

LiNbO₃-затвор для волоконных лазеров

Б.Л.Давыдов, Д.И.Ягодкин

Экспериментально исследован выполненный на единственном кристалле LiNbO₃ принципиально термостабильный электрооптический затвор (модулятор), предназначенный для управления излучением лазерных и люминесцентных волоконных излучателей. Кратко описан принцип работы модулятора, измерена его статическая характеристика, проведены испытания в импульсном режиме, а также исследована зависимость поведения прибора от температуры. В экспериментальном приборе, объединенном с изотропными одномодовыми волокнами, в режиме коммутации света с длиной волны $\lambda = 1060$ нм получен контраст переключения 38 дБ при постоянном напряжении $U_{\lambda/2} = 400$ В. В импульсном режиме полуволновое напряжение составило 800 В.

Ключевые слова: электрооптический затвор, модулятор, LiNbO₃, волоконный лазер.

1. Введение

Электрооптические (ЭО) затворы-модуляторы с постоянными времени порядка нескольких наносекунд обычно применяются в волоконной оптике в качестве модуляторов добротности резонаторов волоконных лазеров или как внрезонаторные формирователи импульсов лазерных и люминесцентных волоконных источников.

При оптических мощностях в десятки и более ватт, когда прямое применение более скоростных интегральных ЭО модуляторов затруднено, приходится использовать модуляторы на объёмных кристаллах. В волоконной оптике их конструктивно жёстко объединяют (связывают) с оптическими волокнами. Естественно, при этом стремятся минимизировать размеры приборов, сохраняя их основные характеристики: контраст, низкие управляющие напряжения, малые вносимые оптические потери, работоспособность в широком интервале температур.

В настоящей работе описывается малогабаритный ЭО амплитудный затвор-модулятор, в котором три компонента стандартной схемы модулятора (поляризатор, управляемый фазовый элемент, анализатор) совмещены в одном кристалле LiNbO₃. При этом основные оптические характеристики модулятора (контраст переключения, потери, управляющее напряжение) оказались практически термнезависимыми. Описываемый прибор предназначался для работы в области длин волн $\lambda = 1060 \pm 50$ нм.

Затворы-модуляторы, каждый из которых состоит из единственного ЭО кристалла, известны достаточно давно [1, 2]. В отличие от рассматриваемого модулятора, они обычно представляют собой электрооптически управ-

ляемые отражатели, осуществляющие угловую селекцию поляризованных пучков. Для твердотельных лазеров с относительно большими сечениями пучков этот способ дискриминации был единственно разумным, поскольку для разделения поляризованных пучков посредством их параллельного разведения потребовались бы слишком длинные кристаллы. В волоконной лазерной оптике стандартными являются коллимированные световые пучки малых сечений (диаметром 0.3 – 0.4 мм). Числовые апертуры одномодовых волокон NA обычно составляют ~ 0.1 . При вводе в волокно пучков, смещённых даже на размеры своих сечений, они выходят за пределы этой числовой апертуры и не распространяются по волокну. Таким образом, данное свойство волокна позволяет использовать модуляторы, обеспечивающие даже малые параллельные разведения поляризованных пучков. А это, в свою очередь, даёт возможность выбрать такую геометрию кристаллической призмы, эквивалентом которой была бы плоскопараллельная пластина, принципиально не дающая угловых искажений при температурных изменениях. Именно по этому принципу построена ЭО призма в нашем затворе.

Затворы-отражатели [1], наоборот, обладают весьма сильной температурной зависимостью углового положения выходного пучка. Их эквивалентом является 90°-ная призма Порро, в которой анизотропное расширение кристаллического материала, изменяя 90°-ный вершинный угол, изменяет и углы выхода лучей. Если кристалл одноосный, то анизотропия его температурного расширения обусловлена двумя неравными коэффициентами температурного расширения – вдоль (α_{\parallel}) и поперёк (α_{\perp}) оптической оси кристалла. Для LiNbO₃ коэффициенты линейного расширения различаются весьма существенно [3]: $\alpha_{\parallel} = 2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\perp} = 14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

В результате, например, для отражающей призмы из LiNbO₃ с основанием в виде прямоугольной трапеции, одна из боковых сторон которой наклонена под углом 45° к основанию [1], расчёт в отсутствие поля для возвращающегося обыкновенного пучка даёт отклонения

Б.Л.Давыдов, Д.И.Ягодкин. Институт радиотехники и электроники РАН, Россия, 141120 Фрязино, Московская обл., пл. акад. Введенского, 1; e-mail: bld_res2001@pochta.ru; ydimon@mail.ru

Поступила в редакцию 8 июня 2005 г., после доработки – 7 сентября 2005 г.

примерно $\pm 3'$ при изменении температуры кристалла на $\pm 30^\circ\text{C}$. У других призм-затворов отражательного типа, описанных в [1], уходы пучка по углу ещё больше и составляют $\pm 5'$. По нашим измерениям такие разбюстировки в приборах с одномодовыми волокнами приводят к оптическим потерям от 1.5 до 5.0 дБ. Поэтому моноэлементные затворы-отражатели не получили широкого распространения в лазерах промышленного типа, работающих в широком температурном интервале.

2. Оптическая схема

На рис.1 представлена оптическая схема описываемого ЭО затвора-модулятора и показаны пути распространения в нём поляризованных волн (лучей). Единственный оптический элемент описываемого модулятора выполнен из одноосного кристалла LiNbO_3 марки ЛН-9 в виде тонкой, удлинённой прямоугольной призмы с размерами $1.5 \times 3.5 \times 34$ мм. Основание призмы имеет вид параллелограмма с наклонёнными под 45° боковыми сторонами. Все четыре узкие грани призмы полированы. На две широкие грани-основания, ориентированные нормальными по оси x , нанесены золотые с подслоем хрома электроды 2.5×27 мм, к которым прикладывается поле E_x . Оптическая ось z кристалла ориентирована по длинному продольному ребру призмы. Обыкновенный и необыкновенный пучки (о- и е-лучи), падающие нормально на призму как один пучок, пространственно разделяются в кристалле при анизотропном полном внутреннем отражении на первой 45° -ной грани. После этого отражения о-волна и о-лучь коллинеарно распространяются вдоль оптической оси z , а е-волна (и примерно так же е-лучь) отклоняется в кристалле от осевого направления на угол $\sim 2^\circ$. В тригональном кристалле LiNbO_3 указанной ориентировки при приложении полуволнового поля E_x круговое перпендикулярное оси z сечение оптической индикатрисы трансформируется в эллиптическое с повёрнутыми на 45° осями. В результате этого кристалл превращается в $\lambda/2$ -пластинку. Соответствующее рабочее полуволновое напряжение, обеспечивающее такое поле [4],

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2N_0^3 r_{22}} \frac{d}{L}, \quad (1)$$

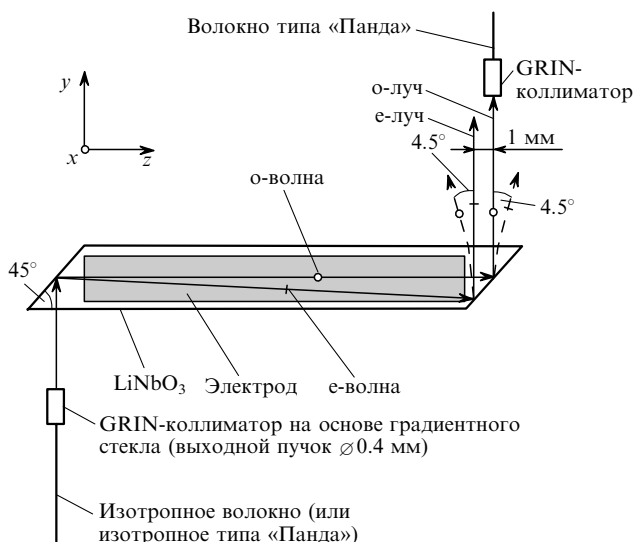


Рис.1. Оптическая схема затвора.

где λ – длина волны модулируемого света (1060 нм); $N_0 = 2.2343$ – «обыкновенный» показатель преломления LiNbO_3 ; r_{22} – элемент ЭО тензора r_{ik} , составляющий 7×10^{-10} см/В на низких частотах и 3.4×10^{-10} см/В на высоких [4]; L – длина электродов (27 мм); d – расстояние между электродами (1.5 мм). Таким образом, в одном кристалле совмещаются функции поляризатора, управляемого фазового элемента и анализатора.

Когда к электродам не приложено никаких напряжений, оба пучка выходят из кристалла параллельно друг другу с относительным смещением ~ 1 мм. При анизотропном тепловом расширении взаимно параллельные грани остаются таковыми при любой температуре, поэтому угловые характеристики пучков на выходе не меняются, а имеют место только их параллельные сдвиги. «Рабочим» пучком, вводимым через коллиматор в одномодовое волокно с числовой апертурой $NA = 0.1$, является обыкновенный пучок. Кристалл работает в режиме оптического затвора при переключении управляющего напряжения от $U_{\lambda/2}$ до нуля. В отсутствие электрического напряжения в выходное волокно вводится только о-лучь – модулятор открыт. При подаче на кристалл напряжения $U_{\lambda/2}$ о-волна на выходе из зоны электрического поля оказывается поляризованной ортогонально своему исходному поляризационному состоянию. После отражения от выходной 45° -ной грани о-волна преобразуется в е-волну и соответствующий ей луч в воздухе отклоняется в сторону примерно на угол 4.5° . С другой стороны, первичная е-волна, путь которой после первого отражения отличается от пути о-волны, после прохода зоны поля трансформируется в о-волну не полностью. После отражения от выходной 45° -ной грани она распадается на две волны с ортогональными поляризациями, одна из которых идёт в прежнем направлении, а другая отклоняется в воздухе тоже на угол примерно 4.5° , но в сторону, противоположную отклонению о-волны. В результате ни один из лучей в волокно не вводится – затвор закрыт. Таким образом, данному модулятору для его закрытия требуется электрическое напряжение смещения, сбрасываемое до нуля «открывающим» импульсом обратной полярности.

На рис.2 показана фотография экспериментального варианта прибора. В верхней части фотографии расположен сам ЭО затвор, связанный одномодовыми волокнами с микроколлиматорами, в нижней – формирователь высоковольтных импульсов, управляемый TTL-им-

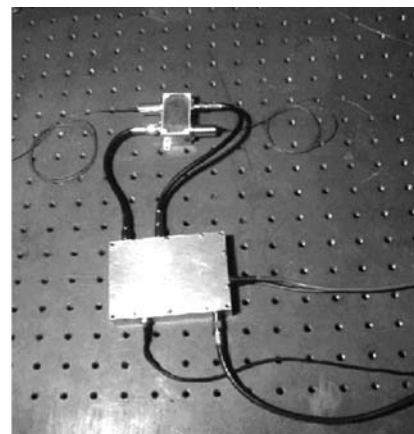


Рис.2. Затвор с блоком формирования высоковольтных импульсов (расстояние между резьбовыми отверстиями оптического стола равно 25 мм).

пульсами и питающийся от низковольтного источника постоянного напряжения. На фото показаны два электрических кабеля, центральные жилы которых соединены с началом и концом одного и того же электрода. Такая конструкция реализована только для оценки времени задержки электромагнитной волны при её распространении по кристаллу. Если фронты электрических импульсов составляют 2–3 нс и более, то вполне допустимо использовать один кабель.

3. Экспериментальные результаты

Основной характеристикой любого модулятора является его статическая характеристика [4]. Для ее снятия использовался стабильный неполяризованный суперлюминесцентный излучатель на основе изотропного кварцевого волокна с активированной ионами Yb³⁺ сердцевиной, накачиваемой двумя лазерными диодами ($\lambda_p = 970 - 980$ нм). Вывод излучения ($P_{out} = 10$ мВт, $\lambda_{mid} = 1060$ нм, $\Delta\lambda = 10$ нм) осуществлялся через торец одномодового волокна с числовой апертурой $NA = 0.1$. Это волокно сваривалось с таким же входным волокном затвора сварочным аппаратом Fitel (в опытном варианте затвор имел с обоих концов идентичные изотропные волокна). Потери на сварке не превышали 0.1 дБ. Излучение после затвора регистрировалось с торца волокна прецизионным измерителем мощности Anritsu ML9001A, имеющим закрытый вход через волоконный оперативный разъем. Постоянное электрическое смещение подавалось на затвор от регулируемого стабилизированного высоковольтного источника с выходным напряжением $U_{out} = 0 - 1000$ В ($\pm 0.5\%$).

Измеренная статическая характеристика данного прибора почти идеально совпадала по форме с теоретической (рис.3). Небольшая асимметричность расположения статической характеристики по оси абсцисс (10 – 15 В) объясняется ошибками в ориентировке оптической оси кристалла и в юстировке призмы относительно входного луча.

В тех же условиях измерялся статический контраст переключения (отношение максимальной и минимальной оптических мощностей, проходящих через модулятор) на нулевой частоте. При комнатной температуре ($T \approx 20^\circ\text{C}$) максимальный достигнутый контраст составил 38 ± 1 дБ при управляющем полувольтном напряжении 400 В. Расчётное значение этого напряжения при указанных электродах и толщине призмы согласно формуле (1) составляет 377 В.

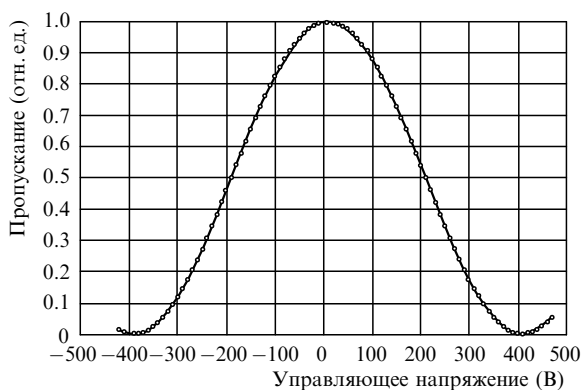


Рис.3. Статическая модуляторная характеристика затвора.

Табл.1.

Измеряемые параметры	Температура корпуса модулятора ($^\circ\text{C}$)		
	0	30	55
Выдержка заданной температуры (мин)	0	30	30
Вносимые потери (дБ)	0.4 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.1
Контраст переключения (дБ)	32 ± 1	35 ± 1	33 ± 1

При комнатной температуре вносимые суммарные потери затвора для обыкновенного пучка составили 0.5 ± 0.1 дБ (без учета поляризационных потерь 3 дБ).

Температурное поведение затвора исследовалось с помощью термокамеры МК240 фирмы WTB-binder (погрешность установки температуры $\pm 0.1^\circ$). В камеру помещался только сам затвор с волокнами и электрическими кабелями (без измерителя мощности, оптического излучателя и блока электрического смещения). В табл.1 приведены результаты измерений, из которых ясно, что вносимые потери и контраст переключения в диапазоне температур от нуля до 55°C меняются относительно слабо.

Тем не менее эти изменения оказались заметно больше теоретических. Расчёты показали, что при изменении температуры в пределах $\pm 30^\circ$ относительно комнатной о-луч на выходе из призмы должен испытывать параллельные смещения на ± 11 мкм. Такое смещение пучка относительно приёмного волокна с коллимирующей градиентной линзой (GRIN-линзой), использованной в модуляторе, теоретически может увеличить потери всего лишь на 0.02 дБ.

Расхождение экспериментальных и теоретических данных мы связываем с тепловым искажением формы корпуса затвора, не совсем удачно сконструированного в виде сплошного, открытого с одной стороны (т.е. несимметричного) лотка, да ещё и выполненного не из инвара (или суперинвара), а из нержавеющей стали с коэффициентом линейного расширения $\sim 10^{-5} \text{K}^{-1}$.

После термоиспытаний модулятор примерно в течение месяца находился при комнатной температуре, после чего был снова проверен контраст переключения при той же температуре. Он оказался равным 37 дБ, т.е. этот основной параметр восстановился практически до исходного значения.

Импульсные испытания затвора проводились с тем же суперлюминесцентным излучателем. В качестве управляющих сигналов использовались регулируемые по амплитуде и частоте следования высоковольтные импульсы с регулируемым постоянным смещением и запуском от TTL-сигналов. Параметры импульсов таковы: частота следования 0–20 КГц, форма трапециевидная с фронтами 4–6 нс, длительность по полувысоте 13 нс, амплитуда 300–900 В.

В импульсном режиме полувольтное напряжение удвоилось по сравнению с $U_{i/2}$ в статическом режиме, что объясняется «выключением» вторичного пьезоэффекта на высоких частотах из-за конечных скоростей звуковых волн в кристалле. При фронтах импульсов 4–6 нс самая быстрая в LiNbO₃ звуковая продольная волна (скорость ~ 7 км/с) проходит расстояние около 35 мкм, что много меньше расстояния между электродами (1500 мкм). Это удвоение напряжения вполне согласуется с уменьшенным вдвое на высоких частотах значением ЭО коэффициента r_{22} (см. выше).

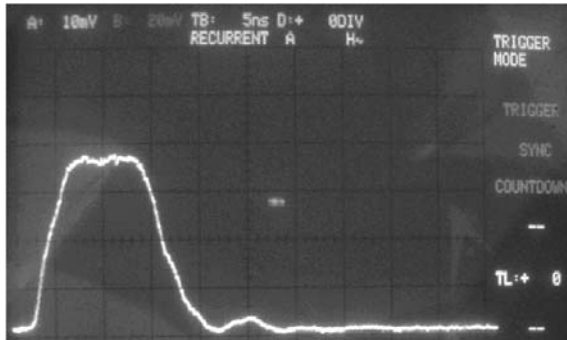


Рис.4. Оциллограмма формы оптического импульса (развёртка 5 нс/дел).

На рис.4 показана оциллограмма оптического импульса, формируемого модулятором из непрерывного оптического излучения при частоте следования импульсов 5 кГц. С ростом частоты следования свыше 20 кГц контраст переключения непрерывно уменьшался и достигал 6 дБ при частоте 50 кГц. Причиной падения контраста является высоковольтный формирователь, который на этих частотах не обеспечивал требуемых амплитуд импульсов.

Из схемы хода лучей (см. рис.1) понятно, что затвор-модулятор может работать и на «включение», если в отсутствие управляющего напряжения он закрыт, а при подаче напряжения $U_x = U_{\lambda/2}$ – открыт. Для этого следует сделать «рабочим» отклонённый бывший о-луч (на рис.1 это самый правый луч, показанный штриховой линией), вводя его в приёмное волокно при наличии на затворе напряжения $U_{\lambda/2}$. Существенным недостатком такой схемы является худшая термостабильность. Расчёт показал (при расчёте кроме коэффициентов термического расширения учитывались дисперсионные и температурные зависимости коэффициентов преломления LiNbO_3 , взятые из [5]), что при изменении температуры кристалла всего лишь на $\pm 5^\circ\text{C}$ выходящий из призмы е-луч (бывший о-луч) будет дополнительно отклоняться по углу примерно на $\pm 1.8'$. Экспериментально было установлено, что в сфокусированном при комнатной температуре приборе такой пучок при входе в волокно будет испытывать дополнительные потери ~ 0.4 дБ. При изменении температуры кристалла на $\pm 15^\circ\text{C}$ угловое отклонение увеличивается до $\pm 5.7'$ и потери составляют уже ~ 5 дБ. Таким образом,

затвор подобной конфигурации может работать либо в лабораторных условиях, либо при термостатировании его корпуса.

4. Заключение

Исследован амплитудный электрооптический модулятор, который в сравнении с традиционными схемами имеет следующие особенности:

- содержит всего один ЭО кристалл, совмещающий функции поляризатора, ячейки Поккельса и анализатора, и, следовательно, он минимизирован по оптическим потерям и конструктивно прост;

- характеризуется низкой чувствительностью к ширине спектра модулируемого излучения (в эксперименте статический контраст 38 дБ получен при $\Delta\lambda \approx 10$ нм, теоретически же для получения этого контраста допускается $\Delta\lambda \approx 50$ нм);

- на низких частотах имеет относительно малое для выбранной схемы ЭО взаимодействия полуволновое напряжение $U_{\lambda/2} \approx 400$ В, близкое к теоретическому значению 377 В; в импульсном режиме это напряжение вдвое больше, что объясняется «выключением» вторичного пьезоэффекта на высоких частотах;

- характеризуется высокой термостабильностью, если выбрана схема ЭО взаимодействия, соответствующая его «закрытому» состоянию при наличии напряжения смещения;

- может использоваться для работы без электрического смещения (т.е. будет открываться электрическим импульсом), но в этом случае из-за высокой температурной чувствительности может эксплуатироваться только в лабораторных условиях;

- кроме приложений в волоконной оптике может использоваться в качестве аттенюатора и коммутатора лазерных пучков малых (~ 1 мм) диаметров.

1. Белостоцкий Б.Р., Любавский Ю.В., Овчинников В.М. *Основы лазерной техники* (М.: Сов. радио, 1972, с. 128).
2. Камач Ю.Э., Козловский Е.Н., Овчинников В.М., Шамбуров В.А. *Кр. сообщ. по физике ФИАН*, №28, 1323 (1969).
3. Абильситов Г.А. и др. *Технологические лазеры. Справочник* (М.: Машиностроение, 1991, т. 2, с. 297).
4. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. *Методы модуляции и сканирования света* (М.: Наука, 1970).
5. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Мир, 1976, с. 113).