

УДК 535.32 : 548.0

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ DKDP МЕТОДОМ ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИК

Бредихин В. И., Кузнецов С. П.

На основе экспериментально измеренных углов синхронизма при умножении частоты света в кристаллах DKDP получены дисперсионные зависимости показателей преломления этих кристаллов, позволяющие вычислять параметры умножителей частоты в диапазоне длин волн 0.5—1.36 мкм при степенях дейтерирования кристаллов $x=0\div 1$.

Кристаллы DKDP находят в последнее время все большее применение в лазерной технике, в частности для преобразования частоты излучения лазеров ИК диапазона вследствие их более широкой, чем у KDP, области прозрачности. Однако их оптические свойства до настоящего времени изучены недостаточно. Так, практически отсутствуют данные о величинах показателей преломления и их зависимости от длины волны в ИК области спектра, которые необходимы для расчета параметров умножителей частоты: углов синхронизма, коэффициентов угловой, температурной, частотной расстройки и др. Прямые измерения показателей преломления в широком диапазоне (особенно в ИК и УФ областях спектра) наталкиваются на значительные трудности, связанные с необходимостью использовать уникальные приборы и обработанные с высокой точностью образцы, а также с большой трудоемкостью работы. Видимо, по этим причинам получаемая в таких измерениях точность результатов оказывается ниже ожидаемой. Например, рассчитанные по данным [1] углы синхронизма для KDP отличаются от экспериментально измеряемых на величину до 20', что соответствует ошибке в показателе преломления $\sim 10^{-4}$ вместо полученной авторами [1] $\sim 10^{-5}$. Для кристаллов DKDP дело осложняется тем, что они являются смешанными ($KD_{2x}H_{2(1-x)}PO_4$), и их показатели преломления зависят от степени дейтерирования x , на что в литературе не всегда обращается достаточное внимание.

В настоящей работе предлагается для определения дисперсии показателей преломления использовать метод генерации гармоник: по экспериментально измеряемым углам синхронизма при преобразовании частоты света восстанавливать показатели преломления. При таких измерениях нетрудно получить углы синхронизма с точностью до нескольких угловых минут, что соответствует точности показателей преломления $\sim 10^{-4}$.

Уравнения для углов синхронизма при умножении частоты света

$$\sum_i [a_i n_{oi} + b_i (n_{oi}^{-2} \cos^2 \theta_c + n_{ei}^{-2} \sin^2 \theta_c)^{-1/2}] = 0, \quad (1)$$

где i — номер гармоники, a_i, b_i — некоторые целые, зависящие от типа взаимодействия, являются однородными относительно показателей преломления, поэтому не позволяют однозначно выразить их через углы синхронизма θ_c . Однако если известны показатели преломления в некотором диапазоне длин волн, то (1) позволяют восстановить показатели преломления вне этого диапазона.

Поскольку в литературе отсутствуют достаточно надежные данные по величине углов синхронизма для кристаллов DKDP с определенной степенью

дейтерирования, мы провели такие измерения на ряде длин волн: 0.694 мкм (лазер на рубине), 1.064, 1.318, 1.338, 1.356 мкм (лазер на YAG-Nd³⁺) и 0.532 мкм (вторая гармоника излучения лазера на YAG-Nd³⁺). Были измерены углы синхронизма при удвоении (взаимодействия типа *ооe* и *оee*) и утроении (взаимодействие $e_1o_2e_3$) частоты света в образцах DKDP со степенью дейтерирования $x=0.865$. Для вырезки образцов углы синхронизма рассчитывались по данным [1] с поправками [2] на степень дейтерирования. В эксперименте определялась поправка к углу синхронизма $\Delta\theta_c = \Delta\theta/n$, где $\Delta\theta$ — угол между нормалью к образцу и направлением падающего на кристалл света при синхронном взаимодействии. Полученные результаты представлены в табл. 1. Точность измерения θ_c составляет около $\pm 10'$ и определяется точностью вырезки образца.

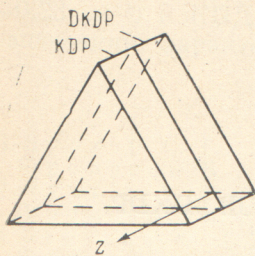


Рис. 1. Схема эксперимента.

Кроме измерений углов синхронизма, были проведены измерения дисперсии показателя преломления n_0 DKDP ($x=0.865$) относительно показателя преломления KDP на тех же длинах волн. Для этого была изготовлена призма из кристаллов KDP и DKDP (рис. 1) с углом 60° . Измерялся угол между преломленными в призмах из KDP и DKDP лучами вблизи угла наименьшего отклонения. Интерполяцией полученных экспериментальных результатов найдено, что дисперсионные кривые $n_0(\lambda)$ для KDP и DKDP пересекаются на длине волны $\lambda=1.12$ мкм. Для нахождения дисперсионных зависимостей $n_{o,e}(\lambda, x)$ кристаллов DKDP в качестве нулевого приближения были взяты дисперсионные формулы, полученные в [1] для кристаллов KDP с поправками на степень дейтерирования, предложенными в [2],

$$n_{o,e}^{(0)}(\lambda, x) = n_{o,e}^{\text{KDP}}(\lambda) + x(\gamma\lambda - \beta). \quad (2)$$

Далее показатели преломления находились в виде

$$n_{o,e}(\lambda, x) = n_{o,e}^{(0)}(\lambda, x) + x\Delta n_{o,e}(\lambda). \quad (3)$$

поскольку, как было установлено в [2], зависимость показателей преломления от степени дейтерирования x можно считать линейной.

Из физических соображений ясно, что поправка $\Delta n_{o,e}(\lambda)$ может иметь вид

$$\Delta n \sim \frac{a\lambda^2}{\lambda_0^2 - \lambda^2}, \quad (4)$$

соответствующий появлению полосы поглощения на длине волны λ_0 , или

$$\Delta n \sim \frac{a\lambda^2}{(\lambda_0^2 - \lambda^2)^2}, \quad (5)$$

соответствующий сдвигу полосы поглощения при частичном замещении Н на D. Экспериментальные данные обрабатывались с использованием обоих видов добавок. Расчеты заключались в минимизации невязок, получаемых при подстановке измеренных углов синхронизма в уравнения синхронизма. При этом учитывалось, что $n_0^{\text{KDP}} = n_0^{\text{DKDP}}$ при $\lambda = 1.12$ мкм. Это последнее оказалось достаточным, чтобы исключить неоднозначность решения задачи. Для исключения неоднозначности в определении n можно было бы использовать результаты измерений [2] или [3] в видимой области спектра. Однако эти данные различаются на величину $\sim 3 \cdot 10^{-4}$, поэтому представляется более целесообразной привязка именно к величине показателя преломления KDP, которая установлена более надежно.

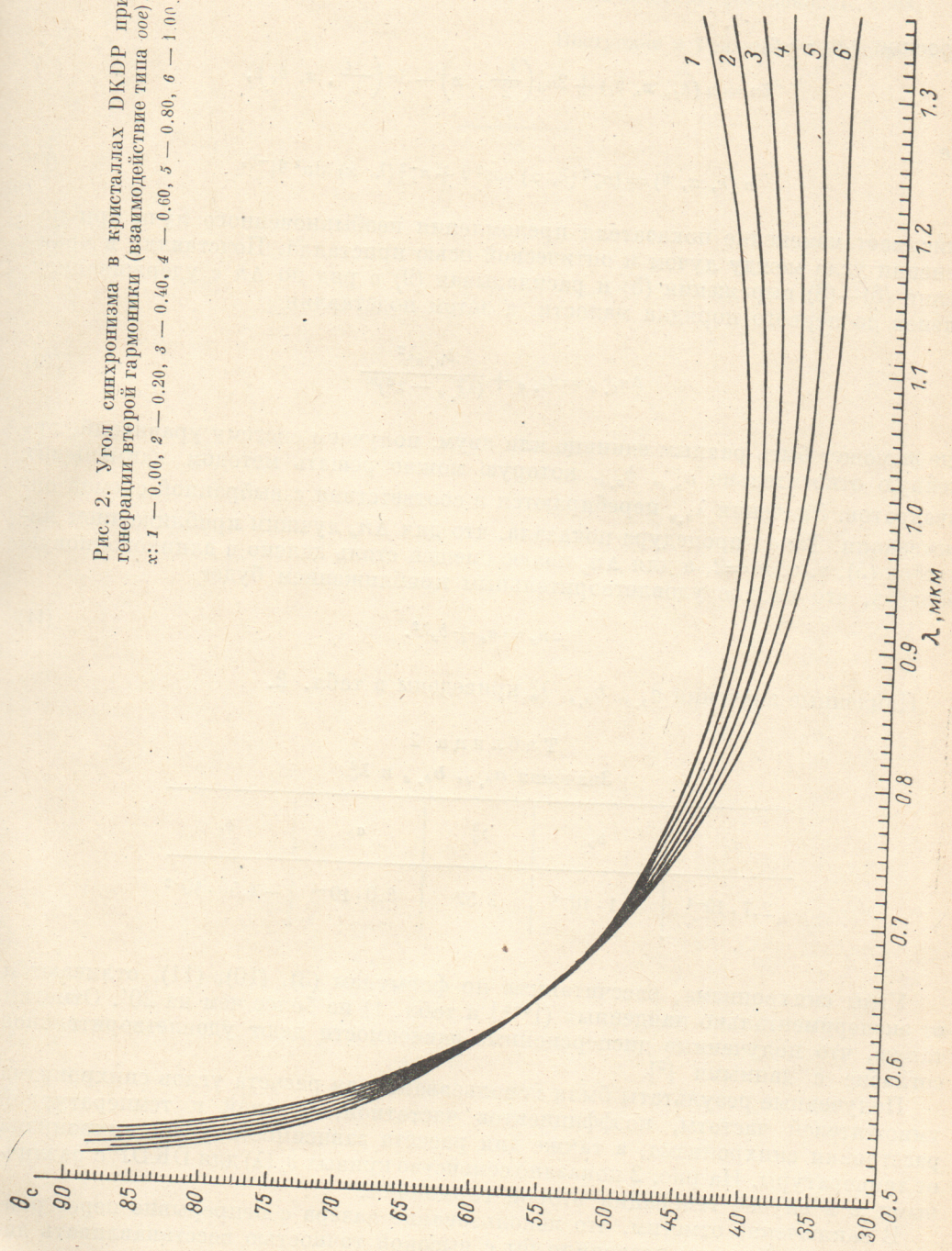
Для тех типов синхронизма, для которых проводились измерения, выражения для невязок имеют следующий вид:

Таблица 1

Результаты измерений углов синхронизма при умножении частоты света

Вид взаимодействия	Длина волны 1-й гармоники, мкм	Угол синхронизма
Удвоение <i>оо</i> → <i>e</i>	1.356	36.2
	1.338	36.0
	1.318	35.9
	1.064	35.9
	0.694	49.8
	0.532	84.4
Удвоение <i>оe</i> → <i>e</i>	1.356	52.5
	1.338	52.6
	1.318	52.7
	1.064	54.0
Утроение <i>eo</i> → <i>e</i>	1.318	47.9
	1.064	59.1

Рис. 2. Угол синхронизма в кристаллах DKDP при генерации второй гармоники (взаимодействие типа ooe).
x: 1 — 0.00, 2 — 0.20, 3 — 0.40, 4 — 0.60, 5 — 0.80, 6 — 1.00.



удвоение $oo \rightarrow e$

$$\delta n = n_o(\lambda_i, x) - n\left(\frac{\lambda_i}{2}, x, \theta_i\right); \quad (6)$$

удвоение $oe \rightarrow e$

$$\delta n = n_o(\lambda_i, x) + n(\lambda_i, x, \theta_i) - 2n\left(\frac{\lambda_i}{2}, x, \theta_i\right); \quad (7)$$

утроение $e_1o_2 \rightarrow e_3$

$$\delta n = n(\lambda_i, x, \theta_i) + 2n_o\left(\frac{\lambda_i}{2}, x\right) - 3n\left(\frac{\lambda_i}{3}, x, \theta_i\right), \quad (8)$$

где

$$n(\lambda, x, \theta) = [n_o^{-2}(\lambda, x) \cos^2 \theta + n_e^{-2}(\lambda, x) \sin^2 \theta]^{-1/2} \quad (9)$$

описывает изменение показателя преломления необыкновенного луча при изменении угла между лучом и оптической осью кристалла. Подставляя в уравнения (6)–(8) выражения (3) и раскладывая (9) в ряд по Δn с удерживанием членов до первого порядка малости, а затем подставляя

$$\Delta n_{o,e} = a_{o,e} + \frac{b_{o,e} \lambda^2}{(\lambda_{o,e}^2 - \lambda^2)^m}, \quad (10)$$

где m может быть равным единице или двум, получаем систему уравнений, линейную относительно $a_{o,e}$, $b_{o,e}$, которую можно решать методом наименьших квадратов. Значения $\lambda_{o,e}$ перебираются в соответствии с выбранной схемой оптимизации. Такая процедура показала, что для Δn_o лучшим приближением является (5), т. е. $m=2$, а для Δn_e полюс смещен столь далеко в длинноволновую область, что вполне удовлетворительным приближением будет

$$\Delta n_e = a_e + b_e \lambda^2. \quad (11)$$

Найденные значения $a_{o,e}$, $b_{o,e}$, λ_n^2 приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
Значения $a_{o,e}$, $b_{o,e}$ и λ_n^2

a_o	b_o	λ_o^2	a_e	b_e
$2.7 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$	2.52	$8.0 \cdot 10^{-4}$	$-2.59 \cdot 10^{-3}$

Углы синхронизма, рассчитанные по формулам (3), (10), (11), отличаются от экспериментально найденных [4–6] и табл. 1) не более чем на 20'. Отметим также, что полученные дисперсионные зависимости дают удовлетворительное согласие с данными [3].

Полученные результаты были использованы для расчета углов синхронизма умножителей частоты, коэффициентов частотной, угловой и температурной расстройки синхронизма, а также для расчета зависимости угла синхронизма от температуры. На рис. 2 показано семейство кривых $\theta_e(\lambda)$ для DKDP с различными x в случае генерации второй гармоники.

В заключение отметим, что использование лазера с непрерывно перестраиваемой длиной волны позволило бы с высокой точностью восстанавливать дисперсионные зависимости показателей преломления в полосе прозрачности кристалла. А так как вариации показателей связаны со слабыми линиями поглощения, то эти данные могут дать информацию о структуре фоновых или примесных уровней в области прозрачности.

Литература

- [1] Zernike F. — JOSA, 1964, v. 54, N 10, p. 1215.
- [2] Волкова Е. Н., Фаерман Ш. Л. — Квант. электрон., 1976, т. 3, с. 2508.
- [3] Phillips R. — JOSA, 1966, v. 56, N 5, p. 629.
- [4] Witte K., Fill E., Brederlow G., Baumhacker H., Volk R. — IEEE J. Quant. Electron., 1981, v. QE-17, N 19, p. 1809.
- [5] Laser Handbook / Ed. by M. L. Stitch. Amsterdam, North-Holland. 1979, v. 3.
- [6] Азаров В. В., Волосов В. Д., Калинин А. Г., Карлинская Е. В. — В кн.: IV Всесоюз. конф. «Оптика лазеров»: Тез. докл. Л., 1983, с. 252.

Поступило в Редакцию 8 октября 1985 г.
