

УДК 535.015

И.А. Паргачёв, М.В. Чуманов, Л.Я. Серебренников, В.А. Краковский,  
А.Р. Гнатышин, А.О. Злобин, А.Е. Шараева**Устройство генерации второй гармоники лазерного излучения на основе высокоомных кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$  с регулярными доменными структурами**

Представлены результаты по формированию регулярной доменной структуры в кристаллах КТР и исследованию устройства для генерации второй гармоники лазерного излучения с длиной волны 1064 нм в кристаллических элементах на основе высокоомных кристаллов КТР с регулярными доменными структурами.

**Ключевые слова:** генерация второй гармоники, нелинейная оптика, кристалл  $\text{KTiOPO}_4$ , лазерное излучение, регулярная доменная структура.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-3-155-158

Для генерации второй гармоники (ГВГ) лазерного излучения в большинстве случаев используются однородные кристаллы с квадратичной нелинейностью, в которых выполняются условия фазового синхронизма двух оптических волн – накачки и второй гармоники [1]. В таких кристаллах эффективная нелинейность описывается совокупностью элементов тензора нелинейных коэффициентов кристалла, и всегда меньше значения максимального элемента тензора [2].

Использование для генерации второй гармоники кристаллов с регулярной доменной структурой (РДС) дает возможность реализовать такие типы нелинейного взаимодействия, при которых эффективная нелинейность будет равна максимальному значению элемента тензора нелинейных коэффициентов кристалла. Таким образом, использование кристаллов с РДС позволяет получать более высокие количественные и качественные характеристики преобразователей частоты лазерного излучения [3].

Область применимости устройств для ГВГ в различных направлениях использования лазерной техники, как правило, определяется характеристиками нелинейного кристалла. К основным характеристикам относятся следующие: высокие нелинейные коэффициенты, высокая лучевая стойкость, высокая механическая и химическая стабильность, высокая степень однородности монокристаллического материала и т.д. К таким материалам относится высокоомный кристалл  $\text{KTiOPO}_4$  (РКТР) выращиваемый по технологии компании ООО «Кристалл Т» (г. Томск) [4].

**Параметры РДС для ГВГ**

Для удвоения частоты лазерного излучения в кристалле необходимо реализовать условие фазового синхронизма, которое описывается выражением  $\mathbf{k}_2 = 2\mathbf{k}_1$ , где  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  – волновые векторы волн первой и второй гармоник соответственно. Если рассматривать скалярный синхронизм, то соотношение принимает вид  $k_2 = 2k_1$ .

Выполнение этих условий в кристалле РКТР возможно только для типов взаимодействия *ssf* и *sff* [5]. Однако максимальный элемент тензора нели-

нейных коэффициентов кристалла соответствует типу взаимодействия *sss*, при котором выполнение фазового синхронизма невозможно, т.е. волновая расстройка

$$\Delta k = k_2 - 2k_1 \quad (1)$$

всегда будет отлична от нуля ( $\Delta k \neq 0$ ). Кроме того, когерентная длина  $l_c = \pi(\Delta k)^{-1}$  будет составлять несколько микрометров.

Для увеличения эффективности ГВГ в нелинейном кристалле формируется такая РДС, чтобы толщина каждого домена  $l_d$  была равна когерентной длине  $l_d = l_c$ . В таком случае оптимальный период доменной структуры определяется выражением

$$\Lambda = 2l_c. \quad (2)$$

**Формирование РДС в кристалле РКТР**

Для формирования РДС были изготовлены плоскопараллельные пластины размерами  $12 \times 3,5 \times 2$  мм<sup>3</sup> вдоль кристаллооптических осей *x*, *y* и *z* соответственно. На одной *Z* грани пластин были сформированы токопроводящие электроды в виде решетки. С противоположной стороны были нанесены сплошные электроды под решёткой (рис. 1).

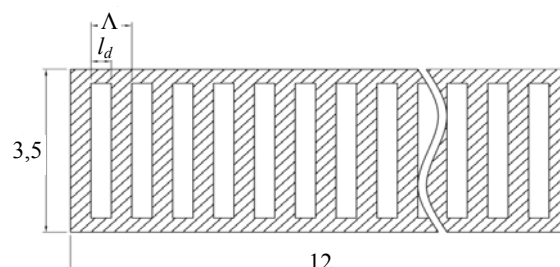


Рис. 1. Конфигурация электрода на кристаллической пластине

Период решетки рассчитывался с помощью выражения, вытекающего из (1) и (2):

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2(n(2\omega) - n(\omega))}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны первой гармоники,  $n(\omega)$  и  $n(2\omega)$  – показатели преломления кристалла для излучения первой и второй гармоник соответственно.

При расчёте периода решётки использовались дисперсионные формулы для кристалла КТР из [2]. Использование различных дисперсионных формул дало разброс результатов вычисления шага решётки в диапазоне от 8,7 до 9,4 мкм при условии, что длина волны первой гармоники равна  $\lambda = 1,064$  мкм. В связи с этим были изготовлены образцы с градацией шага 0,05 мкм с целью определения оптимального периода РДС для кристалла РКТР.

Для переворота доменов в кристаллических пластинах к электродам прикладывалось напряжение 2,1–2,2 кВ/мм. Завершение процесса переворота доменов контролировалось оптическим методом, суть которого состоит в наблюдении за доменными стенками. Схема экспериментальной установки для наблюдения за доменными стенками представлена на рис. 2.

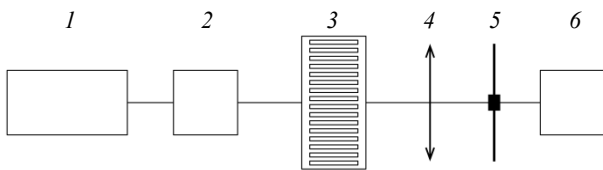


Рис. 2. Схема оптической установки для наблюдения за доменными стенками в кристаллических пластинах: 1 – He-Ne лазер; 2 – коллиматор; 3 – кристаллическая пластина с электродами; 4 – положительная линза; 5 – пространственный фильтр; 6 – цифровая камера

Излучаемый лазером 1 световой пучок проходит через коллиматор 2, в котором задается диаметр пучка, больший или равный длине решётки на кристаллической пластине 3. Проходящий через кристаллическую пластину свет дифрагирует на доменных границах. С помощью положительной линзы 4 и пространственного фильтра 5 отсекается нулевой порядок дифракции. Цифровая камера устанавливается в плоскости, где изображение границ кристаллической пластины и доменных стенок наиболее резкое. На рис. 3 представлен пример изображения границ доменов, полученных описанным методом.

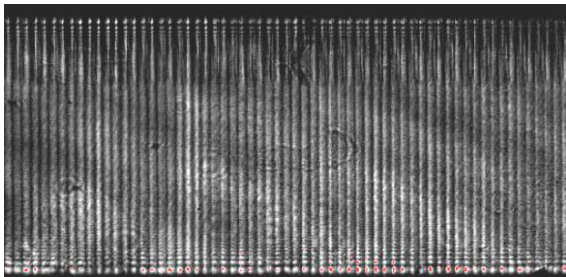


Рис. 3. Изображение доменных стенок в кристалле РКТР, полученное оптическим теньвым методом

### Измерение эффективности ГВГ

Кристалл можно представить в виде большого количества соединенных вместе тонких кристаллических пластин, таких, что толщина каждой пластины  $d$  много меньше когерентной длины ( $d \ll l_c$ ). Тогда разность фаз волн второй гармоники на выходе кристалла, каждая из которых была порождена в

отдельной тонкой пластине, будет определяться выражением

$$\phi_i = -\Delta k \cdot (N - i) \cdot d + \Delta\phi_i, \quad (4)$$

где  $N$  – общее количество тонких пластин в кристалле;  $\Delta\phi_i$  – дополнительный фазовый сдвиг, связанный с параметрами РДС. Если принять, что изменение интенсивности света с частотой второй гармоники на длине взаимодействия  $l_c$  много меньше интенсивности основного излучения, то амплитуды каждой из вышеупомянутых волн можно считать равными. В этом случае амплитуда волны второй гармоники на выходе кристалла будет являться результатом интерференции  $N$  волн с фазами  $\phi_i$ :

$$U = A \cdot \sum_{i=1}^N e^{j\phi_i}, \quad (5)$$

где  $A$  – амплитуда каждой волны, участвующей в интерференции. А интенсивность волны второй гармоники будет определяться выражением

$$I = |U|^2. \quad (6)$$

Для определения дополнительного фазового сдвига  $\Delta\phi_i$  будем полагать, что в одном домене толщиной  $l_d$  укладывается целое количество кристаллических пластин толщиной  $d$ :

$$l_d = m \cdot d, \quad (7)$$

а в одной когерентной длине укладывается целое число  $n$  пластин толщиной  $d$ :

$$l_c = n \cdot d. \quad (8)$$

В таком случае выражение для дополнительного фазового сдвига  $\Delta\phi_i$  можно представить в следующей форме:

$$\Delta\phi_i = \begin{cases} \pi, & \text{при } \sin(i \cdot \pi \cdot n \cdot (l_d/l_c)^{-1}) > 0; \\ 0, & \text{при } \sin(i \cdot \pi \cdot n \cdot (l_d/l_c)^{-1}) \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

Учитывая (9), интенсивность второй гармоники на выходе из кристалла с РДС является функцией, зависящей от отношения толщины домена и когерентной длины

$$I = f(l_d/l_c). \quad (10)$$

На рис. 4 представлен график этой функции в окрестности точки равенства толщины домена и когерентной длины.

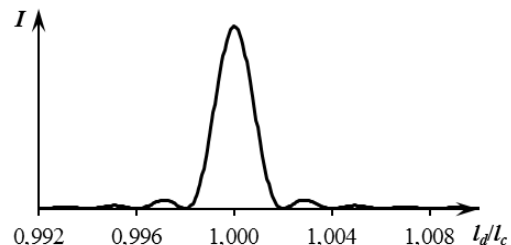


Рис. 4. График функции интенсивности второй гармоники на выходе из кристалла с РДС ( $N = 10^7$ ,  $n = 10^4$ )

Из графика видно, что при равенстве толщины домена и когерентной длины интенсивность излучения второй гармоники максимальна, а при измене-

нии их отношения на 0,002 интенсивность света уменьшается на несколько порядков.

При изменении температуры кристалла с РДС будут изменяться толщина доменов и когерентная длина, что в свою очередь приведет к изменению их соотношения.

Для измерения эффективности ГВГ в кристалле РКТР с РДС была собрана установка, схема которой представлена на рис. 5.

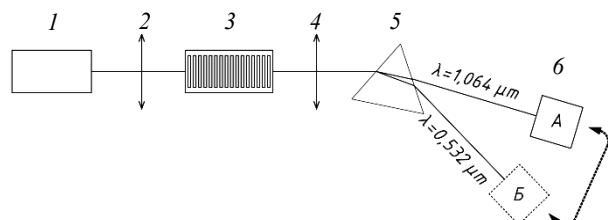


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2, 4 – линзы; 3 – образец; 5 – дисперсионная призма; 6 – цифровая камера

Лазер 1 генерирует световой пучок с длиной волны  $\lambda = 1,064$  мкм. Линзы 2 и 4 предназначены для формирования узкой перетяжки лазерного пучка и его коллимирования. Образец 3 закрепляется на элементе Пельтье и устанавливается в области перетяжки лазерного пучка. С помощью дисперсионной призмы 5 световые пучки с длинами волн первой и второй гармоник разделяются. Цифровая камера устанавливается в положение А или Б для измерения интенсивности излучения первой или второй гармоники соответственно.

Кристаллический элемент с РДС устанавливается таким образом, чтобы доменная решётка была коллинеарной с оптической осью схемы. Камера устанавливается в положение Б, после чего производится медленное охлаждение или нагревание кристаллического элемента с целью нахождения оптимальной температуры, при которой выполняется условие квазисинхронизма.

На рис. 6 представлена зависимость интенсивности второй гармоники от изменения температуры в элементе с периодом РДС  $\Lambda = 8,94$  мкм. Температура, при которой наблюдался максимум интенсивности, составила  $T = 59,6$  °С.

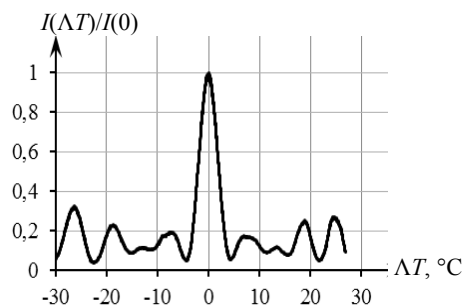


Рис. 6. Зависимость интенсивности излучения с частотой второй гармоники от изменения температуры

При установленной оптимальной температуре кристаллического элемента цифровая камера пере-

мещается в положение А и фиксируется интенсивность излучения с длиной волны первой гармоники  $I_1(\omega)$ . После этого задается температура элемента, соответствующая минимуму интенсивности второй гармоники, и измеряется второе значение интенсивности излучения первой гармоники  $I_2(\omega)$ . Так как во второй точке по температуре уровень оптического сигнала с частотой  $2\omega$  ниже чувствительности цифровой камеры и на несколько порядков ниже уровня сигнала в первой точке по температуре, то эффективность преобразования можно вычислить следующим образом:

$$\eta = \left(1 - \frac{I_1(\omega)}{I_2(\omega)}\right) \cdot 100\% . \quad (11)$$

В обозначенном выше образце эффективность преобразования при плотности мощности излучения основной гармоники  $9,3$  МВт/см<sup>2</sup> составила величину  $\eta = 49,7\%$ .

### Заключение

В ходе работы были подобраны режимы формирования РДС в кристаллических пластинах РКТР. При этом установлено, что для переворота доменов необходимо прикладывать внешнее электрическое поле порядка  $2,1-2,2$  кВ/мм. Также был определен период РДС при температуре кристалла  $59,6$  °С для ГВГ лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 1,064$  мкм в квазисинхронном режиме, величина которого составила  $8,94$  мкм.

Полученная эффективность преобразования частоты  $49,7\%$  при плотности мощности  $9,3$  МВт/см<sup>2</sup> превышает значение эффективности преобразования в монокристалле при тех же условиях в  $2,5$  раза.

Полученные результаты исследований показывают возможность формирования РДС с микронным периодом в кристаллических пластинах РКТР толщиной  $2$  мм и более. Принимая во внимание совокупность всех свойств кристалла РКТР, этот материал является перспективным для разработки устройств преобразования частоты, параметрических осцилляторов, получения суммарных и разностных частот на РДС и их внедрение в действующие лазерные системы и комплексы.

### Литература

1. Гречин С.Г. Генерация второй гармоники при одновременной реализации синхронного и квазисинхронного взаимодействия в нелинейных кристаллах с регулярной доменной структурой / С.Г. Гречин, В.Г. Дмитриев, Ю.В. Юрьев // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 26, № 2. – С. 155–157.
2. Гурзаян Г.Г. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике: справочник / Г.Г. Гурзаян, В.Г. Дмитриев, Д.Н. Никогосян. – М.: Радио и связь, 1991. – 160 с.
3. Гречин С.Г. Генерация второй гармоники в кристаллах с регулярной доменной структурой на двух типах взаимодействия / С.Г. Гречин, В.Г. Дмитриев // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 10. – С. 929–932.
4. Выращивание и монокристаллизация кристаллов семейства КТР / Ю.В. Кулешов, В.А. Краковский, Л.Я. Се-

ребренников и др. // Доклады ТУСУРа. – 2011. – Т. 24, № 2, ч. 2. – С. 112–115.

5. Дмитриев В.Г. Прикладная и нелинейная оптика / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2004. – 512 с.

---

**Паргачёв Иван Андреевич**

Зав. лаб. нелинейной оптики ООО «Кристалл Т», Томск  
Тел.: +7-913-114-47-70  
Эл. почта: underfin@mail.ru

**Чуманов Михаил Владиславович**

Аспирант каф. электронных приборов (ЭП) ТУСУРа,  
инженер ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7-953-923-14-01  
Эл. почта: cmv-chuvi@gambler.ru

**Серебрянников Леонид Яковлевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭП,  
зам. директора ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7-953-912-83-53  
Эл. почта: silver.47@mail.ru

**Краковский Виктор Адольфович**

Д-р техн. наук, профессор каф. ТОР,  
директор ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7 (382-2) 53-50-40  
Эл. почта: office1@crystal.ru

**Гнатышин Алексей Романович**

Магистрант каф. ЭП  
Тел.: +7-923-403-43-01  
Эл. почта: gnatyshin.a.r@mail.ru

**Злобин Андрей Олегович**

Магистрант каф. ЭП  
Тел.: +7-906-950-09-15  
Эл. почта: zlobin.tusur@yandex.ru

**Шараева Анастасия Евгеньевна**

Технолог-оптик ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7-952-183-66-96  
Эл. почта: silver.47@mail.ru

Pargachev I.A., Chumanov M.V., Serebrennikov L.Y.,  
Krakovsky V.A., Gnatyshyn A.R., Zlobin A.O., Sharaeva A.E.  
**Second harmonic generation device of laser radiation  
based on high-resistive periodically poled KTiOPO<sub>4</sub>  
crystal**

The results of the work that consisted to form a periodically poled structure in KTP crystals and to investigate the device for second harmonic generation of laser radiation with a wavelength of 1064 nm in the crystal elements based on high-resistive periodically poled KTP crystals, are presented.

**Keywords:** second harmonic generation, non-linear optic, KTiOPO<sub>4</sub> crystal, laser radiation, periodically poled KTiOPO<sub>4</sub>.