

Оптический параметрический генератор на кристалле $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$

В.В.Бадиков, А.К.Дон, К.В.Митин, А.М.Серёгин, В.В.Синайский, Н.И.Щебетова

Впервые получена генерация оптического параметрического генератора на кристалле $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ с накачкой излучением наносекундного Nd:YAG-лазера. Благодаря градиенту концентрации кадмия вдоль оси кристалла перестройка длины волны генерации в условиях некритического фазового синхронизма осуществлялась линейным перемещением кристалла. Диапазон перестройки составил 2.85–3.27 мкм с максимальным дифференциальным коэффициентом преобразования 6.6 %.

Ключевые слова: оптический параметрический генератор, тиогаллат кадмия-ртути, Nd-лазер.

1. Введение

В настоящее время большой практический интерес представляют перестраиваемые лазерные источники излучения среднего ИК диапазона (3–12 мкм), одним из путей создания которых является разработка оптических параметрических генераторов (ОПГ). Известно сравнительно небольшое число нелинейных кристаллов, пригодных для использования в ОПГ в указанном спектральном диапазоне; к наиболее перспективным относятся ZnGeP_2 , AgGaSe_2 , AgGaS_2 , HgGa_2S_4 [1–5]. Все они обладают различными недостатками, ограничивающими возможности их использования в ОПГ, поэтому технологии выращивания уже известных кристаллов постоянно совершенствуются и ведутся поиски новых нелинейно-оптических сред.

Следует отметить, что особый интерес вызывают кристаллы, позволяющие создавать ОПГ среднего ИК диапазона с накачкой излучением Nd-лазеров – наиболее доступных и технологичных. Чаще всего в таких ОПГ используются тиогаллат серебра (AgGaS_2) и тиогаллат ртути (HgGa_2S_4). Кристаллы HgGa_2S_4 в будущем могут оказаться более перспективными из-за высокой нелинейности, лучевой прочности и теплопроводности. Кроме того, добавка кадмия позволяет создавать твердые растворы тиогаллата кадмия-ртути ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$), которые обладают рядом преимуществ.

Во-первых, введение кадмия в различных концентрациях (x) приводит к изменениям двулучепреломления и главных значений показателей преломления в кристаллах. В результате, меняя величину x , можно «управлять» условиями фазового синхронизма. В частности, при определенной концентрации кадмия в кристалле допуска-

ется реализация условий некритического фазового синхронизма.

Во-вторых, в процессе роста кристалла возникает естественный градиент концентрации кадмия по длине були. Это обстоятельство позволяет изготавливать элементы для нелинейно-оптических преобразователей с плавным изменением x в плоскости синхронизма. Используя такие элементы, можно осуществлять перестройку длины волны ОПГ путем линейного перемещения кристалла относительно пучка накачки (или перемещения пучка накачки относительно кристалла). При этом условия некритического фазового синхронизма не нарушаются.

В последнее время благодаря развитию технологии выращивания монокристаллов в Лаборатории новейших технологий Кубанского государственного университета удалось вырастить кристаллы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ хорошего оптического качества с плавно изменяющейся в плоскости синхронизма концентрацией кадмия. В настоящей работе впервые продемонстрирована параметрическая генерация на таких кристаллах с накачкой излучением Nd-лазера с модуляцией добротности и приведены результаты исследования основных характеристик ОПГ.

2. Выращивание кристаллов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$

Монокристаллы твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ выращивались по методу Бриджмена–Стокбаргера в кварцевых ампулах с внутренним диаметром 18 мм и толщиной стенки 4.5 мм. В кварцевую ампулу закладывалась предварительно синтезированная шихта требуемого химического состава, состоящая из элементов Hg, Cd, Ga и S с высокой степенью чистоты (99.9999 %). Перед процессом синтеза ампула с шихтой откачивалась до остаточного давления воздуха 2×10^{-5} Торр и отпаивалась. Соотношение между объемом газовой фазы над расплавом и объемом расплава в ростовой ампуле составляло 1:1. Кристаллы выращивались на затравках, ориентированных перпендикулярно кристаллографической плоскости (110), со скоростями 2–6 мм в сутки при различных градиентах температур (от 2 до 10 °C/см) в ростовых печах. Температура кристаллизации изменя-

В.В.Бадиков. Кубанский государственный университет, Лаборатория новейших технологий, Россия, 350058 Краснодар, ул. Ставропольская, 149; e-mail: ntlab@mail.kubsu.ru, тел.: (8612)-75-85-49, факс: (8612)-75-85-49

А.К.Дон, К.В.Митин, А.М.Серёгин, В.В.Синайский, Н.И.Щебетова. ГУП «НПО "Астрофизика"», Россия, 125424 Москва, Волоколамское ш., 95; e-mail: arphysica@aha.ru тел.: 490-91-79, факс: 491-21-21

Поступила в редакцию 22 июля 2005 г.

лась от 1000 до 918 °С в зависимости от химического состава расплава.

При выращивании $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ происходит изменение химического состава по высоте були вдоль оси кристалла. В нижней части були кристалл обогащен кадмием, концентрация которого постепенно уменьшается к верхней части були. Это обусловлено тем, что титгаллат кадмия-ртути является твердым раствором переменного химического состава и коэффициент распределения кадмия меньше единицы. У данных кристаллов в направлении (112) могут образовываться двойники. Плоскость (101) является плоскостью спайности.

Из выращенного кристалла был вырезан элемент с поперечным сечением 30.6×8 мм и длиной 11 мм, ориентированный для реализации некритического фазового синхронизма I типа ($e \rightarrow \infty$) ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 45^\circ$). Наблюдалось незначительное изменение цвета от одной грани до другой вдоль оси кристалла. На оптические поверхности элемента были нанесены просветляющие покрытия. Коэффициент отражения от каждой поверхности составлял 0.2 % – 0.8 % в спектральном диапазоне 1–2 мкм.

3. Результаты экспериментальных исследований ОПГ

В качестве источника накачки ОПГ использовался Nd:YAG-лазер с кольцевым полуконфокальным резонатором, обеспечивающим генерацию в режиме бегущей волны при модуляции добротности. Диафрагма диаметром 1.7 мм, расположенная внутри кольцевого резонатора, обеспечивала генерацию на основной пространственной моде TEM_{00} . Длительность импульса излучения составляла 22 нс по уровню 0.5, максимальная энергия в одиночном импульсе достигала 12 мДж. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме с частотой до 10 Гц.

Резонатор ОПГ был образован двумя плоскими зеркалами с диэлектрическими покрытиями. Входное зеркало ОПГ было изготовлено из кварцевого стекла КВ с просветляющим (на длину волны накачки) покрытием на передней поверхности, выходное – из фтористого кальция. Коэффициент отражения входного и выходного зеркал составлял 95 % – 99 % в диапазоне длин волн 1.4–1.9 мкм. Таким образом, для сигнальной волны резонатор имел максимальную добротность, а холостая волна выводилась из резонатора с минимальными потерями (коэффициент пропускания выходного зеркала 80 % – 90 %). Коэффициент отражения входного зеркала для волны накачки составлял 10 %, а для выходного – 30%, расстояние между зеркалами резонатора ОПГ было равно 3 см. ОПГ располагался в перетяжке пучка накачки, формируемой фокусирующим зеркалом ($f = 2$ м). Диаметр перетяжки пучка по уровню $1/e^2$ в области взаимодействия с кристаллом составлял 2 мм. Перестройка длины волны осуществлялась линейным перемещением кристалла относительно пучка накачки в направлении, параллельном его оси, которая находится на расстоянии z от грани кристалла.

Для измерения энергии импульса накачки и распределения интенсивности по сечению пучка часть излучения отводилась при помощи оптического клина и регистрировалась измерителем энергии PE-10-BB (Ophir) и камерой C4915 (Cohu). Выходная энергия ОПГ измерялась этим же измерителем. Для выделения холостой волны применялся набор фильтров из фтористого кальция с

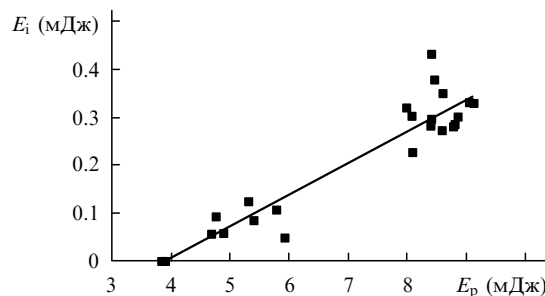


Рис.1. Зависимость выходной энергии ОПГ на частоте холостой волны от энергии накачки ($z = 11$ мм).

диэлектрическим покрытием (коэффициент пропускания для излучения накачки менее 1 %) и Ge-пластина. Длины волны измерялась монохроматором Digikrom CM112. Регистрация сигнала, прошедшего через монохроматор, осуществлялась при помощи пироэлектрического приемного устройства МГ-30 и осциллографа TDS-1012. Излучение ОПГ фокусировалось линзой из фтористого бария с фокусным расстоянием 60 мм. Точность измерения длин волн составляла 0.01 мкм. Для контроля пространственного распределения интенсивности излучения по сечению пучка как холостой, так и сигнальной волны использовалась камера Ругосам-III (Spiricon).

В работе измерялись следующие параметры: выходная энергия ОПГ на частоте холостой волны E_i , энергия излучения накачки E_p и длина холостой волны λ_i . На основании измерений E_p и E_i определялся коэффициент преобразования по энергии $\eta = E_i/E_p$. По тангенсу угла наклона аппроксимирующей зависимости $E_i(E_p)$ определялся дифференциальный коэффициент преобразования η_s .

Были получены следующие результаты. Впервые осуществлена параметрическая генерация на кристалле титгаллата кадмия-ртути в диапазоне плавной перестройки длины волны 2.85–3.27 мкм при пороговой энергии излучения накачки от 2.5 до 4 мДж (для разных положений кристалла). Зависимость выходной энергии ОПГ для холостой волны от энергии накачки представлена на рис.1. Максимальный коэффициент преобразования по энергии для холостой волны ($\lambda_i = 3.03$ мкм) составил 4.5 %, дифференциальный коэффициент преобразования – 6.6 %.

На рис.2 показаны зависимости измеренного коэффициента преобразования по энергии η и дифференциального коэффициента преобразования η_s от положения пучка накачки. При $z = 0 - 25$ мм они изменяются в сравнительно небольших пределах, что говорит об однородности распределения кадмия вдоль оси кристалла. Замет-

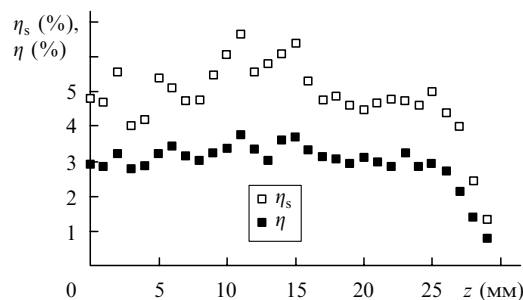


Рис.2. Зависимости максимального и дифференциального коэффициентов преобразования по энергии от смещения пучка накачки относительно боковой поверхности кристалла (в плоскости синхронизма).



Рис.3. Распределение интенсивности излучения по сечению пучка на выходе ОПГ на частоте холостой волны ($\lambda = 3.03$ мкм) при $z = 11$ мм в ближней (расстояние от выходного зеркала ОПГ 160 мм) (а) и дальней (в фокусе линзы с $f = 100$ мм) (б) зонах.

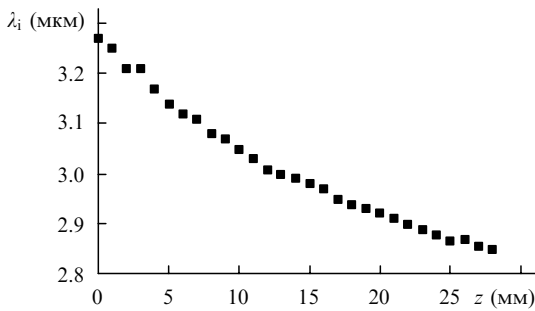


Рис.4. Зависимость длины холостой волны на выходе ОПГ от смещения пучка накачки относительно боковой поверхности кристалла.

ное уменьшение эффективности преобразования наблюдается в краевой области кристалла (~ 3 мм). По-видимому, это обусловлено значительными фазовыми искажениями в данной области.

Были измерены пространственные распределения интенсивности излучения по сечению пучка холостой волны в ближней и дальней зонах (рис.3). Из анализа этих распределений можно судить об оптическом качестве кристалла. В целом полученные распределения излучения ОПГ показывают, что по крайней мере в объеме взаимодействия волн неоднородности распределения показателя преломления в кристалле незначительны. Вытянутая форма обусловлена, по-видимому, «расплыванием» излучения в плоскости синхронизма. Анализ рис.3 позволил также оценить расходимость излучения холостой волны ОПГ, которая составила $\sim 2 \times 10^{-2}$ рад по уровню $1/e^2$.

На рис.4 представлена экспериментальная зависимость длины холостой волны от положения пучка накачки в кристалле. При смещении пучка в плоскости синхронизма кристалла на 28 мм изменение длины волны составило 0.42 мкм.

4. Дисперсионные зависимости для кристаллов $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$

Для установления связи между химическим составом кристалла $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ и его оптическими свойствами, были проведены измерения дисперсии показателей преломления. Для измерений были изготовлены кристаллические призмы с $x = 0.27$ и 0.33 и преломляющим углом $\sim 20^\circ$ (размер рабочих граней 10×10 мм). Измерения показателей преломления проводились в спектральном диапазоне 0.55 – 10 мкм автоколлимационным методом на установке, описанной в [6]. Абсолютная погрешность измерений для кристаллов хорошего качества не превышала 0.001. Результаты измерений при комнатной температуре представлены в табл.1.

Табл.1. Главные значения показателя преломления для кристаллов $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$.

λ (мкм)	$x = 0.33$		$x = 0.27$	
	n_o	n_e	n_o	n_e
0.550	2.5659	2.5342	2.5810	2.5445
0.600	2.5319	2.5018	2.5437	2.5077
0.650	2.5053	2.4726	2.5160	2.4811
0.700	2.4838	2.4557	2.4948	2.4611
0.800	2.4556	2.4260	2.4662	2.4337
0.900	2.4374	2.4094	2.4481	2.4161
1.000	2.4253	2.3976	2.4344	2.4039
1.100	2.4163	2.3873	2.4258	2.3956
1.200	2.4110	2.3815	2.4189	2.3882
1.300	2.4051	2.3765	2.4134	2.3829
1.400	2.4003	2.3727	2.4095	2.3803
1.500	2.3965	2.3689	2.4057	2.3765
1.600	2.3922	2.3649	2.4027	2.3738
1.700	2.3895	2.3621	2.4003	2.3713
1.800	2.3873	2.3610	2.3984	2.3689
1.900	2.3848	2.3591	2.3970	2.3670
2.000	2.3834	2.3578	2.3958	2.3654
3.000	2.3756	2.3501	2.3873	2.3582
4.000	2.3695	2.3441	2.3805	2.3525
5.000	2.3656	2.3397	2.3749	2.3473
6.000	2.3587	2.3322	2.3690	2.3406
7.000	2.3515	2.3253	2.3589	2.3304
8.000	2.3444	2.3171	2.3493	2.3204
9.000	2.3332	2.3059	2.3381	2.3104
10.000	2.3211	2.2938	2.3259	2.2953

Для аппроксимации полученных значений показателя преломления использовалось уравнение Селлмейера [5, 7]:

$$n^2 = A_1 + \frac{A_3}{A_2 - \lambda^2} + \frac{A_5}{A_4 - \lambda^2}, \tag{1}$$

где λ – длина волны излучения в мкм. Чтобы определить коэффициенты Селлмейера для других концентраций кадмия, использовались значения показателей преломления, найденные путем интерполяции по x зависимостей $n_o(\lambda)$ и $n_e(\lambda)$ для $x = 0.27$ и 0.33 , а также аналогичных зависимостей, измеренных в работах [7, 8]. Найденные таким образом коэффициенты Селлмейера для кристаллов с разной концентрацией кадмия представлены в табл.2.

Максимальное отклонение значений показателя преломления, полученных из аппроксимации, от экспериментальных данных составляет 3×10^{-3} .

С использованием полученных уравнений Селлмейера и рассчитанных на их основе длин волн для условий 90° -ного синхронизма были определены концентрации кадмия в кристалле. Для $z = 0$ и 28 мм концентрация кадмия $x = 0.25$ и 0.21 соответственно. На рис.5 представлена зависимость концентрации кадмия от смещения пучка накачки в плоскости синхронизма, полученная с использованием экспериментальных данных по измерению длины холостой волны. Видно, что изменение концентрации кадмия по длине элемента происходит плавно, причем зависимость близка к линейной. Это также свидетельствует о хорошем оптическом качестве кристалла.

Табл.2. Коэффициенты Селлмейера для кристаллов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$.

x	n	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0.20	n_o	7.17117	639.04	-914.648	0.0979835	-0.220006
	n_e	7.03365	653.431	-943.36	0.0770492	-0.210144
0.25	n_o	7.42819	749.29	-1295.98	0.0880175	-0.219608
	n_e	7.3628	783.563	-1411.87	0.0801083	-0.207095
0.30	n_o	7.62356	836.474	-1642.64	0.0717384	-0.220695
	n_e	7.41107	805.268	-1512.04	0.0714881	-0.207339
0.35	n_o	8.47402	1167.86	-3327.19	0.0635593	-0.2180798
	n_e	8.40374	1171.46	-3389.17	0.0807452	-0.2007114
0.40	n_o	8.47346	1184.47	-3414.44	0.0406186	-0.220462
	n_e	8.33498	1143.19	-3255.20	0.0705351	-0.20029
0.45	n_o	8.50139	1213.14	-3569.69	0.0180232	-0.221991
	n_e	8.45613	1182.89	-3536.20	0.0653473	-0.197853
0.50	n_o	8.47455	1222.13	-3599.99	-0.00379508	-0.222829
	n_e	8.42368	1168.94	-3479.53	0.0602277	-0.19524

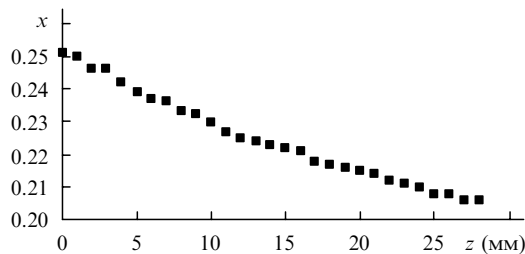


Рис.5. Зависимость расчетного значения концентрации кадмия в кристалле от расстояния от боковой поверхности кристалла.

5. Заключение

Итак, разработана технология и выращен новый нелинейно-оптический кристалл — тигаллат кадмия-ртути ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$), обладающий хорошим оптическим качеством и равномерным распределением примеси Cd

вдоль его оси синхронизма, что позволило создать на его основе ОПГ с накачкой излучением Nd:YAG-лазера и плавной перестройкой длины волны в среднем ИК диапазоне. Получена генерация в ОПГ. Диапазон перестройки составил 2.85–3.27 мкм с максимальным дифференциальным коэффициентом преобразования 6.6%. Определены коэффициенты уравнения Селлмейера для твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$. На основании полученных данных возникает возможность определить концентрацию кадмия в кристалле по длине волны преобразованного излучения. Так, в исследованном элементе параметр x вдоль оси изменяется от 0.21 до 0.25. Особо следует отметить, что кристалл ориентирован под некритический фазовый синхронизм и перестройка длины волны осуществлялась путем линейного перемещения пучка вдоль его оси, перпендикулярно направлению синхронизма. Диапазон непрерывной перестройки длины волны ОПГ ограничивался только характеристиками кристалла, связанными с концентрацией кадмия. Изменяя параметр x от 0.14 до 0.56 можно получить генерацию ОПГ в условиях некритического фазового синхронизма в спектральном диапазоне 2.7–9 мкм.

Работа проводилась в рамках проектов МНТЦ 1897 и 2334 при финансовой поддержке Европейской комиссии.

1. Budni P.A., Ezzo K., Schunemann P.G., Minnigh S., McCarthy J.C., Pollak T.M. *OSA Proc. Advanced Sol. State Lasers*, **10**, 335 (1992).
2. Eckardt R.C., Fan Y.X., Byer R.L., Marquardt C.L., Storm M.E., Esterowitz L. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 608 (1986).
3. Vodopyanov K.L., Maffetone J.P., Zwieback I., Ruderman W. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1204 (1999).
4. Бадиков В.В., Дон А.К. Митин К.В. и др. *Квантовая электроника*, **33**, 831 (2003).
5. Бадиков В.В., Кузьмин Н.В., Лаптев В.Б. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 451 (2004).
6. Badikov V.V. et. al. *Opt. Mater.*, **23**, 575 (2003).
7. Бадиков В.В., Матвеев И.Н., Панютин В.Л. и др. *Квантовая электроника*, **6**, 1807 (1979).
8. Бадиков В.В., Матвеев И.Н., Пшеничников С.М., Рычик О.В., Троценко Н.К., Устинов Н.Д. *Нелинейный монокристаллический материал*. А. С. № 974810. Заявка № 3214481, приоритет от 4.12.1980.