

# Поляризационно-независимый электрооптический затвор-модулятор на объемных кристаллах $\text{LiNbO}_3$ и $\text{LiTaO}_3$

Б.Л.Давыдов, А.А.Крылов, Д.И.Ягодкин

*Рассмотрены два электрооптических затвора для неполяризованных малоразмерных пучков волоконных лазерных и люминесцентных излучателей. С точки зрения максимального контраста переключения оценены требования к кристаллам, точности поддержания их температур, а также допуски на изготовление и юстировку. Испытан сопряженный с изотропным одномодовым волокном затвор на двух кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  с управляющим полуволновым напряжением  $\sim 270$  В. Показано, что погрешности юстировки и изготовления кристаллических фазовых элементов могут быть скомпенсированы слабым контролируемым подогревом одного из кристаллов.*

**Ключевые слова:** электрооптический затвор, волоконный лазер.

## 1. Введение

Электрооптические (ЭО) модуляторы с наносекундными постоянными времени в лазерной оптике обычно используются как коммутаторы добротности резонаторов или как внерезонаторные формирователи оптических импульсов требуемой длительности. ЭО модуляторы обычно предназначены для работы с поляризованным излучением [1–3]. Развитие люминесцентных и лазерных излучателей на изотропном волокне сделало актуальной разработку модуляторов, способных работать с неполяризованным светом без сопутствующих поляризационных потерь [4, 5].

Поляризационно-независимый модулятор можно получить, если его управляемый фазовый элемент поместить не просто между двумя поляризаторами, а между двумя поляризационными делителями [6]. Такими делителями могут быть две одинаковые призмы в виде параллелепипедов, выполненные из любого достаточно сильно двулучепреломляющего кристалла ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\alpha\text{-BBO}$ ,  $\text{YVO}_4$ ,  $\text{TiO}_2$  и т. д.). Первая призма пространственно разделяет входной неполяризованный луч на два параллельных, ортогонально поляризованных луча, которые затем проходят через общий для них управляемый фазовый элемент. После этого лучи попадают во вторую призму, функция которой состоит в том, чтобы либо сводить их снова в один луч, либо разводить ещё больше в зависимости от их поляризационных состояний.

Мы исследовали в режиме оптического затвора два варианта модулятора, различающихся устройством фазового элемента. Оценено влияние на контраст переключения (отношение максимальной и минимальной интенсивностей света на выходе модулятора) оптического качества кристаллических заготовок, точности их изготовления и температурных градиентов в ЭО элементах.

Проведено сравнение модуляторов с фазовыми элементами из кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$ . Изготовлен и испытан модулятор из двух кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ , жёстко сопряжённый через градиентные линзы с изотропными волокнами.

## 2. Оптические схемы

В первом варианте ЭО затвора два коллимированных, ортогонально поляризованных луча распространяются вдоль оптической оси ЭО кристалла  $\text{LiNbO}_3$  или  $\text{LiTaO}_3$  (рис. 1). Во втором варианте эти лучи распространяются через управляемый фазовый элемент, состоящий уже из пары указанных одинаковых кристаллов (рис. 2). При этом лучи распространяются перпендикулярно ортогонально расположенным оптическим осям (принцип «оптической термокомпенсации» [1]), а плоскости их поляризации составляют углы  $\pm 45^\circ$  с этими осями.

В обоих вариантах для разделения и объединения лучей использовались поляризационно-делительные призмы-параллелепипеды (ПДП) из кристалла  $\text{CaCO}_3$  с угловым энергетическим сносом необыкновенного e-луча  $\delta \approx 6^\circ$ .

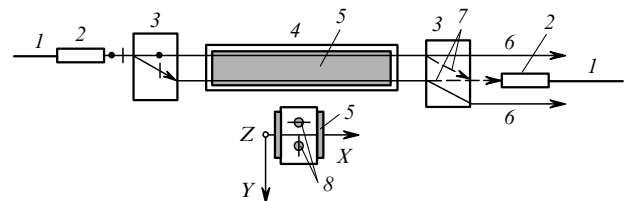


Рис. 1. Схема поляризационно-независимого затвора 1 на одном кристалле:

1 – входное и выходное изотропные одномодовые волокна; 2 – согласующие градиентные линзы (граданы); 3 – поляризационно-делительные призмы из кристаллов  $\text{CaCO}_3$ ; 4 – ЭО кристалл  $\text{LiNbO}_3$ ; 5 – электроды на ЭО кристалле; 6 – ход ортогонально поляризованных лучей при отсутствии управляющего напряжения на кристалле 4; 7 – ход ортогонально поляризованных лучей (штриховые линии) при подаче управляющего напряжения  $U_\pi$  на кристалл 4; 8 – поляризованные лучи в поперечном сечении ЭО кристалла ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – кристаллографические оси ЭО кристалла,  $Z$  – оптическая ось).

Б.Л.Давыдов, А.А.Крылов, Д.И.Ягодкин. Институт радиотехники и электроники РАН, Россия, Московская обл., 141120 Фрязино, пл. акад. Введенского, 1; e-mail: bld\_res2000@rambler.ru

Поступила в редакцию 20 сентября 2006 г.

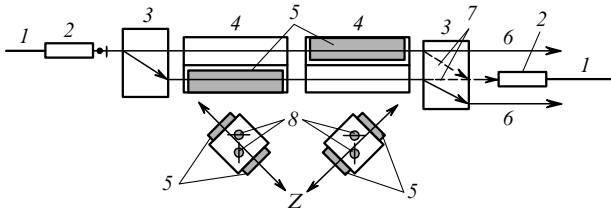


Рис.2. Схема поляризационно-независимого затвора на двух кристаллах:

1 – входное и выходное изотропные одномодовые волокна; 2 – согласующие градиентные линзы (граданы); 3 – поляризационно-делительные призмы из кристаллов  $\text{CaCO}_3$ ; 4 – два одинаковых ЭО кристалла  $\text{LiNbO}_3$ ; 5 – электроды на ЭО кристаллах; 6 – ход ортогонально поляризованных лучей при отсутствии управляющего напряжения на кристаллах 4; 7 – ход ортогонально поляризованных лучей (штриховые линии) при подаче управляющего напряжения  $U_{\pi}$  на кристаллы 4; 8 – поляризованные лучи в поперечных сечениях ЭО кристаллов ( $Z$  – оптические оси ЭО кристаллов).

При подаче на кристалл напряжения  $U$ , равного по волновому напряжению  $U_{\pi}$ , каждый из лучей на выходе из ЭО кристалла(ов) меняет азимут своего плоскополяризованного состояния на  $90^\circ$ . В этом случае выходная ПДП сводит поляризованные лучи снова в один общий луч, который через градиентную линзу вводится в выходное волокно. При  $U = 0$  поляризационные состояния лучей не меняются, в результате чего лучи после выходной ПДП разводятся пространственно ещё больше и, как следствие, либо не вводятся в волокно, либо не распространяются по нему из-за ограничения по числовой апертуре волокна. Обе схемы работают на включение, т. е. затвор закрыт при отсутствии управляющего напряжения и открыт при его наличии. Поскольку степень «закрытости» затвора не связана с наличием управляющего напряжения, то этот режим обеспечивает максимальный контраст переключения во всей спектральной полосе коммутируемого света  $\Delta\lambda \approx 50$  нм.

### 3. Контраст переключения

Анализ влияния на контраст переключения оптического качества кристаллов, их температур, точности изготовления, юстировки и спектральной полосы коллимированного света проводился путём расчёта стационарных и ЭО относительных фаз, а затем и интенсивностей в каждом луче [2, 3]. Интенсивности лучей после выходной ПДП суммировались. Учитывались спектральные и температурные изменения коэффициентов преломления, по волновому напряжению, а также температурные изменения линейных размеров кристаллов. Слабые дисперсионные и температурные изменения ЭО коэффициентов  $r_{ik}$  в исследуемом диапазоне  $\Delta\lambda \approx 50$  нм при температурах  $0 - 50^\circ\text{C}$  не учитывались. Кроме того, предполагалось, что на малом диаметре светового пучка ( $\sim 0.5$  мм) поперечные неоднородности коэффициентов преломления ЭО кристаллов пренебрежимо малы.

Приведём параметры кристаллов фазового элемента, использованные при расчётах. Для кристалла  $\text{LiNbO}_3$  ( $T = 0 - 50^\circ\text{C}$ ) [7] коэффициент линейного расширения вдоль оптической оси  $\alpha_{\parallel} \approx 0.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , коэффициент линейного расширения поперёк оптической оси  $\alpha_{\perp} \approx 1.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Дисперсионная и температурная зависимости коэффициентов преломления  $n_o(\lambda, T)$  и  $n_e(\lambda, T)$  этого кристалла взяты из [8]. Для кристалла  $\text{LiTaO}_3$  ( $T = 0 - 50^\circ\text{C}$ ) [9] коэффициенты  $\alpha_{\parallel} \approx 0.12 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{\perp} \approx 2.2 \times 10^{-5}$

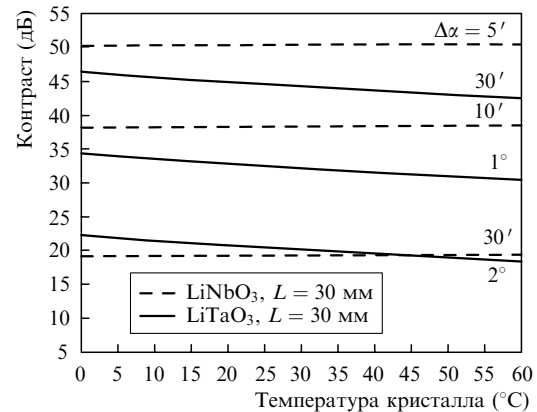


Рис.3. Зависимости контраста переключения от температуры ЭО кристалла  $T$ , угла разъюстировки  $\Delta\alpha$  и материала ЭО фазового элемента затвора 1.

$\text{K}^{-1}$ . Дисперсионные зависимости коэффициентов преломления кристалла  $\text{LiTaO}_3$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 1.05 - 1.1$  мкм определены следующими формулами [3]:

$$n_o(\lambda) \approx 2.13720 - 0.046(\lambda - 1.05),$$

$$n_e(\lambda) \approx 2.14107 - 0.048(\lambda - 1.05),$$

где  $\lambda$  взято в микрометрах. Производные  $dn_o/dT = 2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  и  $dn_e/dT = 5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  получены из температурных зависимостей  $n_o(T)$  и  $n_e(T)$  [9].

На рис.3–7 представлены результаты проведенного анализа. При этом рис.3 и 4 относятся к схеме затвора с одним кристаллом (рис.1), рис.6 и 7 – к схеме затвора из двух кристаллов (рис.2), а рис.5 – к обеим схемам. Рисунок 3 демонстрирует слабую зависимость контраста от температуры ЭО кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$ .

Расчёт проводился в предположении продольной оптической однородности кристалла на пути распространения светового луча (т. е.  $\Delta n_o = \Delta n_e = 0$ ) и точной установки оптической оси вдоль нормали к входному торцу. Параметрами здесь являются длина кристалла  $L$  и угол разъюстировки  $\Delta\alpha$  в воздухе между падающим лучом и нормалью к входному торцу. Интересно отметить, что призма из  $\text{LiTaO}_3$  имеет заметно худшую термостабильность, чем призма из  $\text{LiNbO}_3$ .

Преимущество ЭО призмы из  $\text{LiTaO}_3$  проявляется в возможности её более грубой угловой установки. На рис.4 показаны зависимости контраста от угла разъюс-

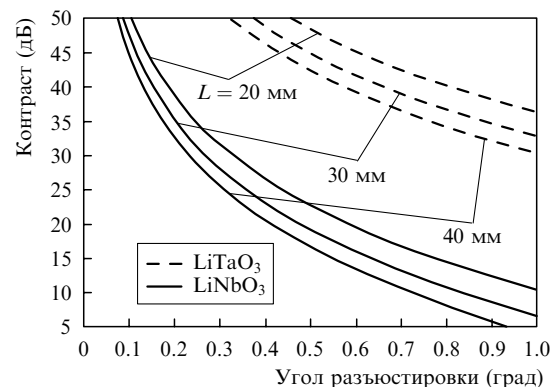


Рис.4. Зависимости контраста переключения от угла разъюстировки  $\Delta\alpha$  ЭО кристалла затвора 1 при разных длинах кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$ .

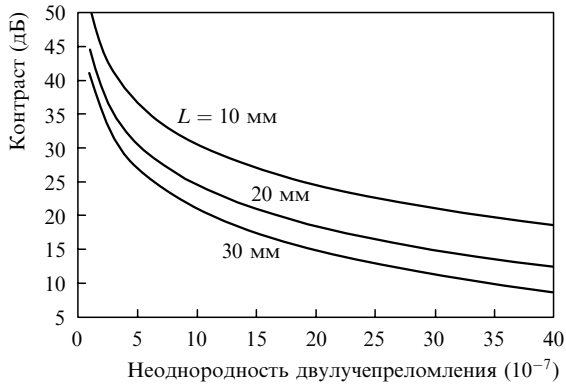


Рис.5. Зависимости контраста переключения от степени неоднородности  $\delta n$  двулучепреломления кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  при разных длинах ЭО фазового элемента в затворах 1 и 2.

тировки  $\Delta\alpha$  коллимированного пучка для разных длин ЭО кристалла при комнатной температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ . Например, для  $\text{LiNbO}_3$ -призмы с максимально возможной, но ещё реальной длиной 30 мм для получения контраста не менее 35 дБ следует добиваться юстировки с погрешностью не более  $12'$ , а для  $\text{LiTaO}_3$ -призмы достаточно обеспечить погрешность  $53'$  (т. е.  $\sim 1^\circ$ ).

Зависимость контраста от степени неоднородности двулучепреломления ЭО кристаллов с различными суммарными длинами  $L$  показана на рис.5. Условия расчёта были следующими:  $T = 20^\circ\text{C}$ , луч падает нормально на входной торец и распространяется вдоль оптической оси. Под неоднородностью двулучепреломления понимается любое добавочное двулучепреломление  $\delta n$  (добавочное к собственному двулучепреломлению идеального кристалла  $\Delta n = |n_o - n_e|$ ), вызванное внутренними напряжениями в кристалле вдоль распространения луча и влияющее на относительную фазу. Эта неоднородность проявляет себя одинаковым образом в обеих схемах модулятора, поэтому рис.5 является общим для них. Хорошо видно, что существуют весьма жёсткие критерии отбора кристаллов, особенно при больших длинах  $L$ . Например, при длине  $L = 20$  мм для обеспечения контраста 30 дБ допустимая неоднородность  $\delta n \approx 5 \times 10^{-7}$  (!). Реально ситуация не столь катастрофична, поскольку на практике угловой подъюстировкой кристалла иногда (если, конечно, в кристалле нет слишком больших напряжений) удается сориентировать световые пучки так, что контраст  $\sim 30$  дБ достигается даже в стандартных кристаллах, например в  $\text{LiNbO}_3$  марки ЛН-9. Предварительно, конечно, соответствующие кристаллические заготовки следует исследовать на наличие однородных зон (хотя бы по качеству коноскопической картины в направлении оптической оси), выделяя те зоны, где наблюдается неискаженный коноскопический «крест».

Анализ влияния спектральной ширины или спектрального положения длины волны света на контраст показал его крайне слабую зависимость (изменения контраста составляли менее 0.1 дБ) от этих факторов в пределах полосы  $\Delta\lambda = 50$  нм, причём это относится к обеим схемам. При изготовлении фазового элемента из кристалла  $\text{LiNbO}_3$  по схеме затвора 1 это верно для углов разъюстировки  $\Delta\alpha < 1^\circ$ , а по схеме затвора 2 – для разности длин двух кристаллов  $\Delta L < 1$  мкм. Иными словами, по этому «спектральному» параметру для схемы 2 вполне достаточно изготовление образцов с углом клина  $\sim 5'$  и примерно такая же погрешность их угловой юстировки.

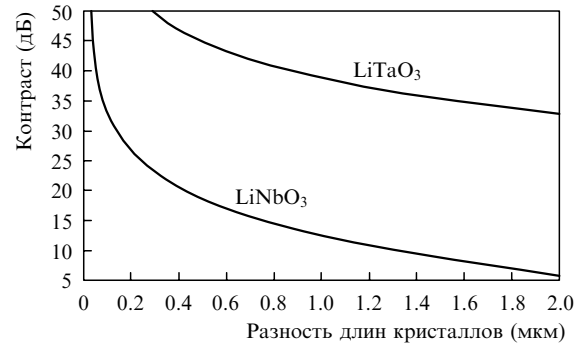


Рис.6. Зависимости контраста переключения от разности длин  $\Delta L$  ЭО кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  затвора 2.

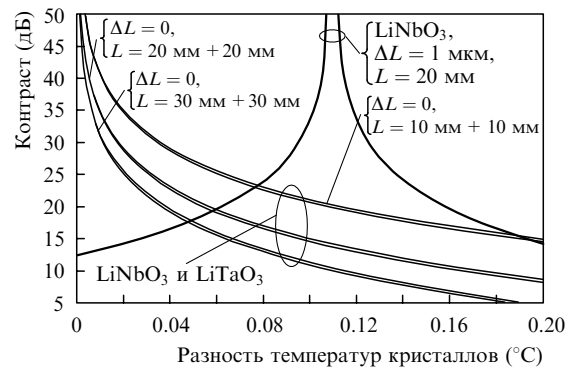


Рис.7. Контраст затвора 2 в зависимости от разности температур  $\Delta T$  ЭО кристаллов, их суммарной длины и «разнотолщинности»  $\Delta L$  вдоль направления распространения лучей.

На рис.6 и 7 показаны результаты анализа влияния разности длин двух ЭО кристаллов  $\Delta L$  и разности их температур  $\Delta T$  на контраст для оптической схемы 2. Расчёты проводились при следующих условиях: рис.6 – температуры кристаллов одинаковые, кристаллы однородные, грани ЭО призмы ориентированы по кристаллографическим осям, свет падает по нормали к входной грани; рис.7 – длины кристаллов одинаковые, кристаллы однородные, грани ЭО призмы ориентированы по кристаллографическим осям, свет падает по нормали к входной грани.

Легко заметить, что для кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  при желаемом контрасте, например не менее 30 дБ, требования к равенству их длин оказываются весьма жёсткими ( $\Delta L < 0.15$  мкм). Если оптик полирует кристаллический блок квадратного сечения, склеенный, например, из 100 кристаллов сечением  $2 \times 2$  мм каждый, то на базе 20 мм это требование выражается в угловом допуске на общий клин порядка  $1.5''$  (!). Только тогда первый и последний образцы из ряда в 10 кристаллов будут различаться не более чем на 0.15 мкм. Поэтому разумно изготавливать малое число кристаллов, например 4, установленных в квадрат  $2 \times 2$  и заключённых в дешёвые оптические «паразитки» больших размеров. Однако и в этом случае изготовление качественных образцов будет достаточно сложной задачей, поскольку допустимый клин всё равно будет достаточно малым –  $7.5''$ .

Выходом из этого положения может быть температурная подстройка контраста. Сильную зависимость последнего от разности температур  $\Delta T$  кристаллов демонстрирует рис.7. Создать необходимую разность  $\Delta T$  можно довольно просто, слегка подогревая накладные электроды одного из кристаллов. Это можно сделать, напри-

мер, с помощью приклеенных к электродам маломощных резисторов. Для иллюстрации на рис.7 приведена зависимость контраста от  $\Delta T$  для весьма грубо изготовленных образцов из  $\text{LiNbO}_3$ , когда разность геометрических длин  $\Delta L = 1$  мкм. Видно, что  $\Delta T \sim 0.10 - 0.12$  °C обеспечивает контраст более 30 дБ. Безусловно, такую разность  $\Delta T$  придётся поддерживать с погрешностью до сотых долей градуса, т.е. в конструкцию прибора следует заложить требование, чтобы изменения температуры внешней среды не приводили к изменению  $\Delta T$  даже при общем изменении температуры кристаллов. Такая задача не представляется слишком сложной. Необходимы относительно массивные электроды в закрытом корпусе из материала с высокими теплопроводностью и теплоемкостью. Возможен и «радиотехнический» путь решения проблемы, заключающийся в автоматической термостабилизации с помощью термодатчиков.

Как следует из рис.6, для кристалла  $\text{LiTaO}_3$  допуски на «разнотолщинность»  $\Delta L$  оказались более чем на порядок менее жесткими, чем в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ .

Таким образом, результаты приведённых выше расчётов позволяют утверждать, что влияние погрешностей изготовления и установки ЭО образцов, а в некоторых случаях и оптических неоднородностей, может быть существенно ослаблено угловой и температурной «подстройками» кристаллов.

Взяв за основу известные характеристики кристаллов (табл.1), в заключение приведём (табл.2 и 3) рассчитанные значения статических напряжений  $U_\pi$  для двух схем затвора-модулятора при длине волны света  $\lambda = 1.06$  мкм и межэлектродных расстояниях  $d = 2.2$  мм [2, 3].

Табл.1. ЭО коэффициенты и главные значения коэффициентов преломления кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$ .

Кристалл	$n_o$	$n_e$	$r_{13}$ (м/В)	$r_{33}$ (м/В)	$r_{22}$ (м/В)
$\text{LiNbO}_3$	2.2343	2.1553	$8.6 \times 10^{-12}$	$30.8 \times 10^{-12}$	$7 \times 10^{-12}$
$\text{LiTaO}_3$	2.1367	2.1406	$7.9 \times 10^{-12}$	$35.8 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-12}$

Табл.2. Управляющее полуволновое напряжение  $U_\pi$  для схемы 1 с одним кристаллом.

Кристалл	$U_\pi$ (В)		
	$L = 20$ мм	$L = 30$ мм	$L = 40$ мм
$\text{LiNbO}_3$	747	498	373
$\text{LiTaO}_3$	5976	3984	2988

Табл.3. Управляющее полуволновое напряжение  $U_\pi$  для схемы 2 с двумя кристаллами.

Кристалл	$U_\pi$ (В)		
	$L = 10$ мм + 10 мм	$L = 20$ мм + 20 мм	$L = 30$ мм + 30 мм
$\text{LiNbO}_3$	549	274	183
$\text{LiTaO}_3$	425	213	142

#### 4. Эксперимент

Для эксперимента был собран макет «термокомпенсированной» схемы 2 с двумя стандартными ЭО кристаллами  $\text{LiNbO}_3$  марки ЛН-9 одинаковых размеров ( $2.2 \times 2.2 \times 20$  мм). Испытывались две пары кристаллических образцов, изготовленных в едином блоке. Клинь каждого образца не превышал  $1'$ . Погрешности ориентировки кристаллографических осей укладывались в диапазон

$\pm 15'$ . Предварительно кристаллические заготовки визуально исследовались на однородность по качеству конусокопической картины в поляризованном свете He-Не-лазера при сканировании фокусной перетяжки по сечению заготовки. Участки с наилучшей однородностью отмечались, и из них изготавливались ЭО призмы.

В качестве источника неполяризованного излучения был выбран люминесцентный волоконный излучатель ( $\lambda = 1.064$  мкм,  $\Delta\lambda = 0.01$  мкм,  $P_{\text{out}} = 10$  мВт), стабилизированный по выходной мощности ( $\pm 0.5\%$ ). На торцах входного и выходного изотропных волокон (с числовой апертурой  $NA = 0.1$ ) находились градиентные линзы, обеспечивающие коллимацию гауссова пучка до диаметра 0.4 мм. Золотые электроды с подслоем хрома наносились на ЭО кристаллы напылением, после чего к ним прижимались латунные электроды толщиной 2 мм. Для температурной подстройки в центрах верхних электродов каждого кристалла наклеивался резистор мощностью 0.25 Вт. В качестве поляризационных делителей использовались призмы из одноосных кристаллов кальцита ( $L = 10$  мм). Модулятор закрывался латунным кожухом со стенками толщиной 1.5 мм. При снятом кожухе имелась возможность угловой юстировки пары ЭО кристаллов относительно падающих на них коллимированных лучей.

Статическая характеристика модулятора почти идеальна по форме (рис.8). Неоднократно измеренные значения полуволнового управляющего напряжения  $U_\pi$  уложились в диапазон  $270 \pm 5$  В, что согласуется с предварительной оценкой. В лучшей паре кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  получен максимальный статический контраст переключения  $\sim 34$  дБ, в другой паре ЭО кристаллов, имеющих большие напряжения, он составлял  $\sim 23$  дБ. Контраст 34 дБ достигался двумя способами – как угловой подстройкой пары ЭО кристаллов как целого, так и подогревом одного из кристаллов в паре (конкретный кристалл для подогрева определялся экспериментально). В первом случае результат был менее стабильным, чем во втором, поскольку кожух снимался для юстировки. Со снятым кожухом модулятор реагировал на любое конвекционное движение воздуха, при наличии кожуха такая реакция не наблюдалась.

Возможность настройки модулятора путём подогрева одного из кристаллов в схеме 2 демонстрируется на рис.9, на котором приведено изменение контраста при подогреве и при различных угловых настройках всей пары ЭО кристаллов относительно падающих лучей. Поведение кривых на рис.9 коррелирует с поведением расчётных кривых на рис.7 – на обоих рисунках кривые имеют

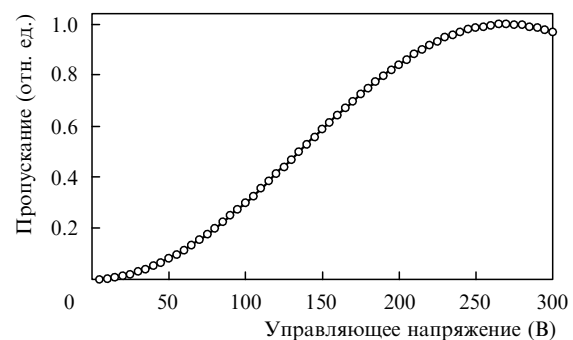


Рис.8. Экспериментальная статическая характеристика поляризационно-независимого ЭО затвора с управляемым фазовым элементом из двух кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ .

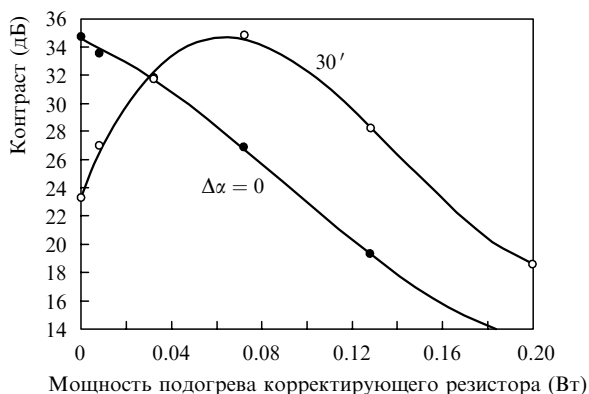


Рис.9. Подстройка контраста затвора 2 подогревом одного из ЭО кристаллов.

экстремумы при ненулевых разностях оптических длин (неважно как полученных – за счёт «разнотолщинности» или за счёт разъюстировки клинообразных образцов).

## 5. Заключение

Результаты проведенного исследования показывают, что поляризационно-независимые модуляторы описанного типа из кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  вполне реальны. Существующие апертурные ограничения, связанные с необходимостью пропустить одновременно два луча через ЭО кристалл и сохранить при этом низкие управляющие напряжения, предполагают применение модуляторов только для модуляции малоразмерных пучков. Идеальным с этой точки зрения является коллимированный градиентной линзой гауссов световой пучок, выходящий с торца одномодового волокна. Таким образом, оптимальные области применения модуляторов – это модуляция добротности лазерных резонаторов из изотропного волокна и быстродействующая внрезонаторная коммутация неполяризованного излучения волоконных лазеров или люминесцентных излучателей ближнего ИК диапазона.

Гарантированный контраст в модуляторах из кристаллов стандартного качества (т. е. без специального отбора) превышает 20 дБ. При отборе оптически однородных кристаллов, качественном изготовлении из них фазовых элементов и соответствующем конструировании модуляторов реально получить стабильный контраст более 30 дБ.

Конструкция модулятора из двух ЭО кристаллов может быть достаточно простой (т. е. без юстировочных устройств), поскольку максимальный контраст прибора может достигаться при слабым подогреве одного из кристаллов.

Кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  могут быть использованы в обеих рассмотренных схемах ЭО взаимодействия. Кристаллы  $\text{LiTaO}_3$  по причине слишком высоких значений управляющего напряжения при распространении света вдоль оптической оси целесообразно использовать только в «термокомпенсированной» схеме с двумя кристаллами. В этой схеме кристаллы  $\text{LiTaO}_3$ , безусловно, предпочтительнее кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с точки зрения более простой технологии изготовления соответствующих ЭО образцов и более низкой точности угловой настройки неидеальных «клиновых» образцов. В остальном (термостабильность, требование высокого оптического качества) кристаллы  $\text{LiTaO}_3$  не имеют преимуществ. Более того, мы полагаем, что возможность термической подстройки модулятора практически уравнивает шансы обоих кристаллов.

Схема затвора на рис.1 в целом несколько более термостойчива, чем схема на рис.2. В то же время управляющее напряжение в схеме рис.2 примерно в 1.4 раза меньше и существует реальная возможность уменьшать далее это напряжение, увеличивая длины обоих кристаллов без катастрофического ухудшения их суммарного оптического качества. Подобная операция для модулятора на одном кристалле затруднительна, поскольку существуют серьёзные технологические трудности выращивания оптически однородных кристаллов с большими длинами.

1. Магдич Л.Н., Панкратов В.М., Пономарёва И.П. *ПТЭ*, № 1, 166 (1968).
2. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. *Методы модуляции и сканирования света* (М.: Наука, 1970).
3. Сонин А.С., Василевская А.С. *Электрооптические кристаллы* (М.: Атомиздат, 1971).
4. [www.ipgphotonics.com](http://www.ipgphotonics.com).
5. Ягодкин Д.И., Давыдов Б.Л. *Тезисы докл. XLVI конф. МФТИ* (Долгопрудный, Московская обл., 2003, с. 58).
6. Беляев Ю.Н., Кузнецов С.П., Новиков М.А. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **21** (3), 388 (1978).
7. *Технологические лазеры. Т. 2*. Под ред. Г.А.Абильситова (М.: Машиностроение, 1991).
8. Hobden M.V., Warner J. *Phys. Lett.*, **22**, 243 (1966).
9. *Акустические кристаллы*. Под ред. М.П.Шаскольской (М.: Наука, 1982).