значения мощности двух разнесенных несвязанных волноводов на выходе Y -разветвителя.

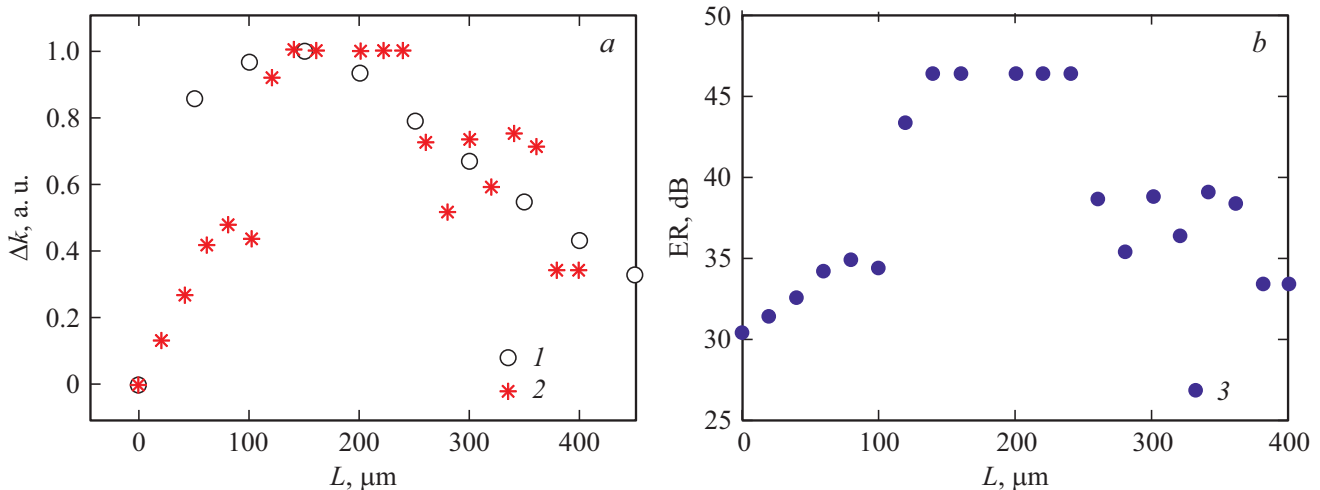


Рис. 3. Зависимость изменения коэффициента деления Y -разветвителя (a) и коэффициента контраста (b) от расположения области фоторефрактивной засветки по продольной координате. 1 — результаты моделирования, 2 и 3 — результаты эксперимента.

Результаты расчета показывают, что локальное уменьшение показателя преломления в одном из плеч Y -разветвителя приводит к уменьшению мощности в этом плече на выходе (рис. 2, b и 3, a). Оптимальное положение центра пятна локального изменения показателя преломления относительно топологии Y -разветвителя соответствует максимальной деформации профиля собственных мод (симметричной и асимметричной) в области ветвления. В продольном направлении относительно направления распространения света это точка максимального взаимодействия между плечами волноводов. В поперечном направлении она соответствует максимумам полей волноводных мод (рис. 2).

Экспериментальная перестройка коэффициента деления Y -разветвителя была реализована на установке, представленной на рис. 1, b . Локальное облучение заданной области Y -разветвителя обеспечивалось при помощи оптического зонда, выполненного на основе телекоммуникационного оптического волокна типа SMF-28, обеспечивавшего облучение поверхности кристалла светом от He–Ne-лазера ($\lambda = 633$ nm, мощность $P = 2$ mW, площадь пятна ~ 10 μm^2). Время экспозиции $t_{exp} \approx 300$ s соответствовало достижению стационарного значения фоторефрактивного изменения показателя преломления. Позиционирование зонда осуществлялось при помощи трехкоординатной микроподвижки.

Образец представлял собой чип интегрально-оптического модулятора Маха–Цендера с интерферометром, образованным двумя Y -разветвителями. Осуществлялась фоторефрактивная подстройка разветвителя на входе модулятора. После локальной засветки проводились измерения коэффициента контраста модулятора. После проведения измерений образец возвращался к исходному состоянию при помощи мощного однородного ультрафиолетового излучения. Полученные экспериментальные результаты были пересчитаны в изменение

коэффициента деления Y -разветвителя по формулам

$$k = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2}}{2},$$

$$A = 10^{ER/10},$$

где ER — значения коэффициента контраста модуляции (в dB). При этом для простоты предполагалось, что неидеальность интерферометра определялась исключительно неточностью деления мощности во входном Y -разветвителе.

Полученные экспериментальные результаты представлены вместе с результатом моделирования на рис. 3. Несмотря на ряд сделанных допущений, наблюдается хорошее согласие результатов теоретического анализа с экспериментальными данными. Это показывает, что предложенная упрощенная модель адекватно описывает эффект фоторефрактивного управления Y -разветвителем. При этом область максимальной чувствительности Y -разветвителя приходится именно на область вблизи точки ветвления входного волновода на два, что соответствует качественным предположениям, сделанным ранее.

При выбранных параметрах перестройка коэффициента деления возможна в пределах до 1–2%. Этого оказалось достаточно для повышения коэффициента контраста интегрально-оптического модулятора на его основе на существенные значения (10–17 dB при изначальном коэффициенте контраста 30 dB).

Возможность производить перестройку коэффициента деления для уже изготовленных модуляторов с достижением значительного увеличения коэффициента контраста модуляции, отсутствие потребности в сложном оборудовании для выполнения процедуры и возможность стирать эффект в случае неудовлетворительного результата [6,10] являются явными преимуществами

метода и могут широко применяться для оптимизации характеристик модуляторов на основе ниобата лития.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00511).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Alferness R.* // IEEE J. Quant. Electron. 1981. V. 17. N 6. P. 946–959.
- [2] *Петров В.М., Шамрай А.В.* Интерференция и дифракция для информационной фотоники. СПб.: Лань, 2019. 460 с.
- [3] *Chen A., Murphy E.J.* Broadband optical modulators: science, technology, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2012. 532 p.
- [4] *Wang X., Liu J., Li X., Li Y.* // IEEE J. Quant. Electron. 2015. V. 51. N 6. P. 5200206 (1–6).
- [5] *Bai Q., Wang Q., Wang D., Wang Y., Gao Y., Zhang H., Zhang M., Jin B.* // Sensors (Basel). 2019. V. 19. N 8. P. 1862.
- [6] *Парфенов М.В., Тронеv А.В., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Шамрай А.В.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 5. С. 3–5.
- [7] *Chen F.S.* // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. N 8. P. 3389–3396.
- [8] *Bazzan M., Sada C.* // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2. N 4. P. 040603.
- [9] *Ильичев И.В., Тогузов Н.В., Шамрай А.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 17. С. 97–103.
- [10] *Grachev A.I., Chamrai A.V., Petrov M.P.* // OSA TOPS. 2011. V. 62. P. 203–211.