Акустооптические модуляторы мощного лазерного излучения на кристаллах KGW и KYW

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, А.А.Сироткин, А.В.Рябинин, В.Н.Шорин

Разработаны и исследованы различные модификации акустооптических модуляторов (АОМ) на кристаллах $KG(WO_4)_2$ (KGW) и $KY(WO_4)_2$ (KYW), предназначенные для модуляции добротности мощных импульсных лазеров. Показано, что АОМы на этих кристаллах универсальны, могут работать при использовании различных лазеров в диапазоне длин волн 1–3 мкм, имеют высокую лучевую прочность при отсутствии просветляющих покрытий и вводе оптического излучения под углом Брюстера. Экспериментально продемонстрирована эффективность работы АОМов на основе кристалла KGW. Исследованы твердотельные лазеры на кристаллах Cr : Er : YSGG (λ = 2.78 мкм), Cr : Yb : Ho : YSGG (λ = 2.87 мкм), Cr : Tm : Ho : YSGG (λ = 2.09 мкм) и Nd : YAG (λ = 1.064 мкм) с активной акустооптической модуляцией добротности, работающие в импульсно-периодическом режиме генерации с хорошим качеством пучка и без разрушения поверхностей. Получены импульсы лазерного излучения с длительностью 30–60 нс и энергией до 32 мДж при частоте их следования от 1 до 1000 Гц.

Ключевые слова: *мощные твердотельные лазеры ИК диапазона, акустооптические модуляторы, кристаллы KGW и KYW.*

1. Введение

Мощные твердотельные лазеры ИК диапазона длин волн с модуляцией добротности, генерирующие импульсы наносекундной длительности, в настоящее время широко используются для оптической накачки источников когерентного излучения, работающих в среднем ИК диапазоне, в биомедицинских приложениях, при дистанционном зондировании загрязняющих примесей в атмосфере и в других областях.

Для модуляции добротности применяются акустооптические модуляторы (АОМ), основанные на дифракции лазерного излучения на объемной решетке, создаваемой акустической волной [1]. Достоинствами АОМов являются простота и удобство в использовании, относительно невысокая стоимость, а также большое разнообразие модификаций, что позволяет оптимизировать выбор устройства для конкретной задачи. АОМы изготавливаются из кристаллов с малым оптическим поглощением на генерируемой длине волны, с высокой лучевой прочностью и удовлетворительным акустооптическим качеством. До настоящего времени наиболее широко применяемыми материалами для АОМов были кристаллы SiO_2 (кварц) и TeO_2 (парателлурит).

Используемые в лазерных технологиях кристаллы семейства двойных калиевых вольфраматов $KMe(WO_4)_2$, где Me – металл (Gd, Y, Yb, Lu), являются эффективными акустооптическими кристаллами и благодаря своей высокой лучевой прочности [2] и прозрачности в широком (0.4–3.5 мкм) диапазоне спектра могут служить основой ряда акустооптических устройств для управления мощным лазерным излучением [3]. Упругие и акустооптические свойства [3, 4], а также оптические характеристики [5–9] двойных калиевых вольфраматов $KMe(WO_4)_2$ близки. Исключение – наличие широкой области поглощения в диапазоне 0.8–1.1 мкм у кристалла $KYb(WO_4)_2$.

Характеристики кварца, парателлурита и кристалла $KGd(WO_4)_2$ представлены в табл.1. Спектры пропускания кристалла $KGd(WO_4)_2$, парателлурита и кристаллического кварца приведены на рис.1.

Табл.1. Характеристики материалов, применяемых для АОМов.

Материал	Область прозрачности (мкм)	Скорость звука (10^5 см/с)	Акустооптическое качество	Лучевая прочность* (ГВт/см^2)
SiO_2	0.2–2.7	6	1	20
TeO_2	0.35–4.5	4.3	20	0.25–0.30
$KGd(WO_4)_2$	0.35–3.5	4.3	6–10	20–170

*Лучевая прочность материалов указана для оптического излучения с длиной волны 1.06 мкм при длительности импульса 10 нс.

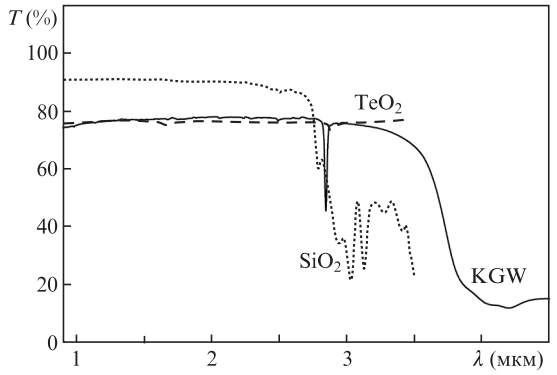

Рис.1. Спектры пропускания образцов кристаллического кварца (толщиной 44 мм), парателлурита (35 мм) и калий-гадолиниевого вольфрамата (72 мм).

М.М.Мазур, Л.И.Мазур, А.В.Рябинин, В.Н.Шорин. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: ryabinin.nn@yandex.ru
А.А.Сироткин. ФИЦ «Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН», Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 29 мая 2020 г.

Достоинство парателлурита – высокое акустооптическое качество, обеспечивающее низкие значения управляющей мощности и прозрачность в широком (0.35–4.5 мкм) спектральном диапазоне, а его недостаток – малая лучевая прочность. Кварц имеет высокую лучевую прочность [2], но низкое акустооптическое качество и неудовлетворительное пропускание при длинах волн свыше 2.7 мкм. Скорость звука в кварце является наибольшей, но его акустооптическое качество в 6–10 раз меньше акустооптического качества KGW. Для управления АОМом на кристалле KGW требуется мощность высокочастотного сигнала, на порядок меньшая, чем для АОМа на кварце. Соответственно, даже в простых случаях, системы охлаждения АОМа на KGW будут проще. Для больших апертур светового пучка и при длине волны излучения более 2 мкм создание эффективных АОМов на кварце может оказаться невозможным. В таком случае АОМы на KGW (или на других кристаллах $KMe(WO_4)_2$) могут стать незаменимыми.

Следовательно, ни кварц, ни парателлурит не обладают набором необходимых свойств для создания АОМов мощного оптического излучения, работающих в диапазоне 1–3 мкм.

2. Анализ характеристик АОМов на кристаллах KYW и KGW

Акустические и акустооптические свойства кристаллов $KMe(WO_4)_2$ исследованы в ряде работ [3, 4, 10–14]. Используя матрицы упругих и фотоупругих модулей этих кристаллов, можно рассчитать характеристики АОМов, реализуемых на данных материалах. Ранее такой расчет был выполнен для кристалла KYW в [15], где исследовались характеристики АОМов, предназначенных для работы на длине волны 1.06 мкм, для двух различных направлений распространения ультразвуковой волны (табл.2). Поскольку свойства кристаллов KGW и KYW различны, а работа АОМа на кристалле KYW подробно рассмотрена в [15], нам представляется полезным проанализировать особенности характеристик АОМов, создаваемых на основе кристалла KGW. Это интересно, потому что качественные кристаллы KGW более доступны, чем кристаллы KYW. При разработке АОМов необходимо знать акустооптическую эффективность M_2 для выбранной акустической моды, скорость звуковой волны, угол между направлением групповой скорости звуковой волны и ее волновым вектором. Также надо учитывать положение осей эллипсоида диэлектрической проницаемости относительно направлений распространения света и звука. На рис.2 представлены рассчитанные для кристаллов KGW и KYW скорости квазипродольной звуковой волны, распространяющейся в плоскости Y кристаллов, углы между волновым вектором и направлением групповой скорости, а также величины акустооптического качества M_2 для световых волн, распространяющихся по оси $Y(N_p)$ с поляризациями вдоль осей N_g и N_m, в зависимости от направления волнового вектора звуковой волны (N_p, N_g и N_m – главные оси эллипсоида показателей преломления кристалла).

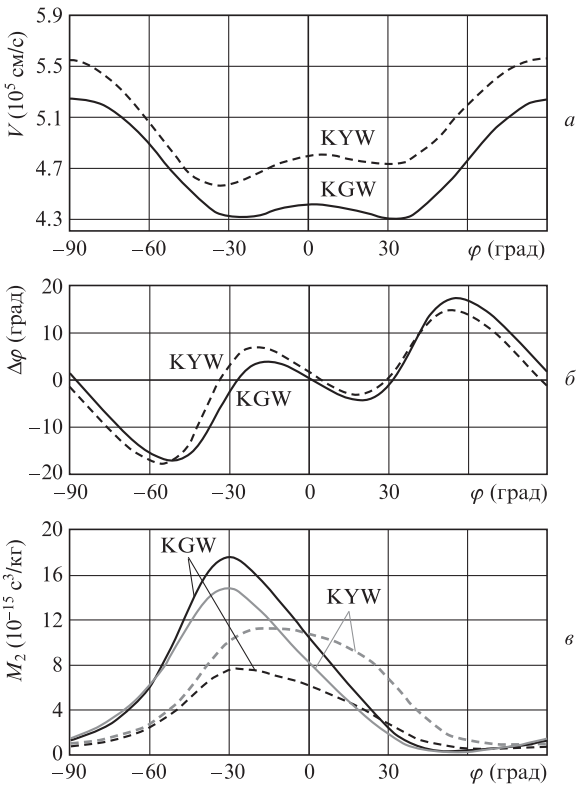

Рис.2. Зависимости в плоскости Y кристаллов KYW и KGW скорости квазипродольной ультразвуковой волны $V(a)$, угла между волновым вектором и направлением групповой скорости $\Delta\varphi$ (*б*), а также акустооптического качества M_2 для световых волн, распространяющихся по оси Y (N_p) с поляризациями вдоль осей N_g (сплошные кривые) и N_m (штриховые кривые) (*в*), от направления квазипродольной звуковой волны, распространяющейся под углом φ. Угол φ отсчитывается от оси N_g.

В плоскости Y кристалла KGW акустооптическая эффективность M_2, определяемая квазисдвиговой волной, распространяющейся под углом –75° к оси N_g, более чем в два раза превышает эффективнось M_2, определяемую квазипродольной акустической волной [14]. Поэтому в такой конфигурации взаимодействия получается более эффективный АОМ, но время переключения увеличивается в два раза, т. к. скорость квазисдвиговой волны вдоль оси N_g в два раза меньше, чем квазипродольной.

Зависимости, представленные на рис.2,*б* и *в*, показывают, что углы между направлениями фазовой и групповой скоростей невелики, а величины акустооптической

Табл.2. Характеристики АОМов, изготовленных из KYW и KGW.

Характеристика	KYW			KGW	
Длина световой волны (мкм)	0.63	2.1	2.8	1.064	1.064
Размер преобразователя (мм)	25×2.5	48×3	48×3	25×2.5	29×2.5
Эффективность дифракции (%/Вт)	55 (φ = 0, N_g) 40 (φ = 0, N_m) 74 (–30°, N_g) 40 (–30°, N_m)	11 (–30°, N_g) 8.5 (–30°, N_m)	4.5 (–30°, N_g)	36 (φ = 0, N_g) 25 (φ = 0, N_m)	62 (–30°, N_g) 38 (–30°, N_m)

эффективности M_2 для квазипродольной волны, распространяющейся в плоскости Y, имеют максимумы в интервале углов φ от 0 до –30°, что делает эти направления распространения ультразвуковой волны удобными для использования в АОМах.

Максимальные значения акустооптической эффективности для обоих кристаллов обеспечиваются для световой волны, распространяющейся по оси Y с поляризацией вдоль оси N_g, если квазипродольная звуковая волна распространяется в плоскости Y под углом $\varphi \approx -30°$ к оси N_g. При этом акустооптическая эффективность M_2 кристалла KGW немного больше M_2 кристалла KYW. При распространении звуковой волны под углом $\varphi \approx -12°$ к оси N_g в кристалле KYW акустооптическая эффективность одинакова для обеих поляризаций, что позволяет использовать такую ориентацию для создания эффективного поляризационно-нечувствительного АОМа. Были разработаны, изготовлены и испытаны ряд АОМов на кристаллах KGW и KYW с распространением звуковой волны под углами $\varphi \approx 0$ и –30° к оси N_g. В разработанных АОМах рабочая частота ультразвуковых преобразователей составляет 50 ± 10 МГц, что обеспечивает режим дифракции Брэгга. Модуляторы работают в режиме бегущей волны. Характеристики этих АОМов представлены в табл.2.

Некоторые из указанных АОМов с успехом использовались для модуляции добротности лазеров, генерирующих на длинах волн 2.1 и 2.8 мкм [16, 17]. Однако при работе с такими модуляторами было зафиксировано, что в случае генерации мощных импульсов происходит деградация просветляющих покрытий.

3. Брюстеровский АОМ на кристалле KGW

Лучевую прочность АОМа часто ограничивают пороги разрушения просветляющих покрытий. Это особенно актуально при создании АОМа мощного оптического излучения в области длин волн ~3 мкм, где существуют проблемы с нанесением просветляющих покрытий с высокими порогами разрушения.

Ввод излучения в АОМ под углом Брюстера позволяет увеличить его лучевую прочность до лучевой прочности кристалла. Однако при этом возникают другие дополнительные проблемы. АОМ, в котором световой пучок входит в кристалл под углом Брюстера, может работать только с линейно поляризованным излучением, т. к. для другой поляризации потери на отражение будут очень велики. При входе в АОМ под углом Брюстера световой пучок уширяется пропорционально показателю преломления кристалла (для $KMe(WO_4)_2$ примерно в два раза). Если входная грань в брюстеровском АОМе параллельна волновому вектору звуковой волны, то при заданной эффективности акустооптической дифракции это приводит к увеличению необходимой мощности управляющего высокочастотного генератора пропорционально показателю преломления. Если входная грань в брюстеровском АОМе параллельна вектору, перпендикулярному волновым векторам световой и звуковой волн, то время переключения АОМа увеличивается пропорционально показателю преломления. Для сохранения времени переключения входная грань во всех изготовленных брюстеровских АОМах параллельна волновому вектору звуковой волны, т. е. перпендикулярна плоскости ультразвукового преобразователя.

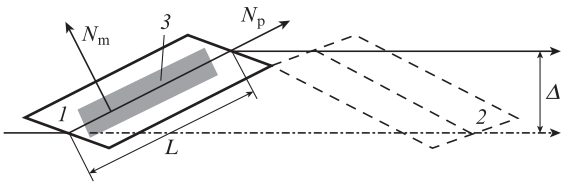

Рис.3. Схема АОМа с вводом светового пучка под углом Брюстера: *1* – акустооптическая ячейка; *2* – корректирующая призма; *3* – ультразвуковой преобразователь; L – длина акустооптической ячейки; Δ – величина смещения оптического пучка после прохождения через одну ячейку.

Величина смещения вводимого под углом Брюстера пучка после прохождения через одну ячейку $\Delta = L(n_m^2 - 1) \times (n_m^2 + 1)^{-1}$, где n_m – показатель преломления. Лазерный пучок возвращается в исходное положение с помощью дополнительной призмы *2*, являющейся зеркальным отображением акустооптической ячейки *1* (рис.3).

Нами были изготовлены два варианта АОМа с вводом оптического пучка под углом Брюстера. В первом случае использовалась одна ячейка, и пучок испытывал пространственное смещение, во втором прменялась схема, восстанавливающая пространственное положение оптического пучка, приведенная на рис.3. Характеристики брюстеровского АОМа на кристалле KGW представлены в табл.3.

Табл.3. Характеристики брюстеровского АОМа, изготовленного из KGW.

Размер преобразователя	Диаметр светового пучка	Эффективность дифракции		
		1.06 мкм	2.1 мкм	2.8 мкм
42×3 мм	1.5 мм	64% (W = 2.2 Вт)	70% (W = 12 Вт)	56% (W = 33 Вт)

Примечание: W – мощность высокочастотного сигнала, подаваемого на АОМ.

В обоих вариантах АОМы продемонстрировали свою работоспособность. Поскольку в кристаллах $KMe(WO_4)_2$ в спектральном диапазоне 1–3 мкм дисперсия показателей преломления незначительна [6–9] и нет просветляющих покрытий, то указанные конструкции АОМов могут успешно использоваться в широкой области спектра. Вариант АОМа с двумя ячейками удобен тем, что при установке данного модулятора в резонатор лазера практически нет необходимости проводить подстройку резонатора. Однако наличие второй ячейки увеличивает внутрирезонаторные потери, кроме того такой АОМ сложнее и дороже.

Для демонстрации возможностей работы универсального АОМа на основе кристалла KGW были проведены исследования наносекундных лазеров в широком диапазоне длин волн – от одного до трех микрометров.

Схема экспериментального стенда представлена на рис.4. Резонатор был образован глухим зеркалом З1 с диэлектрическим покрытием с высоким отражением на длине волны генерации и плоским выходным зеркалом З2 с диэлектрическим покрытием с частичным отражением ~50%–75% в диапазоне длин волн 1–3 мкм. Общая длина резонатора лазеров составила 325 мм. Одномодовый режим генерации выходного излучения достигнут за счет использования диафрагмы диаметром 1.5–2 мм внутри резонатора.

Рис.4. Схема экспериментального стенда:
З1, З2 – зеркала резонатора; Д – диафрагма; активный элемент – кристаллы Nd:YAG (3×120 мм), Cr:Tm:Ho:YSGG (5×100 мм), Cr:Er:YSGG (5×100 мм) или Cr:Yb:Ho:YSGG (4.5×95 мм).

В резонатор вблизи глухого зеркала помещался АОМ на основе кристалла KGW. Использовался один образец АОМа для работы в диапазоне длин волн 1–3 мкм. Модулятор состоял из двух частей (активной и пассивной) размером 45 мм. Его внешние грани были ориентированы под углом Брюстера (см. рис.4). Пассивная часть позволяла компенсировать сдвиг пучка внутри резонатора. Управление модулятором осуществлялось генератором синусоидальных напряжений ГСН 50-30 с максимальной мощностью высокочастотного сигнала 30 Вт. Для измерения временных характеристик лазерного излучения применялись фотодиод PVM-10.6 (Vigo System) с временным разрешением $\tau \approx 1$ нс и осциллограф GW Instek GDS-73154. Энергия измерялась пироэлектрическим детектором Ophir.

Для тестирования АОМа на длинах волн от 1 до 3 мкм использовались четыре лазерных кристалла – Cr:Er:YSGG (λ = 2.78 мкм), Cr:Yb:Ho:YSGG (λ = 2.87 мкм), Cr:Tm:Ho:YSGG (λ = 2.09 мкм), Nd:YAG (λ = 1.064 мкм).

Для исследования модулятора на длине волны 1.064 мкм применялся лазерный модуль с поперечной диодной накачкой RD40 (Northrop Grumman) с кристаллом YAG:Nd (диаметром 3 мм и длиной 120 мм) в качестве активной среды. Торцы активного элемента имели просветляющие покрытия на длину волны генерации. Лазер работал в режиме активной модуляции добротности. Резонатор был образован глухим зеркалом З1 радиусом 500 мм с диэлектрическим покрытием с высоким отражением на длине волны 1.064 мкм и плоским выходным зеркалом З2 с диэлектрическим покрытием с отражением ~70%. При частоте следования импульсов 1 кГц были получены импульсы длительностью 30 нс с энергией до 12 мДж.

Для работы АОМа на длине волны 2.09 мкм использовался лазер с ламповой накачкой на основе кристалла Cr:Tm:Ho:YSGG. Диаметр активного элемента составлял 5 мм, а его длина равнялась 100 мм. Торцы активного элемента не имели просветляющих покрытий. Резонатор был образован глухим плоским зеркалом З1 с диэлектрическим покрытием с высоким отражением на длине волны 2.09 мкм и плоским выходным зеркалом З2 с диэлектрическим покрытием с отражением ~75%. Лазер генерировал импульсы длительностью 60 нс с энергией до 28.5 мДж при частоте их следования 3 Гц.

Наибольший интерес представляли исследования, направленные на создание твердотельного трехмикронного лазера с модуляцией добротности, работающего в импульсно-периодическом режиме, для получения максимальных энергетических параметров. Именно в этой области спектра в наибольшей степени проявляются возможности данного типа АОМа.

В качестве активной среды использовался кристалл YSGG:Cr:Er с диаметром 5 мм и длиной 100 мм (его торцы не имели просветляющих покрытий), излучающий в

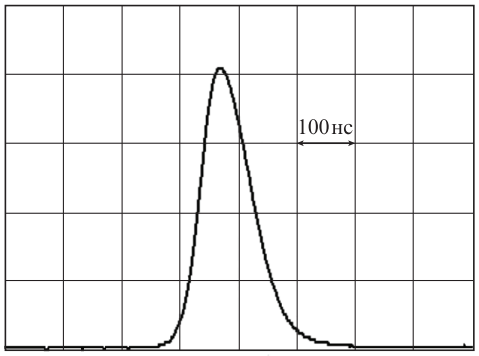

Рис.5. Осциллограмма импульса генерации YSGG:Cr:Er-лазера (λ = 2.78 мкм), полученная в режиме модуляции добротности при частоте следования импульсов 2–10 Гц.

области λ = 2.78 мкм на переходе $^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ионов эрбия. В настоящей работе также был исследован твердотельный лазер на переходе $^5I_8 \rightarrow {}^5I_6$ ионов Ho^{3+} в кристалле Cr:Yb:Ho:YSGG (λ = 2.87 мкм) с акустооптической модуляцией добротности. Активный элемент Cr:Yb:Ho:YSGG имел длину 95 мм и диаметр 4.5 мм.

Резонатор лазеров был образован двумя плоскими зеркалами – З1 и З2 с коэффициентами отражения ~100% и 60% соответственно. Активный элемент и лампа накачки располагались в квантроне и охлаждались водой. Температура квантрона поддерживалась равной ~18 °C. Длительность импульса накачки ксеноновой лампы составляла ~200 мкс. В этом случае устойчивая генерация излучения сохранялась при частоте следования импульсов вплоть до 10 Гц. Выходное излучение имело линейную поляризацию благодаря брюстеровским граням модулятора. Максимальная выходная энергия 32 мДж получена с использованием кристалла YSGG:Cr:Er на длине волны 2.78 мкм. Измеренная длительность импульса генерируемого излучения была равна ~ 60 нс (рис.5).

Таким образом, созданные лазеры на кристаллах Cr:Er:YSGG и Cr:Yb:Ho:YSGG, работающие в режиме модуляции добротности, обеспечивают стабильное излучение мегаваттной мощности как в многомодовом, так и в одномодовом режиме генерации и могут успешно применяться в различных областях.

4. Заключение

Разработаны и исследованы различные модификации АОМов на кристаллах KGW и KYW, предназначенные для модуляции добротности мощных импульсных лазеров, работающих в диапазоне спектра 1–3 мкм.

АОМы на кристаллах KGW и KYW не имеют альтернативы при использовании в мощных лазерах, генерирующих излучение с длинами волн, превышающими 2 мкм. У АОМов с вводом оптического излучения под углом Брюстера на основе этих кристаллов нет ограничений по мощности оптического излучения, связанных с лучевой прочностью просветляющих покрытий, а вследствие малой дисперсии показателя преломления они могут работать на любой длине волны в диапазоне 1–3 мкм.

Экспериментально продемонстрирована эффективность работы универсального АОМа на основе кристалла KGW. Исследованы твердотельные лазеры на кристаллах Cr:Er:YSGG (λ = 2.78 мкм), Cr:Yb:Ho:YSGG (λ = 2.87 мкм), Cr:Tm:Ho:YSGG (λ = 2.09 мкм) и

Nd : YAG (λ = 1.064 мкм) с активной акустоптической модуляцией добротности, работающие в импульсно-периодическом режиме генерации с хорошим качеством пучка и без разрушения поверхностей.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.А.Павлюку за плодотворное сотрудничество. Под его руководством в Институте неорганической химии им. А.В.Николаева СО РАН синтезированы все кристаллы, использованные для создания АОМов и описанные в настоящей работе. Авторы благодарны также А.В.Пушкину за измерение дифракционной эффективности АОМов на длине волны 2.8 мкм.

1. Тарасов Л.В. *Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения* (М.: Радио и связь, 1981).
2. Mochalov I.V. *Opt. Eng*., **36** (6), 1660 (1996).
3. Mazur M.M., Velikovskiy D.Yu., Mazur L.I., Pavluk A.A., Pozhar V.E., Pustovoit V.I. *Ultrasonics*, **54**, 1311 (2014); http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2014.01.009.
4. Mazur M.M., Mazur L.I., Pozhar V.E. *Ultrasonics*, **73**, 231 (2017).
5. Mateos X., Sole R., Gavalda Jna., Aguilo M., Massons J., Diaz F. *Opt. Mater*., **28**, 423 (2006).
6. Kaminskii A.A., Konstantinova A.F., Orekhova V.P., Butashin A.V., Klevtsova R.F., Pavlyuk A.A. *Crystallogr. Rep*., **46** (4), 665 (2001).
7. Pujol M.C., Rico M., Zaldo C., Sole R., Nikolov V., Solans X., Aguilo M., Dıaz F. *Appl. Phys. B*, **68** (2), 187 (1999).
8. Pujol M.C., Barsukova M., Guell F., Mateus X., Sole R., Gavalda Jna., Aguilo M., Massons J., Dıaz F., Klopp P., Grieber U., Petrov V. *Phys. Rev. B*, **65**, 165121 (2002); http://prb.aps.org/abstract/PRB/v65/i16/e165121.
9. Pujol M.C., Mateus X., Aznar A., Solans X., Surinach S., Massons J., Dıaz F., Aguilo M. *Appl. Crystallogr*., **39**, 230 (2006). DOI: 10.1107/S0021889806004328.
10. Mazur M.M., Mazur L.I., Kuznetsov F.A., Pavlyuk A.A., Pustovoit V.I. *Inorg. Mater*., **48** (1), 67 (2012).
11. Mazur M.M., Velikovskii D.Yu., Kuznetsov F.A., Mazur L.I., Pavlyuk A.A., Pozhar V.E., Pustovoit V. *Acoust. Phys*., **58** (6), 658 (2012).
12. Мазур М.М., Мазур Л.И., Пожар В.Э. *Письма в ЖТФ*, **41** (5), 91 (2015).
13. Velikovskii D.Yu., Mazur M.M., Pavlyuk A.A., Pozhar V.E., Solodovnikov S.F., Yudanova L.I. *Phys. Wave Phenom*., **23** (1), 58 (2015).
14. Mazur M.M., Mazur L.I., Pozhar V.E. *Phys. Procedia*, **70**, 741 (2015).
15. Мазур М.М., Мазур Л.И., Пожар В.Э., Шорин В.Н., Константинов Ю.П. *Квантовая электроника*, **47** (7), 661 (2017) [*Quantum Electron*., **47** (7), 661 (2017)].
16. Sirotkin A.A., Mazur M.M. *Proc. 2018 Int. Conf. on Laser Optics (ICLO)* (St.Petersburg, 2018, p. 46).
17. Pushkin A.V., Mazur M.M., Sirotkin A.A., Firsov V.V., Potemkin F.V. *Opt. Lett*., **44**, 4837 (2019).