

НАПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВОГО СИНХРОНИЗМА ПРИ СЛОЖЕНИИ И ВЫЧИТАНИИ ЧАСТОТ В ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛАХ С КВАДРАТИЧНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТЬЮ

Д.Ю. Степанов, В.Д. Шигорин, Г.П. Шипуло

УДК 535.5:621.373:535

Получены выражения, определяющие все возможные направления коллинеарного и неколлинеарного фазового синхронизма при сложении и вычитании частот в одноосных кристаллах с квадратичной оптической восприимчивостью.

Синхронные взаимодействия световых волн в одноосных кристаллах с квадратичной восприимчивостью широко используются для получения эффективного преобразования оптических частот. Наиболее полный анализ направлений, в которых осуществляются такие взаимодействия, был сделан лишь для коллинеарной /1/ и неколлинеарной /2/ генерации второй гармоники. Мы обобщили эти результаты на процессы сложения и вычитания частот, применяя те же методы, что и в случае двuosных кристаллов /3/.

1. При неколлинеарном распространении в одноосном кристалле трех взаимодействующих линейно поляризованных плоских монохроматических световых волн закон сохранения импульса для фотонов в среде дает в случае генерации суммарной (разностной) частоты (ГС(Р)Ч) $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ ($\omega_1 = \omega_3 - \omega_2$)* следующее условие фазового синхронизма

$$\omega_1 N_1 \vec{n}_1 + \omega_2 N_2 \vec{n}_2 = \omega_3 N_3 \vec{n}_3.$$

Здесь $\vec{n} = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta)$ — единичный вектор волновой нормали; N — соответствующий этому \vec{n} показатель преломления, который может

*) При параметрическом усилении ω_1 и ω_2 — частоты холостой и сигнальной волн, ω_3 — частота волны накачки. Все выражения для ГРЧ $\omega_3 - \omega_1 = \omega_2$ получаются из соответствующих выражений для ГСЧ $\omega_3 - \omega_2 = \omega_1$ заменой индексов 1 \leftrightarrow 2.

иметь два значения: N_0 (для обыкновенной волны) или $N_e(\theta) \equiv [N_0^{-2} + (N_e^{-2} - N_0^{-2}) \sin^2 \theta]^{-1/2}$ (для необыкновенной волны); N_0 и N_e — главные значения показателя преломления.

Если волна с частотой ω_2 обыкновенная, то при ГС(Р)Ч ω_3 (ω_1) в процессе взаимодействий типа $o_1 o_2 - e_3 (e_3 o_2 - o_1)$, $e_1 o_2 - e_3 (e_3 o_2 - e_1)$ в отрицательных одноосных кристаллах с $N_e < N_0$ и типа $e_1 o_2 - o_3 (o_3 o_2 - e_1)$ в положительных одноосных кристаллах с $N_0 < N_e$ углы фазового синхронизма связаны соотношением:

$$(2 \sin \theta_1 \sin \theta_3)^{-1} [\omega_1 N_1 (\omega_3 N_3)^{-1} - \omega_2^2 N_{02}^2 (\omega_1 \omega_3 N_1 N_3)^{-1} + \omega_3 N_3 \times \\ \times (\omega_1 N_1)^{-1}] - \operatorname{ctg} \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_3 - \cos(\varphi_3 - \varphi_1) = 0. \quad (1)$$

Если волна с частотой ω_2 необыкновенная, то при ГС(Р)Ч ω_3 (ω_1) в процессе взаимодействий типа $o_1 e_2 - e_3 (e_3 e_2 - o_1)$ в кристаллах с $N_e < N_0$ и типа $e_1 e_2 - o_3 (o_3 e_2 - e_1)$, $o_1 e_2 - o_3 (o_3 e_2 - o_1)$ в кристаллах с $N_0 < N_e$ углы фазового синхронизма связаны соотношением:

$$(2 \sin \theta_1 \sin \theta_3)^{-1} [\omega_1 N_1 (\omega_3 N_3)^{-1} (\sin^2 \theta_1 + N_{e2}^2 N_{o2}^{-2} \cos^2 \theta_1) - \omega_2^2 N_{e2}^2 \times \\ \times (\omega_1 \omega_3 N_1 N_3)^{-1} + \omega_3 N_3 (\omega_1 N_1)^{-1} (\sin^2 \theta_3 + N_{e2}^2 N_{o2}^{-2} \cos^2 \theta_3)] - \\ - N_{e2}^2 N_{o2}^{-2} \operatorname{ctg} \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_3 - \cos(\varphi_3 - \varphi_1) = 0. \quad (2)$$

В области нормальной дисперсии ($N_{1,2} < N_3$) синхронные взаимодействия при одинаковой поляризации всех волн невозможны.

При заданных углах θ_1 и φ_1 (θ_3 и φ_3) уравнениям (1) и (2) отвечают конические поверхности $\Phi(\theta_3, \varphi_3) = 0$ ($\Phi(\theta_1, \varphi_1) = 0$), образуемые направлениями распространения синхронно-генерируемых волн на частоте ω_3 (ω_1). В положительных и отрицательных кристаллах может существовать до трех конусов таких направлений. Направления распространения волн с частотой ω_2 , участвующих в синхронных взаимодействиях, также образуют конические поверхности и определяются углами θ_2 и φ_2 :

$$\operatorname{tg}^2 \theta_2 = (A^2 + B^2)/C^2, \quad \operatorname{tg}^2 \varphi_2 = B^2/A^2, \quad (3)$$

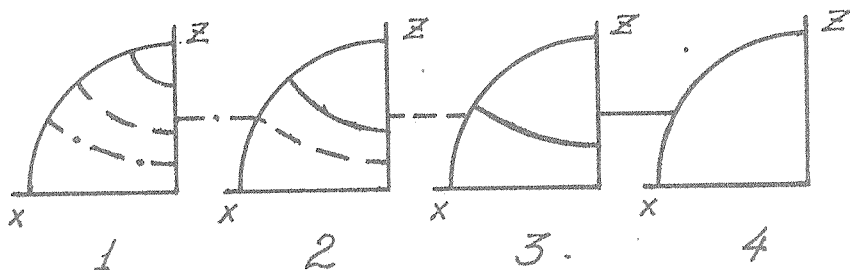
где

$$A = \omega_3 N_3 \sin \theta_3 \cos \varphi_3 - \omega_1 N_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1, \\ B = \omega_3 N_3 \sin \theta_3 \sin \varphi_3 - \omega_1 N_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1, \\ C = \omega_3 N_3 \cos \theta_3 - \omega_1 N_1 \cos \theta_1. \quad (4)$$

При заданных углах синхронизма θ_1, φ_1 и θ_2, φ_2 волна с частотой $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ распространяется в направлении $\vec{n}_3(\theta_3, \varphi_3)$, где θ_3 и φ_3 выражаются формулами (3) и (4), в которых произведена замена индексов: $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 1$, причем $\omega_1 \rightarrow -\omega_2$. При заданных углах синхронизма θ_2, φ_2 и θ_3, φ_3 волна с частотой $\omega_1 = \omega_3 - \omega_2$ распространяется в направлении $\vec{n}_1(\theta_1, \varphi_1)$, определяемом формулами (3) и (4), в которых сделана замена индексов $1 \leftrightarrow 2$.

2. При коллинеарном фазовом синхронизме, когда $\vec{n}_1 \parallel \vec{n}_2 \parallel \vec{n}_3 \parallel \vec{n}$, все формулы предыдущего раздела существенно упрощаются.

Если $\omega_1/\omega_3 = k$, то в области нормальной дисперсии направления синхронизма определяются углами θ_m между оптической осью кристалла и \vec{n} . Уравнения для θ_m могут быть получены из уравнений табл. 1 [3] для коллинеарного фазового синхронизма в главной плоскости ij двуосного кристалла заменой $a_m \rightarrow \theta_m$; $i \rightarrow e$; $j, k \rightarrow 0$. В общем случае решения этих уравнений находятся с помощью ЭВМ. Однако, как показывает проведенный нами анализ, о характере направлений фазового синхронизма и их расположении можно судить уже по соотношениям между главными показателями преломления данного кристалла на частотах взаимодействующих световых волн. Результаты такого анализа, проведенного нами по методике [3], обсуждаются ниже. Последовательность индексов в обозначениях типов взаимодействия соответствует процессу ГСЧ. В случае ГРЧ тем же направлениям (и условиям) синхронизма будут соответствовать уже другие типы взаимодействия. Их обозначения отличаются тривиальной перестановкой индексов.



Р и с. 1. Возможные варианты расположения направлений коллинеарного фазового синхронизма при ГС(Р)Ч в одноосных кристаллах

На рис. 1 схематически представлены все возможные варианты расположения направлений критического коллинеарного синхронизма при ГС(Р)Ч в одноосных кристаллах. Для каждого варианта, или, по традиционной терминологии, класса, в квадранте стереографической проекции условно изображены существующие у него направления синхронизма при различных типах взаимодействий. У положительных (отрицательных) кристаллов при ГСЧ сплошная линия отвечает взаимодействиям типа $e_1 e_2 - o_3$ ($o_1 o_2 - e_3$), пунктирная — взаимодействиям типа $o_1 e_2 - o_3$ ($e_1 o_2 - e_3$), штрих-пунк-

тирная — взаимодействиям типа $e_1 o_2 - o_3 (o_1 e_2 - e_3)$. *) Оси x и z — главные диэлектрические оси, причем ось z совпадает с оптической осью. Видно, что коллинеарный фазовый синхронизм у одноосных кристаллов существует лишь в трех классах. Круговые конусы, образуемые направлениями синхронизма для любого типа взаимодействия, охватывают оптическую ось. В классе 2 невозможны синхронные взаимодействия типа $e_1 o_2 - o_3 (o_1 e_2 - e_3)$, в классе 3 невозможны синхронные взаимодействия типа $e_1 o_2 - o_3 (o_1 e_2 - e_3)$ и $o_1 e_2 - o_3 (e_1 o_2 - e_3)$, в классе 4 невозможны синхронные взаимодействия любого типа. Соотношения между главными показателями преломления положительных одноосных кристаллов на частотах взаимодействующих волн приведены для всех четырех классов в табл. 1. ($\omega_1 \leq \omega_2 < \omega_3$)

Таблица 1.

Неравенства, определяющие существование и вид конусов направлений коллинеарного фазового синхронизма Класс

$N_{o_3} < \kappa N_{e_1} + (1-\kappa) N_{e_2}$	$N_{o_3} < \kappa N_{o_1} + (1-\kappa) N_{e_2}$	$N_{o_3} < \kappa N_{e_1} + (1-\kappa) N_{o_2}$	1
		$N_{o_3} > \kappa N_{e_1} + (1-\kappa) N_{o_2}$	2
$N_{o_3} > \kappa N_{e_1} + (1-\kappa) N_{e_2}$	$N_{o_3} > \kappa N_{o_1} + (1-\kappa) N_{e_2}$		3
			4

Переход от данного класса к другим классам сопровождается исчезновением или появлением конусов синхронизма для определенных типов взаимодействия. Квадранты, соответствующие этим классам, соединены между собой теми же линиями, которыми изображены и сами конусы. "На границах" классов осуществляется не критический фазовый синхронизм в плоскости xu (90-градусный синхронизм): при $\kappa N_{e_1} + (1-\kappa) N_{o_2} = N_{o_3}$ — для взаимодействий типа $e_1 o_2 - o_3$, при $\kappa N_{o_1} + (1-\kappa) N_{e_2} = N_{o_3}$ — для взаимодействий типа $o_1 e_2 - o_3$, при $\kappa N_{e_1} + (1-\kappa) N_{e_2} = N_{o_3}$ — для взаимодействий типа $e_1 e_2 - o_3$.

Указанные соотношения для положительных одноосных кристаллов переходят в аналогичные соотношения для отрицательных одноосных кристаллов при замене индексов $o \leftrightarrow e$.

*) Эти типы синхронных взаимодействий допускаются лишь дисперсией и анизотропией. Некоторые из них могут быть запрещены по симметрии /4/.

Табл. 1 и рис. 1 позволяют, не решая уравнения для углов синхронизма, определить общую картину расположения всех возможных направлений коллинеарного фазового синхронизма для различных типов взаимодействия при оптическом смещении в одноосных кристаллах с квадратичной восприимчивостью.

С проведенным анализом направлений синхронизма в одноосных кристаллах хорошо согласуются результаты наших экспериментов по коллинеарному и неколлинеарному сложению и вычитанию частот излучений лазеров типа ЛГ-21 ($\lambda = 337$ нм) и ЛТИПЧ-7 ($\lambda_1 = 1064$ нм, $\lambda_2 = 532$ нм) в кристаллах KDP и LiIO_3 .

Поступила в редакцию 24 февраля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.V. Hobden, J. Appl. Phys., 38, 4365 (1967).
2. H.E. Bates, J. Opt. Soc. Amer., 63, 146 (1973).
3. Д. Ю. Степанов, В.Д. Шигорин, Г.П. Шипуло, Квантовая электроника, 11, 1783 (1984).
4. Б.В. Бокуть, А.Г. Хаткевич, ЖПС, 6, 192 (1967).