

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.378.325

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЯТОРОВ НА КРИСТАЛЛАХ КТР В Nd:YAG-ЛАЗЕРАХ С ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ

© 2009 г. В. А. Русов\*, канд. физ.-мат. наук; В. А. Серебряков\*, доктор физ.-мат. наук;  
А. Б. Каплун\*\*, доктор техн. наук; А. В. Горчаков\*\*\*, канд. физ.-мат. наук

\* Институт лазерной физики НПК "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

E-mail: rusov-vladimir@yandex.ru

\*\* Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: kaplun@itp.nsc.ru

\*\*\* Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: galex1111@mail.com

В статье представлены результаты исследований по получению высокоомных монокристаллов КТиОРО<sub>4</sub> (КТР). Показана возможность создания надежно функционирующих в импульсных и постоянных управляющих полях высококонтрастных электрооптических модуляторов на основе высокоомных кристаллов КТР, выращенных методом Чохральского из раствора в расплаве. Рассмотрены экспериментальные образцы модуляторов на кристаллах КТР и кристаллах КТР, легированных Rb, и показано, что они могут быть использованы для реализации моноимпульсных режимов генерации импульсно-периодических Nd:YAG-лазеров с высокой средней мощностью (до 4,0 кВт/см<sup>2</sup>), при этом потери на двулучепреломление в кристаллах КТР, наведенные излучением генерации, не превышают нескольких процентов.

**Ключевые слова:** кристаллы КТР, выращивание кристалла КТР из раствора в расплаве, электрооптический модулятор, высокоомный КТР, модуляция добротности лазера.

Коды OCIS: 140.3540

Поступила в редакцию 05.12.2008

### Введение

Сочетание в кристаллах семейства КТР (КТР, КТА, RTP, RTA) высоких нелинейно-оптических и электрооптических свойств определяет постоянный интерес к ним как к материалам, пригодным для создания электрооптических устройств управления мощным лазерным излучением [1–3]. Они обладают высокой лучевой стойкостью, низкими значениями пьезооптических констант, высокой оптической однородностью и невысокими значениями управляющих напряжений. В частности, удельное полуволновое напряжение для КТР на длине волны 1,064 мкм составляет около 7,7 кВ, лучевые пороги пробоя превышают 600 МВт/см<sup>2</sup>. Низкие (по сравнению с ниобатом и танталатом лития) значения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{33} = 13\text{--}15$ ) удобны для высокочастотного согласования, а умеренные значения коэффициента электромеханической связи определяют и существенно более низкий уровень "пьезозвона" при импульс-

ном управлении, что позволяет использовать их для модуляции излучения в килогерцовом диапазоне частот.

Однако использование монокристаллов КТР в электрооптике ограничивается электрохромной деградацией кристаллов в электрических полях [4]. Это связано с тем, что кристаллы КТР обладают высокой ионной проводимостью (особенность кристаллической структуры КТР – наличие каналов ионной проводимости), для таких кристаллов ионная проводимость вдоль оси  $z$  составляет  $10^{-6}\text{--}10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>, что приводит при включении электрического поля к инжеекции материала электродов в кристалл. Наряду с этим происходит образование центров окраски  $Ti^{4+} \rightarrow Ti^{3+}$  при протекании тока. Так, при напряженности поля порядка 200–500 В/см наблюдается поглощение света в приэлектродных областях, а при повышении напряженности до 1,0 кВ/см происходит необратимое расширение областей интенсивного почернения с течением времени.

При выращивании кристаллов КТР могут быть использованы две различные технологии – гидротермальная (в основном, в ряде фирм США) и выращивание из раствора в расплаве методом Чохральского [1]. При выращивании кристаллов гидротермальным методом возможно получение высокоомных элементов – с проводимостью до  $10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ , однако выход годных элементов довольно невелик – порядка нескольких процентов. Кроме того, процесс роста при использовании гидротермального метода длится около двух месяцев при давлении 400 атм, что исключает получение значительных объемов изделий. Аналогичная ситуация имеет место и при выращивании кристаллов флюсовым методом: длительный рост, сверхчистые реактивы, отбор из всех заготовок только высокоомных, дефекты, немонодоменность по поляризации, большое рассеяние на примесях и т. д. И как итог – малый выход годных кристаллов. Таким образом, большое сопротивление элемента есть условие необходимое, но не достаточное для реальной работы в модуляторах. Видимо поэтому, несмотря на возможность получения высокоомных кристаллов КТР стандартными технологиями, после ряда публикаций в девяностых годах прошлого века [1, 5–11] по их применению в электрооптике, в дальнейшем это направление не получило должного развития.

В нашей работе проведена направленная модификация основных технологических этапов флюсовой технологии выращивания кристаллов для получения именно высокоомных кристаллов. Частино результаты этих исследований были опубликованы ранее в работах [12, 13], доложены на Международной конференции “Laser Optics 2008” (Санкт-Петербург) и на 5-м Международном симпозиуме по современным проблемам лазерной физики (MPLP'2008) (г. Новосибирск). Целью работы было создание технологической цепочки, гарантированно приводящей к созданию электрооптических КТР-модуляторов с высоким контрастом (порядка 500:1), устойчиво работающих при постоянном и переменном управляющих напряжениях.

Для решения этой задачи мы выполнили:

модификацию флюсовой технологии для выращивания именно высокоомных кристаллов,  
модификацию контроля параметров КТР-кристаллов до изготовления рабочих элементов модуляторов,

разработку конструкции и изготовление экспериментальных образцов КТР-модуляторов,

исследование параметров КТР-модуляторов в составе импульсно-периодических Nd:YAG-лазеров с высокой средней мощностью.

## Выращивание высокоомных кристаллов КТР и исследование их параметров

Выращивание высокоомных монокристаллов КТР осуществлялось из полифосфатных растворов-расплавов. Для выращивания использовался модифицированный метод Чохральского – выращивание на ориентированную в направлении оси  $x$  затравку в градиентном температурном поле. Разработка технологии выращивания высокоомных кристаллов КТР предшествовало детальное изучение физико-химических характеристик и процессов кристаллизации полифосфатных расплавов.

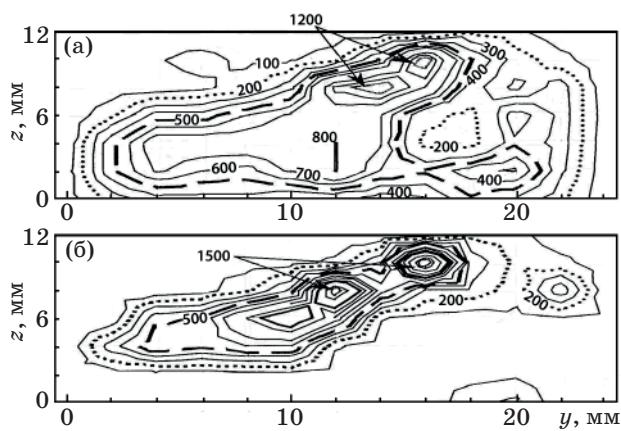
Исследования проводились с помощью созданных нами вибрационных методов (измерения вязкости и фазового анализа) [14–16]. При их использовании в одном опыте удается определить до 15 характеристик расплава и параметров кристаллизации, в том числе коэффициент вязкости, температуру ликвидуса, температуры начала кристаллизации и окончания плавления в зависимости от условий проведения опыта, условный темп кристаллизации и плавления, а также ряд других характеристик. По точности, информативности и производительности созданные методы многократно превосходят достигнутый мировой уровень. Некоторые характеристики выращенных кристаллов приведены в работе [17], “базовая” фазовая диаграмма тройной системы  $\text{K}_2\text{O}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{TiO}_2$  в области кристаллизации КТР приведена в [18]. Достоверная детальная информация о физико-химических характеристиках и кристаллизации расплавов позволила существенно уменьшить время выращивания булы (до 12–15 дней). Проведенные нами исследования позволили выбрать оптимальный состав флюса и оптимальные технологические режимы для выращивания высококачественных кристаллов с заданными свойствами.

Выращенные були КТР огранялись и полировались по кристаллографическим осям и максимальным размерам. На грани  $Z$  наносились графитовые электроды. На подготовленных таким образом заготовках регистрировались пространственные распределения неоднородности двулучепреломления (контраста), оптические спектры пропускания, определялись проводимость КТР, ее температурная и полевая

зависимости, границы начала электрохромных изменений. Предельно достижимый контраст определяется интегральной по диаметру пучка степенью нарушения однородности двулучепреломления. Такие нарушения обусловлены ростовыми дефектами различной природы и являются неизбежными при любой технологии роста КТР. Их характерные размеры и пространственное распределение определяются индивидуальными характеристиками ростовых установок, конкретными особенностями используемых технологий, и такая информация важна для направленного их улучшения.

В схеме контроля однородности использовался линейно поляризованный гауссов пучок ( $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$ , диаметр 1–3 мм, угол поляризации  $45^\circ$  относительно осей  $z$  и  $y$ ), который пропускался вдоль оси  $x$  образца через стоящий за ним поляризатор и регистрировался широкоапертурным фотоприемником. Тестируемый образец перемещался дискретно по осям  $z$ ,  $y$ , а затем по двумерному дискретному массиву значений контраста, пакетом программ MathCad экстраполировались его изолинии. При проведении тестов нами обнаружено, что дефекты определенного типа, существенные для работы электрооптического модулятора, не видны при обычном режиме измерения пространственного распределения контраста (без поля) и проявляются лишь в электрических полях выше определенного порога. Для исследованных нами кристаллов КТР порог “проявления” таких дефектов около 400 В/см.

Рисунок 1 иллюстрирует характер изменений в распределении локальной контрастности при



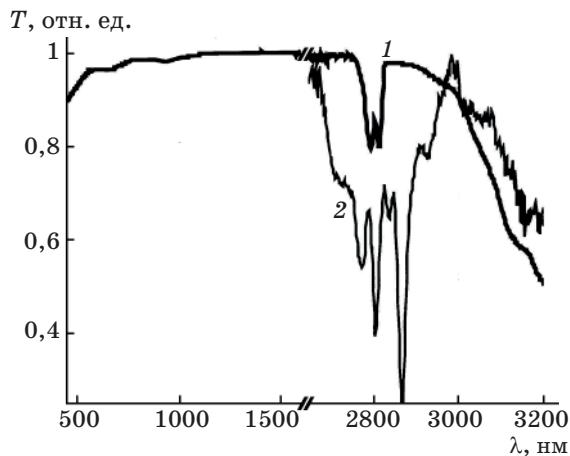
**Рис. 1.** Распределение контраста в буле кристалла КТР. а – без приложения поля ( $E_z = 0$ ), б – приложении постоянного электрического поля вдоль оси  $z$  ( $E_z = 2,0 \text{ кВ/см}$ ).

приложении напряжения вдоль оси  $z$  ограниченной заготовки. Наиболее вероятной причиной показанных изменений является локальный перегрев “слабых” зон були с повышенной проводимостью. Как видно из представленных рисунков, выращенные кристаллы обладают высокой оптической однородностью, а контраст в отдельных зонах заготовки достигает значений 700–1000.

Аналогичное тестирование проводилось для луча, распространяющегося вдоль оси  $y$ . Потенциальная привлекательность этого направления обусловлена большими ростовыми размерами були (заготовок) 30–35 мм и примерно на 10% большим эффективным электрооптическим коэффициентом для этого направления. Однако измеряемые максимальные значения контраста в этой геометрии не превышают 60–80 для 2 мм-пучка, что существенно ниже, чем для  $x$  направления. Характерной особенностью пространственного распределения контраста в этом случае является его ламинарная структура (плоскости  $zy$ ) и квазилинейное изменение контраста вдоль оси  $x$ . Такая слоевая структура не является особенностью только нашей технологии и, по-видимому, возникает в результате периодического накопления и сброса примесей и дефектов в процессе роста вдоль оси  $x$ . Отмеченное различие между двумя направлениями распространения света определяет область потенциального использования  $y$  направления только для модуляторов малой апертуры и контрастностью порядка 80–100. Сказанное, разумеется, относится только к кристаллам, выращенным нами к настоящему времени.

В соответствии с приведенными картами из зон высокого контраста вырезались заготовки, на которых проверялись монодоменность (по пространственной однородности пьезоотклика на гранях  $Z$ ) и полуволновые напряжения. Повторное измерение контраста заготовок подтверждало, что все технологические операции, связанные с разрезкой и полировкой заготовок, а также связанные с этим возможные изменения внутренних упругих напряжений не приводят к существенному изменению контраста.

Ширина спектра пропускания выращенных нами кристаллов (рис. 2) (по уровню поглощения 5%/см) составляла 500–3000 нм и практически не отличалась от таковых для кристаллов других стандартных технологий. Кристаллы различных технологий, однако, уверенно различаются по структуре полосы и положению пиков поглощения на О–Н-связях в области 2800 нм. Так, для гидротермального КТР характерна широкая



**Рис. 2.** Спектральные зависимости пропускания КТР модифицированной растворо-расплавной технологии (1) и гидротермального КТР фирмы “Litton” (США) (2). Приведенная длина кристаллов 1,0 см.

полоса поглощения с основным пиком поглощения на  $\lambda = 2868$  нм. Для наших кристаллов КТР положение пиков поглощения локализовано в области 2794–2814 нм.

Измерения температурной зависимости проводимости отобранных заготовок КТР показали, что в диапазоне 10–100 °C и в линейной области вольт-амперной характеристики (ВАХ) она имеет активационный характер –  $\sigma_z(T) \approx \sigma_0 \exp(-E_a/kT)$ , с энергией активации  $E_a \approx 0,85$  эВ,  $\sigma_0 \approx 3 \times 10^{-11}$  Ом<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>. Для кристаллов, выращенных по традиционной растворо-расплавной технологии, энергия активации существенно ниже –  $E_a \approx 0,5$  эВ, а значения  $\sigma_0 \approx 10^{-6}$ – $10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>.

Как было сказано выше, электрохромные процессы (образование центров окраски  $Ti^{4+} \rightarrow Ti^{3+}$  в прикатодной области при протекании тока) являются одним из основных ограничителей для применения КТР в электрооптических устройствах и поэтому важно определить допустимые при работе напряженности используемых полей. Контроль ВАХ кристаллов позволяет уверенно определить начало развития электрохромных процессов. Их характерным признаком является рост тока через образец во времени при фиксированном напряжении. Отклонение (превышение) тока от линейной зависимости ВАХ можно соотнести с процессами преобразования  $Ti^{4+} \rightarrow Ti^{3+}$ , т. е. с реакциями, сходными с химическими реакциями в сухом электролите. Фактически опасным является не сама напря-

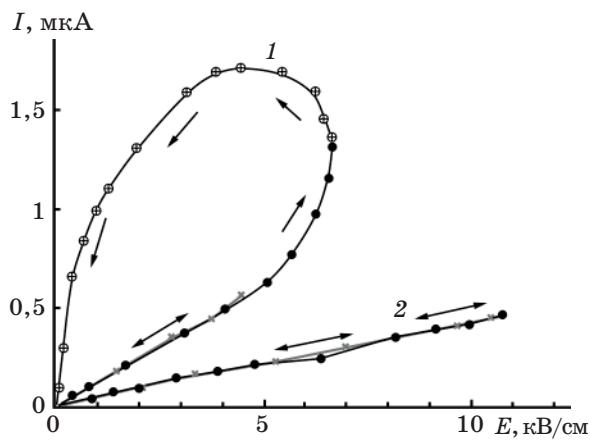
женность электрического поля, а плотность тока. Его критическое значение, по нашим оценкам, составляет 100–200 нА/см<sup>2</sup>. Используемый нами критерий – увеличение тока в минуту на 1% – достаточно просто и надежно определяет границы рабочих напряжений. Для выращенных нами кристаллов КТР значение предельных допустимых напряженностей поля составляет около 2,5 кВ/см при комнатной температуре. Для кристаллов КТР традиционной флюсовой технологии электрохромные процессы быстро развивались уже при существенно меньших напряженностях поля – 300–400 В/см.

Указанные электрохромные процессы резко подавляются при использовании переменного или биполярного импульсного напряжения. Так, на частоте 50 Гц образцы выдерживали десятки часов работы при напряженностях до 50 кВ/см.

Для понижения проводимости кристаллов и повышения электрической стойкости к постоянному электрическому полю нами использовалось их легирование оксидом рубидия. Кристаллы, выращенные по разработанной с учетом проведенных исследований специальной технологии, по нелинейно-оптическим свойствам не отличались от выращенных по стандартным технологиям. Но при этом они имели существенно более низкую удельную электрическую проводимость – порядка  $1 \times 10^{-11}$  Ом<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>, что на 3–4 порядка ниже, чем у кристаллов, выращенных по стандартным флюсовым технологиям.

Проведенные специальные исследования электрической стойкости показали, что эти кристаллы при комнатных температурах не деградируют в постоянных электрических полях с напряженностью поля до 10 кВ/см в течение длительного времени (несколько часов). На рис. 3 представлены ВАХ высокоомных кристаллов КТР и кристаллов КТР, легированных окисью рубидия (Rb:КТР).

Обращает на себя внимание, что при небольших напряженностях прикладываемого поля начальное сопротивление кристаллов КТР и Rb:КТР и, соответственно, протекающий через них ток отличаются всего в два-три раза. Однако электрохромные процессы в нелегированных кристаллах развиваются существенно раньше, что приводит к резкому и необратимому возрастанию проводимости при 4,5 кВ/см и полной деградации кристаллов (почернению). В них при таких напряженностях поля для использования кристаллов в модуляторах необходимо применять только импульсное управление (желательно биполярной формы).



**Рис. 3.** ВАХ высокоомных кристаллов КТР (1) и кристаллов КТР, легированных окисью рубидия (2).

В то же время легированные окисью рубидия кристаллы имеют линейную ВАХ до 10 кВ/см и более. Это, по всей видимости, связано с тем, что локальная проводимость обусловлена еще и дефектностью структуры кристалла. Из-за дефектности структуры высота потенциальных барьеров, которые приходится преодолевать ионам калия для перехода на свободное место, может быть разной, т. е. при сравнительно малых напряженностях поля ионы калия оказываются замороженными и проводимость достаточно низкая, что мы и наблюдаем в не легированных окисью рубидия кристаллах. Однако с увеличением поля калий вырывается из решетки и дрейфует в новое связанное положение. Легирование кристаллов затрудняет этот процесс, в силу чего ВАХ КТР и Rb:KTP существенно различаются.

Следует, однако, отметить, что легирование кристаллов КТР окисью рубидия, приводило не только к повышению электрической стойкости кристаллов, но и к некоторому ухудшению их оптической однородности – максимально достижимый контраст не превышал 200. Поэтому представляются актуальными дальнейшие исследования в направлении совершенствования методики их роста с целью увеличения выхода оптически однородного материала.

### Разработка конструкции экспериментальных образцов электрооптических модуляторов на кристаллах КТР

Из выращенных по модифицированной технологии кристаллов КТР были изготовлены экспериментальные образцы модуляторов, с ис-

пользованием которых проводилось исследование режимов генерации различных лазерных систем на Nd:YAG. Работа модулятора основана на перпендикулярном электрооптическом эффекте. Излучение в кристаллах КТР распространяется вдоль оси  $x$ , а управляющее напряжение прикладывается вдоль оси  $z$ , при этом направление поляризации излучения составляет угол  $45^\circ$  с осями  $y$  и  $z$ . Из-за того что излучение распространяется перпендикулярно оптической оси кристалла, существенную роль играет разность фаз, связанная с естественной анизотропией. Компенсация естественного двуплечепреломления достигается путем использования в модуляторе двух кристаллов, оси  $z$  которых развернуты друг относительно друга на  $90^\circ$ . Для того чтобы при этом индуцированный в двух кристаллах набег фаз суммировался, векторы напряженности управляющего поля в кристаллах должны иметь противоположные направления.

Конструктивно модуляторы были изготовлены в двух модификациях: 1) на высокоомных кристаллах без легирования окисью рубидия и 2) на кристаллах КТР с окисью рубидия последней нашей разработки.

#### 1. Модуляторы на основе высокоомных кристаллов КТР без Rb

В этом случае в состав модулятора входила четвертьволновая пластина и для управления модулятором с целью минимизации влияния электрохромных эффектов был разработан драйвер биполярных импульсов. Модулятор работал в четвертьволновой схеме и имел следующие технические характеристики:

длина волны	1,064 мкм,
размеры кристаллов	4,0×4,0×15,0 мм,
электрическая проводимость кристаллов вдоль оси $z$	$3\times10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ,
пропускание	98%,
контраст	более 500,
порог разрушения на $\lambda = 1,064$ мкм	600 МВт/см <sup>2</sup> ,
четвертьволновое напряжение на $\lambda = 1,064$ мкм	500 В,
форма импульсов управления модулятором	биполярная,
частота повторения импульсов	до 20 кГц,
длительность фронта	менее 10 нс.

## 2. Модуляторы на основе кристаллов Rb:KTP

Модуляторы на высокоомных кристаллах КТР, легированных окисью рубидия, можно было использовать без четвертьволновой пластины с подачей постоянного напряжения. При этом они работали неограниченно долгое время без следов электрохромной деградации кристаллов. На рис. 4 показан внешний вид такого модулятора, выполненного с драйвером в едином корпусе.

Модулятор имел следующие технические характеристики:

длина волны	1,064 мкм,
размеры кристаллов	6,0×6,0×10,0 мм,
электрическая проводимость кристаллов вдоль оси $z$	$1 \times 10^{-11} \Omega^{-1} \text{ см}^{-1}$ ,
пропускание	98%,
контраст	100,
порог разрушения на $\lambda = 1,064$ мкм	600 МВт/см <sup>2</sup> ,
полуволновое напряжение на $\lambda = 1,064$ мкм	2400 В,
частота повторения импульсов	0–200 Гц,
длительность фронта	менее 5 нс.

### Применение модуляторов на высокоомных кристаллах КТР в Nd:YAG-лазерных системах

I. Исследованные экспериментальные образцы модуляторов на высокоомных кристаллах КТР (без рубидия) были использованы для реализации режимов генерации наносекундных импульсов (режимов Q-switch) Nd:YAG-лазерами с частотами следования импульсов до 10 кГц. На рис. 5 представлена оптическая схема такого лазера. В качестве активной среды использовались два кристалла Nd:YAG ( $\varnothing 4 \times 10$  мм) с концентрацией ионов неодима 1%. Между кристаллами помещалась кварцевая пластинка для поворота плоскости поляризации на 90°. Кристаллографические оси [111] кристаллов лазера были направлены параллельно осям резонатора для компенсации двулучепреломления. В качестве источника накачки использовались диодные линейки (LIMO, GmbH) с волоконным выходом (диаметр волокна 400 мкм). Торец волокна был спроектирован на кристалл Nd:YAG, таким образом диаметр перетяжки составлял

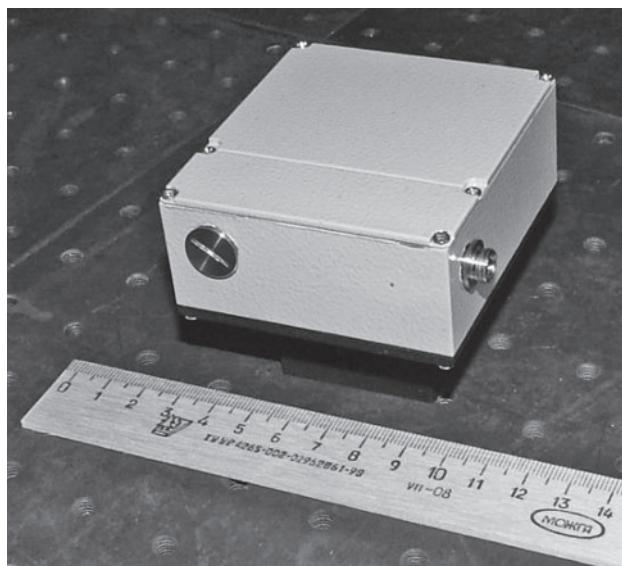


Рис. 4. Внешний вид модулятора с драйвером.

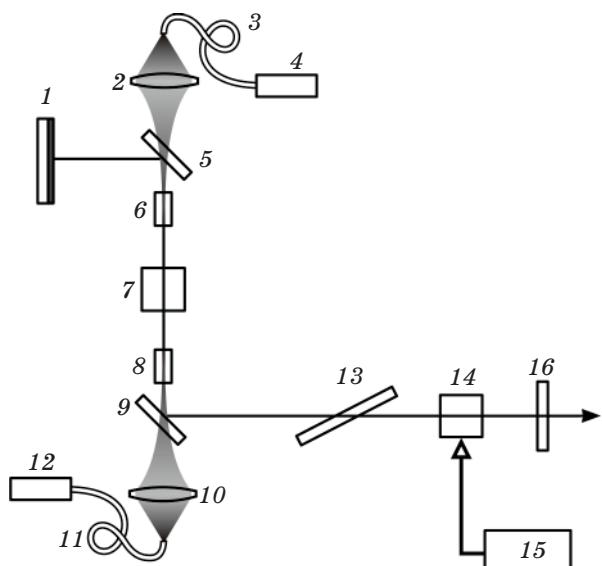


Рис. 5. Оптическая схема лазера. 1, 16 – зеркала резонатора; 2, 10 – линзы; 3, 11 – волоконные кабели; 4, 12 – лазерные диоды; 5, 9 – светоделительные зеркала; 6, 8 – активные Nd:YAG-элементы размерами  $\varnothing 4 \times 10$  мм; 7 – 90°-ный вращатель поляризации, 13 – интерференционный поляризатор, 14 – модулятор на кристаллах КТР, 15 – драйвер модулятора.

1 мм. Максимальная мощность излучения линеек могла достигать 30 Вт. Кристаллы и линейки термостабилизировались элементами Пельтье с точностью до 0,1 °С. Для построения резонатора использовались плоские зеркала, расположенные

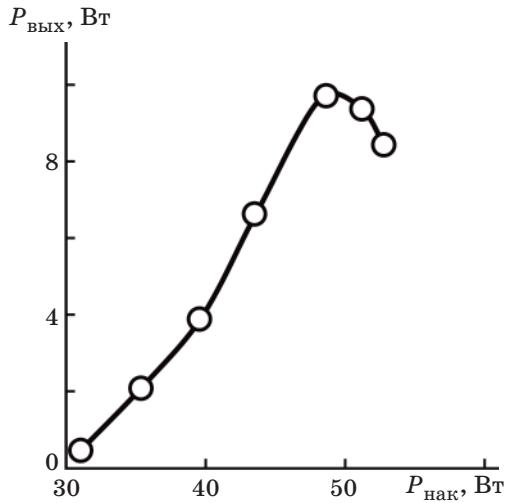


Рис. 6. Выходная мощность лазера в режиме свободной генерации.

женные на расстоянии 20–25 см. Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора составлял 40%.

В первую очередь была измерена зависимость выходной мощности лазера  $P_{\text{вых}}$  в режиме свободной генерации от мощности излучения накачки  $P_{\text{нак}}$  в отсутствие электрооптического модулятора, но с поляризатором в резонаторе (рис. 6).

Видно, что при увеличении мощности накачки до уровня порога генерации выходная мощность быстро растет, достигая максимума, а затем резко падает. Это падение связано с появлением термооптических искажений в кристалле. В режиме свободной генерации была достигнута выходная мощность 9,8 Вт.

Использованный кварцевый вращатель поляризации обеспечивал эффективную компенсацию термоиндуцированного двулучепреломления, что иллюстрируют наши экспериментальные данные. Так, если при  $P_{\text{нак}} = 48,5$  Вт без вращателя поляризации имели  $P_{\text{вых}} = 6,0$  Вт и эффективность оптического преобразования  $\eta = P_{\text{вых}}/P_{\text{нак}} \approx 12\%$ , то при той же  $P_{\text{нак}}$  и использовании вращателя поляризации получили  $P_{\text{вых}} = 9,8$  Вт и  $\eta \approx 20\%$ .

Для квазинепривного режима генерации в режиме модулированной добротности выходная мощность ( $\text{TEM}_{00}$ ) составляла более 5 Вт при частоте повторения импульсов 5 кГц. На рис. 7 представлена характерная осциллограмма выходного импульса генерации. Как видно из рисунка, длительность импульса по полуширине не превышала 10 нс.

Высокий порог разрушения, высокая теплопроводность и низкие значения термооптических коэффициентов делают кристаллы КТР превосходным материалом для модуляции излучения с высокой средней мощностью. В области таких применений с ними могут сравниться лишь модуляторы на кристаллах ВВО (Beta Barium Borate). Однако они имеют довольно низкие значения электрооптических коэффициентов и, соответственно, высокие (до 10 кВ) значения на  $\lambda = 1,064$  мкм полуволновых управляющих напряжений.

II. Мы исследовали работу созданных модуляторов на кристаллах КТР, легированных окисью рубидия, в Nd:YAG-лазере с ламповой накачкой и высокой средней мощностью. При проведении исследований изучалось двулучепреломление в кристаллах модулятора, индуцированное излучением генерации Nd:YAG-лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме с частотой до 50 Гц со средней мощностью излучения в диапазоне до 15 Вт.

Анализировались следующие процессы:

- двулучепреломление в кристаллах КТР модулятора, помещенного в скрещенных поляризаторах вне резонатора, при работе лазера в режиме свободной генерации;
- двулучепреломление в кристаллах модулятора, помещенного внутри резонатора Nd:YAG-лазера, работающего в режиме свободной генерации, и его влияние на энергетические параметры лазера;
- работа модулятора в лазере в режиме модуляции добротности с высокой (до 15 Вт) средней мощностью.

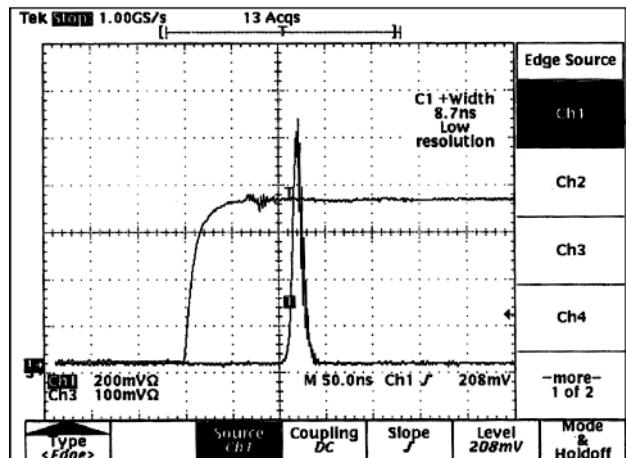


Рис. 7. Осциллограмма импульса генерации.

При проведении испытаний модулятора вне резонатора он располагался в области перетяжки линзы с фокусом 18,0 см (диаметр пятна в области перетяжки составлял 0,4 мм). Напряжение на модулятор не подавалось, а его пропускание измерялось в параллельных и скрещенных поляризаторах.

## Результаты испытаний модулятора

### Модулятор вне резонатора

При установке модулятора между скрещенными поляризаторами измерялось наведенное излучением генерации двулучепреломление кристалла (без подачи напряжения) как отношение  $\theta = P_{\text{br}}/P_0$  (где  $P_0$  – мощность падающего излучения, а  $P_{\text{br}}$  – мощность излучения, отраженного от поляризатора (обусловленная наведенным двулучепреломлением в кристаллах модулятора)). При малой средней мощности излучения это соотношение составляло порядка 0,1%, что говорит о практическом отсутствии в нем наведенного двулучепреломления.

При увеличении средней мощности входного излучения мощность излучения, отраженного от поляризатора, возрастила (рис. 8а). Однако даже при плотности мощности 3,5 кВт/см<sup>2</sup> ее значение не превышало 7,0%, что говорит о сравнительно небольшом наведенном двулучепреломлении.

Для сравнения аналогичные эксперименты проводились с модуляторами на кристаллах RTP фирмы "Raicol Crystals" (Израиль). Результаты экспериментов представлены на рис. 8б. Как видно из рисунка, исследованные кристаллы RTP имеют существенно большее значение наведенной оптической неоднородности по сравнению с нашими высокоомными кристаллами. Так, уже при значительно меньших плотностях мощности излучения (порядка 100–200 Вт/см<sup>2</sup>) наведенное в них двулучепреломление достигает значительной (до 15%) величины.

### Модулятор внутри резонатора

При проведении испытаний модулятора на кристаллах КТР внутри резонатора (рис. 9) изменились средняя мощность выходного излучения и мощность излучения, отраженного от поляризатора со стороны "глухого" зеркала (мощность потерь излучения за счет двулучепреломления в кристаллах КТР). Как показали эксперименты, даже при максимальной мощности генерации, составлявшей 15 Вт, двулучепреломление  $\theta$

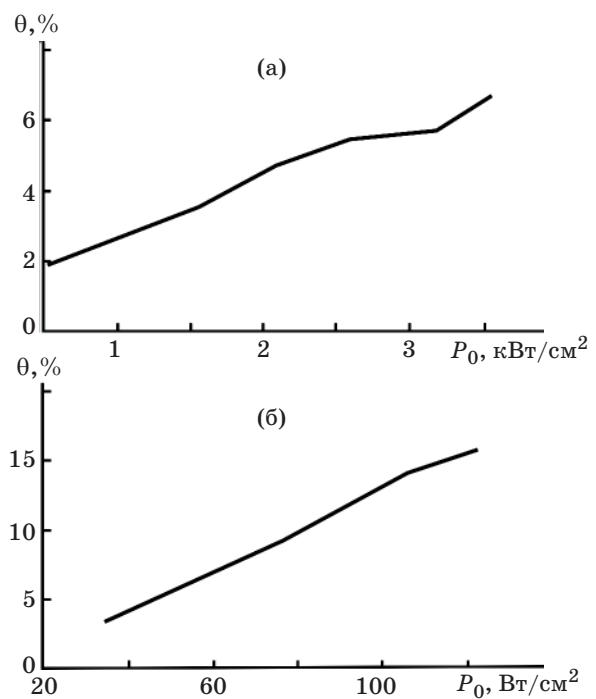


Рис. 8. Зависимость наведенного двулучепреломления в кристаллах модулятора  $\theta$  от плотности мощности излучения  $P_0$ . а – для модулятора на высокоомных кристаллах КТР, б – для модулятора на кристаллах RTP.

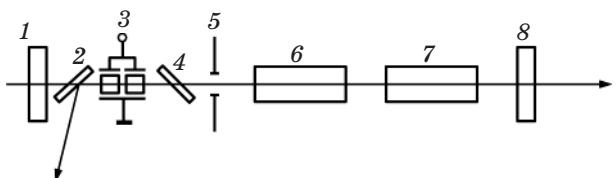
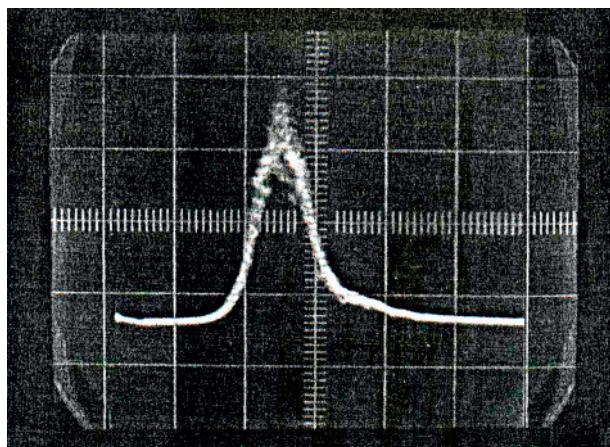


Рис. 9. Оптическая схема лазера с модулятором на высокоомных кристаллах КТР. 1, 8 – зеркала резонатора; 2, 4 – интерферционные поляризаторы; 3 – модулятор на кристаллах КТР, легированных окисью рубидия; 5 – диафрагма Ø5,5 мм, 6, 7 – активные элементы Nd:YAG размерами Ø6,3×80 мм.

не превышало 1%, т. е. в модуляторе практически отсутствует наведенное излучением двулучепреломление.

Было проведено также испытание модулятора на кристаллах КТР, легированных окисью рубидия, в режиме модуляции добротности. При этом модулятор работал в полуволновой схеме и на него предварительно подавалось постоянное



**Рис. 10.** Типичная осциллограмма импульса генерации (развертка – 20 нс/дел.).

смещение, а затем импульсное управляющее напряжение амплитудой 2400 В с длительностью импульса 500 нс. Лазер имел следующие выходные параметры генерации:

средняя мощность	15 Вт,
частота повторения импульсов	50 Гц,
энергия в импульсе	300 мДж,
длительность импульса (по полуширине)	10 нс,
типичная осциллограмма импульса представлена на рис. 10.	

### Заключение

Показана возможность создания надежно функционирующих в импульсных и постоянных управляющих полях высококонтрастных электрооптических модуляторов на основе высокоомных кристаллов КТР (с контрастом не менее 500:1), выращенных из раствора в расплаве. Кристаллы КТР, выращенные по модифицированной флюсовой технологии, имели удельную электрическую проводимость порядка  $3 \times 10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ , что на 3–4 порядка ниже, чем у кристаллов, выращенных по стандартным флюсовым технологиям.

Показано, что существенное улучшение стойкости кристаллов к электрическому полю может быть достигнуто легированием их окисью рубидия. Такие кристаллы КТР не деградировали в постоянных электрических полях с напряженностью поля до 10 кВ/см в течение длительного времени.

Продемонстрированы экспериментальные образцы модуляторов на кристаллах КТР и показано, что они могут быть использованы для

амплитудной модуляции излучения Nd:YAG-лазеров с плотностью мощности до  $4,0 \text{ кВт/см}^2$ , при этом потери на двулучепреломление, наведенные излучением генерации, не превышают нескольких процентов.

Представленные результаты свидетельствуют, что разработанные модуляторы на высокоомных кристаллах КТР могут эффективно использоваться для реализации моноимпульсных режимов импульсно-периодических Nd:YAG-лазеров с высокой средней мощностью.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bierlein J.D., Vanherzele H. Potassium Titanyl Phosphate: Properties and New Applications // JOSA. B. 1989. V. 6. № 4. P. 622–633.
2. Ebbers C.A., Velsko S.P. High Average Power KTiOPO<sub>4</sub> electrooptic Q-switch // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67 . № 5. P. 593–595.
3. Roth M., Tseitlin M., Angert N. Oxide Crystals for Electro-Optic Q-Switching of Lasers // Glass Physics and Chemistry. 2005. V. 31. № 1. P. 86–95.
4. Лемешко В.В., Обуховский В.В., Стоянов А.В., Павлова Н.И., Писанский А.И., Коротков П.А. Электрохромный эффект в кристаллах титанат фосфата // Укр. физич. журнал. 1986. Т. 31. № 11. С. 1747–1750.
5. Bierlein J.D., Arweiler C.B. Electro-optic and dielectric properties of KTiOPO<sub>4</sub> // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49 . № 15. P. 917–919.
6. Wang X.D., Basseras P., Dwayne Miller R.J., Vanherzele H. Investigation of KTiOPO<sub>4</sub> as electro-optic amplitude modulator // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. № 5. P. 519–521.
7. Dwayne Miller R.J., Bonner C., Palese S., Pereira M., Schilling L., Walmsley I.A., Wang D., Guo Z. Development and applications of electro-optics for high power systems // Proc. SPIE. 1993. V. 1865. P. 100–108.
8. Taira T., Kobayash T. Q-Switching and Frequency Doubling of Solid-State Lasers by a Single Intracavity KTP Crystal // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. № 3. P. 800–804.
9. Chuang T., Hays A.D., Verdun H.R. Application of KTP an Electro-Optic Q-Switch // OSA Proc. on \advanced Solid-State Lasers. 1994. V. 20. P. 314–318.
10. Ebbers C.A., Cook W.M., Velsko S.P. A High Average Power Electro-Optic Switch Using KTP // An informal report. UCRL-ID-117079. 1994. P. 1–22. Lawrence Livermore Nationale Laboratory.
11. Ebbers C.A., Velsko S.P. High average power KTiOPO<sub>4</sub> electro-optic Q-switch // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 5. P. 593–595.
12. Горчаков А.В., Белостоцкий А.Л., Сапожников В.К., Русов В.А., Мешалкин А.Б., Каплун А.Б. Технология высококонтрастных электрооптических

- модуляторов на основе кристаллов КТиОРО<sub>4</sub> // Автометрия. 2001. № 3. С. 81–88.
13. Rusov V.A., Gorchakov A.V., Belostotsky A.L., Sapojnikov V.K., Kaplun A.B., Meshalkin A.B., Shapovalov V.N. KTiOPO<sub>4</sub> electro-optical devices with extinction ratio up to 1:1000// Proc. SPIE. 2001. V. 4350. P. 117–119.
14. Соловьев А.Н., Каплун А.Б. Вибрационный метод измерения вязкости жидкости // Новосибирск: Наука, 1970. 140 с.
15. Kaplun A.B., Meshalkin A.B. Stable and metastable phase equilibrium in system Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–GeO<sub>2</sub>// Journal of Crystal Growth. 1966. V. 167. P. 171–175.
16. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б. Исследование фазовых равновесий в системе Li<sub>2</sub>O–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Неорганические материалы. 1999. Т. 11. С. 1349–1354.
17. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Головей А.Д., Сафонов В.В., Пасманик Г.А., Потемкин А.К., Мальшаков А.Н. Выращивание монокристаллов калий – титанил фосфата и исследование их характеристик // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 2. С. 264–267.
18. Каплун А.Б., Шишкун А.В. Исследование поверхности ликвидуса в системе K<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>–KPO<sub>3</sub>–KTi–PO<sub>4</sub> по разрезам равной мольной концентрации KTiOPO<sub>4</sub> // Изв. РАН. Сер. Неорганические материалы. 1992. Т. 28. № 2. С. 445–447.