

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-538-547

УДК 535.015, 537.226.82

Исследование пьезоэлектрического эффекта и создание модифицированной конструкции фазового модулятора на основе ниобата лития

Алена Викторовна Шулепова¹✉, Владимир Андреевич Шулепов²,
Владимир Евгеньевич Стригалев³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ 79213040490@ya.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>

² shulepov_vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

³ vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Аннотация

Введение. В работе рассмотрено явление пьезоэлектрического эффекта и показано его влияние на возникновение дополнительного фазового сдвига проходящей световой волны в волноводной структуре фотонных интегральных схем, сформированных на подложке кристалла ниобата лития X-среза. **Метод.** Измерения проводились интерферометрическим способом в схеме волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера с использованием модуляции излучения в опорном плече, позволяющего выполнять непрерывное измерение фазы в плече с исследуемым образцом. Проведен расчет временных параметров каждого из элементов экспериментальной схемы для определения времени релаксации пьезоэлектрических зарядов.

Основные результаты. Выполнен анализ влияния пьезоэлектрического дрейфа фазы, его величины и временных характеристик релаксации зарядов, вызывающих дрейф. Предложена модель и исследована конструкция фазового модулятора на основе кристалла ниобата лития с дополнительными обратно Z-ориентированными пластинами, расположенными на электродах модулятора. **Обсуждение.** Предложенный способ решения проблемы способен компенсировать пьезоэлектрическое поле и, как следствие, уменьшить паразитный сдвиг фазы.

Ключевые слова

ниобат лития, фазовый модулятор, пьезоэлектрический эффект, пьезоэлектрическое поле

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Ссылка для цитирования: Шулепова А.В., Шулепов В.А., Стригалев В.Е. Исследование пьезоэлектрического эффекта и создание модифицированной конструкции фазового модулятора на основе ниобата лития // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 538–547. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-538-547

Study of pyroelectric effect and creation of modified design of phase modulator based on lithium niobate

Alena V. Shulepova¹✉, Vladimir A. Shulepov², Vladimir E. Strigalev³

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ 79213040490@ya.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>

² shulepov_vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

³ vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Abstract

The study explores the phenomenon of the pyroelectric effect and demonstrates its influence on the emergence of an additional phase shift of the passing light wave in waveguide structures of photonic integrated circuits formed on a lithium niobate crystal X-cut substrate. Measurements were carried out using interferometric methods in a Mach-Zehnder

© Шулепова А.В., Шулепов В.А., Стригалев В.Е., 2024

fiber-optic interferometer configuration with radiation modulation in the reference arm allowing for continuous phase measurement in the arm with the sample under study. The calculation of the temporal parameters of each element of the experimental setup was performed to determine the relaxation times of pyroelectric charges. An analysis of the contribution of pyroelectric phase drift, its magnitude, and the temporal characteristics of charge relaxation causing the drift was conducted. A model was proposed and the design of a phase modulator based on a lithium niobate crystal with additional back Z-oriented plates located on the modulator electrodes was investigated. The proposed solution method is capable of compensating for the pyroelectric field and, as a result, reducing parasitic phase shift.

Keywords

lithium niobate, phase modulator, pyroelectric effect, pyroelectric field

Acknowledgments

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2024-0006).

For citation: Shulepova A.V., Shulepov V.A., Strigalev V.E. Study of pyroelectric effect and creation of modified design of phase modulator based on lithium niobate. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 538–547 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-538-547

Введение

Кристалл ниобата лития (НЛ), благодаря уникальному набору электрооптических и оптических свойств, нашел широкое применение при создании устройств интегральной оптики, включая электрооптические амплитудные и фазовые модуляторы. Интенсивное развитие телекоммуникаций на основе волоконно-оптических компонентов усилило требования к снижению потерь оптической мощности и сохранению однододового состава распространения излучения [1]. В результате изучения возможности создания однододовых волноводных структур в НЛ разработаны две основные технологии: титан-диффузионная и протонно-обменная [2–6]. Данные технологии позволяют получать волноводы с низкими оптическими потерями в диапазоне длин волн в области 1,55 мкм и эффективным согласованием с оптическими волокнами. Таким образом, уникальные свойства НЛ и развитие технологий способствовали широкому распространению этого материала в интегральной оптике и волоконно-оптических устройствах [7–11].

Известно, что НЛ имеет множество преимуществ для использования в интегрально-оптических модуляторах [12, 13]. Однако существуют и недостатки, некоторые из которых до сих пор не имеют решения. Например, проблема кратко- и долговременного дрейфов фазы остается нерешенной для фазовых модуляторов на X- и Z-срезах кристалла [14, 15]. Кратковременный дрейф фазы можно объяснить ограниченностью передаточной амплитудно-частотной характеристики, действующей как фильтр нижних частот. Долговременный дрейф представляет собой медленную стабилизацию фазового значения в установившемся режиме длительностью от нескольких часов до нескольких дней [16]. В работе [17] отмечено, что дрейф фазы связан с особенностями электрических характеристик материала, проводящих слоев электродов и адгезионного подслоя. Таким образом, анализ дрейфа фазы можно свести к переходной характеристике эквивалентных RC-цепей.

Еще одним недостатком кристалла НЛ является его сегнетоэлектрическая природа, которая приводит к пироэлектрическому эффекту. Анализ данного явления в кристалле НЛ широко представлен в научных работах.

Пироэлектрический эффект характеризуется изменением величины спонтанной поляризации кристалла от изменения значения температуры. При этом на полярных гранях кристалла НЛ формируются свободные заряды, что приводит к возникновению внешнего электрического поля. После определенного периода времени (от нескольких часов до нескольких дней) происходит релаксация зарядов за счет рекомбинации зарядов вследствие объемной и поверхностной проводимостей кристалла.

Заряды на поверхности образуются за счет свободных носителей в окружающей среде, которые притягиваются к поверхности кристалла при изменении температуры, увеличивая внутреннее поле поляризации домена. После компенсации напряженности электрического поля наступает зарядовое равновесие и внешнее электрическое поле исчезает. При нагреве сегнетоэлектрика внутренняя поляризация ослабевает, и на поверхности часть зарядов, не требуемых для компенсации поляризации, становятся свободными. Далее эти заряды могут сформировать электрическое поле и взаимодействовать с окружающей средой. Цикл возникновения зарядов и их последующая релаксация повторяются при каждом нагревании и охлаждении сегнетоэлектрика (рис. 1).

Пироэлектрический коэффициент ρ характеризует плотность зарядов на полярной поверхности кристалла НЛ при изменении его температуры на 1 °С. Анализ ряда научных работ позволяет утверждать, что величина

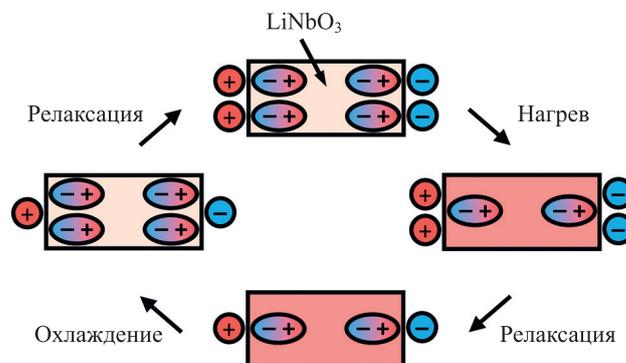


Рис. 1. Пироэлектрический эффект в кристалле ниобата лития (LiNbO₃)

Fig. 1. Pyroelectric effect in lithium niobate (LiNbO₃) crystal

на пироэлектрического коэффициента может изменяться от -4 до -11 мкКл/($m^2 \cdot K$) за счет структуры (степень отклонения от стехиометрического состава) [18–20], а также от методов измерения (статические, динамические, оптические) [18] и температурного диапазона.

Актуальность проблемы явления пироэлектрического эффекта для интегрально-оптических модуляторов высока по той причине, что образование свободных зарядов на поверхности кристалла НЛ способно вносить существенный вклад в искажение картины распределения напряженности электрического поля в сечении кристалла параллельно полярной оси. Также эффект может вызывать локальное изменение показателя преломления волновода в кристалле НЛ от незначительного сдвига фазы вплоть до нарушения условий волноводного распространения и выхода оптической моды в подложку.

Методы защиты и подавления пироэлектрического эффекта

Традиционным методом подавления влияния пироэлектрического эффекта для интегрально-оптических модуляторов на X -срезе кристалла НЛ является нанесение на грани токопроводящей композиции [21]. Полярные грани модулятора, на поверхности которых формируются заряды, промазываются токопроводящей композицией и объединяются в единую электрическую цепь. В таком случае не образуется свободных зарядов, которые формируют поле, и пироэлектрическое затухание оптической волны не наблюдается. Другой способ для модуляторов на Z -срезе подразумевает перед нанесением электродов и последующим закорачиванием формирование оксидом кремния слоя [22–24] на верхней и нижней поверхностях кристалла НЛ. За счет диэлектрического слоя с электропроводностью величиной порядка 10^{-10} , что в сравнении с объемной проводимостью кристалла 10^{-14} – 10^{-16} 1/(Ом·м) при комнатной температуре [25, 26] является достаточной величиной для обеспечения повышенной проводимости. Также известен способ повышения проводимости кристалла НЛ путем проведения восстановительного отжига, который описан в работах [27–30]. Проведение отжига кристалла может уменьшить пироэлектрический эффект, что связано с оксидизацией его приповерхностных слоев. Это происходит из-за изменения электрических свойств кристалла НЛ, вызванного восстановительной обработкой.

С другой стороны, несмотря на кажущуюся очевидность решения проблемы пироэлектрического эффекта, необходимо учитывать наличие в сегнетоэлектриках особого поверхностного диэлектрического слоя [26, 31]. Даже в случае полного промазывания поверхности кристалла НЛ проводящим материалом, диэлектрический слой приводит к снижению эффективности экранирования внутреннего поля спонтанной индукции кристалла. В результате часть зарядов, находящихся между сегнетоэлектрической и диэлектрической зонами кристалла, остаются некомпенсированными и создают остаточное электрическое поле в кристалле. В электрооптических модуляторах такое поле может

внести часть паразитного вклада в оптическую мощность и фазу световой волны.

В настоящей работе представлены результаты исследования пироэлектрического эффекта в титан-диффузионных волноводах кристалла НЛ, сформированных на подложке X -среза, являющихся основой для создания модуляторов фазы. Выполнен анализ влияния пироэлектрического эффекта на дрейф фазы, его величины и временных характеристик релаксации зарядов. Измерения проводились интерферометрическим способом в схеме волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера. В опорном плече использована модуляция излучения для непрерывного и высокоточного измерений фазы в плече с исследуемым образцом. Приведены результаты исследования впервые предложенной методики подавления пироэлектрического эффекта в фотонной интегральной схеме, основанной на кристалле НЛ.

Объект исследования

В работе исследованы образцы фотонных интегральных схем (ФИС), изготовленные в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН. Фазовый модулятор представляет собой кристалл НЛ на X -срезе, в котором методом диффузии титана создан каналный волновод. С двух сторон от него для обеспечения фазовой модуляции светового сигнала нанесены сформированные пленки электродов из золота путем напыления через адгезионный слой хрома. Рабочая длина волны оптического излучения 1550 нм.

Новая конструкция фазового модулятора на основе ниобата лития

Предложена оригинальная конструкция ФИС, предполагающая добавление пластин из материала подложки на области электродов. Данное конструктивное решение направлено на уменьшение влияния пироэлектрического эффекта. На рис. 2 представлены два образца ФИС двух конструкций: стандартной (конструкция 1) и модифицированной (конструкция 2). В конструкции 2 добавленные пластины из кристалла НЛ имеют оптическую ось Z , ориентированную противоположно направлению оптической оси подложки. Это позволяет осуществить компенсацию пироэлектрического поля, возникающего вследствие изменения температуры, что подтверждено экспериментальными данными.

Материалы и методика эксперимента

Детектирование фазового сдвига осуществлялось с помощью волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера. Исследуемый образец был размещен в верхнем плече интерферометра, а фазовый модулятор в нижнем плече, который позволяет управлять фазой оптического излучения (рис. 3). Элементы интерферометра имели соосную стыковку по «быстрой» поляризационной оси. В схеме использован узкополосный (менее 1 кГц) лазер ORION Laser Module с длиной

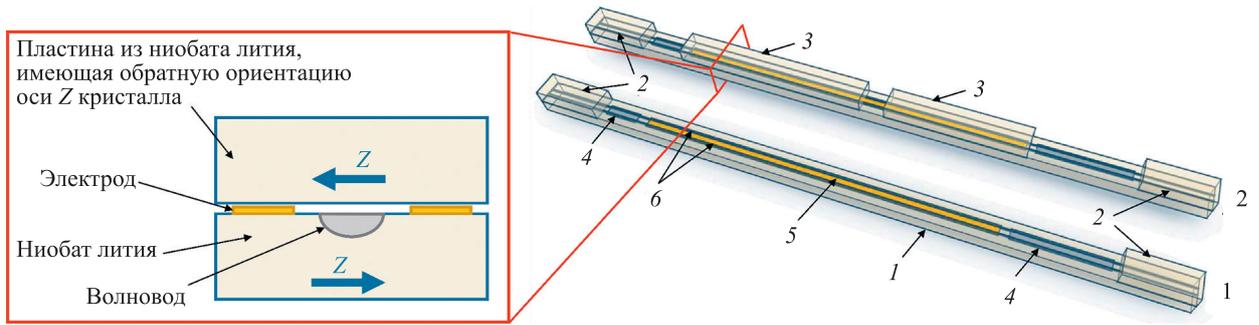


Рис. 2. Схема фотонных интегральных схем на основе ниобата лития (НЛ) стандартной (конструкция 1) и модернизированной (конструкция 2) конструкций: 1 — кристалл НЛ; 2 — крышечки из кристалла НЛ для осуществления стыковки; 3 — крышечки из НЛ, обратно ориентированные по оси Z; 4 — поляризаторы; 5 — электроды; 6 — волноводы

Fig. 2. Scheme of photonic integrated circuits based on lithium niobate of standard (design 1) and upgraded (design 2), where 1 — lithium niobate crystal; 2 — lithium niobate caps for coupling; 3 — back Z-oriented lithium niobate caps; 4 — polarizers; 5 — electrodes; 6 — waveguides

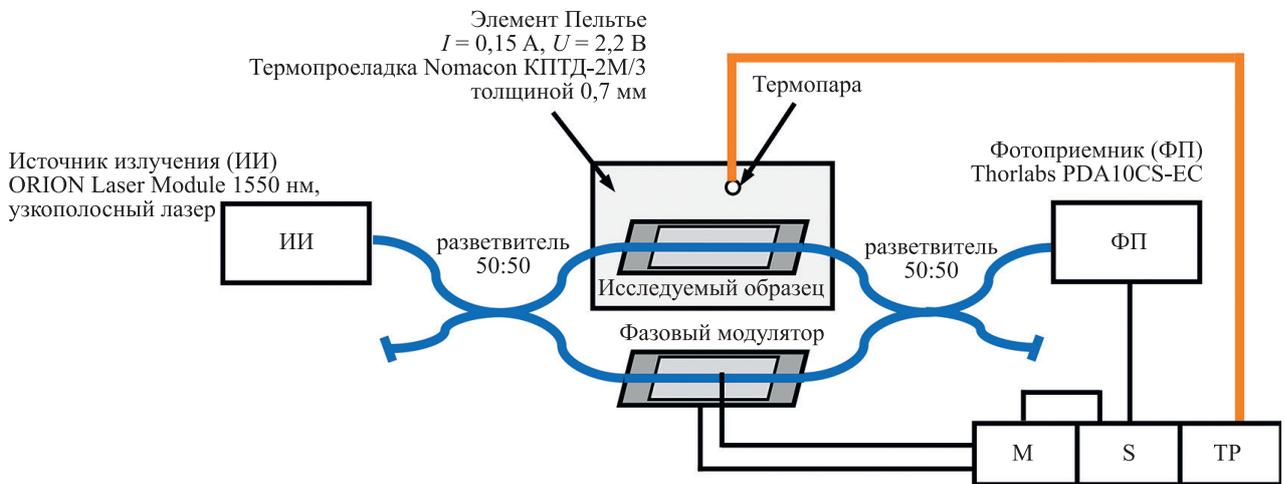


Рис. 3. Схема волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера

Fig. 3. Schematic of the fiber-optic Mach-Zehnder interferometer

волны 1550 нм. В ходе экспериментов система сбора данных (Data Acquisition, DAQ), оснащенная оборудованием National Instruments cDAQ-9188, синхронно регистрировала модуляционный сигнал «М» и данные с фотодетектора Thorlabs PDA10CS-EC «S», тогда как преобразователь напряжения NI 9211 учитывал информацию о температуре, поступающую от термопары «ТР».

Управление температурными циклами нагрева и остывания осуществлено посредством крепления образца на термоэлектрическом модуле Пельтье, разделенного с образцом 0,7 мм термопрокладкой Nomason KPTD-2M/3 (рис. 4), где одновременно размещается горячий спай термопары, что дает возможность измерения температуры верхнего сегмента прокладки. Во избежание температурных флуктуаций модулятора, обеспечивающего фазовую модуляцию в нижнем плече интерферометра, все компоненты термоизолированы в корпусе, состоящем из двух отсеков. При этом в первом отсеке находятся разветвители и модулятор, а второй предназначен для размещения исследуемого образца вместе с термоэлектрическим модулем Пельтье.

В экспериментах нагрев образца при токе $I = 0,15$ А и напряжении $U = 2,2$ В, подаваемых на элемент Пельтье, привел к температурному росту на $\Delta T \approx 3-4$ °С (рис. 5). В результате нагрева образца произошло изменение фазы светового потока, проходящего по волноводу модулятора. Вычисление сигнала фазы осуществлено на основе данных от фотоприемника. Задание периодиче-

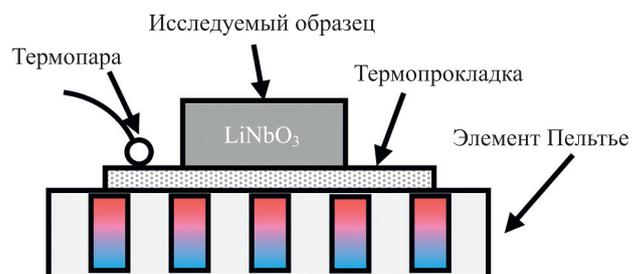


Рис. 4. Схематичное представление расположения горячего спая термопары

Fig. 4. Schematic representation of thermocouple hot junction location

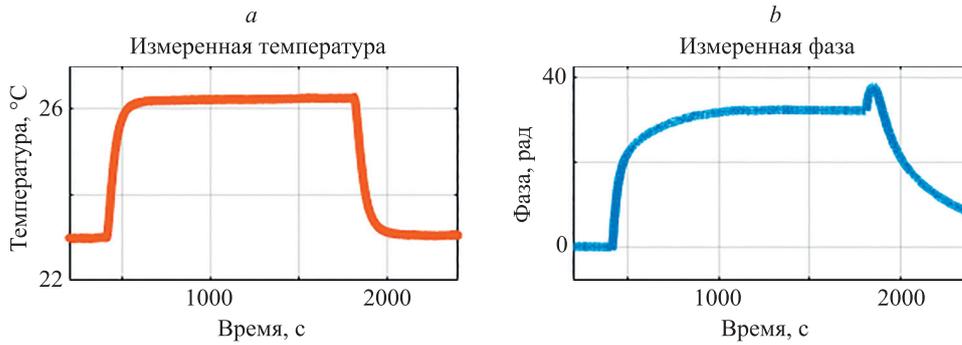


Рис. 5. Измеренные температура (а), регистрируемая термопарой при подаче на элемент Пельтье тока $I = 0,15$ А, и сигнал фазы (b)

Fig. 5. Temperature readings registered by thermocouple when current $I = 0.15$ A is applied to Peltier element (a) and measured phase signal (b)

ской модуляции в виде косинуса позволило определить амплитуды первой и второй гармоник результирующего оптического сигнала и вычислить функции арктангенса. Это обеспечило точный расчет значения текущей рабочей точки интерферометра.

Расчет передаточных характеристик методами автоматического регулирования

Рассмотрим этапы процесса нагрева образца. Сначала с определенной скоростью нагревается элемент Пельтье в сборе с керамическими пластинами и полупроводниковыми нагревателями. Затем повышенные температуры доходит до термопрокладки, которая приводит к затягиванию процесса нагрева образца. Следует учесть, что профиль изменения температуры в эксперименте получен для термопрокладки, а не

для образца, находящегося на ней. В результате был применен подход к разделению элементов системы на элементарные звенья [32, 33]. Каждый процесс описан определенной функцией с соответствующими коэффициентами, чтобы соответствовать экспериментальному температурному сигналу (рис. 6).

В предложенной системе [27, 28] управляемым элементом выступает модуль Пельтье. Сбор данных осуществлен по двум основным каналам: температура термопары и сдвиг фаз. Элемент динамической системы регулирования отражает переходный процесс, характеризующийся преобразованием тепловой энергии в оптическое изменение фазы, наблюдаемое во времени. Например, переходная функция, соответствующая позиционному аperiodическому звену 1-го порядка, может описать нагрев твердого тела с помощью переменной X , определяющей название процесса

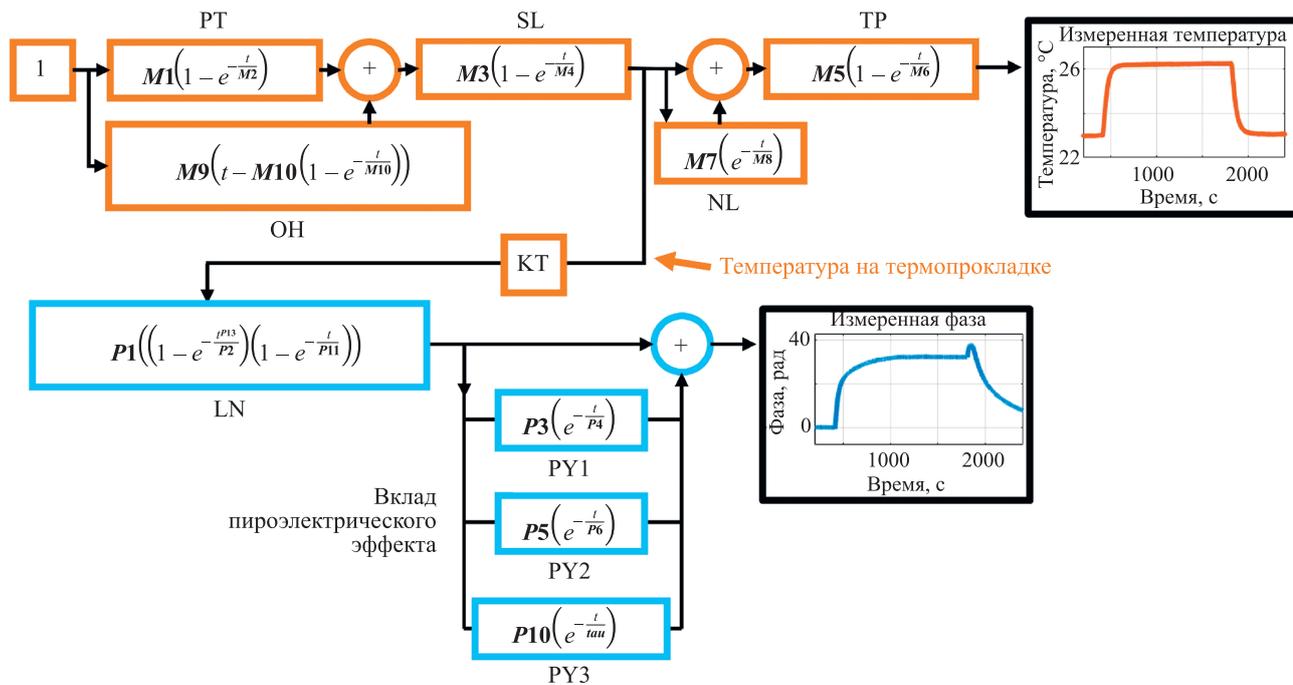


Рис. 6. Блок-схема системы нагрева и реакции

Fig. 6. Block diagram of the heating system with sample

(например, нагрев Пельтье, термопрокладки, образца кристалла НЛ и горячего спая термопары):

$$X = k \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right), \quad (1)$$

где k — коэффициент передачи звена; t — время; τ — постоянная времени.

Таким образом, в уравнении (1) вместо переменных k и τ подобраны коэффициенты для описания определенных температурных процессов. Исходя из этого, для блока РТ подобран коэффициент $M1$ вместо k и $M2$ вместо τ , который отвечает за прогрев элемента Пельтье и представляет позиционное аperiodическое звено 1-го порядка. Аналогичный подбор коэффициентов выполнен с остальными блоками. Блок ОН отвечает за перегрев элемента Пельтье, когда температура продолжает незначительно расти после достигнутого значения, и имеет вид интегрирующего звена с замедлением. Следующий блок SL контролирует прогрев термопрокладки, расположенной на элементе Пельтье, и имеет вид позиционного аperiodического звена 1-го порядка. NL определяет нелинейную зависимость прогрева. За прогрев термопары, которая помещена на термопрокладку, отвечает блок TP, представленный позиционным аperiodическим звеном 1-го порядка.

Температурные флуктуации вызывают фазовый сдвиг, который может быть описан с помощью четырех компонент.

Рассмотрим блок LN, отражающий фазовый сдвиг, обусловленный термооптическим и эффектом термического расширения кристалла НЛ. Блоки PY1, PY2, PY3 определяются дифференцирующим звеном с замедлением и связаны со способностью пироэлектрических зарядов к релаксации и рассеиванию через объем образца.

$$PY3 = P10 \left(\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right), \quad (2)$$

где $\tau = P7 \exp\left(\frac{-DF^{P9}}{P8}\right)$ и $DF = \frac{dT(LN)}{dt}$.

Отметим, что звено PY3 (2) включает временную константу (τ). В зависимости от градиента скорости профиля температуры данное значение будет изменяться. Переменная τ оказывает влияние на динамику увеличения электрической проводимости в зазоре между электродами, что непосредственно воздействует на ускорение релаксации электрических зарядов в условиях повышения электрического поля.

Подбор коэффициентов звеньев ($M1, M2, \dots, M10, P1, P2, \dots, P11$) произведен методом регрессного анализа по экспериментальным данным (рис. 5). В рассматриваемой системе все приводится к размерности фазы. В связи с этим введен дополнительный коэффициент $P11$. Данный коэффициент учитывает изменение показателя преломления и коэффициент термического расширения при изменении температуры кристалла НЛ. Дополнительный коэффициент определяет изменение фазы при нагреве исследуемого образца на 1°C и учитывает только температурные эффекты.

В результате расчета всех коэффициентов, представленных на рис. 6, рассчитаны временные характеристики релаксации заряда вследствие пироэлектрического эффекта.

Результаты и обсуждение

На рис. 7 показаны временные профили сдвига фазы. Эксперимент с исследуемым образцом конструкции 1 выявил, что изменение температуры приводит к аномальному изменению фазы. Кривая сдвига фазы интерферометра имеет более сложный характер, чем сдвиг фазы, обусловленный только температурными эффектами (рис. 7, «сдвиг фазы от нагрева»). Данный факт указывает на то, что одновременно с термооптическим и эластоупругим эффектами существует третий эффект, описывающий функцию изменения пироэлектрического сдвига фазы.

Также для образца конструкции 1 замечено, что при изменении температуры или в состоянии ее покоя присутствуют мгновенные скачки фазы (рис. 8). Наблюдается изменение фазы до $0,15$ рад со скоростью до $1,11$ рад/с. Данный эффект может быть вызван микроразрядом на поверхности кристалла НЛ [34].

При анализе полученных фазовых кривых обнаружено, что при повышении температуры образца конструкции 1 сдвиг фазы интерферометра сначала растет в противофазе, а затем разворачивается и начинает стремиться к равновесному положению (рис. 9). Однако для образца конструкции 2 с увеличением температуры фаза изменяется пропорционально, а при возвращении температуры в исходное значение набег фазы пропадает. Таким образом, изменение фазы имеет температурную зависимость, близкую к линейной, и позволяет снизить вклад пироэлектрического эффекта, возникающего в кристалле НЛ.

На рис. 10 представлены рассчитанные функциональные зависимости влияния пироэлектрического эффекта на основании блоков PY1, PY2, PY3, представленных в блок-схеме (рис. 6). Получено, что конструкция 2 в большей степени повлияла на уменьшение постоянной времени PY2. Рассчитанное время релаксации пироэлектрических зарядов сократилось с 960 до 396 с. Отметим, что вклад от блока PY3 стал равен 0. В первые секунды нагрева производная изменения температуры максимальна, а блок PY3 — экспоненциальная постоянная затухания, зависящая от силы воздействия

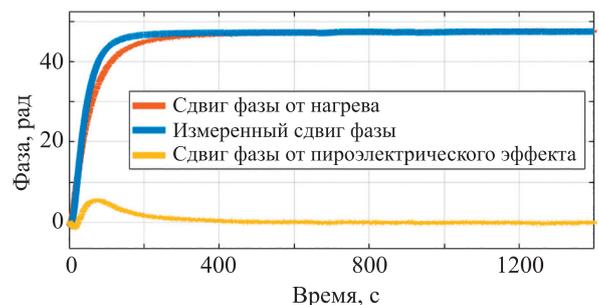


Рис. 7. Сдвиг фазы при нагреве образца на 3°C
Fig. 7. Phase shift when the sample is heated by 3°C

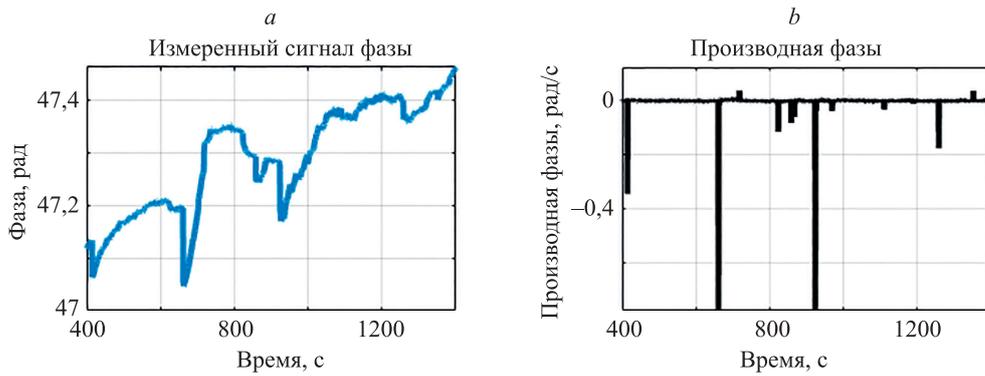


Рис. 8. Измеренный сигнал фазы (a) и производная мгновенных скачков фазы (b) для образца конструкции 1 без воздействий
 Fig. 8. Measured phase signal (a) and derivative of instantaneous phase jumps (b) for design 1 without influences

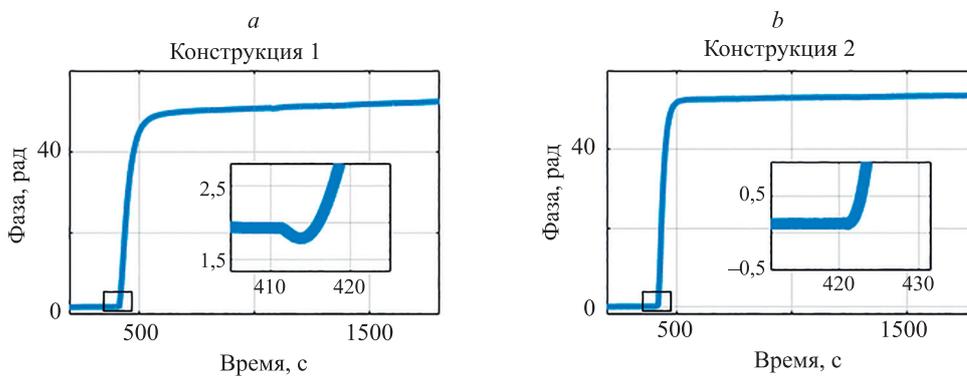


Рис. 9. Экспериментально измеренный сдвиг фазы для образцов конструкций 1 (a) и 2 (b)
 Fig. 9. Experimentally measured phase shift for samples of design 1 (a) and design 2 (b)

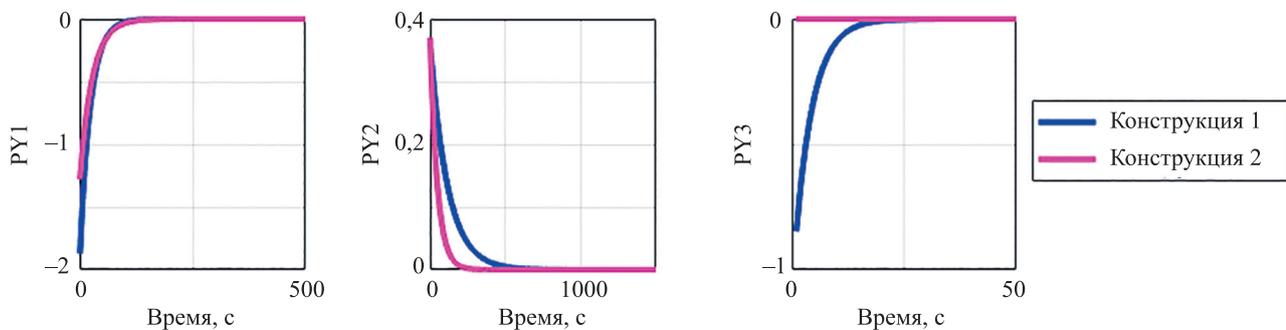


Рис. 10. Функциональные зависимости влияния пьезоэлектрического эффекта для образцов конструкций 1 и 2
 Fig. 10. Functional dependence of the pyroelectric effect for samples of design 1 and 2

на образец, т. е. от скорости нагрева. В конструкции 1 при напряженности электрического поля (256 кВ/м) существует большее значение поверхностного заряда на полярных гранях, чем в конструкции 2 при меньшей напряженности электрического поля (138 кВ/м). Температурное воздействие в экспериментах с образцом конструкции 2 не приводит к столь сильному нарушению зарядового равновесия и тем самым «развороту фазы» (рис. 9).

Функциональные зависимости (рис. 10) образца конструкции 2 достигают уровня 0 за более короткое время, чем для образца конструкции 1. Это говорит об отсутствии длительной релаксации зарядов и быстрым

перераспределении зарядов внутри образца за счет скомпенсированного поля в межэлектродном зазоре образца. Примененная в работе конструкция 2 приводит к минимизации воздействия пьезоэлектрического эффекта, а также исчезновению мгновенных скачков фазы.

Заключение

Исследован пьезоэлектрический эффект в фазовых модуляторах на основе кристалла ниобата лития. Установлено, что нагрев образца приводит к возникновению пьезоэлектрического поля, которое вызывает перераспределение свободных зарядов внутри кри-

сталла. Это пьезоэлектрическое поле, в свою очередь, вызывает паразитный сдвиг фазы сигнала. Однако для образца модифицированной конструкции 2 изменение температуры оказало существенно меньшее влияние на сдвиг фазы по сравнению со стандартной конструкцией 1. Применение методов систем автоматического регулирования позволило представить измерительную установку в виде динамических звеньев. Расчеты передаточных функций каждого звена в среде MATLAB определили временные параметры всех элементов установки. В результате для конструкции 2 время релаксации пьезоэлектрических зарядов и восстановления

свойств сократилось более чем в два раза. Кроме того, для конструкции 1 обнаружены мгновенные скачки фазы в состоянии покоя, которые связаны с частичной миграцией свободных электронов с боковых граней фазового модулятора на электроды, что ухудшает стабильность работы устройства. Данные скачки отсутствовали в модифицированной конструкции 2. Таким образом, модернизация конструкции 2 позволила достичь сниженной напряженности пьезоэлектрического поля, что обеспечило стабилизацию оптических характеристик и корректную работу фазового модулятора.

Литература

1. Ильичев И.В., Тогузов Н.В., Шамрай А.В. Оптимальная конфигурация пленочного интегрально-оптического поляризатора на подложках ниобата лития // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2009. № 3(83). С. 103–107.
2. Minakata M., Saito S., Shibata M. Two-dimensional distribution of refractive-index changes in Ti-diffused LiNbO₃ strip waveguides // Journal of Applied Physics. 1979. V. 50. N 5. P. 3063–3067. <https://doi.org/10.1063/1.326383>
3. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications // Applied Physics Reviews. 2015. V. 2. N 4. P. 040603. <https://doi.org/10.1063/1.4931601>
4. Korkishko Y.N., Fedorov V.A., Feoktistova O.Y. LiNbO₃ optical waveguide fabrication by high-temperature proton exchange // Journal of Lightwave Technology. 2000. V. 18. N 4. P. 562–568. <https://doi.org/10.1109/50.838131>
5. Becker R.A. Comparison of guided wave interferometric modulators fabricated on LiNbO₃ via Ti indiffusion and proton exchange // Applied Physics Letters. 1983. V. 43. N 2. P. 131–133. <https://doi.org/10.1063/1.94280>
6. Courjal N., Bernal M.-P., Caspar A., Ulliac G., Bassignot F., Gauthier-Manuel L., Suarez M. Lithium niobate optical waveguides and microwaveguides // Emerging Waveguide Technology. InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76798>
7. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope / third ed. Boston: Artech House, 2022. 500 p.
8. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 263 с.
9. Zhang M., Wang C., Kharel P., Zhu D., Lončar M. Integrated lithium niobate electro-optic modulators: when performance meets scalability // Optica. 2021. V. 8. N 5. P. 652–667. <https://doi.org/10.1364/optica.415762>
10. Chen G., Li N., Ng J.D., Lin H.-L., Zhou Y., Fu Y.H., Lee L.Y.T., Yu Y., Liu A.-Q., Danner A.J. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives // Advanced Photonics. 2022. V. 4. N 3. P. 034003. <https://doi.org/10.1117/1.ap.4.3.034003>
11. Deppe O., Dörner G., König S., Martin T., Voigt S., Zimmermann S. MEMS and FOG technologies for tactical and navigation grade inertial sensors—recent improvements and comparison // Sensors. 2017. V. 17. N 3. P. 567. <https://doi.org/10.3390/s17030567>
12. Петров А.Н., Тронева А.В., Лебедев В.В., Ильичев И.В., Величко Е.Н., Шамрай А.В. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконнооптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 5. С. 131–136.
13. 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. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. V. 6. N 1. P. 69–82. <https://doi.org/10.1109/2944.826874>
14. Yamada S., Minakata M. DC drift phenomena in LiNbO₃ optical waveguide devices // Japanese Journal of Applied Physics. 1981. V. 20. N 4. P. 733. <https://doi.org/10.1143/jjap.20.733>

References

1. Ilyichev I.V. Toguzov N.V. Shamray A.V. Optimal configuration of integrated optical thin film polarizer on lithium niobate substrate. *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*, 2009, no. 3(83), pp. 103–107. (in Russian)
2. Minakata M., Saito S., Shibata M. Two-dimensional distribution of refractive-index changes in Ti-diffused LiNbO₃ strip waveguides. *Journal of Applied Physics*, 1979, vol. 50, no. 5, pp. 3063–3067. <https://doi.org/10.1063/1.326383>
3. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications. *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 040603. <https://doi.org/10.1063/1.4931601>
4. Korkishko Y.N., Fedorov V.A., Feoktistova O.Y. LiNbO₃ optical waveguide fabrication by high-temperature proton exchange. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, vol. 18, no. 4, pp. 562–568. <https://doi.org/10.1109/50.838131>
5. Becker R.A. Comparison of guided wave interferometric modulators fabricated on LiNbO₃ via Ti indiffusion and proton exchange. *Applied Physics Letters*, 1983, vol. 43, no. 2, pp. 131–133. <https://doi.org/10.1063/1.94280>
6. Courjal N., Bernal M.-P., Caspar A., Ulliac G., Bassignot F., Gauthier-Manuel L., Suarez M. Lithium niobate optical waveguides and microwaveguides. *Emerging Waveguide Technology*. InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76798>
7. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Third Ed. Boston, Artech House, 2022, 500 p.
8. Kuzminov Iu.S. *Electro-Optical and Non-Linear Optical Lithium Niobate Crystal*. Moscow, Nauka Publ., 1987, 263 p. (in Russian)
9. Zhang M., Wang C., Kharel P., Zhu D., Lončar M. Integrated lithium niobate electro-optic modulators: when performance meets scalability. *Optica*, 2021, vol. 8, no. 5, pp. 652–667. <https://doi.org/10.1364/optica.415762>
10. Chen G., Li N., Ng J.D., Lin H.-L., Zhou Y., Fu Y.H., Lee L.Y.T., Yu Y., Liu A.-Q., Danner A.J. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives. *Advanced Photonics*, 2022, vol. 4, no. 3, pp. 034003. <https://doi.org/10.1117/1.ap.4.3.034003>
11. Deppe O., Dörner G., König S., Martin T., Voigt S., Zimmermann S. MEMS and FOG technologies for tactical and navigation grade inertial sensors—recent improvements and comparison. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 567. <https://doi.org/10.3390/s17030567>
12. Petrov A.N., Velichko E.N., Shamrai A.V., Troneva A.V., Lebedev V.V., Il'ichev I.V. An increase in the transmission efficiency of an rf fiber-optic line using the working point of an external modulator. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 761–766. <https://doi.org/10.1134/S1063784215050217>
13. 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. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, vol. 6, no. 1, pp. 69–82. <https://doi.org/10.1109/2944.826874>
14. Yamada S., Minakata M. DC drift phenomena in LiNbO₃ optical waveguide devices. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 20, no. 4, pp. 733. <https://doi.org/10.1143/jjap.20.733>
15. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Yatsenko A.V. Pyroelectric drift of integrated-optical LiNbO₃ modulators.

15. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Yatsenko A.V. Pyroelectric drift of integrated-optical LiNbO₃ modulators // *Ferroelectrics*. 2021. V. 574. N 1. P. 170–178. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1888062>
16. Hollinger W.P., Kovacs R.A. Tuned integrated optic modulator on a fiber optic gyroscope. Patent US5504580A. 1996.
17. Salvestrini J.P., Guilbert L., Fontana M., Abarkan M., Gille S. Analysis and control of the DC drift in LiNbO₃-based mach-zehnder modulators // *Journal of Lightwave Technology*. 2011. V. 29. N 10. P. 1522–1534. <https://doi.org/10.1109/jlt.2011.2136322>
18. Popescu S.T., Petris A., Vlad V.I. Interferometric measurement of the pyroelectric coefficient in lithium niobate // *Journal of Applied Physics*. 2013. V. 113. N 4. P. 043101. <https://doi.org/10.1063/1.4788696>
19. Parravicini J., Safioui J., Degiorgio V., Minzioni P., Chauvet M. All-optical technique to measure the pyroelectric coefficient in electro-optic crystals // *Journal of Applied Physics*. 2011. V. 109. N 3. P. 033106. <https://doi.org/10.1063/1.3544069>
20. Евдокимов С.В., Шостак Р.И., Яценко А.В. Аномалии пьезоэлектрических свойств кристаллов LiNbO₃ конгруэнтного состава // *Физика твердого тела*. 2007. V. 49. N 10. P. 1866–1870.
21. Bulmer C.H., Burns W.K., Hiser S.C. Pyroelectric effects in LiNbO₃ channel waveguide devices // *Applied Physics Letters*. 1986. V. 48. N 16. P. 1036–1038. <https://doi.org/10.1063/1.96640>
22. Nagata H. Activation energy of DC-drift of x-cut LiNbO₃ optical intensity modulators // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000. V. 12. N 4. P. 386–388. <https://doi.org/10.1109/68.839027>
23. Skeath P., Bulmer C.H., Hiser S.C., Burns W.K. Novel electrostatic mechanism in the thermal instability of z-cut LiNbO₃ interferometers // *Applied Physics Letters*. 1986. V. 49. N 19. P. 1221–1223. <https://doi.org/10.1063/1.97419>
24. Seino M., Nakazawa T., Kubota Y., Doi M., Yamane T., Hakogi H. A low DC-drift Ti:LiNbO₃ modulator assured over 15 years // *Proc. of the Optical Fiber Communication Conference*. 1992. P. 325–328. <https://doi.org/10.1364/ofc.1992.pd3>
25. Яценко А.В., Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Пritуленко А.С., Евдокимов С.В. Особенности электрической проводимости кристаллов LiTaO₃ и LiNbO₃ в области температур 290–450 К // *Физика твердого тела*. 2015. Т. 57. № 5. С. 932–936.
26. Rosenman G., Shur D., Krasik Ya.E., Dunaevsky A. Electron emission from ferroelectrics // *Journal of Applied Physics*. 2000. V. 88. N 1. P. 6109–6161. <https://doi.org/10.1063/1.1319378>
27. Смирнова А.В., Стригалева В.Е., Варжель С.В. Исследование способов стабилизации оптических параметров фазового модулятора путем подавления пьезоэлектрического эффекта // *Навигация и управление движением: Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием*. 2022. С. 85–87.
28. Шулепова А.В., Аксарин С.М., Стригалева В.Е. Исследование сдвига фазы под действием пьезоэлектрического поля в Ti:LiNbO₃ модуляторе // *Альманах научных работ молодых учёных Университета ИТМО*. Т. 4. СПб., 2021. С. 102–106.
29. Sosunov A., Ponomarev R., Zhuravlev A., Mushinsky S., Kuneva M. Reduction in DC-drift in LiNbO₃-based electro-optical modulator // *Photonics*. 2021. V. 8. N 12. P. 571. <https://doi.org/10.3390/photronics8120571>
30. Яценко А.В., Пritуленко А.С., Ягупов С.В., Сугак Д.Ю., Сольский И.М. Исследование стабильности электрических свойств восстановленных кристаллов LiNbO₃ // *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. № 7. С. 1049–1052. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.07.44676.1984>
31. Fridkin V.M. *Photoferroelectrics*. Springer, Springer, 1979. 176 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81351-1>
32. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 768 с.
33. Щербаков В.С., Лазута И.В. Теория автоматического управления. Линейные непрерывные системы: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2013. 142 с.
34. Thiele F., Hummel T., Amelie Lange N., Dreher F., Protte M., Bruch F., Lengeling S., Herrmann H., Eigner C., Silberhorn C. Pyroelectric influence on lithium niobate during the thermal transition for cryogenic integrated photonics // *Materials for Quantum Technology*. 2024. V. 4. N 1. P. 015402. <https://doi.org/10.1088/2633-4356/ad207d>
35. *Ferroelectrics*, 2021, vol. 574, no. 1, pp. 170–178. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1888062>
36. Hollinger W.P., Kovacs R.A. Tuned integrated optic modulator on a fiber optic gyroscope. Patent US5504580A, 1996.
37. Salvestrini J.P., Guilbert L., Fontana M., Abarkan M., Gille S. Analysis and control of the DC drift in LiNbO₃-based mach-zehnder modulators. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, no. 10, pp. 1522–1534. <https://doi.org/10.1109/jlt.2011.2136322>
38. Popescu S.T., Petris A., Vlad V.I. Interferometric measurement of the pyroelectric coefficient in lithium niobate. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 4, pp. 043101. <https://doi.org/10.1063/1.4788696>
39. Parravicini J., Safioui J., Degiorgio V., Minzioni P., Chauvet M. All-optical technique to measure the pyroelectric coefficient in electro-optic crystals. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, no. 3, pp. 033106. <https://doi.org/10.1063/1.3544069>
40. Yevdokimov S.V., Shostak R.I., Yatsenko A.V. Anomalies in the pyroelectric properties of LiNbO₃ crystals of the congruent composition. *Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, no. 10, pp. 1957–1962. <https://doi.org/10.1134/S1063783407100241>
41. Bulmer C.H., Burns W.K., Hiser S.C. Pyroelectric effects in LiNbO₃ channel waveguide devices. *Applied Physics Letters*, 1986, vol. 48, no. 16, pp. 1036–1038. <https://doi.org/10.1063/1.96640>
42. Nagata H. Activation energy of DC-drift of x-cut LiNbO₃ optical intensity modulators. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 4, pp. 386–388. <https://doi.org/10.1109/68.839027>
43. Skeath P., Bulmer C.H., Hiser S.C., Burns W.K. Novel electrostatic mechanism in the thermal instability of z-cut LiNbO₃ interferometers. *Applied Physics Letters*, 1986, vol. 49, no. 19, pp. 1221–1223. <https://doi.org/10.1063/1.97419>
44. Seino M., Nakazawa T., Kubota Y., Doi M., Yamane T., Hakogi H. A low DC-drift Ti:LiNbO₃ modulator assured over 15 years. *Proc. of the Optical Fiber Communication Conference*, 1992, pp. 325–328. <https://doi.org/10.1364/ofc.1992.pd3>
45. Yatsenko A.V., Pritulenko A.S., Evdokimov S.V., Palatnikov M.N., Sidorov N.V. Specific features of electrical conductivity of LiTaO₃ and LiNbO₃ crystals in the temperature range of 290–450 K. *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 8, pp. 1547–1550. <https://doi.org/10.1134/S1063783415050339>
46. Rosenman G., Shur D., Krasik Ya.E., Dunaevsky A. Electron emission from ferroelectrics. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 1, pp. 6109–6161. <https://doi.org/10.1063/1.1319378>
47. Smirnova A.V., Varzhel S.V., Strigalev V.E. Methods of suppressing the pyroelectric effect to stabilize the optical parameters in a phase modulator. *Proc. of the 24th Conference of Young Scientists "Navigation and Motion Control" (with international participants)*, 2022, pp. 85–87. (in Russian)
48. Shulepova A.V., Aksarin S.M., Strigalev V.E. Study of phase shift under the influence of a pyroelectric field in a Ti:LiNbO₃ modulator. *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University. Vol. 4*. St. Petersburg, 2021, pp. 102–106. (in Russian)
49. Sosunov A., Ponomarev R., Zhuravlev A., Mushinsky S., Kuneva M. Reduction in DC-drift in LiNbO₃-based electro-optical modulator. *Photonics*, 2021, vol. 8, no. 12, pp. 571. <https://doi.org/10.3390/photronics8120571>
50. Yatsenko A.V., Pritulenko A.S., Yagupov S.V., Sugak D.Y., Sol'skii I.M. Investigation of the stability of electrical properties of reduced linbo3 crystals. *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 7, pp. 1065–1068. <https://doi.org/10.1134/S1063784217070271>
51. Fridkin V.M. *Photoferroelectrics*. Springer, Springer, 1979, 176 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81351-1>
52. Besekerskii V.A., Popov E.P. *Theory of Automatic Control Systems*. Moscow, Nauka, 1972, 768 p. (in Russian)
53. Shcherbakov V.S., Lazuta I.V. *The theory of automatic control. linear continuous systems*. Omsk, SibADI, 2013, 142 p. (in Russian)
54. Thiele F., Hummel T., Amelie Lange N., Dreher F., Protte M., Bruch F., Lengeling S., Herrmann H., Eigner C., Silberhorn C. Pyroelectric influence on lithium niobate during the thermal transition for cryogenic integrated photonics. *Materials for Quantum Technology*, 2024, vol. 4, no. 1, pp. 015402. <https://doi.org/10.1088/2633-4356/ad207d>

Авторы

Шулепова Алена Викторовна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57226292609](https://orcid.org/0000-0001-6898-3400), <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>, 79213040490@ya.ru

Шулепов Владимир Андреевич — кандидат технических наук, начальник группы, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191411190](https://orcid.org/0000-0003-2168-8046), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, shulepov_vladimir@mail.ru

Стригалева Владимир Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.03.2024
Одобрена после рецензирования 19.06.2024
Принята к печати 22.07.2024

Authors

Alena V. Shulepova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57226292609](https://orcid.org/0000-0001-6898-3400), <https://orcid.org/0000-0001-6898-3400>, 79213040490@ya.ru

Vladimir A. Shulepov — PhD, Head of the Group, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191411190](https://orcid.org/0000-0003-2168-8046), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, shulepov_vladimir@mail.ru

Vladimir E. Strigalev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Received 28.03.2024
Approved after reviewing 19.06.2024
Accepted 22.07.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»