

09;10

## Акустические колебания в интегральных электрооптических модуляторах на основе ниобата лития

© А.В. Варламов<sup>1,2</sup>, М.Ю. Плотников<sup>3</sup>, А.С. Алейник<sup>3</sup>,  
П.М. Агрузов<sup>1</sup>, И.В. Ильичев<sup>1</sup>, А.В. Шамрай<sup>1,2,3</sup>, А.А. Власов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

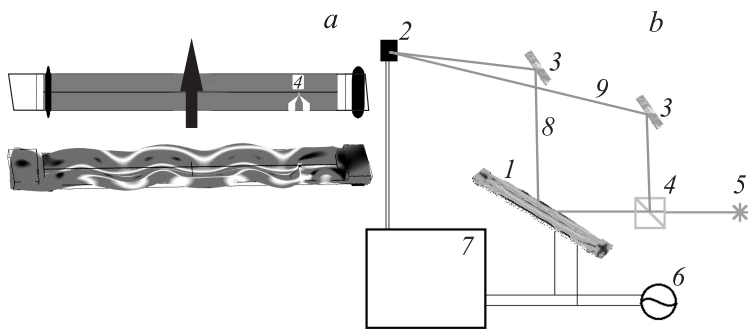
E-mail: wwa@bk.ru

Поступило в Редакцию 8 ноября 2016 г.

Исследованы процессы возбуждения и воздействия акустических колебаний на оптические сигналы в интегральных электрооптических модуляторах на подложках ниобата лития. Определены резонансные частоты возбуждения колебательных мод подложки. Показано, что акустические колебания могут вносить значительный вклад в передаточную характеристику модулятора на частотах до нескольких сотен мегагерц, что должно учитываться при использовании модуляторов на низких частотах, например, в составе волоконно-оптических датчиков.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.21.45166.16559

Интегрально-оптические модуляторы на подложках ниобата лития широко используются в оптических телекоммуникациях [1]. Возбуждение акустических колебаний и их влияние на оптические сигналы в таких системах пренебрежимо малы и лежат вне высокочастотного диапазона ( $> 10$  GHz) передаваемых цифровых сигналов. В последнее время значительно возрос интерес к волоконно-оптическим системам с аналоговыми оптическими сигналами и аналоговой модуляцией. Это системы опроса и предварительной обработки сигналов волоконно-оптических датчиков [2] и радиофотонные системы генерации, передачи и обработки аналоговых СВЧ-сигналов [3,4]. Здесь возбуждаемые электрическими управляющими сигналами поверхностные и объемные акустические колебания модулятора даже на относительно



**Рис. 1.** *a* — вид фазового модулятора (стрелка схематично показывает направление сканирования лучом, овальные области соответствуют местам приклейки модулятора) и мгновенная картина деформаций модулятора при частоте 240 kHz; *b* — измерительная установка: 1 — модулятор (также показана результирующая огибающая амплитуд колебаний его поверхности), 2 — кристалл GaAs, 3 — зеркала, 4 — светоделительный куб, 5 — лазер с длиной волны 532 nm и выходной мощностью 200 mW, 6, 7 — сопряженные генератор и селективный нановольтметр, 8, 9 — предметный и опорный лучи.

низких частотах до 1 GHz могут приводить к значительному росту шумов и возникновению паразитных сигналов-артефактов. Ниобат лития обладает целым набором эффектов [5]: электрооптическим, акустооптическим, пьезоэлектрическим, фотоупругим, а также нелинейными оптическими эффектами. Это может приводить к сложным нелинейным взаимодействиям оптического сигнала и возбуждаемых акустических колебаний.

В связи с этим существует необходимость исследования процессов возбуждения акустических колебаний и их влияния на оптические сигналы в интегральных электрооптических модуляторах на подложках из ниобата лития. Это осуществлено в настоящей работе.

В качестве объекта исследований был выбран чип фазового модулятора на основе прямого канального оптического волновода (рис. 1, *a*). Чип был изготовлен на монокристаллической пластине ( $5 \times 50 \times 1$  mm) конгруэнтного ниобата лития *x*-среза с титано-диффузным оптическим волноводом, направленным вдоль оси *y* [6]. Волновод находился в зазоре  $20 \mu\text{m}$  между золотыми планарными электродами толщи-

ной 200 nm, изготовленными на поверхности кристаллической пластины. Чип был приклеен к текстолитной пластине с использованием УФ-отверждаемого полимерного клея по двум линиям, перпендикулярным направлению оптического волновода (рис. 1, *a*).

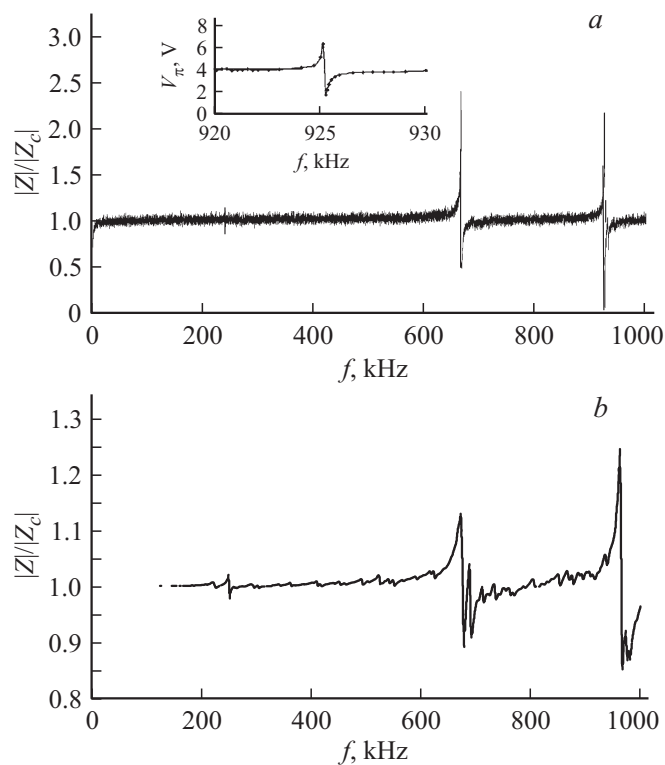
Для электрооптической модуляции на электроды подавалось переменное напряжение с амплитудой 10 V в полосе частот от 0 до 1 MHz, характерной для систем обработки сигналов волоконно-оптических датчиков [2].

Пьезоэлектрические свойства ниобата лития приводят к возникновению в межэлектродном зазоре механических деформаций, которые распространяются по тонкой пластине ниобата лития в виде акустических волн [7]. Возбуждение акустических волн и механические деформации (изменение межэлектродного зазора) приводят в свою очередь к изменению импеданса электродов.

Частотная зависимость абсолютного значения  $|Z|$  импеданса электродов, нормированного на абсолютное значение емкостной составляющей импеданса электродов  $|Z_c|$ , в исследуемом диапазоне частот имела три ярко выраженных резонансных пика: 240, 666 и 925 kHz (рис. 2, *a*). Резонансное поведение импеданса связано с резонансным возбуждением акустических колебаний пластины ниобата лития. Вблизи резонанса энергия модулирующего сигнала начинала эффективно перекачиваться в энергию акустических колебаний, что проявлялось в снижении амплитуды модулирующего напряжения на выходе генератора, имеющего ограничения по мощности.

Влияние акустических колебаний на оптический сигнал за счет фотоупругого эффекта было исследовано путем измерения частотных зависимостей полуволнового напряжения. Для преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности использовался дискриминатор на основе волоконно-оптического интерферометра Маха—Цендера. Чтобы исключить влияние изменения импеданса электродов, отдельно измерялась и контролировалась амплитуда напряжения на электродах, в особенности вблизи акустических резонансов. Измеренная частотная зависимость полуволнового напряжения  $V_\pi$  полностью совпала с частотной зависимостью импеданса электродов как по расположению резонансных пиков, так и по их форме (рис. 2, *a*).

Для получения точной картины распределения амплитуды акустических колебаний по поверхности чипа модулятора было проведено его численное моделирование с использованием метода конечных эле-



**Рис. 2.** Резонансные возбуждения акустических колебаний для фазового модулятора в диапазоне до 1 МГц: *a* — полученное путем электрического измерения нормированного импеданса электродов (также приведена частотная характеристика для полуволнового напряжения вблизи резонанса на 925 кГц); *b* — полученное с помощью компьютерного моделирования посредством расчета нормированного импеданса электродов.

ментов. Рассчитанные резонансные пики (рис. 2, *b*), соответствующие появлению картины стоячих волн поперечной деформации поверхности пластины ниобата лития, хорошо согласуются с экспериментально наблюдаемыми резонансами импеданса электродов и полуволнового напряжения модулятора.

Для экспериментального исследования пространственного распределения амплитуды колебаний был применен метод адаптивной интерферометрии с использованием фотоприемника на основе нестационарной фотоэДС [8]. Высокая чувствительность данного метода позволяет регистрировать колебания поверхности с амплитудой в несколько десятков пикометров. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, б. В качестве источника излучения в адаптивном интерферометре использовался непрерывный лазер на второй гармонике неодима (Nd:YAG, 532 nm, 200 mW). Предметный луч отражался от поверхности чипа модулятора, при этом колебания поверхности приводили к фазовой модуляции предметного луча, сдвигу интерференционной картины и возникновению нестационарной фотоэДС на адаптивном фотоприемнике, которая регистрировалась селективным нановольтметром. Амплитуда колебаний поверхности вычислялась из амплитуды сигнала нестационарной фотоэДС с использованием калибровки адаптивного интерферометра по отклику на фазовую модуляцию опорного луча при помощи ячейки Поккельса с известным полуволновым напряжением. Получение калибровочной кривой осуществлялось следующим образом. Измерялись амплитуды сигнала нестационарной фотоэДС при заданных значениях амплитуды напряжения на ячейке Поккельса. Далее по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{V\pi}{V_\pi}, \quad (1)$$

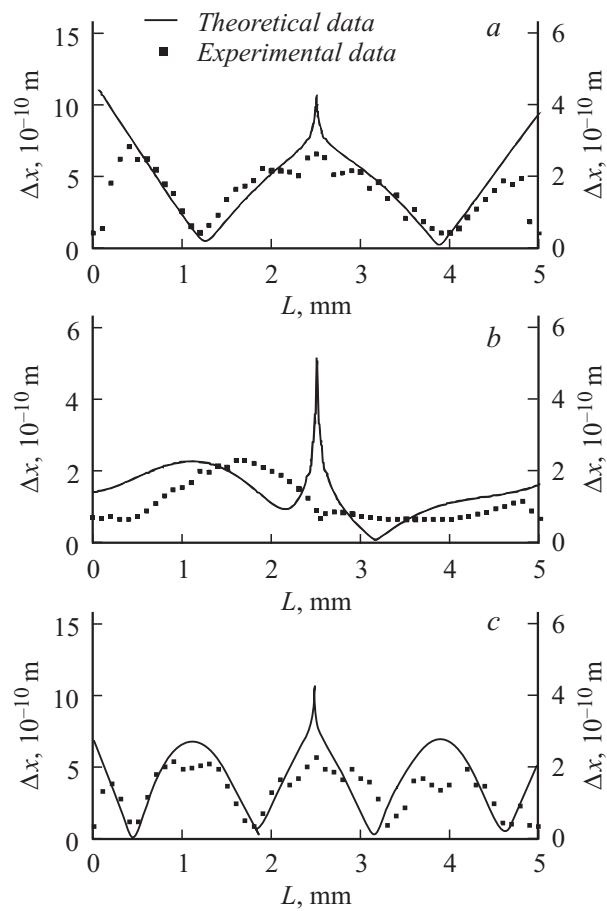
где  $V_\pi = 125 \text{ V}$  — полуволновое напряжение, вычислялся сдвиг фаз, вносимый ячейкой Поккельса при заданном напряжении  $V$ . Затем путем аппроксимации экспериментальной зависимости степенной функцией

$$\Delta\varphi = 0.0412V_{Ph}^{0.5205} \quad (2)$$

была получена эмпирическая калибровочная формула, которая связывает сдвиг фаз и  $V_{Ph}$  — значение амплитуды сигнала нестационарной фотоэДС в микровольтах. Амплитуда колебаний поверхности вычислялась по формуле

$$\Delta x = \frac{0.0412V_{Ph}^{0.5205}\lambda}{2\pi} \quad (3)$$

(где  $\lambda = 532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  — длина волны лазера), связывающей изменение оптического пути в метрах с амплитудой сигнала нестационарной фотоэДС в микровольтах.



**Рис. 3.** Пространственные распределения амплитуд колебаний, полученные с помощью компьютерного моделирования (левая ось) и экспериментально (правая ось): *a* — при частоте резонансного возбуждения 240 kHz, *b* — при частоте 666 kHz, *c* — при частоте 925 kHz.

Сканирование предметным лучом вдоль поверхности образца позволяло получить картину пространственного распределения амплитуды акустических колебаний. На рис. 3 показаны пространственные за-

висимости амплитуды акустических колебаний для трех резонансных частот от положения  $L$  предметного луча при сканировании в направлении, перпендикулярном направлению волноводов (направление сканирования на рис. 1,  $a$ ). Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. В численных расчетах коэффициент затухания акустических волн определялся методом подбора по наилучшему соответствию теоретических и экспериментальных частотных характеристик (положения и формы резонансных пиков (рис. 2,  $b$ )). Различие абсолютных значений амплитуд колебаний поверхности может быть связано с точностью численного моделирования, ограниченной вычислительными возможностями и относительно невысокой плотностью сетки для анализа структуры с наибольшим размером 50 nm при размере межэлектродного зазора 20  $\mu\text{m}$ . Кроме того, влияние мест крепления чипа требует более детального исследования.

Таким образом, проведены исследования поведения интегральных электрооптических модуляторов в кристаллах ниобата лития при низкочастотной модуляции. Показано, что в диапазоне частот до 1 MHz, характерном для работы модуляторов в составе систем обработки сигналов волоконно-оптических датчиков [2], происходит эффективное возбуждение акустических колебаний, которое носит резонансный характер. Резонансные частоты согласуются с собственными акустическими модами кристаллической подложки модулятора, что подтверждается результатами математического моделирования. Данные резонансы оказывают существенное влияние на оптический сигнал. Влияние оказывается как за счет изменения электрических, так и за счет изменения оптических характеристик модулятора. При использовании узкополосной модуляции данное влияние может быть сведено к минимуму путем выбора частоты модуляции вдали от акустических резонансов и использования заградительных фильтров в обрабатываемой сигнал электронике. Однако во многих приложениях, таких как система обработки сигналов волоконно-оптического гироскопа [9], модуляция и регистрация сигналов проводятся в широком спектральном диапазоне. В этом случае уменьшение влияния акустических колебаний может быть реализовано за счет выбора геометрической формы подложки и электродов, специальных методов обработки поверхности чипа и демпфирующего крепления. Показано, что метод адаптивной интерферометрии с использованием фотоприемника на основе нестационарной фотоздс [8] может быть эффективно использован при исследовании

оптимальной конфигурации чипа модулятора, материалов и методов, используемых для его крепления, с целью подавления акустических колебаний.

## Список литературы

- [1] Broadband optical modulators: science, technology, and applications / Ed. A. Chen., E.J. Murphy. CRC Press. 2012. P. 532.
- [2] Kirkendall C.K., Dandridge A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. N 18. P. R197.
- [3] Urick V.J., Williams K.J., McKinney J.D. Fundamentals of microwave photonics. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc., 2015. 488 p.
- [4] Cox III C.H. Analog optical link: theory and practice. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press. 2004. 293 p.
- [5] Vazzan M., Sada C. // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2., P. 040603. 040603 (2015).
- [6] Караваев П.М., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Тронеv А.В., Шамрай А.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 10. С. 33–39.
- [7] Бородинa И.А., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. // Акуст. журн. 2000. Т. 46. В. 1. С. 42–46.
- [8] Stepanov S.I., Sokolov I.A., Trofimov G.S., Vlad VI., Popa D., Apostol I. // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 1239–1241.
- [9] Алейник А.С., Волковский С.А., Михеев М.В., Никитенко А.Н., Плотников М.Ю. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3 (103). С. 436–444.