

ГОМОЦЕНТРИЧЕСКИЕ ПУЧКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНО ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ИК ИЗОБРАЖЕНИЯ

Киреева Н. М.¹, Криштоп В. В.^{1,2}, Карпец Ю. М.¹, Троилин В. И.¹, Литвинова М. Н.¹, Кузьмичев Д. Н.¹, Строганов В. И.¹

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщений, Хабаровск, Россия (680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47)

²Electrophysics Department, Kwangwoon University, 20 Kwangwoon Road, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea, e-mail: krishtop@list.ru

Проведен анализ систем по преобразованию изображений из инфракрасной области спектра в видимую, в нелинейно оптических кристаллах с лазерным излучением накачки. В этих системах использовалась схема касательного и критичного векторного синхронизма. Показано, что данные системы обладают рядом недостатков (зернистость изображения, искажение геометрических параметров преобразованного изображения, малая энергетическая эффективность образования). Предложена система по преобразованию изображения из ИК области с накачкой в виде большого числа гомоцентрических пучков излучения. Выбор гомоцентрического пучка накачки для каждого гомоцентрического пучка излучения происходит автоматически при совмещении в кристалле изображения ИК объекта и источника накачки. Система свободна от недостатков, свойственных системам с лазерной накачкой.

Ключевые слова: нелинейная оптика, нелинейно-оптические кристаллы, системы преобразования инфракрасного изображения.

HOMOCENTRIC BUNCHES OF RADIATION IN NONLINEAR OPTICAL CONVERTERS IR IMAGE

Kireeva N. M.¹, Krishtop V. V.^{1,2}, Karpetz Yu. M.¹, Troilin V. I.¹, Litvinova M. N.¹, Kuzmichev D. N.¹, Stroganov V. I.¹

¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia (680021, Khabarovsk, st. Serycheva, 47)

²Electrophysics Department, Kwangwoon University, 20 Kwangwoon Road, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

The analysis of systems for converting images from the infrared to the visible in nonlinear optical crystals with laser pumping is presented. These systems use the scheme of tangent and critical vector matching. It is shown that these systems have a number of drawbacks (graininess, distortion of geometrical parameters of the converted image, low efficiency of energy conversion). System for conversion of image with infrared pumping in the form of a large number of homocentric beams of radiation is proposed. The choosing of the homocentric pump for each radiation beam is automatically realized when infrared image of the object coincides with image of pumping source inside a crystal. System is free from flaws inherent in systems with laser pumping.

Keywords: nonlinear optics, nonlinear-optical crystals, systems of conversion of infra-red image.

Введение

Одним из главных достоинств нелинейно-оптических преобразователей ИК изображений является высокое быстродействие, позволяющее изучать высокоскоростные оптические процессы в инфракрасной области спектра. Причиной тому является быстрый оптический нелинейный процесс, реализованный одновременно во всех областях кристалла; отсутствие сканирующей системы и полупроводниковых приемников ИК излучения, в том числе которые необходимо охлаждать до достаточно низких температур.

Для перевода изображения из ИК области в видимую необходимо осуществить преобразование ИК излучения ($\omega_{\text{ИК}}$) по частоте $\omega_{\text{в}} = \omega_{\text{ИК}} + \omega_{\text{н}}$ ($\omega_{\text{в}}$ – частота видимого излучения). Излучение с частотой $\omega_{\text{н}}$ называется излучением накачки (или просто накачкой) и подбирается таким образом, чтобы $\omega_{\text{в}}$ оказалось в видимой области спектра.

Начальный этап исследований по преобразованию ИК изображений в нелинейно-оптических кристаллах связан с работой [30]. В этой работе было преобразовано изображение линейной решетки, сформированное в области спектра $\sim 1,6$ мкм излучением ксеноновой лампы в кристалле иодата лития. Затем было преобразовано изображение из области спектра 10,6 мкм в прустите [32]. В том и другом случаях излучением накачки являлось излучение рубинового лазера ($\lambda = 0,6943$ мкм).

В первых и последующих работах [3-5,12,17] для преобразования изображения использовалась схема касательного синхронизма. В ряде работ изучено влияние характеристик кристаллов, конечной ширины спектра и расходимости излучения на характеристики изображения [5, 12, 17].

Обычно увеличение ширины спектра и расходимости приводит к резкому ухудшению преобразованного изображения [3-5, 30]. Существенным недостатком является малая угловая ширина преобразованного изображения [3-5, 12, 28, 29, 30].

В 1970–1971 гг. была предложена другая схема преобразования – схема критичного векторного синхронизма [6–8]. В этой схеме используется цилиндрическая волна накачки, что делает возможным преобразование изображения из ИК области в видимую с большой угловой апертурой. В эксперименте уже в первых работах, в кристалле КДР, была реализована угловая апертура $\sim 49^\circ$ [6–9, 19]. Недостатком данной схемы преобразования изображения является ее меньшая, чем для касательного синхронизма, энергетическая эффективность. Изображение по одной из координат сжато в $\lambda_{\text{ИК}}/\lambda_{\text{в}}$ раз.

При использовании лазерной накачки возникает зернистость изображения [6, 8, 9], разрешение ухудшается с ростом расходимости накачки [6, 9, 19].

В 1973 г. Ю. Г. Колпаковым и др. [14] предложена схема преобразования ИК изображения, свободная от перечисленных недостатков. В этой схеме ИК изображение создано в кристалле гомоцентрическими пучками широкополосного излучения. В качестве накачки использовался не один пучок, а совокупность гомоцентрических пучков накачки. При этом необходимое условие совмещения осей пучков ИК излучения с осями пучков накачки выполнялось автоматически, так как пучки накачки создавались ИК объектом, то есть накачка и ИК излучение были разделены только по спектру. Например, ИК излучение лежит в диапазоне 1–2 мкм, а накачка – 0,85–0,95 мкм. Преобразованное изображение

цветное, мнимое, расходящееся и поэтому для перевода его в действительное за нелинейным оптическим кристаллом требуется дополнительный объектив.

К настоящему времени по преобразованию ИК изображения с гомоцентрическими широкополосными пучками излучения выполнен большой цикл работ [10, 18, 20–29, 31].

Помимо быстродействия, системам преобразования ИК изображения с нелазерным излучением присущи и другие достоинства: достаточно высокое качество изображения; отсутствие пятнистой структуры изображения, свойственное лазерному излучению; неизменность геометрических размеров преобразованного изображения.

Отметим еще раз необходимые требования к данным системам преобразования ИК изображения в нелинейно-оптических кристаллах. ИК изображение в нелинейном оптическом кристалле создается совокупностью гомоцентрических пучков излучения. Каждой точке ИК изображения в кристалле соответствует свой гомоцентрический пучок ИК излучения, исходящий из определенной точки объекта. Излучение накачки должно быть также в виде большого числа гомоцентрических пучков. Гомоцентрический пучок ИК излучения может быть преобразован в нелинейном оптическом кристалле по частоте только с определенным гомоцентрическим пучком накачки (т. е. когда оси этих двух пучков и точки схождения лучей в кристалле совпадают).

В точке схождения пучков ИК излучения и накачки рождается гомоцентрический пучок преобразованного излучения (рис. 1).

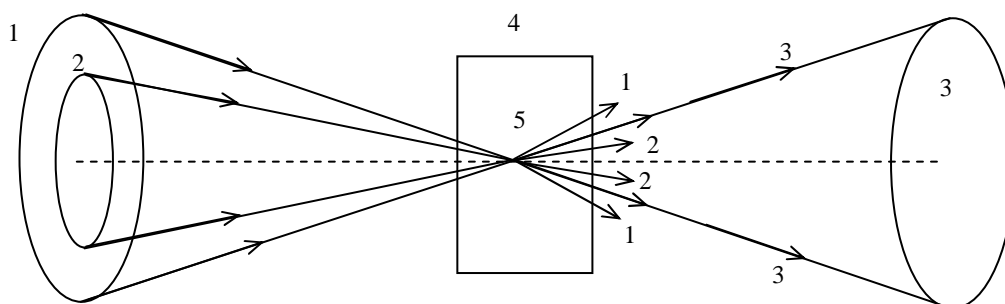


Рис. 1. Преобразование гомоцентрических пучков ИК излучения (1; $\omega_{ик}$) и накачки (2; ω_n) в нелинейном оптическом кристалле (4); 3 – гомоцентрический пучок преобразованного излучения; 5 – центр сходящихся пучков

Ниже рассмотрены особенности преобразования излучения и изображения из ИК области спектра в видимую в нелинейных оптических кристаллах в случае, когда излучение некогерентное, немонахроматическое, широкополосное, а пучки излучения – сходящиеся или расходящиеся.

1. Преобразование широкополосного излучения в нелинейных оптических кристаллах

Если при генерации оптической гармоники в нелинейном кристалле менять угол θ между волновым вектором излучения с частотой ω и оптической осью или частоту ω , то получим характерную кривую (рис. 2) зависимости интенсивности $I_{2\omega}$ преобразованного излучения от θ или ω . Величины $2\Delta\theta$ и $2\Delta\omega$, характеризующие спад $I_{2\omega}$ до нуля, называются угловой $2\Delta\theta$ и частотной $2\Delta\omega$ ширинами синхронизма. Обычно для нелинейных кристаллов $2\Delta\theta$ и $2\Delta\omega$ невелики ($2\Delta\theta \sim 2-5$ угловых минут, $2\Delta\omega \sim 5-10 \text{ см}^{-1}$).

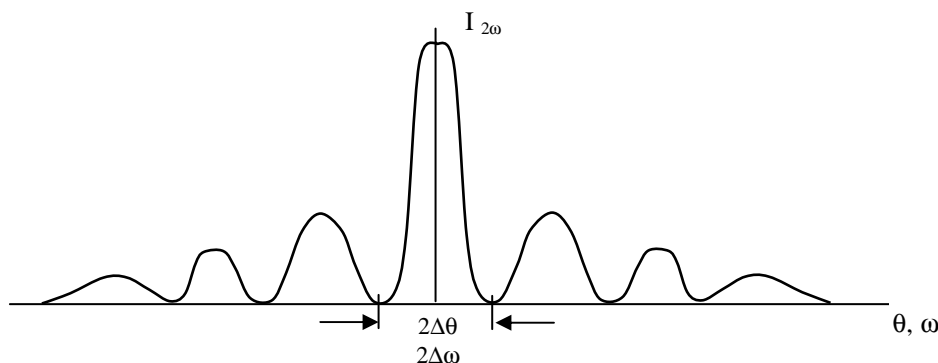


Рис. 2. Зависимость интенсивности гармоники от θ или ω . $2\Delta\omega$ – частотная ширина синхронизма; $2\Delta\theta$ – угловая ширина

Иногда генерация лазерного излучения происходит в достаточно широкой полосе частот, например, в лазере на стекле с неодимом. В связи с этим возникает ряд особенностей при преобразовании излучения в гармоники [2, 31], связанные с конкретными свойствами используемого нелинейного кристалла.

Оказалось, что коэффициент преобразования в кристалле LiNbO_3 примерно такой же, как в КДР, хотя линейная восприимчивость более чем в 10 раз больше, чем у кристалла КДР [2]. Выяснилось, что причиной этого является меньшая частотная (спектральная) ширина синхронизма в кристаллах LiNbO_3 ($3,5 \text{ \AA}$) по сравнению с КДР ($\sim 400 \text{ \AA}$). То есть эффективно преобразуется только часть излучения с частотой, попадающей в полосу синхронизма.

В последующие годы появилась необходимость в преобразовании излучения с очень широким спектром, например, излучения от лазеров на растворах органических красителей или излучения тепловых источников. Однако для преобразования такого излучения приходится применять нелинейные кристаллы с конечной частотной шириной синхронизма. Казалось бы, что здесь существуют серьезные препятствия и трудно надеяться на высокоэффективное преобразование излучения с таким спектром (например, $\sim 8000-10000 \text{ \AA}$).

В работах [15, 16] впервые показано, что препятствия, связанные со значительно меньшей спектральной шириной синхронизма, чем ширина спектра, вполне преодолимы.

Излучение даже с очень широким спектром может быть преобразовано при точном выполнении условий фазового синхронизма. В связи с такой особенностью преобразования

излучения этот тип синхронизма получил название – многочастотный синхронизм [11, 13, 15].

Эффективность преобразования может быть значительно увеличена за счет вклада в преобразованное излучение эквидистантно расположенных относительно частоты синхронизма ω_0 частот ω_1 и ω_2 ($\omega_1 + \omega_2 = 2\omega_0$) [1, 27].

В этом случае условия $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ и фазового синхронизма для второй оптической гармоники (взаимодействия коллинеарные)

$$K_{\omega_1} + K_{\omega_2} = K_{2\omega_0} \quad (1),$$

где $K_{\omega_1}; K_{\omega_2}$ – волновые векторы на частотах $\omega_0, 2\omega_0$ соответственно. Для взаимодействия $\omega_1 + \omega_2 = 2\omega_0$

$$K_{\omega_1} + K_{\omega_2} = K_{2\omega_0}^{\parallel} \quad (2),$$

где $K_{\omega_1}; K_{\omega_2}$ и $K_{2\omega_0}^{\parallel}$ – волновые векторы излучения на частотах ω_1, ω_2 и волновой вектор волны поляризации на частоте $2\omega_0$, созданной волнами с частотами ω_1 и ω_2 .

Расстройка фазового синхронизма ΔK

$$\Delta K = K_{2\omega_0}^{\parallel} - K_{2\omega_0} \quad (3).$$

Учитывая, что $\omega_1 = \omega_0 - \Delta\omega$; $\omega_2 = \omega_0 + \Delta\omega$ имеем

$$K_{\omega_1} = \omega_1 / cn_1 = [(\omega_0 - \Delta\omega) / c](n_0 - \Delta n_1),$$

$$K_{\omega_2} = \omega_2 / cn_2 = [(\omega_0 + \Delta\omega) / c](n_0 + \Delta n_2) \quad (4),$$

где $n_0, n_0 - \Delta n_1, n_0 + \Delta n_2$ – показатели преломления для частот ω_0, ω_1 и ω_2 , соответственно.

Подставляя (4) в (3), получим

$$\Delta K = 1/c [(\Delta n_2 - \Delta n_1)\omega_0 + \Delta\omega(\Delta n_2 + \Delta n_1)] \quad (5)$$

Увеличение ширины спектра $\Delta\omega$ при преобразовании излучения по частоте приводит к возрастанию расстройки ΔK фазового синхронизма, что в свою очередь влечет за собой уменьшение интенсивности $I_{2\omega_0}$ преобразованного излучения (рис. 2).

Обычно значения $\Delta n_1 \approx \Delta n_2$ и при возрастании $\Delta\omega$ увеличиваются медленно, что и приводит к значительным $2\Delta\omega_c$ ($2\Delta\omega_c$ – частотная ширина синхронизма для частот ω_1, ω_2 , дающих вклад в преобразованное излучение с частотой $2\omega_0$). Оценки показывают, что $2\Delta\omega_c$ может быть порядка $500-1000 \text{ см}^{-1}$.

Неожиданной оказалась возможность существования в нелинейных оптических кристаллах многочастотного синхронизма [14, 15], который делает возможным преобразование излучения с широким спектром при точном выполнении условия фазового синхронизма ($\Delta K = 0$).

Запишем выражение для расстройки фазового синхронизма

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3,$$

$$\omega_1 = \omega_3/2 - \Delta\omega \quad (6),$$

$$\omega_2 = \omega_3/2 + \Delta\omega,$$

$$K_{\omega_3}^{\parallel} = K_{\omega_1} + K_{\omega_2} = 1/c [(\omega_3/2)(n_2 + n_1) + \Delta\omega(n_2 - n_1)] \quad (7)$$

$$K_{\omega_3} = \omega_3 / cn_3 \quad (8),$$

$$\Delta K = K_{\omega_3}^{\parallel} - K_{\omega_3} = 1/c [(n_1 + n_2 - 2n_3)(\omega_3/2) + \Delta\omega(n_2 - n_1)] \quad (9).$$

Из (9) видно, что фазовый синхронизм ($\Delta K=0$) существует при выполнении равенства

$$\omega_3/2 (n_1+n_2-2n_3) = - \Delta\omega (n_2-n_1) \quad (10),$$

которое определяется характером дисперсии показателя преломления кристалла; типом взаимодействия и реализуется не для одного набора $\omega_3, \omega_2, \omega_1$, а для большой совокупности таких наборов, то есть в значительных интервалах частот.

Если $\omega_3 > 2\omega_0$, то при определенном значении $\Delta\omega$, реализуются значения $\Delta K=0$, то есть возможно выполнить условия фазового синхронизма для взаимодействующих волн с частотами ω_1, ω_2 и ω_3 . Чем большее ω_3 отличается от $2\omega_0$, тем большее значение $\Delta\omega$ необходимо для компенсации расстройки фазового синхронизма.

Спектральную интенсивность преобразованного излучения $I(\Delta\omega, \omega_3)$ находим из выражения $I(\Delta\omega, \omega_3) = AI_1 I_2 \text{sinc}^2((\Delta K/2)z)$, где A – постоянная, зависящая от характеристик кристалла [14, 16, 22, 25].

Результаты расчетов для кристалла LiIO_3 (взаимодействие $oo \rightarrow e$) приведены на рис. 3. По мере отхода от синхронизма для удвоения частот (ω_3 от $2\omega_0$) кривые становятся все более симметричными и более узкими по основанию (спектральная ширина синхронизма для сложения частот $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ уменьшается, что соответствует уменьшению вклада широкого спектра (ω_1, ω_2) в определенную частоту ω_3).

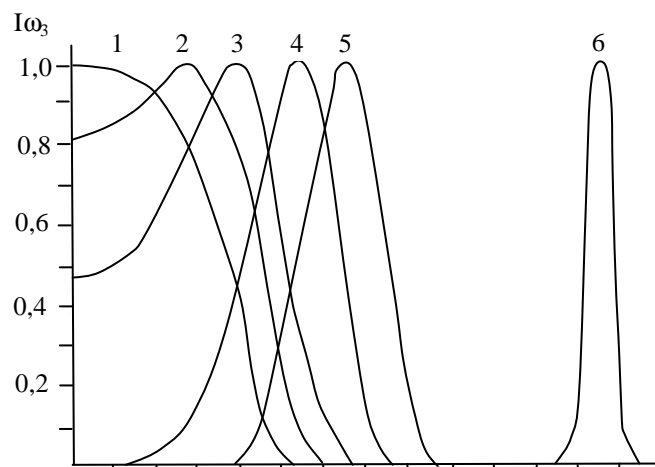


Рис. 3. Зависимость I_{ω_3} от $\Delta\omega$. $\omega_3, \text{ см}^{-1}$: 500 20398; 2 – 2041000 – $2\Delta\omega$

20412; 5 – 20428

Для нахождения спектра $I(\omega_3)$ преобразованного излучения необходимо проинтегрировать по $\Delta\omega$ каждую кривую рис. 3. Интеграл для одной кривой рисунка соответствует интенсивности для одной частоты ω_3 преобразованного излучения [22, 25].

При проведении экспериментальных исследований излучение фокусируется в кристалл (гомоцентрические пучки). Эффективность преобразования увеличивается за счет пересекающихся под небольшими углами световых лучей (векторные взаимодействия). Спектральное распределение интенсивности преобразованного излучения для сфокусированного пучка приведено на рис. 4. Расчет проведен для углового интервала $\pm 2,5^\circ$ с центром для $\lambda^\circ = 0,98$ мкм ($\lambda^\circ = 2\pi c/\omega_0$). Такой интервал углов отвечает ситуации в эксперименте и обычно определяется апертурой регистрирующей аппаратуры. Фокусирование широкополосного излучения в кристалл приводит к увеличению эффективности преобразования на 3–4 порядка.

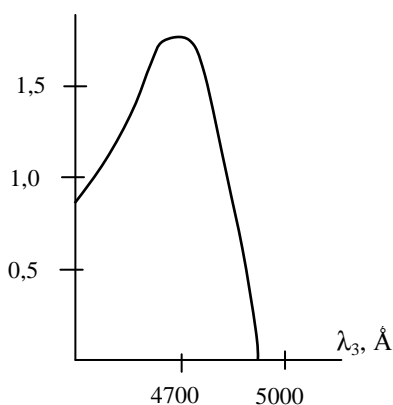
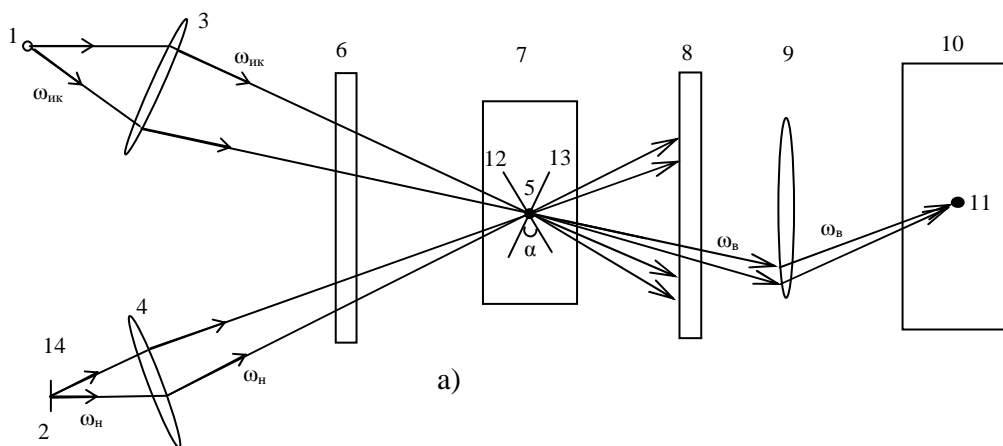


Рис. 4. Спектр преобразованного излучения при фокусировании лучей в кристалл LiIO_3 (взаимодействие $oo \rightarrow e$)

2. Формирование изображения в нелинейных оптических кристаллах гомоцентрическими пучками

Типичные схемы преобразования широкополосного ИК изображения приведены на рис. 5



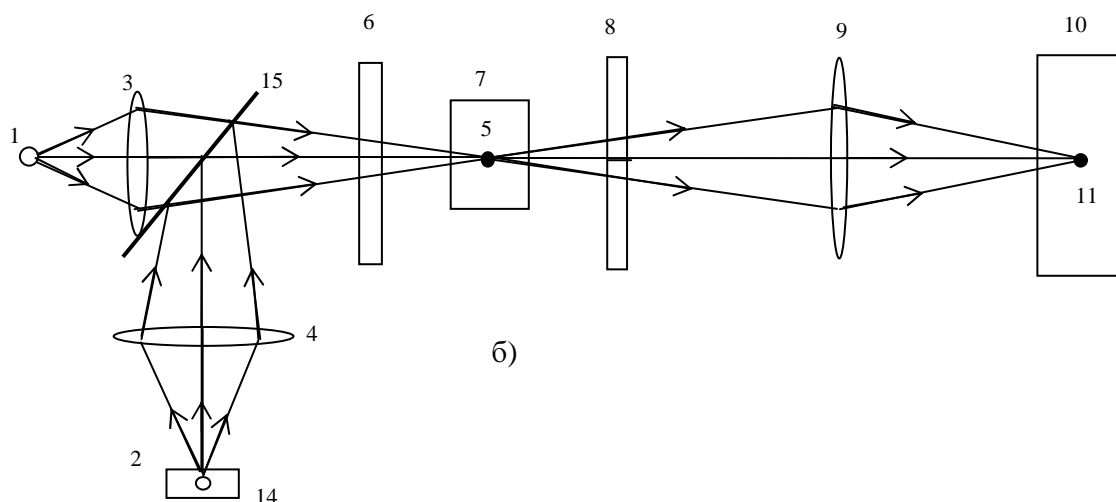


Рис. 8. Схема преобразования ИК изображения в видимую область спектра

Показан ход лучей при создании одной точки преобразованного изображения. ИК излучение ($\omega_{ик}$) из одной точки объекта 1 и излучение из одной точки источника накачки 2 (ω_n) в виде гомоцентрических пучков через светофильтр 6 попадают в кристалл 7. Фокальные точки этих пучков в кристалле должны быть совмещены. В этом случае процесс преобразования происходит наиболее эффективно. В области пересечения пучков реализуется процесс преобразования по частоте, и из кристалла 7 выходит гомоцентрический пучок преобразованного (ω_v) излучения. Этот пучок проходит через светофильтр 8, объектив 9 и создает на экране 10 одну точку преобразованного изображения 11.

Формирование ИК изображения в кристалле 7 осуществляется гомоцентрическими пучками ИК лучей, выходящими из каждой точки поверхности ИК объекта. Для преобразования каждого из этих пучков по частоте в нелинейно оптическом кристалле необходим свой собственный гомоцентрический пучок накачки. Оси этих пучков и фокальные точки в кристалле должны совпадать.

Для выполнения перечисленных выше условий необходим специальный источник накачки. Наиболее приемлемым в экспериментальных условиях источником накачки является нить накаливания электрической лампы в виде плоскости определенных размеров. При нагревании этой плоскости из каждой точки выходит гомоцентрический пучок накачки. Выбор необходимого (нужного) пучка накачки для любого пучка ИК излучения происходит автоматически. Каждый ИК пучок «выберет сам» нужный пучок накачки.

Если угол α между плоскостями ИК изображения и накачки отличен от нуля (рис. 5, а), то преобразователь работает с меньшей эффективностью, в сравнении с $\alpha=0$ (рис. 5, б).

Результаты экспериментов при использовании таких схем приведены в работах [22, 25]. В качестве объекта 1 и накачки 2 использовались кинолампы. Любопытным фактом оказалось то, что на экране 10 (рис. 5) появились три изображения. В центре – изображение,

когда одна из ламп является накачкой, а другая – ИК объектом. По краям размещены изображения, когда каждая из ламп является одновременно и ИК объектом и накачкой. Качество изображения значительно лучше, чем при использовании лазерной накачки.

Отметим, что предложенные схемы преобразования, не накладывающие никаких ограничений ни со стороны широкого спектра, ни со стороны сходящихся пучков накачки [21, 22, 25].

Наиболее простой системой преобразования ИК изображения объекта является система, когда ИК объект и накачки совмещены, тогда в нелинейном кристалле изображения объекта и накачки также совмещены.

Особенностью данной схемы преобразования является то, что из каждой точки объекта выходит два гомоцентрических пучка лучей. Один пучок лучей 1 – накачка (например, в области длин волн 0,75–0,95 мкм), второй 2 – ИК излучение (например, в области 1,0–2,5 мкм). Центры этих пучков в кристалле всегда совмещены. Они создают в кристалле за счет преобразования по частоте третий пучок гомоцентричных лучей ω_b . Этот пучок выходит из точки 5, в которую входят пучки ИК лучей и накачки. Светофильтр 5 (рис. 9) поглощает оба пучка лучей (ИК лучей и накачки) и пропускает пучок лучей с преобразованной частотой ω_b , объектив 6 создает на экране на частоте ω_b изображение точки объекта [22, 25].

Приведенные рассуждения применимы к преобразованию изображения для любой точки объекта. В целом (рис. 5) на экране 7 создается изображение 8. В связи с тем, что каждая точка изображения 8 создается пучками гомоцентрических лучей, изображение объекта 1 в кристалле 4 и преобразованное изображение в кристалле с частотой ω_b по своим геометрическим характеристикам подобны. Сжатия изображения ни по одной из координат не происходит [7]. В общем случае, для эффективного преобразования изображения необходимо совмещать в кристалле плоскости изображения ИК объекта и объекта накачки [8]. Достоинством данной схемы является то, что практически всегда это требование выполняется.

В экспериментальном плане такая система очень удобна, так как позволяет избавиться от влияния юстировок при совмещении пучков излучения и дает возможность изучить принципиальные моменты преобразования теплового изображения в нелинейно оптическом кристалле.

Отметим некоторые характеристики такой системы. Разрешающая способность R , обусловленная дифракцией излучения на оправках объективов, равна $R=D/1,22\lambda$, где D – диаметр объектива. Другим ограничивающим фактором являются геометрические aberrации, присущие системе в той или иной мере. Кроме дифракции и aberrаций системы, сильное влияние на разрешающую способность оказывают геометрические факторы. Так,

при преобразовании изображения точечного источника излучения боковое смещение сфокусированного в нелинейный кристалл пучка ИК излучения приводит к неполному перекрытию с пучком накачки, что снижает коэффициент преобразования. Если же фокальная плоскость в случае протяженной накачки заполнена совокупностью гомоцентрических пучков накачки, то система не критична к боковому смещению пучка ИК излучения. Продольное смещение пучка ИК излучения приводит к уменьшению коэффициента преобразования.

Линейное число разрешаемых элементов $N_{\text{лин}}$, например, для объектива с угловой апертурой 15° при диаметре объектива $D=10$ мм, $\lambda=5$ мкм равно 450. Увеличение диаметра объектива до 50 мм дает значение 2250 [22, 25].

В работе [25] приведены результаты исследований с совмещенной и независимой накачкой. В качестве источников ИК излучения и накачки использовали электрические лампы накаливания с мощностью от 5 до 750 Вт. Наблюдения проводились при работе источников ИК излучения и накачки в непрерывном режиме.

Визуально наблюдали преобразованное изображение этих ламп при мощности 100–750 Вт. Фотоэлектрическая регистрация возможна от электрических ламп с мощностью 4,5–5 Вт.

От лампы мощность 750 Вт полный поток ИК излучения в области кристалла, в зависимости от диаметра объектива, достигал 0,5–1,2 Вт.

Такие мощности излучения предъявляют серьезные требования к светофильтрам, так как в эксперименте необходимо устранить (до нелинейного кристалла) излучение видимой области спектра, а после кристалла необходимо удалить ИК излучение (выделить преобразованное излучение). Стандартные светофильтры из набора цветного оптического стекла при максимальных уровнях накачки позволяли работать в течение 3–5 минут. Затем требовалось 10 минут для охлаждения светофильтров (ИКС-5, ИКС-7, СЗС-25) [25].

В эксперименте использовали в основном кристалл LiIO_3 толщиной 25 мм (взаимодействие $oo \rightarrow e$). Преобразованное изображение слабое, поэтому визуальные наблюдения проводили в полностью затемненном помещении.

Изображение нитей накаливания лампы после преобразования в кристалле четкое и цветное. Зернистость изображения отсутствует. Четкость изображения по всему полю зрения визуальна одинакова. Цвет изображения при повороте нелинейного кристалла вокруг вертикальной оси (угол синхронизма меняется) меняется от голубого до красного (при неизменном неподвижном изображении). В плоскости, перпендикулярной плоскости синхронизма, цвет неизменен. Характерной чертой преобразователя является неизменность геометрических размеров преобразованного изображения по сравнению с ИК изображением объекта. Энергетический коэффициент преобразования 10^{-7} - 10^{-8} .

В работах [23–24, 28] зарегистрирован спектр изображения, преобразованного в кристалле LiIO_3 (светофильтры – КС-17, СЗС-22). Спектр значительно меняется при изменении угла между пучком излучения и оптической осью кристалла.

Отметим, что при преобразовании широкополосного ИК излучения в нелинейном кристалле настройка кристалла в синхронизм не критична, то есть нет необходимости выставлять кристалл по углу относительно пучка лучей с точностью до нескольких угловых минут. При установке кристалла на поворотный столик вручную синхронное преобразование происходит сразу, без подстройки кристалла. Это связано с тем, что для широкой области углов выполняются условия многочастотного синхронизма. И неточность установки кристалла приводит лишь к небольшому смещению максимума в преобразованном излучении.

Отметим любопытный факт, обнаруженный при визуальном наблюдении преобразованного изображения [22]. Иногда изображение нити накаливания лампы наблюдается на чуть светлом фоне. Через некоторое время светлый фон скачкообразно исчезает, и нить лампы видна на темном фоне. Этот эффект, вероятно, связан с перестройкой доменной структуры кристалла.

Заключение

Показано, что оптимальные характеристики систем преобразования широкополосного инфракрасного изображения в видимую область спектра в нелинейных оптических кристаллах реализуются при использовании источника накачки в виде большого числа гомоцентрических сходящихся пучков излучения.

Наиболее простым источником накачки такого типа является нить накаливания электрической лампы в форме прямоугольника. Каждая точка такого прямоугольника является источником гомоцентрических пучков. Проецирование ИК объективами в кристалл ИК изображения и изображения источника накачки приводят к автоматическому совпадению осей ИК пучков от объекта и накачки, и реализации максимального коэффициента преобразования.

В нелинейной оптике имеется определенный класс объектов, где производится запись, преобразование, обработка изображений. Во всех этих случаях целесообразно при расчетах и экспериментальном воплощении новых оптических приборов использовать гомоцентрические пучки излучения. Данное направление можно назвать «нелинейной оптикой гомоцентрических пучков излучения».

Работа была начата профессором Строгановым В.И., в ней развиты его идеи, и авторы посвящают статью его светлой памяти.

Работа выполнена при поддержке гранта Kwangwoon University (Seoul, Korea) в 2012 году и Государственной Федеральной целевой программы «Научные и педагогические кадры инновационной России (2009-2013)», контракт № 16.740.11.0396.

Список литературы

1. Андреев Р. Б., Волосов В. Д. Влияние некогерентности излучения лазера на генерацию второй оптической гармоники // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. 29, № 2. – С. 374-380.
2. Блистанов А. А. Кристаллы квантовой нелинейной оптики. – М.: МИСИС, 2007. – 432 с.
3. Воронин Э. С., Дивлекеев М. И., Ильинский Ю. А. Преобразование изображения из ИК диапазона в видимый методами нелинейной оптики // ЖЭТФ. – 1970. – Т. 58, № 1. – С. 51-59.
4. Воронин Э. С., Дивлекеев М. И., Ильинский Ю. А. Продольная и поперечная разрешающая способность при преобразовании изображения методами нелинейной оптики // Оптика и спектроскопия. – 1971. – Т. 30, № 6. – С. 1118-1122.
5. Воронин Э. С., Стрижевский В. Л. Параметрическое преобразование ИК излучения с повышением частоты и его применение // УФН. – 1979. – Т. 127, № 1. – С. 99-133.
6. Гайнер А. В. Нелинейно-оптические преобразователи инфракрасного излучения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 168 с.
7. Гайнер А. В., Кривошеков Г. В., Круглов С. В. Исследования системы преобразования изображения с большой угловой апертурой // Квантовая электроника. – 1971. – № 6. – С. 122-124.
8. Гайнер А. В., Круглов С. В., Кривошеков Г. В. Преобразование изображения из ИК области в видимую с большой угловой апертурой // Оптика и спектроскопия. – 1971. – Т. 31, № 5. – С. 772-775.
9. Гайнер А. В., Лебедев В. В., Маренников С. И. Исследование разрешающей способности нелинейного преобразователя изображения // Оптика и спектроскопия. – 1974. – Т. 37, № 4. – С. 754-760.
10. Илларионов А. И., Строганов В. И., Троилин В. И. Преобразование ИК изображения без искажения его линейных размеров методами нелинейной оптики // Оптика и спектроскопия. – 1988. – Т. 6, № 64. – С.1366-1368.
11. Илларионов А. И., Янчук О. В. Нелинейное преобразование по частоте сфокусированного гауссова пучка // Известия вузов. Физика. – 2007. – Т. 50, № 12. – С. 14-19.

12. Илларионов А. И., Янчук О. В., Старченко А. А. Влияние астигматизма волнового фронта основного излучения на нелинейное преобразование второй оптической гармоники // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 11. – С. 71-74.
13. Казак Н. С. Преобразование нелинейными кристаллами частоты излучения ОКГ на основе органических соединений: Автореферат дис... канд. ф.-м. наук. – Минск, 1975. – 16 с.
14. Колпаков Ю. Г., Кривошеков Г. Б., Строганов В. И. Оптические гармоники, возбуждаемые излучением теплового источника света // Нелинейные процессы в оптике. – Новосибирск: Наука, 1973. – С. 306-309.
15. Колпаков Ю. Г., Кривошеков Г. В., Строганов В. И. Применение многочастотного синхронизма для преобразования излучения тепловых источников света в нелинейном кристалле // Тезисы докладов 7 Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике. – Ташкент, 1974. – С. 457-458.
16. Кривошеков Г. В., Колпаков Ю. Г., Самарин В. И. Преобразование оптического излучения с широким спектром в нелинейных кристаллах // Журнал прикладной спектроскопии. – 1979. – Т. 30, № 5. – С. 884-889.
17. Криштоп В. В., Строганов В. И. Нелинейная оптика немонахроматического широкополосного излучения. – Монография. Хабаровск: ДВГУПС, 2007. – 110 с.
18. Криштоп В. В., Толстов Е. В., Строганов В. И. Преобразование ИК излучения с широкополосной накачкой в нелинейно-оптических кристаллах // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 4. – С. 24-26.
19. Лебедев В. В. Нелинейно оптическая система преобразования изображения из ИК диапазона в видимый с высоким разрешением при когерентном освещении: Автореферат дис... к.ф.-м.н. – Новосибирск: ИФП СО АН СССР, 1975.
20. Литвинова М. Н., Сьюй А. В., Криштоп В. В. *Преобразование широкополосного ИК-излучения в кристаллах ниобата лития стехиометрического и конгруэнтного состава*, Наука и образование. Инженерное образование. – 2012. – № 7: <http://technomag.edu.ru/doc/431642.html/>
21. Строганов В. И. Способ преобразования инфракрасного изображения объекта в нелинейном кристалле // Патент СССР №4079404/31.1988. Бюл. № 26.
22. Строганов В. И. Параметрические процессы в нелинейных оптических кристаллах при взаимодействии волн различной структуры: Автореферат дис... доктора ф.-м. наук. – Томск: ТТУ, 1989. – 32 с.

23. Толстов Е. В., Криштоп В. В., Строганов В. И. Спектральные характеристики преобразователя теплового излучения // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 1. – С. 68-69.
24. Толстов Е. В., Криштоп В. В., Строганов В. И. Температурные характеристики нелинейно-оптического преобразователя // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 10. – С. 74-77.
25. Троилин В. И. Преобразование немонохроматического широкополосного инфракрасного изображения в нелинейных оптических кристаллах: Автореферат дис... канд. ф.-м. наук. – Хабаровск: ДВГУПС, 1994. – 16 с.
26. Alfaro M., Paez G., Strojnik M. Bidimensional fluorescence analysis and thermal design of europium thenoyltrifluoroacetate based thermal-to-visible converter // Appl. Opt. – 2012. – Vol. 51. – P. 780-788.
27. Capper P. Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials. Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications. 2005. – 574 p.
28. Krishtop V., Efremenko V., Litvinova M. N. The spectrum of up-converted broadband radiation in nonlinear optical crystals // Proceedings of SPIE. – 2007. – Vol. 6610, April. – P. 121-128.
29. Krishtop V. V., Troilin V.I., Stroganov V. V. High-speed system of IR-image conversion in a nonlinear crystal pumped by a thermal source // Russian physics journal. – 2011. – Vol. 54. – № 2. – P. 251-253.
30. Midwinter J. E. Image conversion from 1, 6 to the visible in lithium niobate // Appl. Phys. Lett. – 1968. – Vol. 12, № 3. – P. 68-70.
31. Vainer B. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol. 41, № 6. – P. 065102 (12 pp).
32. Warner J. Spatial resolution measurements in up conversion from 10, 6 to the visible // Appl. Phys. Lett. – 1968. – Vol. 13, № 10. – P. 360-362.

Рецензенты:

Графский О. А., д.т.н., профессор ДВГУПС, г. Хабаровск.

Кондратьев А. И., д.т.н., профессор ДВГУПС, Хабаровск.