

УДК 538.9, 535.8

PACS 42.79.Gn, 77.84.Ek

Подавление дрейфа рабочей точки интегрально-оптических схем на основе ниобата лития

А. В. Сосунов^{1†}, Р. С. Пономарев^{1,2}, А. А. Журавлев³, С. С. Мушинский³,
М. Кунева⁴

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

²Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

³Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, ул. 25 Октября, 106

⁴Институт физики твердого тела Академии наук Болгарии
Tzarigradsko Chaussee 72, Blvd., 1784 Sofia, Bulgaria

† alexeisosunov@gmail.com

Работа посвящена исследованию дрейфа рабочей точки интегрально-оптических схем на основе протонообменных волноводов, созданных в кристаллах ниобата лития с восстановленной структурой приповерхностного слоя. Восстановление нарушенного приповерхностного слоя проводили с помощью процедуры гомогенизирующего предотжига пластин ниобата лития при температуре 500 °С. Дрейф рабочей точки характеризуется постоянным изменением выходной оптической мощности интегрально-оптических схем при приложении напряжения смещения к электродам или изменении температуры. Показано, что восстановление нарушенного приповерхностного слоя ниобата лития приводит к двукратному снижению кратковременного и долговременного дрейфов рабочей точки интегрально-оптических схем. Исследовано влияние структуры приповерхностного слоя кристалла на дрейф рабочей точки интегрально-оптических схем на основе ниобата лития.

Ключевые слова: ниобат лития; интегрально-оптическая схема; рабочая точка; протонообменные волноводы; приповерхностный слой; дрейф рабочей точки модулятора

Поступила в редакцию 15.03.2021; после рецензии 26.03.2021; принята к опубликованию 31.03.2021

Reduction of drift of operating point in lithium niobate-based integrated-optical circuit

A. V. Sosunov^{1†}, R. S. Ponomarev^{1,2}, A. A. Zhuravlev³, S. S. Mushinsky³, M. Kuneva⁴

¹Perm State University, 15 Bukirev st., 614990, Perm, Russia

²Perm Federal Research Center UB RAS, 614990, Perm, Lenina St.,13a

³Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, 25 October st., 614990, Perm, Russia

⁴Institute of Solid State Physics Bulgarian Academy of Sciences, Tzarigradsko Chaussee 72, Blvd., 1784 Sofia, Bulgaria

† alexeisosunov@gmail.com

This work is devoted to the study of the drift of the operating point of integrated-optical circuits based on proton-exchange waveguides in lithium niobate crystal with a recovered structure of the near-surface layer. Recovered of the damaged near-surface layer of lithium niobate wafer was carried out using pre-annealing at temperature of 500 °C. Drift of operating point is characterized by a constant change in the optical output power of the integrated-optical circuits when a bias voltage is applied to the electrodes or temperature changes. Recovered of the damaged near-surface layer of lithium niobate wafer leads to a decrease in the short-term and long-term drifts of the operating point of integrated-optical circuits. Crystal structure factor was investigated on the drift of operating point of integrated-optical circuits based on lithium niobate crystal.

Keywords: lithium niobate; integrated-optical circuit; operating point; proton-exchange waveguides; near-surface layer; modulator operating point drift

Received 15.03.2021; revised 26.03.2021; accepted 31.03.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-05-13

1. Введение

Интегрально-оптические схемы (ИОС) на основе ниобата лития (LiNbO_3 , НЛ) подробно описаны в научной литературе, как эффективные широкополосные устройства с низкими оптическими потерями. Такие ИОС широко применяются в телекоммуникационных системах с высокой скоростью передачи данных, волоконно-оптических гироскопах и сенсорах, где необходима внешняя модуляция сигнала [1].

Несмотря на значительный прогресс в производстве ИОС на основе НЛ [2], до сих пор нет однозначного решения одной из основных проблем – дрейфа рабочей точки (РТ) ИОС при их длительной эксплуатации в составе системы передачи данных. Дрейф РТ заключается в постепенном смещении РТ по передаточной функции от заданного драйвером оптимального положения при постоянных внешних условиях.

Передаточная функция ИОС связывает выходную оптическую мощность P_{out} с электрическим напряжением V , приложенным к электродам ИОС:

$$P_{out}(V, t, T) = \frac{L_{in}P_{in}}{2} \left(1 + \cos \left[\frac{\pi V}{V_{\pi}} + \Phi_0(t, T) \right] \right), \quad (1)$$

где, L_{in} – вносимые оптические потери, P_{in} – входная оптическая мощность, Φ_0 – фазовый сдвиг, V_{π} – полуволновое напряжение или напряжение необходимое для перехода по мощности от максимума P_{max} к минимуму P_{min} и определяется:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda \cdot d}{\gamma \cdot L \cdot n_{eff}^3 r_{eff}}, \quad (2)$$

где γ – интеграл перекрытия электрического поля и волноводов, λ – длина волны излучения, L – длина активной части волноводов, d – расстояние между электродами, n_{eff} – эффективный показатель преломления волновода, r_{eff} – эффективный электрооптический коэффициент, обусловленный материалом, оптической поляризацией и конструкцией электродов [3].

Передаточная функция является нелинейной (рис. 1) и зависит от конструкционных параметров устройства – L , d , λ и от материальных параметров кристалла и волновода – r_{eff} и n_{eff} . Конструкционные параметры являются константами или надежно контролируются при работе ИОС. Материальные параметры зависят от температуры T , эффекта фоторефракции, пиро- и пьезоэлектрического эффектов в кристалле НЛ и механических напряжений. Такая зависимость довольно сложна, но имеет понятную природу и может быть учтена при проектировании ИОС и их эксплуатации.

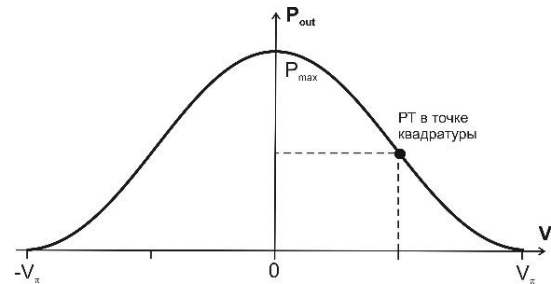


Рис. 1. Передаточная функция ИОС

Однако длительные исследования ИОС показали, что РТ может дрейфовать при постоянной температуре и приложенном внешнем электрическом напряжении [4,5]. Эти явления связаны с дрейфом подвижных заряженных дефектов в кристаллической решетке и исследованы гораздо слабее.

Множество современных работ [6-12] посвящено устранению дрейфа рабочей точки ИОС посредством разработки конструкции и улучшения методов корпусирования устройства. Сравнительный анализ основных методов устранения дрейфа рабочей точки ИОС представлен в работе [13]. Однако в работе [14] показано, что основной причиной дрейфа РТ является наличие заряженных дефектов в структуре кристалла НЛ. При приложении напряжения к электродам ИОС происходит перераспределение этих заряженных дефектов в области протонообменных волноводов, приводящее к появлению зависящего от времени деполяризующего электрического поля. То есть основной вклад в дрейф РТ вносят именно материальные параметры, а не конструкция или способ сборки. Этот вывод на первый взгляд может показаться тривиальным, однако в работах, посвященных исследованию процессов дрейфа РТ, не уделялось должного внимания материальным параметрам кристалла, в частности составу, структуре и свойствам приповерхностного слоя, в котором сформирован волновод, а также плотности дислокаций в этом слое и коэффициентам диффузии точечных дефектов. Нашей группой были проведены экспериментальные исследования состояния приповерхностного слоя кристалла НЛ и показано, что данный слой имеет несовершенную структуру с элементами фрагментации [15]. Эти изменения структуры кристалла НЛ необходимо рассматривать с микроскопической точки зрения как увеличение числа точечных дефектов и дислокаций в области протонообменных волноводов, что является важным для понимания механизмов подавления дрейфа РТ.

В недавно проведенном исследовании [16] было подтверждено, что измененное соотношение

[Li]/[Nb] может указывать на существование более сложных форм несовершенств структуры приповерхностного слоя кристалла НЛ, например легких путей диффузии в виде сеток дислокаций. Далее мы предложили [17] методику восстановления нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ для повышения однородности его структуры и снижения дрейфа РТ в ИОС.

В настоящей работе мы делаем следующий шаг: исследуем поведение ИОС на основе протонообменных волноводов, сформированных на пластинах НЛ с восстановленной кристаллической структурой. Целью работы является оценка влияния приповерхностной структуры кристалла НЛ на дрейфовые процессы в ИОС.

2. Эксперимент

2.1. Изготовление ИОС

Для изготовления ИОС использовали НЛ конгруэнтного состава X-среза производства Crystal Technology Inc. Одну из пластин НЛ предварительно отжигали при температуре 500 °С в течение 3 ч с последующим медленным охлаждением вместе с печью для восстановления структуры нарушенного приповерхностного слоя согласно [17]. Данная температура является оптимальной для получения более однородной структуры приповерхностного слоя кристалла НЛ и протонообменных оптических волноводов. Далее пластины очищали в изопропиловом спирте и деионизированной воде в течение 10 мин на каждом этапе создания элементов ИОС.

Канальные волноводы создавали с помощью прямой фотолитографии. В качестве защитной пленки использовали слой Al_2O_3 толщиной 300 нм, нанесенный методом электронно-лучевого напыления. Далее наносили позитивный фоторезист толщиной 1 мкм. После сушки и проявки фоторезиста удаляли остатки защитной пленки Al_2O_3 в растворе азотной кислоты. В результате были сформированы волноводные каналы шириной около 6 мкм, являющиеся одномодовыми на длине волны 1550 нм.

Протонный обмен проводили в закрытом циркониевом реакторе при температуре 170 °С в течение 2 ч с последующим охлаждением со скоростью 10 °С/мин. Отжиг проводили при температуре 350 °С в течение 5.5 ч с последующим охлаждением вместе с печью.

На следующем этапе методом вакуумного напыления на поверхность подложки НЛ наносили слой золота толщиной порядка 0.5 мкм. Для формирования конечной структуры электродов также использовали процесс фотолитографии и химического травления. Пару полученных пластин с нанесенными на их поверхности оптическими волноводами и электродами нарезали на блоки шириной 15 мм. В результате была получена пара чипов с восстановленной структурой НЛ и пара стандартных (без

дополнительного технологического вмешательства). Все чипы были получены при идентичных технологических параметрах. На завершающем этапе проводили стыковку чипов с оптическим волокном с помощью системы микропозиционеров и системы технического зрения (рис. 2).

Из описанных выше технологических циклов изготовления интегральных элементов на поверхности НЛ влияние на изменения в структуре кристалла оказывает только протонный обмен, а не сопутствующие побочные физико-химические процессы, а именно:

- максимальная температура нагрева кристалла (350 °С) существенно ниже температуры начала перестройки состава кристалла (выше 600 °С), а пирозлектрический эффект характерен для Z-среза кристалла, в котором перераспределение ионов Li^+ происходит вблизи двух полярных граней. Для X-среза НЛ данные процессы не характерны ввиду того, что направление нормали к X-срезу кристалла является неполярным. С учетом сильных связей между кислородным каркасом и ионами Nb^{5+} можно утверждать, что в ходе создания волноводов по описанной технологии не происходит изменения состава кристалла в тех областях, где он не подвергается протонному обмену;
- время травления фоторезиста подбирается таким образом, чтобы исключить взаимодействие кислоты и подложки. Что касается процесса проявки, то НЛ инертен к органическим проявителям;
- УФ облучение в процессе стыковки чипов с волокном может вызывать генерацию свободных электронов в НЛ под действием фотовольтаического эффекта, но время их релаксации в решетке кристалла много меньше времени между сборкой и испытаниями ИОС.

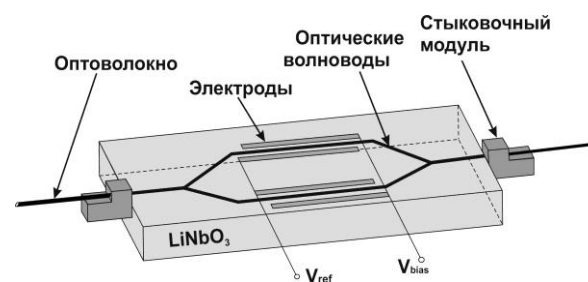


Рис. 2. Схематическое изображение ИОС

2.2. Методы исследования

2.2.1. Оптические потери. Дрейф рабочей точки в зависимости от приложенного напряжения (кратковременный дрейф). В научной литературе дрейф РТ разделяется обычно на долговременный (long-term drift) и кратковременный (short-term drift). Долговременный дрейф характеризует процессы, происходящие в кристалле в диапазоне времени от десятка минут до месяцев и лет, либо в течение всего жизненного цикла работы устрой-

ства. Кратковременный дрейф описывает процессы, происходящие сразу после подачи напряжения на систему электродов ИОС и, прекращающиеся, как правило, в течение нескольких минут после изменения напряжения. Мы полагаем, что оба вида дрейфа имеют одинаковую природу, связанную с движением заряженных дефектов в решетке кристалла НЛ. В данной работе мы исследовали кратковременный дрейф рабочей точки ИОС, подавая на электроды постоянное напряжение и записывая при этом изменение P_{out} . В отсутствие дрейфа оптическая мощность P_{out} должна мгновенно стабилизироваться после подачи напряжения V на электроды. Однако измеряемое значение P_{out} менялось в течение некоторого времени после подачи напряжения. Наиболее интересные результаты удалось получить при скачкообразной смене знака подаваемого напряжения. Все эксперименты проводились в диапазоне напряжений ± 8 В с шагом 1 В и с выдержкой в течение 5 мин после смены знака приложенного напряжения. В качестве источника напряжения использовали батарейку, как малошумящий химический источник. На основе полученных результатов проводили анализ времени дрейфа рабочей точки ИОС. В качестве источника света использовали высокостабильный узкополосный лазер с длиной волны 1550 нм и мощностью 3 мВт. Схематичное изображение экспериментальной установки представлено на рис. 3.

Погонные потери протонообменных волноводов в НЛ определяли по наклону кривой величины обратных отражений с помощью OFDR-рефлектометра. Разрешение прибора позволяет проводить измерения каждые 30 мкм на однородном линейном участке в топологии ИОС.

Оптические потери ИОС вычисляли на длине волны 1550 нм с помощью измерения выходной мощности излучения из источника и после распространения излучения по волноводам (волокну-волокну). В качестве измерителя оптической мощности использовали прибор Santec PEM-330.



Рис. 3. Схема измерений дрейфа РТ в ИОС

2.2.2. Дрейф рабочей точки в зависимости от температуры (долговременный дрейф). Температурные испытания проводили для расчета энергии активации дрейфа РТ в ИОС. Понимание активационных процессов, происходящих в рипервхностном слое НЛ в области канальных волноводов и

электродов при тепловом воздействии, позволило провести оценку эффективности восстановления структуры НЛ и ее влияния на дрейф рабочей точки ИОС. Во-первых, РТ фиксировали при постоянном напряжении 4.5 В, что соответствует линейному участку передаточной функции для всех исследуемых ИОС на длине волны $\lambda=1.55$ мкм. Далее, ИОС помещали в печь и нагревали до 50, 70 и 90 °С с выдержкой в течение 7 ч. При смене температурного режима ИОС остывали в течение 12 ч. На выходе измеряли изменения P_{out} , соответствующей смещению рабочей точки ИОС.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Кратковременный дрейф РТ

Перед исследованием дрейфовых процессов в ИОС измеряли оптические потери, как в кристалле НЛ (погонные потери) методом оптической рефлектометрии, так и во всей схеме методом волокну-волокну. Полученные оптические потери исследуемых ИОС представлены в таблице 1. Известно, что погонные оптические потери стабильных отоженных протонообменных волноводов в кристалле НЛ составляют ~ 0.15 дБ/см [18]. В результате испытаний были получены такие же стабильные волноводы со стандартными характеристиками. Разброс значений погонных потерь в чипе обусловлен погрешностью измерений, а наибольшие оптические потери в ИОС происходят на соединении чипа (кристалла НЛ) и оптического волокна.

Таблица 1. Оптические потери

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Погонные потери, дБ/см | 0.13–0.17 |
| Средние оптические потери, дБ | 6.5 |

Далее рассмотрим влияние приложенного напряжения на изменение P_{out} в зависимости от состояния приповерхностного слоя кристалла НЛ (предотжиг пластин НЛ). Результаты измерения P_{out} для 3 и 7 В подаваемого напряжения представлены на рис. 4. Аналогичные результаты получены во всем диапазоне измерений ± 8 В.

В момент смены полярности напряжение меняется на противоположное по знаку и далее остается постоянным, до обратного переключения. Следовательно, в каждый момент времени, кроме момента смены полярности, значение P_{out} обусловлено только процессами, происходящими в самом волноводе.

При смене полярности происходит скачкообразное изменение значения P_{out} , соответствующее положению РТ на передаточной функции ИОС. Время, за которое P_{out} выходит на изначальное значение (разница менее 1 %) после двукратного ($- \rightarrow + \rightarrow -$) переключения полярности, является, в нашем случае, характеристикой ИОС, показывающей, насколько быстро происходит подавление

дрейфа РТ. Подавление дрейфа рабочей точки ИОС на основе восстановленного НЛ проходит более чем в 2 раза быстрее по сравнению с контрольными образцами ИОС 116 ± 22 и 286 ± 37 с, соответственно.

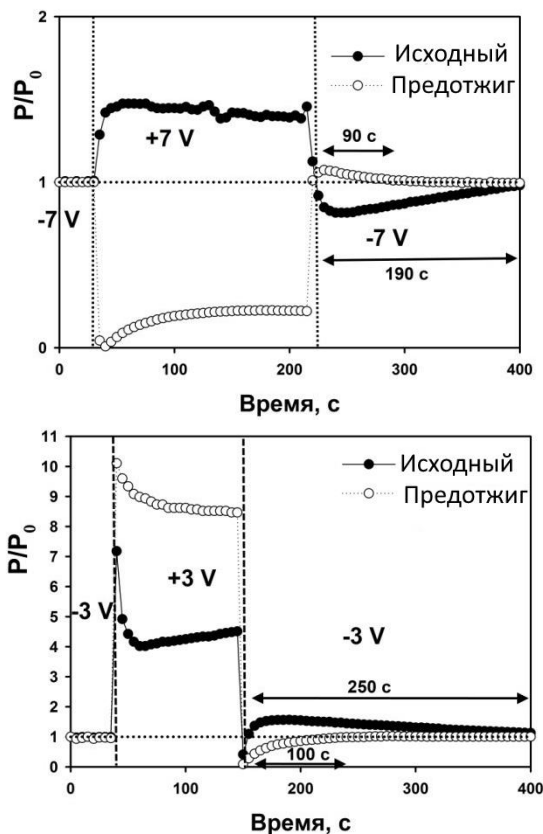


Рис. 4. Кратковременный дрейф РТ при смене полярности напряжения ± 7 В (вверху) и ± 3 В (внизу)

Такая существенная разница во времени дрейфа РТ может быть обусловлена только более однородной структурой вследствие восстановления нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ. В процессе восстановления происходит снятие внутренних напряжений, выход точечных дефектов и улучшение микроструктуры, как показано в [19]. Тогда при приложении напряжения V_{bias} заряженным дефектам гораздо труднее передвигаться, создавая при этом локальные электрические поля в области протонообменных волноводов, влияющих на изменение показателя преломления и дрейф РТ. Таким образом, во-первых, показано, что структура и свойства приповерхностного слоя кристалла НЛ влияют на дрейфовые параметры ИОС через электрооптический эффект, а во-вторых, метод восстановления данного слоя продемонстрировал свою эффективность для подавления кратковременного дрейфа РТ.

Также отметим, что рабочая точка ИОС с невосстановленной структурой приповерхностного слоя кристалла НЛ нестабильна после первой смены знака приложенного напряжения V_{bias} . Это, вероятно, связано с активацией заряженных дефектов в

приповерхностных слоях пластины НЛ и протонообменных волноводов. Анализ энергии активации дрейфа РТ в ИОС рассмотрен ниже.

3.2. Долговременный дрейф РТ

Для оценки долговременного дрейфа РТ в ИОС проводили оценку энергии активации E_a дрейфа РТ. В нашем исследовании данный параметр является ключевым для анализа влияния температуры на долговременный дрейф РТ. Ранее подобный анализ был представлен в работах [5, 20] для оценки срока службы ИОС на основе X-среза НЛ.

Эксперимент проводили согласно следующим рассуждениям. РТ фиксировали на линейном участке передаточной функции при постоянном напряжении $V_0 = 4.5$ В. Экспериментально обнаружено, что при изменении температуры РТ смещается и в течение определенного времени выходит в новое равновесное состояние. В этом случае значение P_{out} можно представить в виде степенной функции:

$$\frac{P_{out}(t)}{P_0} = A_0 \cdot t^n, \quad (3)$$

где t – время, P_0 – выходная оптическая мощность при V_0 . Скорость дрейфа рабочей точки снижается с увеличением времени работы устройства $\frac{dP_{out}(t)}{dt} \sim t^{n-1}$, соответственно, индекс n должен находиться в интервале $0 < n < 1$. В то же самое время P_{out} зависит от температуры:

$$\frac{P_{out}(t, T)}{P_0} = (B_0(T) \cdot t)^n, \quad (4)$$

где T – температура, $B_0(T) \sim e^{-\frac{E_a}{kT}}$ – константа скорости дрейфа РТ, пропорциональная функции Аррениуса.

Уравнение (3) не отражает полностью физический смысл явления дрейфа РТ, а выражает экспериментально наблюдаемый профиль изменения P_{out} , который можно использовать для сравнительного анализа E_a дрейфа рабочей точки ИОС с восстановленной структурой приповерхностного слоя НЛ. На рис. 5 показаны экспериментальные зависимости P_{out} от времени при различных температурах.

Из равенства уравнений (3) и (4) вычисляли константу скорости дрейфа РТ. На завершающем этапе строили зависимость $\log(B_0(1/T))$ для вычисления E_a . Для построения функции Аррениуса использовали рассчитанные коэффициенты, представленные в таблице 2 для значений температуры от 50 до 90 °С. E_a дрейфа рабочей точки ИОС после восстановления структуры нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ составила 1.5 эВ, что в два раза превышает значение E_a для контрольных ИОС без применения гомогенизирующего предотжига, $E_a = 0.8$ эВ (рис. 6).

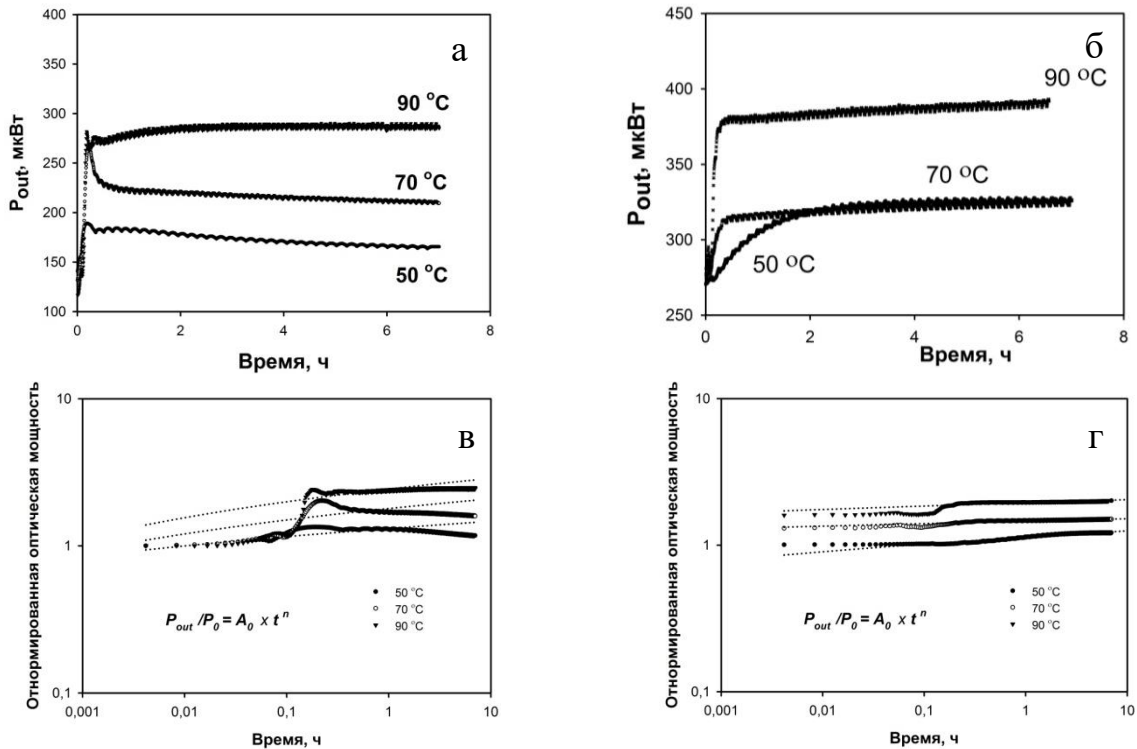


Рис. 5. Выходная оптическая мощность ИОС при температурах 50 – 90 °С до (а) и после (б) восстановления нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ. Отнормированная выходная оптическая мощность ИОС в логарифмическом масштабе: до (в) и после (г) восстановления нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ

Полученные результаты говорят о том, что для перевода системы в неравновесное состояние необходимо приложить энергии в два раза больше в случае использования пластин, подвергнутых предварительному отжигу. Это происходит за счет меньшего количества заряженных дефектов в области канальных волноводов и приповерхностного слоя НЛ, которые упоминались в предыдущем разделе и работе [14], как основной источник дрейфа рабочей точки ИОС.

В работе [5] на основе полученных значений энергии активации дрейфа РТ (0.7, 1.0 и 1.2 эВ) проводили оценку числа отказов при эксплуатации ИОС в течение 20 лет. Число отказов при 50 °С составило 3 ошибки с $E_a = 1.2$ эВ, 25 ошибок с $E_a = 1.0$ эВ и 260 ошибок с $E_a = 0.7$ эВ. Следовательно, чем выше E_a дрейфа РТ, тем выше стабильность всего устройства и можно ожидать меньшего числа ошибок при длительной эксплуатации ИОС. Полученные нами сравнительные результаты позволяют однозначно сделать вывод о возможности более длительной эксплуатации с меньшим числом отказов ИОС на НЛ с восстановленной структурой при заданных возможностях драйвера.

Таким образом, в ходе температурных испытаний было показано существенное улучшение дрейфовых параметров ИОС с восстановленной структурой НЛ. Предложенная нами идея повышения стабильности работы ИОС за счет контроля материальных параметров передаточной функции пока-

зала свою эффективность в различных экспериментальных условиях и может быть применима к системам на основе других оптических материалов.

Таблица 2. Рассчитанные коэффициенты дрейфа РТ в ИОС

| ИОС | Температура | A_0 | n | $B_0, 1/ч$ |
|--------------|-------------|-------|-------|------------|
| Исходный НЛ | 50 | 0.842 | 0.068 | 0.079 |
| | 70 | 0.909 | 0.128 | 0.475 |
| | 90 | 1.112 | 0.191 | 1.745 |
| Предотжиг НЛ | 50 | 0.783 | 0.051 | 0.008 |
| | 70 | 0.992 | 0.024 | 0.708 |
| | 90 | 1.050 | 0.043 | 3.180 |

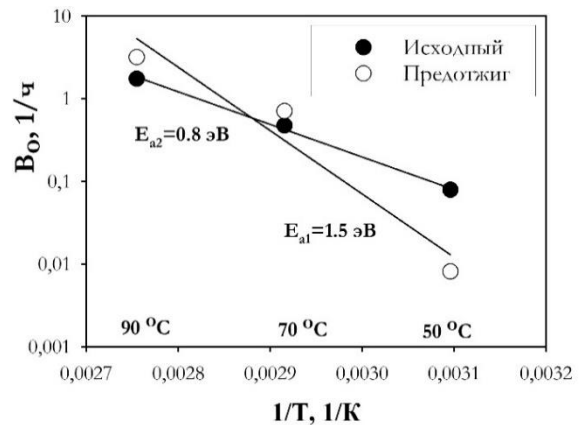


Рис. 6. Графики Аррениуса

4. Заключение

В данной работе основное внимание уделяется исследованию влияния материальных параметров передаточной функции (структура и свойства приповерхностного слоя кристалла НЛ) на дрейф РТ в ИОС. Проведен анализ влияния восстановления нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ на величину дрейфа рабочей точки ИОС и показано, что в результате отжига исходного кристалла кратковременный дрейф РТ снижается минимум в 2 раза.

Все полученные результаты в данной работе дополняют друг друга и демонстрируют влияние материальных факторов передаточной функции на дрейф рабочей точки ИОС. Предложенная нами методика восстановления структуры нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ показала свою эффективность для уменьшения как кратковременного, так и долговременного дрейфов рабочей точки ИОС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-42-596001, при поддержке Министерства образования и науки Пермского края, проект № С-26/848.

Список литературы

1. *Noguchi K.* Broadband optical modulators: science, technology, and applications / ed. Chen A., Murphy E.J. Boca Raton: CRC Press. 2012. 548 p.
2. *Rao A., Fathpour S.* Compact lithium niobate electrooptic modulators // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2018. Vol. 24, N 4. P. 1–14.
3. *Wooten E. L. et al.* Review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2000. Vol. 6, N 1. P. 69–82.
4. *Nagata H.* Long-term DC drift in x-cut LiNbO₃ modulators without oxide buffer layer // *Optoelectronics IEE Proceedings-IET.* 2000. Vol. 147. N. 5, 350354.
5. *Nagata H., Papasavvas N.* Bias stability of OC48 x-cut lithium-niobate optical modulators: four years of biased aging test results // *Technol. Lett. IEEE.* 2003. Vol. 15. N. 1. P. 42–44.
6. *Hofer L. R. et al.* Bias voltage control in pulsed applications for Mach-Zehnder electrooptic intensity modulators // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2017. Vol. 25. N. 5. P. 1890–1895.
7. *Yuan X. et al.* Any point bias control technique for MZ modulator // *Optik.* 2019. Vol. 178. N. 2018. P. 918–922.
8. *Svarny J.* Analysis of quadrature bias-point drift of Mach-Zehnder electro-optic modulator // *Proc. of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference.* 2010. P. 231–234.

9. *Cho P. S., Khurgin J. B., Shpantzer I.* Closed-loop bias control of optical quadrature modulator // *IEEE Photonics Technology Letters.* 2006. Vol. 18, P. 2209–2211.
10. *Wang L. L., Kowalczyk T. A.* Versatile bias control technique for any-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators // *Journal of Lightwave Technology.* 2010. Vol. 28, P. 1703–1706.
11. *Padmaraju K. C., Chan J., Chen L., Lipson M., Bergman K.* Thermal stabilization of a microring modulator using feedback control // *Optics Express.* 2012. Vol. 20, 2799.
12. *Bui D. T., Nguyen C. T., Ledoux-Rak I., Zyss J., Journet B.* Instrumentation system for determination and compensation of electro-optic modulator transfer function drift // *Measurement Science and Technology.* 2011. Vol. 22, 125105.
13. *Fu. Y., Zhang X., Hraimel B., Liu T., Shen D.* Mach-Zehnder: A review of bias control techniques for Mach-Zehnder modulators in photonic analog links // *IEEE Microwave magazine.* 2013. Vol. 14, P. 102–107.
14. *Salvestrini J. P. et al.* Analysis and control of the DC drift in LiNbO₃-based Mach-Zehnder modulators // *J. Light. Technol.* 2011. Vol. 29, N 10. P. 1522–1534.
15. *Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Yuriev V. A., Volyntsev A. B.* Effect of the structure and mechanical properties of the near-surface layer of lithium niobate single crystals on the manufacture of integrated optic circuits // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2017. Vol. 53, N 1. P. 82–87.
16. *Piecha J. et al.* Features of surface layer of LiNbO₃ as-received single crystals: Studied in situ on treatment samples modified by elevated temperature // *Solid State Ionics.* 2016. Vol. 290, P. 31–39.
17. *Sosunov A., Ponomarev R., Semenova O., Petukhov I., Volyntsev A.* Effect of pre-annealing of lithium niobate on the structure and optical characteristics of proton-exchanged waveguides // *Optical Materials.* 2019. Vol. 88. P. 176–180.
18. *Suchoski P. G., Findakly T. K., Leonberger F. J.* Stable low-loss proton-exchanged LiNbO₃ waveguide devices with no electro-optic degradation // *Opt. Lett.* 1988. Vol. 13. N 11. P. 1050–1052.
19. *Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Yuriev V. A., Tsiberkin K. B., Volyntsev A. B.* Features of structure and mechanical properties LiNbO₃ // *Ferroelectrics.* 2017. Vol. 506 (1). P. 24–31.
20. *Nagata H.* Activation energy of DC-drift of X-cut LiNbO₃ // *Technology.* 2000. Vol. 12. N. 4. P. 386–388.

References

1. *Noguchi K.* Broadband optical modulators: science, technology, and applications / ed. Chen A., Murphy

- E.J. Boca Raton: CRC Press. 2012. 548 p. DOI: 10.1201/B11444
2. Rao A., Fathpour S. Compact lithium niobate electrooptic modulators. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2018. vol. 24, no. 4. pp. 1–14. DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2779869
 3. Wooten E.L. et al. Review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2000. vol. 6, no. 1. pp. 69–82. DOI: 10.1109/2944.826874
 4. Nagata H. Long-term DC drift in x-cut LiNbO₃ modulators without oxide buffer layer. *Optoelectronics IEE Proceedings-IET.* 2000. vol. 147, no. 5, 350354. Doi: 10.1049/ip-opt:20000626
 5. Nagata H., Pappasavvas N. Bias stability of OC48 x-cut lithium-niobate optical modulators: four years of biased aging test results. *Technol. Lett. IEEE.* 2003. vol. 15, no. 1. pp. 42–44. Doi: 10.1109/LPT.2002.805866
 6. Hofer L.R. et al. Bias voltage control in pulsed applications for Mach-Zehnder electrooptic intensity modulators. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2017. vol. 25, no. 5. pp. 1890–1895. DOI: 10.1109/TCST.2016.2626276
 7. Yuan X. et al. Any point bias control technique for MZ modulator. *Optik.* 2019. vol. 178, no. 2018. pp. 918–922. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.10.091
 8. Svarny J. Analysis of quadrature bias-point drift of Mach-Zehnder electro-optic modulator. *Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference.* 2010. pp. 231–234. DOI: 10.1109/BEC.2010.5631589
 9. Cho P. S., Khurgin J. B., Shpantzer I. Closed-loop bias control of optical quadrature modulator. *IEEE Photonics Technology Letters.* 2006. vol. 18, pp. 2209–2211. Doi: 10.1109/LPT.2006.884759
 10. Wang L. L., Kowalczyk T. A. Versatile bias control technique for any-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators. *Journal of Lightwave Technology.* 2010. vol. 28, pp. 1703–1706. Doi: 10.1109/JLT.2010.2048553
 11. Padmaraju K. C., Chan J., Chen L., Lipson M., Bergman K. Thermal stabilization of a microring modulator using feedback control. *Optics Express.* 2012. vol. 20, 2799. DOI: 10.1364/OE.20.027999
 12. Bui D.T., Nguyen C.T., Ledoux-Rak I., Zyss J., Journet B. Instrumentation system for determination and compensation of electro-optic modulator transfer function drift. *Measurement Science and Technology.* 2011. vol. 22, pp. 125105. Doi: 10.1088/0957-0233/22/12/125105
 13. Fu. Y., Zhang X., Hraimel B., Liu T., Shen D. Mach-Zehnder: A Review of Bias Control Techniques for Mach-Zehnder Modulators in Photonic Analog Links. *IEEE Microwave magazine.* 2013. vol. 14, pp. 102–107. Doi: 10.1109/MMM.2013.2280332
 14. Salvestrini J. P. et al. Analysis and Control of the DC Drift in LiNbO₃-Based Mach-Zehnder Modulators. *J. Light. Technol.* 2011. vol. 29, no. 10. pp. 1522–1534. Doi: 10.1109/JLT.2011.2136322
 15. Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Yuriev V. A., Volyntsev A. B. Effect of the structure and mechanical properties of the near-surface layer of lithium niobate single crystals on the manufacture of integrated optic circuits. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2017. vol. 53, no. 1. pp. 82–87. DOI: 10.3103/S8756699017010125
 16. Piecha J. et al. Features of surface layer of LiNbO₃ as-received single crystals: Studied in situ on treatment samples modified by elevated temperature. *Solid State Ionics.* 2016. vol. 290, pp. 31–39. DOI: 10.1016/j.ssi.2016.04.001
 17. Sosunov A., Ponomarev R., Semenova O., Petukhov I., Volyntsev A. Effect of pre-annealing of lithium niobate on the structure and optical characteristics of proton-exchanged waveguides. *Optical Materials.* 2019. vol. 88, pp. 176–180. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.11.018
 18. Suchoski P. G., Findakly T. K., Leonberger F. J. Stable low-loss proton-exchanged LiNbO₃ waveguide devices with no electro-optic degradation. *Opt. Lett.,* 1988, vol. 13, no. 11. pp. 1050–1052. DOI: 10.1364/OL.13.001050
 19. Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Yuriev V. A., Tsiberkin K. B., Volyntsev A. B. Features of structure and mechanical properties LiNbO₃. *Ferroelectrics.* 2017. vol. 506 (1), pp. 24–31. DOI: 10.1080/00150193.2017.1281686
 20. Nagata H. Activation energy of DC-drift of X-cut LiNbO₃. *Technology,* 2000, vol. 12, no. 4, pp. 386–388. DOI: 10.1364/AO.37.008147

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Сосунов А. В., Пономарев Р. С., Журавлев А. А., Мушинский С. С., Кунева М. Подавление дрейфа рабочей точки интегрально-оптических схем на основе ниобата лития // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 2. С. 5–13. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-05-13

Please cite this article in English as:

Sosunov A. V., Ponomarev R. S., Zhuravlev A. A., Mushinsky S. S., Kuneva M. Reduction of drift of operating point in lithium niobate-based integrated-optical circuit. Bulletin of Perm University. Physics, 2021, no. 2, pp. 5–13. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-05-13

Сведения об авторах

1. *Алексей Владимирович Сосунов*, ассистент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990
2. *Роман Сергеевич Пономарев*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990
3. *Антон Александрович Журавлев*, главный конструктор, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614990
4. *Сергей Сергеевич Мушинский*, начальник отдела, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614990
5. *Мариана Кунева*, PhD, с.н.с., Институт физики твердого тела академии наук Болгарии, Tzarigradsko Chaussee 72, Blvd., 1784 Sofia, Bulgaria

Author information

1. *Alexey V. Sosunov*, Assistant, Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm, Russia
2. *Roman S. Ponomarev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm, Russia
3. *Anton A. Zhuravlev*, Chief designer, PJSC “Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company”, 25th October St. 106, 614990, Perm, Russia
4. *Sergei S. Mushinsky*, Head of Department, PJSC “Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company”, 25th October St. 106, 614990, Perm, Russia
5. *Mariana Kuneva*, PhD, Senior researcher, Institute of Solid State Physics, Tzarigradsko Chaussee 72, Blvd., 1784 Sofia, Bulgaria