

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ НАСТРОЙКИ КРИСТАЛЛОВ KDP ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФАЗОВОГО СИНХРОНИЗМА 1-ГО ТИПА ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

*Рябцев Вячеслав Михайлович, Зубков Антон Валерьевич, Кедров Александр Иванович,
Коваленко Владимир Петрович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, Россия

Аннотация

Представлена оптическая схема стенда измерения углов настройки кристаллов KDP для обеспечения фазового синхронизма 1-го типа [1] при генерации второй гармоники излучения неодимового лазера ($\lambda = 1053$ нм). Значения углов определяются по положению максимума преобразования излучения во вторую гармонику на угловой кривой синхронизма. В процессе измерений кристалл поворачивается по углу с шагом 100 мкрад в пределах центрального и первых побочных максимумов преобразования. Приведены измеренные значения угла синхронизма кристаллов. Суммарная погрешность измерения не превышает 30 мкрад (внешний угол).

Ключевые слова: KDP, угол синхронизма, фазовый синхронизм, генерация второй гармоники.

MEASUREMENT OF THE TUNING ANGLES OF KDP CRYSTALS TO ENSURE PHASE SYNCHRONISM OF THE 1ST TYPE WHEN GENERATING THE SECOND HARMONIC

*Ryabtsev Vyacheslav Mikhailovich, Zubkov Anton Valerievich, Kedrov Aleksandr Ivanovich,
Kovalenko Vladimir Petrovich*

FSUE «RFNC – VNIIEF», Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

Abstract

An optical scheme of a stand for measuring the tuning angles of KDP crystals to ensure phase synchronism of the 1st [1] type when generating the second harmonic of neodymium laser radiation ($\lambda = 1053$ nm) is presented. The values of the angles are determined by the position of the maximum of radiation conversion to the second harmonic on the angular synchronism curve. During the measurements the crystal rotates around the angle with a step of 100 mcrad within the central and first side maxima of the transformation. The measured values of the crystal synchronism angle are given. The total measurement error does not exceed 30 mcrad (external angle).

Keywords: KDP, synchronism angle, phase synchronism, second harmonic generation.

Одной из основных задач, возникающих при генерации второй гармоники лазерного излучения является задача измерения угла настройки кристалла для обеспечения фазового синхронизма, при котором будет достигнут максимальный коэффициент преобразования излучения 1ω во вторую гармонику.

Известны различные методы измерения и настройки углового положения кристаллов–преобразователей частоты излучения мощных лазеров для осуществления фазового синхронизма. Так, на йодных лазерах «Искра-4» и «Asterix» выставление положения кристаллов проводится за несколько экспериментов, путём введения коррекций положения кристаллов [2, 3]. При этом углы заклона кристаллов относительно направления распространения излучения 1ω не измеряются. На установке «Луч», реализована схема контроля углового положения нелинейного элемента KDP относительно луча юстировочного лазера, и методика определения направления синхронизма в кристаллах-преобразователях [4]. Погрешность при выставлении кристалла в угол синхронизма в эксперименте составляет 110 мкрад. Ещё одним методом настройки угловой ориентации кристаллов-удвоителей частоты DKDP, является геодезический метод [5] реализованный на установке «Искра-5», позволяющий измерить и выставить углы заклона кристалла относительно луча юстировочного He-Ne лазера при помощи автоколлимационного теодолита 2Т2А (приборная погрешность 6"). В данном методе каждый кристалл настраивается относительно опорного настроечного He-Ne лазера на свои индивидуальные углы заклона, определяемые в предварительных экспериментах по максимуму преобразования во вторую гармонику. Точность метода составляет 130 мкрад.

Ни один из представленных выше методов угловой настройки не позволяют получить необходимую точность 50 мкрад, потому что измерения углов производятся в однократных экспериментах по максимуму генерации второй гармоники.

Для увеличения точности необходимо проводить больше измерений, что, в частности реализовано на установке NIF [6]. На данной установке, настройка угла синхронизма кристаллов преобразователей предполагает практически идеальное изготовление кристаллов по ориентации оптической оси относительно их поверхности. Эта задача была решена с помощью, разработанной на установке NIF специальной системой CATS – Crystal Alignment Test System [7]. Погрешность данного метода составляет 10 мкрад.

Из представленных выше методов по требуемой точности удовлетворяет только метод с установки NIF. Но для реализации данного метода разброс углов синхронизма используемых кристаллов должен быть значительно меньше, что на данный момент невозможно из-за особенностей технологии изготовления кристаллов (или в разы увеличивает их стоимость). Проведённый анализ позволяет сделать вывод о том, что наиболее подходящим способом угловой настройки является прецизионное выставление угла поворота кристалла по максимуму генерации излучения 2-й гармоники, определяемой из угловой кривой синхронизма. В данной работе углы для каждого кристалла измеряются на специально разработанном стенде, описанном далее. Угловая настройка кристаллов производится с помощью специально разработанных моторизованных оправок, с суммарной погрешностью позиционирования не более, чем 30 мкрад.

Определение требуемой точности угловой настройки кристаллов-преобразователей

Эффективность преобразования излучения во 2-ю гармонику определяется условием фазового синхронизма – равенством скоростей (показателей преломления) взаимодействующих волн. Фазовый синхронизм между волнами накачки 1ω и второй гармоники 2ω является одним из важнейших условий эффективного преобразования излучения 1ω во вторую гармонику [8]. В идеальном случае, угловое направление волнового вектора излучения накачки 1ω должно совпадать с направлением идеального синхронизма внутри кристалла-преобразователя.

При преобразовании излучения во 2-ю гармонику в кристаллах KDP 1-го типа (взаимодействие оо-е) исходная линейно поляризованная волна излучения 1-й гармоники разделяется внутри кристалла на две обыкновенные волны, нелинейное взаимодействие между которыми и приводит к генерации необыкновенной волны 2-й гармоники. Расположение оптической оси в применяемых

кристаллах таково, что для осуществления фазового синхронизма кристалл необходимо сориентировать в азимутальном направлении относительно поляризации излучения 1ω , и склонить в вертикальной плоскости на некий угол ϑ , такой, чтобы направление излучения 1ω внутри кристалла совпадало с направлением синхронизма. Величина угла ϑ у применяемых кристаллов находится в диапазоне $0,1^\circ$ – 2° , определяется ориентацией оптической оси кристалла относительно его поверхности и является уникальной для каждого кристалла ввиду технологии его изготовления.

Необходимая точность измерений и настройки угла определяется угловой кривой синхронизма – нормированной зависимостью эффективности преобразования излучения во 2-ю гармонику от внешнего угла заклона кристалла для данной интенсивности излучения 1ω , и толщины кристалла. На рис. 1 приведены расчётные угловые кривые синхронизма для кристалла KDP толщиной 20 мм при разных значениях интенсивности – 0.01, 1 и 2 ГВт/см², импульс – «полка» по времени.

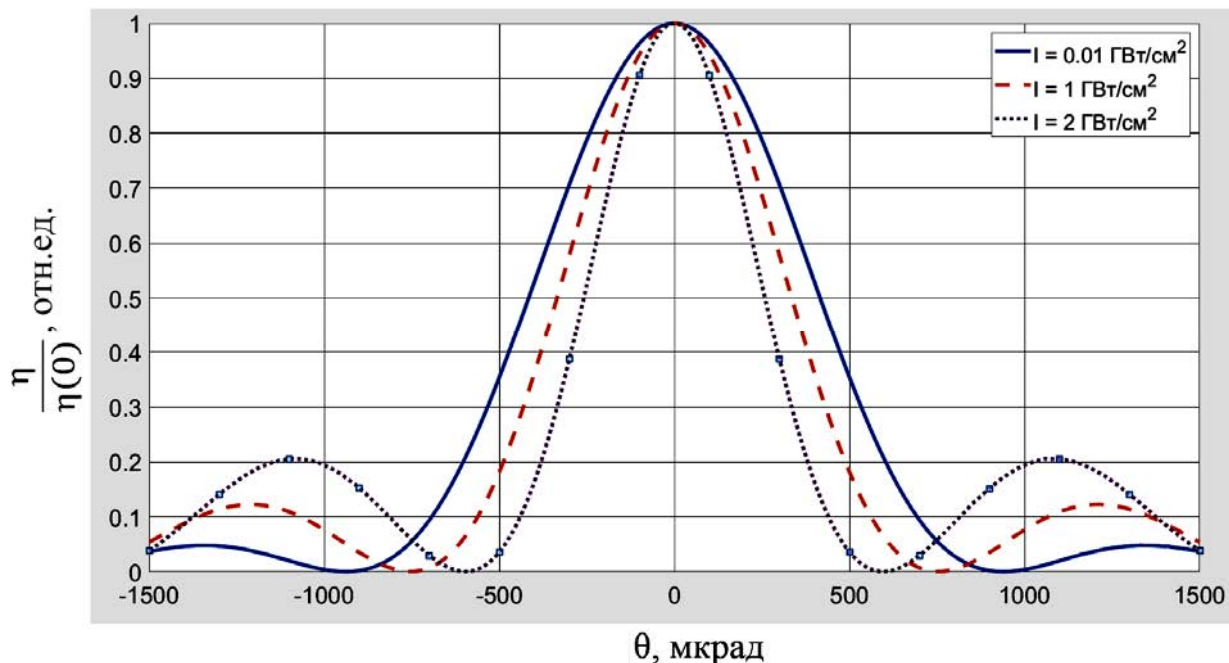


Рис. 1. Зависимость нормированной на единицу эффективности преобразования во 2-ю гармонику излучения 1053 нм в кристалле KDP толщиной 20 мм от внешнего угла заклона кристалла

Расчёты показывают, что при малых интенсивностях ширина центрального максимума постоянна, а при средних и больших – уменьшается с ростом интенсивности. Также из проведённых расчётов можно получить, что при рабочей интенсивности (1–2 ГВт/см²) угловая точность настройки кристалла должна быть не хуже 50 мкрад – при этом эффективность уменьшается на 1,5–2,5 % от максимально возможной величины, что является допустимой величиной.

Оптическая схема стенда для измерения угла синхронизма кристаллов-преобразователей излучения во вторую гармонику

Для достижения требуемой точности измерения углов заклона кристаллов (50 мкрад) используется угловая зависимость эффективности преобразования излучения во вторую гармонику от угла заклона кристалла. Для реализации данного метода был разработан стенд, оптическая схема и фото которого изображены на рис. 2 и рис. 3.

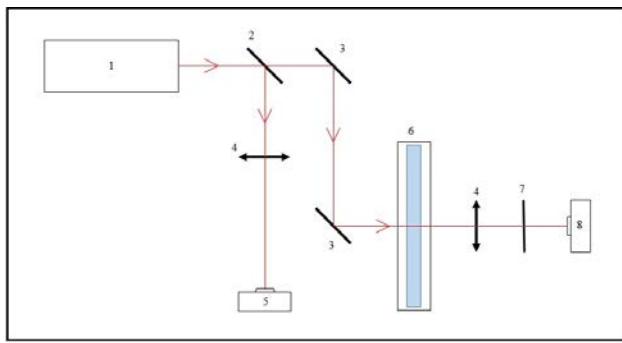


Рис. 2. Оптическая схема стенда для измерения угла синхронизма: 1 – лазер с $\lambda = 1053$ нм, 2 – полупрозрачная пластина, 3 – зеркала, 4 – фокусирующая линза, 5, 8 – измерители энергии, 6 – моторизированная оправа, 7 – светофильтр

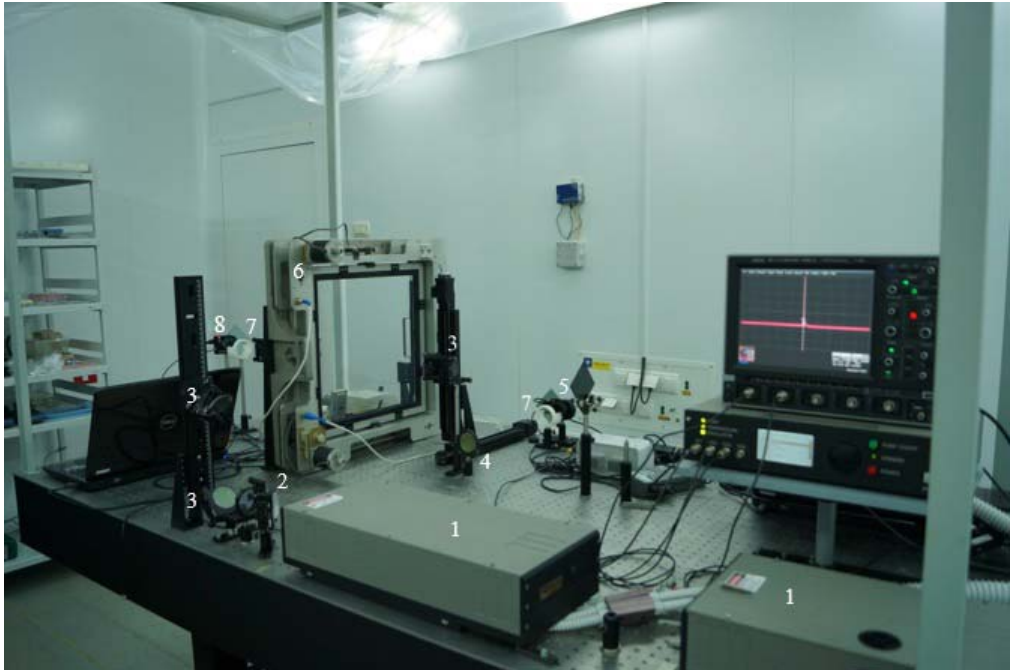


Рис. 3. Фото стенда для измерения угла синхронизма: 1 – лазер с $\lambda = 1053$ нм, 2 – полупрозрачная пластина, 3 – зеркала, 4 –фокусирующая линза, 5, 8 – измерители энергии, 6 – моторизированная оправа, 7 – светофильтр

В этой схеме, с помощью положительной линзы формируется параллельный пучок излучения лазера (1), который делится полупрозрачной пластиной (2), после чего, отражённая часть фокусируется линзой (4) на измеритель энергии 1ω (5), а прошедшая часть отразившись от зеркал (3) попадает на кристалл, закреплённый в оправе (6). После прохождения кристалла, излучение преобразуется во вторую гармонику и попадает на измеритель энергии 2ω (8), предварительно отсекая оставшуюся часть излучения первой гармоники светофильтром (7). Срабатывание измерителей энергии синхронизировано с импульсами лазера. По отношению этих сигналов можно определить эффективность преобразования в каждом импульсе лазера.

В представленной схеме исследуемый кристалл KDP устанавливается в оправу (6) и облучается излучением импульсного лазера, имеющего характеристики:

- Длина волны: $\lambda = 1053$ нм;
- Режим работы: импульсно-периодический;
- Энергия в импульсе: $E = 0,5-1,5$ мДж;
- Длительность импульса: $\tau = 100$ псек;
- Расходимость: $\theta = 4$ мрад;

Площадь пучка на кристалле: $S = 1,5 \text{ см}^2$;

Интенсивность на кристалле: $I = 10 \text{ МВт/см}^2$;

Измерение угла синхронизма осуществлялось следующим образом. Кристалл наклоняется на угол близкий к углу синхронизма, где фиксируется несколько угловых положений с шагом 100–200 мкрад, для которых выполняется серия из нескольких измерений энергии 1-й и 2-й гармоник. Полученные сигналы обрабатываются и производится усреднение.

Результаты измерения значений угла синхронизма кристалла KDP

Используемый для проведения измерений лазер, имеет интенсивность, соответствующую случаю слабого сигнала для преобразования ($< 0.01 \text{ ГВт/см}^2$), что позволяет при различных малых значениях сохранить ширину центрального максимума постоянной. Согласно работе [9], интенсивность второй гармоники на выходе кристалла $I_{2\omega}$ имеет вид:

$$I_{2\omega} = \text{const} \cdot \left(\frac{\sin(\gamma)}{\gamma} \right)^2 \cdot I_{1\omega}^2, \quad (1)$$

где $I_{1\omega}$ – интенсивность первой гармоники на входе кристалла, γ – параметр, зависящий от угловой расстройки Δk и длины кристалла L_c как:

$$\gamma = \frac{\Delta k \cdot L_c}{2}. \quad (2)$$

Выразив параметр γ через угол отклонения от положения синхронизма, получаем:

$$\gamma = \frac{\pi L_c}{\lambda} n_{0\omega}^2 \sin(2\theta_c) \left(\frac{1}{n_{e2\omega}^2} - \frac{1}{n_{o2\omega}^2} \right) \cdot \Delta\theta = K \cdot \Delta\theta, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучения, $n_{o\omega}$, $n_{o2\omega}$, $n_{e2\omega}$ – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей 1-й и 2-й гармоник.

Угловую ошибку $\Delta\theta$ также можно выразить в шагах двигателя:

$$\Delta\theta = (N - N_c) r, \quad (4)$$

где N – текущее положение кристалла в шагах мотора, N_c – значение шагов мотора, соответствующее точному синхронизму, r – величина шага мотора в радианах. Используя формулу (1), а также определения интенсивности $I = E/(S \cdot t)$, в котором E – энергия в импульсе, S – площадь пучка, а t – длительность импульса, можно получить:

$$\frac{E_{1\omega}^2}{E_{2\omega}} = \text{const} \cdot t \cdot \left(\frac{\gamma}{\sin(\gamma)} \right)^2, \quad (5)$$

где $E_{1\omega}$ и $E_{2\omega}$ – измеренные значения энергий первой и второй гармоник.

Величина константы и значение шагов мотора, для которого выполняется синхронизм, были определены путём аппроксимации соответствующей функцией 20 точек, полученных из 20 серий измерений. Чтобы увеличить точность измерений и минимизировать влияние нестабильной работы лазера, в каждой серии было сделано по 30 измерений энергии 1-й и 2-й гармоник. Сопоставление экспериментальных точек и аппроксимирующей кривой показано на рис. 4.

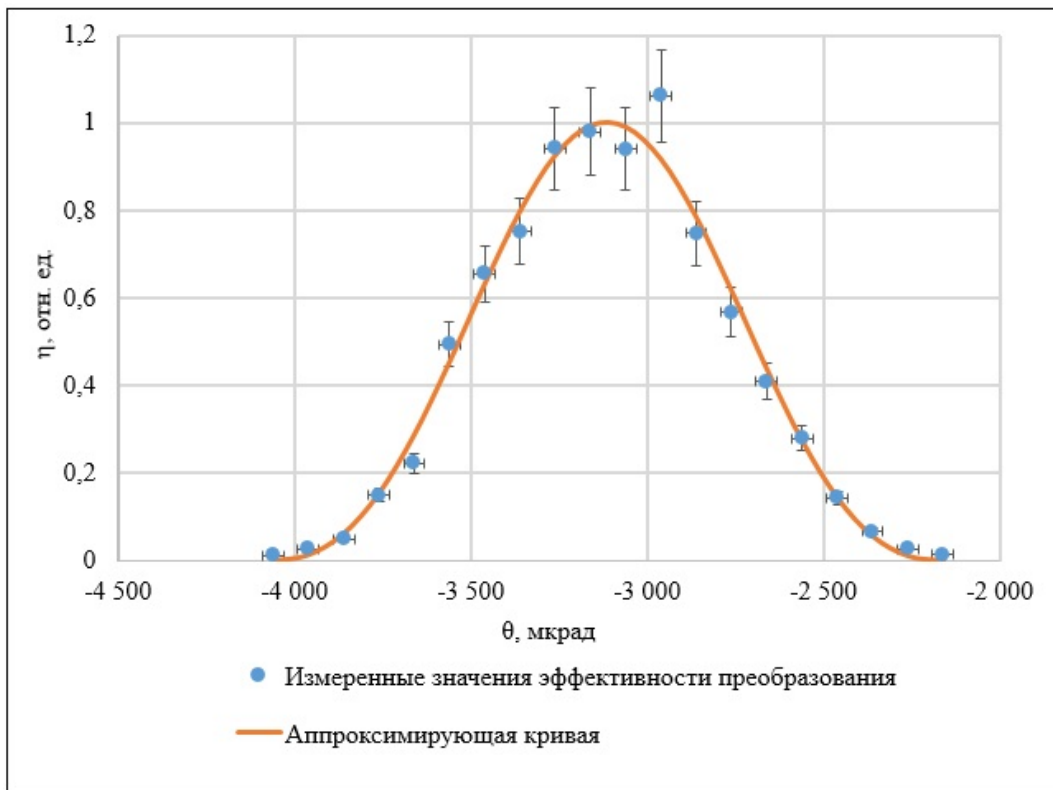


Рис. 4. График зависимости относительной эффективности преобразования от угла отклонения от положения синхронизма, полученный при обработке экспериментов по измерению угла синхронизма

Положение синхронизма определялось по максимуму аппроксимирующей кривой. С целью дополнительной проверки положение синхронизма также было определено при помощи корреляционной функции. Полученные значения совпали с полученными методом аппроксимации с точностью до 1 мкрад.

То есть, точность вычисления угла синхронизма по совокупности экспериментальных данных составила 1–2 мкрад. Учитывая, что погрешность позиционирования угла поворота кристалла с помощью применяемых нами оправ составляет 25–30 мкрад, суммарная погрешность определения угла синхронизма не превышает 30 мкрад.

Измерение температурной поправки для угла настройки кристаллов-преобразователей излучения во вторую гармонику

При настройке кристаллов температура окружающей среды может изменяться в пределах 21 ± 2 °С, что приводит к изменению угла синхронизма, и требует коррекции угла настройки кристаллов. Температурные зависимости показателей преломления кристалла КДР исследовались разными авторами [10–14], однако значение температурной производной угла синхронизма $\partial\theta_s/\partial T$, вычисленное по этим данным, имеет значительный разброс – от 49 до 104 мкрад/°С для внутреннего угла, и 74–156 мкрад/°С, для внешнего угла.

Описанная выше схема стенда позволяет провести прямые измерения температурной поправки для внешнего угла настройки кристалла, путём определения положения максимума преобразования для одного и того же кристалла при разных температурах – $19,0$ и $21,9 \pm 0,1$ °С (рис. 5).

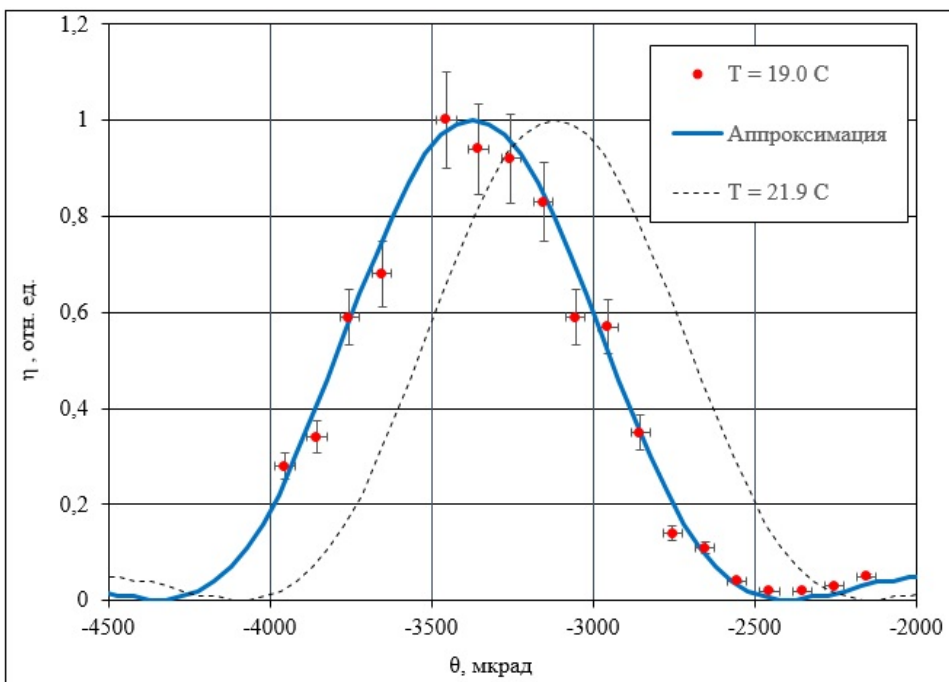


Рис. 5. Зависимости относительной эффективности преобразования от угла отклонения от положения синхронизма, полученные для двух значений температуры кристалла

Результаты измерений показывают, что положение максимума преобразования при изменении температуры, действительно сдвигается. Отсюда, можно определить, что для внешнего угла настройки, величина

$$\partial\theta_s/\partial T = (75 \pm 15) \text{ мкрад}/^\circ\text{C}$$

Это значение хорошо согласуется с работой [15] американских авторов, где температурная поправка составила 49 ± 2 мкрад/ $^\circ\text{C}$ для внутреннего и 73 ± 3 мкрад/ $^\circ\text{C}$ для внешнего угла настройки кристалла KDP с 1-м типом синхронизма при генерации 2-й гармоники излучения 1064 нм.

Для небольших колебаний температуры 2–3 $^\circ\text{C}$ полученной нами точности определения величины $\partial\theta_s/\partial T$ достаточно для того, чтобы попасть в направление синхронизма с погрешностью не более чем ± 50 мкрад.

Заключение

Разработана оптическая схема стенда, а также методика измерения углов настройки кристаллов KDP для обеспечения фазового синхронизма 1-го типа при генерации второй гармоники излучения неодимового лазера ($\lambda = 1053\text{нм}$).

Данная методика позволяет измерять углы наклона кристаллов, необходимых для осуществления фазового синхронизма с суммарной погрешностью, не превышающей 30 мкрад.

Для используемых кристаллов KDP определена температурная поправка для внешнего угла настройки $\partial\theta_s/\partial T = (75 \pm 15) \text{ мкрад}/^\circ\text{C}$.

Список литературы

1. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
2. Воронич И. Н. Разработка широкоапертурных мозаичных преобразователей длины волны света и перевод установки «Искра-4» в режим работы на второй гармонике: Диссертация на соискание ученой степени к.ф.–м.н. ВНИИЭФ, 1994.

3. Baumhacker H., Brederlow G., Fill E., Volk R., Witkowski S., Witte K. J. Layout and Performance of the Asterix IV Iodine Laser at MPQ, Garching. // *Appl. Phys. B*. 1995. Vol. 61, P. 325–332.
4. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Четырехканальная лазерная установка «Луч» – модуль установки «Искра-6» // IV Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 2002.
5. Гайдаш В. А., Гузов И. П., Коваленко В. П., и др. Преобразование лазерного излучения установки «Искра-5» во вторую гармонику. ВНИИЭФ, 1997.
6. Miller G. H., Moses E. I., and Wuest C. R. The National Ignition Facility. // *Opt. Eng.* 2004. Vol. 43. P. 2841–2853.
7. Hunt J. T. National Ignition Facility Performance Review 1999. – LLNL Report UCRL-ID-138120-99. 2000. P. 313.
8. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика. / Пер. сангл. подред. С. А. Ахманова. М.: «Мир», 1976. С. 264.
9. Сизмин Д. В. Нелинейная оптика // Учебно-методическое пособие. Саров. 2015. С. 85–103.
10. Philips R. A. Temperature variations of the index of refraction of ADP, KDP, and deuterated KDP. // *J. Opt. Soc. Am.* 1966. Vol. 56. N 5. P. 629 – 632.
11. Craxton R. S., Jacobs S. D., Rizzo J. E., and Boni R. Basic properties of KDP related to the frequency conversion of 1- μm laser radiation // *IEEE J. Quant. Electron.* 1981. Vol. QE – 17. P. 1782–1786.
12. Barnes N. P., Gettemy D. J., Adhav R. S. Variations of the refractive index with temperature and the tuning rate for KDP isomorphs // *J. Opt. Soc. Am.* 1982. Vol. 72. N. 7. P. 895–898.
13. Ghosh G. C., Bhar G. C. – Temperature dispersion in ADP, KDP and KD*P for nonlinear devices // *IEEE J. Quant. Electron.* 1982. Vol. QE–18. N 2. P. 143 – 145.
14. Eimerl D. Electro–optic, linear and nonlinear optical properties of KDP and its isomorphs // *Ferroelectrics*. 1987. Vol. 72. N 1. P. 95–139.
15. Webb M. Temperature Sensitivity of KDP for Phase-Matched Frequency Conversion of 1 μm Laser Light // *IEEE J. Quant. Electron.* 1994. Vol. 30. N 8. P. 1934–1942.