

09

Фоторефрактивная подстройка коэффициента деления интегрально-оптического направленного X-ответвителя на подложке ниобата лития

© М.В. Парфенов^{1,2}, А.В. Тронев^{1,3}, И.В. Ильичев¹, П.М. Агрузов¹, 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, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mvparfenov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 5 декабря 2018 г.

Принято к публикации 6 декабря 2018 г.

Исследована возможность подстройки коэффициента деления мощности в интегрально-оптическом направленном ответвителе (X-ответвителе) при возбуждении локального фоторефрактивного отклика в материале подложки (LiNbO₃). Проведено численное моделирование работы X-ответвителя, определены его участки, обладающие максимальной чувствительностью к фоторефракции. Получено соответствие расчетных данных и эксперимента. Максимальное изменение коэффициента деления в разветвителе составило величину порядка 1–2%. Фоторефрактивная подстройка коэффициента использована для повышения контраста модулятора Маха–Цендера до уровня 47 dB.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.05.47386.17627

Ниобат лития (LiNbO₃) является одним из основных материалов интегральной оптики. Благодаря сильно выраженному электрооптическому эффекту Поккельса, а также хорошо отработанным технологиям изготовления в ниобате лития оптических волноводов с низкими потерями он широко применяется для производства оптических модуляторов [1,2]. В наиболее распространенной конфигурации такие модуляторы представляют собой интерферометры Маха–Цендера, в которых для деления мощности используются X-ответвители (направленные ответвители на основе связанных волноводов) или Y-разветвители (делители волнового фронта в волноводном исполнении). Из-за неточностей, имеющих место при изготовлении этих волноводных элементов (например, неточностей фотолитографии), у модуляторов на их основе есть разброс коэффициентов контраста в пределах 20–30 dB. Для многих практических задач этот разброс несуществен, но в ряде приложений требуются модуляторы с очень высоким коэффициентом контраста, например в некоторых видах оптических датчиков или системах квантовой криптографии [3,4].

Увеличить точность изготовления интегрально-оптических элементов затруднительно. В связи с этим вызывает интерес исследование механизмов подстройки коэффициента деления в уже изготовленных делителях мощности. Известно, что ниобат лития является фоторефрактивным материалом, у которого оптическое излучение высокой плотности мощности приводит к уменьшению показателя преломления в области засветки. В ниобате лития оно может достигать значений до $\Delta n_{pr} \sim 10^{-3}$ [5]. В то же время увеличение показателя

преломления относительно показателя подложки у волноводов на подложке ниобата лития имеет те же значения по порядку величины ($\Delta n_{wg} \sim 10^{-3}$) [6,7]. Исходя из этого можно предполагать, что фоторефрактивная коррекция волноводных элементов на подложке ниобата лития возможна. Задача настоящей работы заключается в проверке этого предположения на примере подстройки коэффициента деления X-ответвителя, а также в разработке экспериментальных методов для ее реализации.

Было проведено численное моделирование с целью определить участки интегрально-оптического делителя мощности, чувствительные к фоторефрактивной коррекции. Была построена модель X-ответвителя (рис. 1, а), конфигурация которого при идеальной точности изготовления должна обеспечивать деление оптической мощности в соотношении 50:50 на второй перекачке. С целью уменьшения вычислительной сложности была рассмотрена двумерная система с изотропным показателем преломления подложки, градиентные волноводы были заменены эквивалентными ступенчатыми волноводами с увеличением показателя преломления $\Delta n_{wg} = 0.002$ и шириной $8 \mu\text{m}$. Участок локального фоторефрактивного изменения показателя преломления был представлен прямоугольной областью размером $10 \times 10 \mu\text{m}$ с равномерным уменьшением показателя преломления на $\Delta n_{pr} = -0.001$. Ввиду больших размеров интегрально-оптического элемента (много больших оптической длины волны) численные расчеты выполнялись методом BPM (beam propagation method) в программном пакете OptiBPM. Анализ проводился для фундаментальной TE-моды оптического волновода, ли-

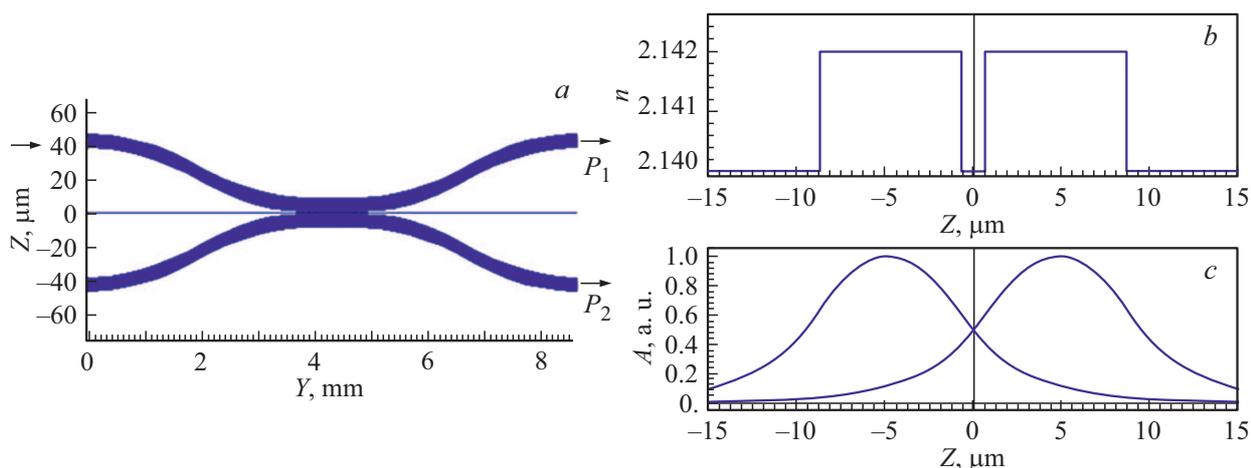


Рис. 1. Геометрия X-ответвителя (a), профиль показателя преломления (b) и распределение нормированных амплитуд оптических мод волноводов (c) в центральном сечении X-ответвителя.

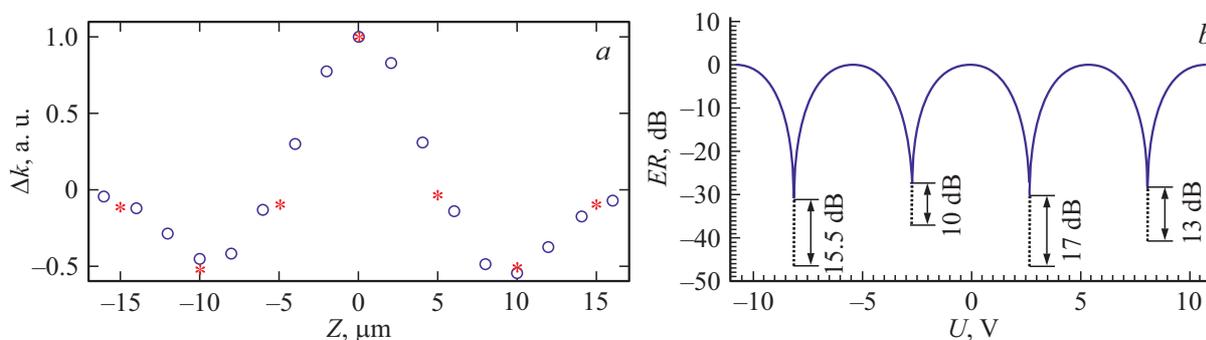


Рис. 2. a — зависимость изменения коэффициента деления X-ответвителя от расположения области фоторефрактивной засветки (звездочками отмечены экспериментальные результаты, кружками — результаты расчета); b — зависимость коэффициента контраста модулятора от напряжения на электродах до (сплошная) и после (пунктирная линия) фоторефрактивной коррекции.

нейно поляризованной параллельно поверхности кристалла [8] и чувствительной к изменению необыкновенного показателя преломления кристалла ($n_e = 2.14$), на длине волны 1550 nm . Моделирование осуществлялось при различном расположении области фоторефрактивного воздействия в пределах центрального сечения X-ответвителя (рис. 1, b, c). В данном сечении происходит наиболее сильное взаимодействие соседних волноводов, и соответственно должно наблюдаться значительное влияние локального изменения показателя преломления. В ходе расчетов определялись значения оптической мощности в выходных плечах X-ответвителя, а затем по формуле

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

(где P_1, P_2 — мощности излучения в выходных плечах X-ответвителя) рассчитывалась зависимость изменения коэффициента деления от расположения области фоторефрактивной засветки. Характер зависимости приведен на рис. 2, a. Из него видно, что засветка области между волноводами приводит к уменьшению перекачки мощности между ними, а засветка с боков волноводов

приводит, наоборот, к ее увеличению. Этот эффект можно объяснить деформацией оптических мод при изменении профиля показателя преломления в области засветки. Уменьшение показателя преломления в области между волноводами разводит моды дальше друг от друга, из-за этого уменьшается их перекрытие, что приводит к уменьшению связи между ними. Если же уменьшать показатель преломления с внешней стороны одного из волноводов, то это приведет к смещению его моды к центру, в сторону другого волновода, и, как следствие, к увеличению перекрытия полей мод, т.е. к увеличению связи.

Выявленный характер зависимости был подтвержден экспериментально. Для этого была собрана установка, приведенная на рис. 3. Для локальной засветки применялся зонд на основе оптического волокна SMF-28, который подводился на расстоянии $5 \mu\text{m}$ к поверхности подложки, при этом на поверхности подложки образовывалось пятно засветки диаметром около $10 \mu\text{m}$. Для эффективного фоторефрактивного возбуждения использовалось излучение He-Ne-лазера ($\lambda = 633 \text{ nm}$, мощность $P = 2 \text{ mW}$) с временем экспозиции $t_{\text{exp}} \approx 300 \text{ s}$.

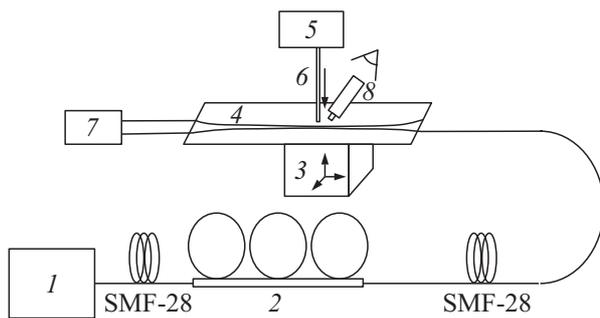


Рис. 3. Экспериментальная установка. 1 — DFB-лазер (1550 nm), 2 — поляризационный контроллер, 3 — трехосевая координатная подвижка, 4 — интегрально-оптический элемент, 5 — He–Ne-лазер (633 nm), 6 — одномодовое оптоволокно, 7 — фотоприемник, 8 — микроскоп.

Точное позиционирование области засветки относительно топологии X-ответвителя производилось при помощи трехосевой микроподвижки, на которой был закреплен образец. Для регистрации изменений коэффициента деления входы и выходы X-ответвителя были состыкованы с оптическим волокном. Для измерений использовалось излучение одночастотного полупроводникового лазера ($\lambda = 1550$ nm, мощность $P = 10$ mW). Селекция ТЕ-моды обеспечивалась интегральным поляризатором на одном входе X-ответвителя [9]. Экспериментальные результаты фоторефрактивной подстройки коэффициента деления оптической мощности приведены вместе с результатами численного моделирования на рис. 2, а. Максимальные изменения коэффициента деления составили величину порядка 1–2%.

Важно отметить, что полученный характер зависимости дает возможность производить подстройку как в одну, так и в другую сторону от исходного значения коэффициента деления. Также важно, что результат фоторефрактивного воздействия реверсивный и может быть стерт при однородной засветке образца мощным ультрафиолетовым излучением. Этим можно пользоваться и производить фоторефрактивную подстройку по-новому в случае неудовлетворительного результата. Если же результат подстройки удовлетворительный, его можно термически зафиксировать на длительный срок [10].

Для X-ответвителя, входящего в состав модулятора Маха–Цендера, была сделана оценка улучшения контраста при фоторефрактивной подстройке. Предполагается, что контраст модулятора 30 dB определяется дисбалансом мощностей, связанным с несимметричностью одного из двух X-ответвителей модулятора. Значение коэффициента контраста может быть вычислено как

$$ER = 10 \lg \left(\frac{1 + 2\sqrt{(1-k)k}}{1 - 2\sqrt{(1-k)k}} \right), \quad (2)$$

где k — коэффициент деления мощности X-ответвителя. Изменение коэффициента деления на 2% (с 47

до 49%) приведет к изменению коэффициента контраста на ~ 9.5 dB (с 30.45 до 40 dB). При необходимости большего увеличения коэффициента контраста можно производить фоторефрактивную засветку в нескольких точках X-ответвителя.

Предложенная методика была использована для экспериментальной демонстрации коррекции контраста интегрально-оптического модулятора Маха–Цендера. Экспериментально было продемонстрировано повышение контраста до уровня 47 dB (рис. 2, б). В заключение отметим, что фоторефрактивная коррекция может быть использована и для других интегрально-оптических элементов, таких как симметричный Y-разветвитель, делитель поляризации, модовый фильтр. Относительно простая техническая реализация метода делает его весьма перспективным для повышения характеристик уже изготовленных интегрально-оптических чипов на подложках ниобата лития.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-01174).

Список литературы

- [1] Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A., Murphy E.J., Lafaw D.A., Hallemeier P.F., Maack D., Attanasio D.V., Fritz D.J., McBrien G.J., Bossi D.E. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2000. V. 6. N 1. P. 69–82.
- [2] Chen A., Murphy E.J. Broadband optical modulators: science, technology, and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. P. 532.
- [3] Wang X., Liu J., Li X., Li Y. // IEEE J. Quantum Electron. 2015. V. 51. N 6. P. 1–6.
- [4] Brooks J., Moslehi B., Kim B. // J. Light. Technol. 1987. V. 5. N 7. P. 1014–1023.
- [5] Chen F.S. // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. N 8. P. 3389–3396.
- [6] Bazzan M., Sada C. // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2. N 4. P. 040603.
- [7] Parfenov M., Agruzov P., Il'ichev I., Shamray A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 741. N 1. P. 012141.
- [8] Toney J.E. Lithium niobate photonics. Norwood, MA: Artech House, 2015. 260 p.
- [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. 2001. V. 62. P. 203–211.