

УДК 535.2:681.7.013.82

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ШИРОКОПОЛОСНОЙ НАКАЧКОЙ В НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

© 2007 г. **В. В. Криштоп**, канд. физ.-мат. наук; **Е. В. Толстов**, канд. физ.-мат. наук;  
**В. И. Строганов**, доктор физ.-мат. наук; **А. В. Сюй**, канд. физ.-мат. наук  
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
E-mail: fizika@festu.khv.ru

Рассчитаны спектры ап-конверсии широкополосного теплового излучения в нелинейно-оптических кристаллах ниобата лития и парателлуриата с широкополосной нелазерной накачкой для различных типов нелинейного взаимодействия.

Коды OCIS: 190.7220, 140.0140.

*Поступила в редакцию 16.10.2006.*

Работы по преобразованию широкополосного излучения в нелинейных оптических кристаллах в настоящее время имеют особую актуальность в связи с созданием и использованием лазерных источников фемтосекундных световых импульсов, имеющих очень широкий спектр.

Проблема преобразования излучения с широким спектром в нелинейных оптических кристаллах рассматривалась неоднократно, но до сих пор не потеряла своей актуальности. В работах [1–6] проведен учет конечной ширины спектра лазерного излучения, в значительной степени влияющего на эффективность преобразования излучения в оптические гармоники. Затем появились работы, в которых рассмотрено преобразование в оптические гармоники излучения лазеров на растворах органических красителей [7, 8]. Показана возможность достаточно эффективной перекачки энергии в гармоники за счет так называемого “многочастотного синхронизма” [9]. Разработка систем переноса широкополосного инфракрасного спектра и изображения в видимую область спектра с использованием широкополосной нелазерной накачки потребовала проведения теоретических и экспериментальных работ по преобразованию излучения с экстремально широким спектром [9–15].

Однако ряд вопросов преобразования широкополосного излучения в гармоники до сих пор не решен. Не вскрыты особенности преобразования широкополосного излучения в положительных кристаллах, не рассмотрено преобразование широкополосного инфракрасного излучения с широкополосной накачкой в таком известном кристалле, как ниобат лития, и не решен ряд других вопросов. От-

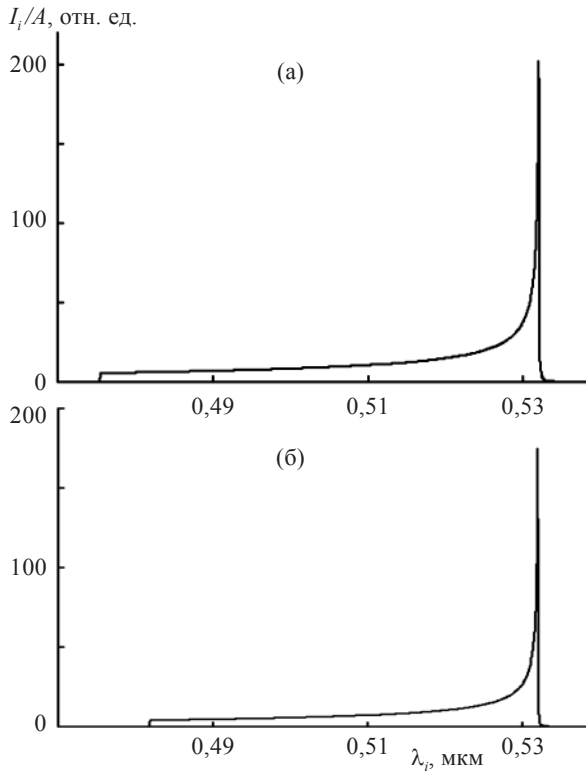
метим, что преобразование широкополосного излучения в кристаллах с лазерной узкополосной накачкой рассматривалось неоднократно [16, 17].

Совокупность имеющихся в литературе научных результатов [9–15] по преобразованию широкополосного излучения и изображения можно классифицировать как новое научное направление – нелинейная оптика некогерентного широкополосного теплового излучения.

Целью работы является расчет спектров преобразованного широкополосного теплового излучения в кристаллах ниобата лития (отрицательный кристалл) и парателлуриата (положительный кристалл).

При расчете спектров полагали, что на нелинейный оптический кристалл длиной 1 см под углом  $\theta$  к оптической оси падает сколлимированный пучок широкополосного излучения с равномерным распределением интенсивности по спектру. Температура кристаллов 298 К.

Эффективное преобразование излучения по частоте в оптических кристаллах реализуется при выполнении условий фазового синхронизма, т. е. когда волновая расстройка  $\Delta k$  между взаимодействующими волнами равна нулю. Возможны два варианта взаимодействий. В первом одна из частот широкого спектра, для которой выполнены условия фазового синхронизма, преобразуется во вторую оптическую гармонику через  $\omega_0$  ( $\lambda_0$ ); во втором – реализуется смешение  $\omega_i = \omega_k + \omega_j$  за счет “многочастотного синхронизма” [9]. В этом случае во взаимодействии участвует ряд волн с частотами  $\omega_k$  и  $\omega_j$ , равноотстоящими на некоторый интервал  $\Delta\omega$  относительно центральной частоты  $\omega_c/2$ . Все частоты в падающем излучении, перекрестно взаимо-



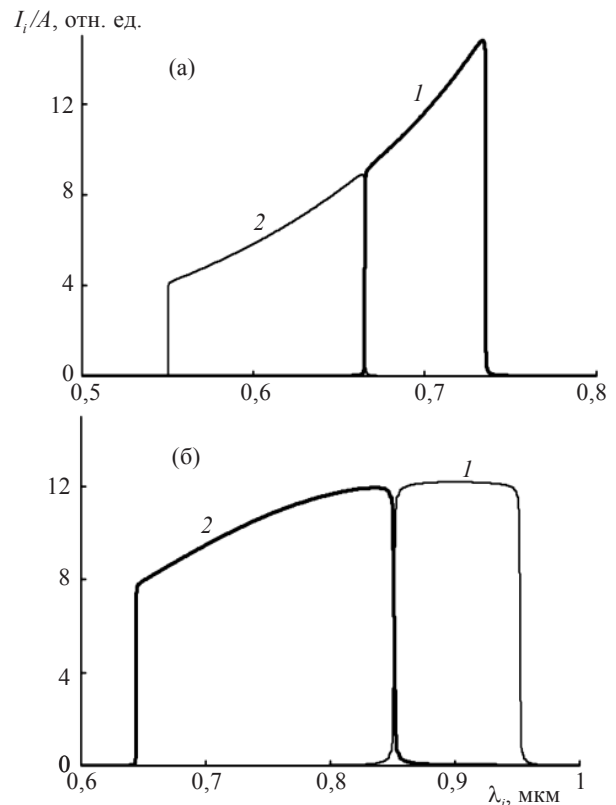
**Рис. 1.** Спектры преобразованного широкополосного излучения в кристаллах. а –  $\text{LiNbO}_3$  ( $\Delta\omega_{\text{пр}} = 12 \text{ см}^{-1}$ ), б –  $\text{TeO}_2$  ( $\Delta\omega_{\text{пр}} = 9,5 \text{ см}^{-1}$ ). Спектр падающего излучения 0,65–2 мкм. Взаимодействие:  $oo \rightarrow e$  (а),  $ee \rightarrow o$  (б). Длина волны синхронизма  $\lambda_0 = 1,064$  мкм,  $\lambda_0/2 = 0,532$  мкм.

действуя друг с другом, дают излучение на суммарных частотах  $\omega_i = \omega_k + \omega_j$  для каждой пары взаимодействующих волн, где  $\omega_k = \omega_i/2 - \Delta\omega$ ;  $\omega_j = \omega_i/2 + \Delta\omega$ . Отметим, что для каждого определенного угла  $\theta$  существуют свои частоты, для которых выполняются соотношения  $\omega_k = \omega_j = \omega_0$ ,  $\omega_i = 2\omega_0$ , а  $\Delta\mathbf{k} = 0$ . При изменении угла  $\theta$  меняются и значения  $\omega_0$  ( $\lambda_0$ ) и  $2\omega_0$  ( $\lambda_0/2$ ). Спектры преобразованного излучения рассчитаны по методике, используемой в [12].

Отметим характерные особенности преобразования широкополосного излучения в нелинейных оптических кристаллах. Спектры для ниобата лития (отрицательный кристалл) и парателлурита (положительный кристалл) при взаимодействии типа  $oo \rightarrow e$  и  $ee \rightarrow o$  имеют одинаковый вид (рис. 1) и асимметричны относительно частоты  $2\omega_0$  (длины волны  $\lambda_0/2$ ). Со стороны меньших частот  $\omega_i < 2\omega_0$  излучение практически отсутствует; со стороны частот  $\omega_i > 2\omega_0$  преобразование происходит при выполнении условий фазового синхронизма. Эффективность преобразования излучения резко возрастает вблизи частоты  $\omega_i = 2\omega_0$  (длины волны  $\lambda_i = \lambda_0/2$ ). В этой области спектра так же, как в кристалле иодата лития [12], происходит сильное сжатие спектра.

Для взаимодействий типа  $eo \rightarrow o$ ,  $oe \rightarrow e$  имеет значение, к какому типу волны ( $o$  – обыкновенный

или  $e$  – необыкновенный луч) относятся частоты  $\omega_k$  и  $\omega_j$  ( $\omega_k < \omega_j$ ). Например, если  $\omega_k$  имеет тип  $e$ -волны, а частота  $\omega_j$  имеет тип  $o$ -волны, то для положительного кристалла ( $eo \rightarrow o$ ) спектральные компоненты преобразованного излучения  $\omega_i$  находятся ниже частоты синхронизма  $2\omega_0$  ( $\lambda_i > \lambda_0/2$ ) (кривая 1 на рис. 2а). В случае, когда  $\omega_k$  имеет тип  $o$ -волны, а частота  $\omega_j$  имеет тип  $e$ -волны, преобразование аналогично случаю взаимодействия типа  $ee \rightarrow o$  (кривая 2 на рис. 2а). Для отрицательного кристалла (взаимодействие  $oe \rightarrow e$ ) для волн  $o(\omega_k)$  и  $e(\omega_j)$  спектр находится в области меньших частот  $2\omega_0$  ( $\lambda_i > \lambda_0/2$ ) (кривая 1 на рис. 2б), а для  $o(\omega_j)$  и  $e(\omega_k)$  – в области больших частот  $2\omega_0$  ( $\lambda_i < \lambda_0/2$ ) (кривая 2 на рис. 2б). В скобках за индексом  $o$  или  $e$  указана область используемых частот  $\omega_k$  или  $\omega_j$ . Так как в падающем на кристалл широкополосном излучении волны частоты  $\omega_k$  и  $\omega_j$  могут быть как  $o$ -, так  $e$ -волнами одновременно, то спектр преобразованного излучения содержит частотные составляющие как ниже, так и выше  $2\omega_0$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Спектры преобразованного широкополосного излучения в кристаллах. а –  $\text{TeO}_2$  ( $\Delta\omega_{\text{пр}} = 2150 \text{ см}^{-1}$ ), б –  $\text{LiNbO}_3$  ( $\Delta\omega_{\text{пр}} = 5028 \text{ см}^{-1}$ ). Спектр падающего излучения: 0,8–2 мкм (а), 1–2 мкм (б). Взаимодействие:  $e(\omega_k)o(\omega_j) \rightarrow o(\omega_i)$  – кривая 1 (а),  $e(\omega_j)o(\omega_k) \rightarrow o(\omega_i)$  – кривая 2 (а),  $o(\omega_k)e(\omega_j) \rightarrow e(\omega_i)$  – кривая 1 (б),  $o(\omega_j)e(\omega_k) \rightarrow e(\omega_i)$  – кривая 2 (б). Длина волны синхронизма:  $\lambda_0 = 1,33$  мкм (а),  $\lambda_0 = 1,72$  мкм (б).

На рис. 1 и 2 величина  $A$ , входящая в выражение для интенсивности преобразованного излучения, пропорциональна квадрату используемого компонента тензора нелинейной восприимчивости кристалла;  $\Delta\omega_{\text{пр}}$  – частотная ширина преобразованного спектра по уровню  $1/2$  от максимального значения интенсивности преобразованного излучения.

Таким образом, для взаимодействий типа  $ee \rightarrow o$  или  $oo \rightarrow e$  преобразование эквивалентно действию оптического фильтра с преобразованием частот выше  $2\omega_0$  (антистоксово преобразование). При использовании взаимодействия типа  $eo \rightarrow e$  или  $oe \rightarrow o$  по желанию можно получить излучение как в стоксовой, так и в антистоксовой областях спектра. Интенсивность преобразованного излучения без учета нелинейной восприимчивости кристалла для взаимодействий типа  $oe \rightarrow o$  и  $eo \rightarrow e$  будет на порядок ниже, чем для взаимодействии типа  $ee \rightarrow o$  или  $oo \rightarrow e$ . Учитывая, что для кристалла ниобата лития (рис. 2б) нелинейность примерно на порядок выше, чем для парателлурита (рис. 2а), можно сделать вывод, что эффективность преобразования широкополосного излучения в ниобате лития будет на два порядка выше, чем в парателлурите. В системах преобразования излучения и изображения с широкополосной накачкой так же, как и при преобразовании излучения с монохроматической накачкой, целесообразно использовать кристаллы с большой нелинейной восприимчивостью, в том числе и кристаллы ниобата лития.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волосов В.Д., Андреев Р.Б. Генерация второй оптической гармоники немонохроматическим излучением лазера в нелинейных кристаллах // *Опт. и спектр.* 1969. Т. 26. № 5. С. 809–814.
2. Андреев Р.Б., Волосов В.Д. Влияние немонохроматичности излучения лазера на генерацию второй оптической гармоники в различных нелинейных средах // *Опт. и спектр.* 1970. Т. 29. № 2. С. 374–380.
3. Волосов В.Д. Некоторые вопросы высокоэффективной генерации второй оптической гармоники в нелинейных средах // *Нелинейные процессы в оптике.* Новосибирск: Наука, 1970. С. 209–214.
4. Wolosow V.D., Karpenko S.G., Kornienko N.E., Strizhevski V.L. Saturation of second harmonics spectral intensity with increase in frequency half-width of exiting radiation // *Physics Letters.* 1972. V. 41 A. P. 31–33.
5. Miller R.C. Second harmonic generation with a broadband optical maser // *Physics Letters.* 1968. V. 26 A. № 5. P. 177–178.
6. James H. Second harmonic generation using partially coherent light // *Optics communications.* 1984. V. 51. № 3. P. 207–212.
7. Бетеров И.М., Строганов В.И., Трунов В.И., Юришин Б.Я. Возбуждение оптических гармоник в кристаллах иодата и формиата лития излучением непрерывного лазера на кристалле // *Квант. электрон.* 1975. Т. 2. № 11. С. 2440–2445.
8. Бокуть Б.В., Казак Н.С., Белый В.Н., Батырев В.А. Особенности преобразования частоты широкополосного лазерного излучения на нелинейных кристаллах // *ЖПС.* 1975. Т. 22. № 2. С. 224–229.
9. Колпаков Ю.Г., Кривошецов Г.В., Строганов В.И. Оптические гармоники, возбуждаемые излучением теплового источника света // *Нелинейные процессы в оптике.* Новосибирск: Наука, 1973. С. 306–309.
10. Карпенко С.Г., Корниенко Н.Е., Стрижевский В.Л. О нелинейной спектроскопии излучения инфракрасного диапазона при использовании расходящейся и некогерентной накачки // *Квант. электрон.* 1974. Т. 1. № 8. С. 1768–1779.
11. Бабин А.А., Беляев Ю.Н., Форгус В.М., Фрейдман Г.И. Исследование процессов параметрического преобразования изображения в поле частично когерентной накачки // *Квант. электрон.* 1976. Т. 3. № 1. С. 112–124.
12. Кривошецов Г.В., Колпаков Ю.Г., Самарин В.И., Строганов В.И. Преобразование оптического излучения с широким спектром в нелинейных кристаллах // *ЖПС.* 1979. Т. 30. № 5. С. 884–889.
13. Илларионов А.И., Строганов В.И., Троллин В.И. Преобразование ИК изображения без искажения его линейных размеров методами нелинейной оптики // *Опт. и спектр.* 1988. Т. 64. № 6. С. 1366–1368.
14. Строганов В.И., Троллин В.И. Преобразование немонохроматического широкополосного ИК изображения в нелинейных кристаллах иодата и формиата лития // *ЖПС.* 1989. Т. 50. № 2. С. 297–301.
15. Троллин В.И., Строганов В.И. Оптико-электронная система измерения температуры с визуализацией теплового изображения // *Изв. вузов. Приборостроение.* 1990. Т. 33. № 5. С. 83–85.
16. Гайнер А.В., Кривошецов Г.В., Круглов С.В., Маренников С.И., Чаповский П.Л. Сложение частот когерентного и некогерентного излучения в кристалле KDP // *ЖПС.* 1970. Т. 8. № 3. С. 526–528.
17. Лебедев В.В., Колпаков Ю.Г. Быстродействующая нелинейно-оптическая система абсорбционного анализа широких инфракрасных спектров // *ЖПС.* 1977. Т. 26. № 2. С. 319–322.