

Генерация УФ излучения в кристалле тетрабората лития методом частотного суммирования типа I с компенсацией пространственного сноса излучения†

Г.Ч.Бхар*, П.Кумбхакар**, А.К.Чаудхари*

Генерация УФ излучения в двух кристаллах тетрабората лития ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, или LB4) получена методом частотного суммирования типа I излучения лазера на красителе и излучения промышленного неодимового лазера, накачиваемого второй гармоникой этого же лазера. При компенсации пространственного сноса вследствие двулучепреломления получено увеличение эффективности суммирования в 3.8 раза относительно однокристалльного варианта.

Ключевые слова: тетраборат лития, частотное суммирование типа I, генерация УФ излучения, пространственный снос излучения.

1. Введение

Кристаллы группы боратов зарекомендовали себя в качестве перспективных материалов для различных нелинейно-оптических устройств, в том числе и в УФ области излучения [1]. В последнее время ведутся интенсивные исследования недавно полученного кристалла тетрабората лития ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, или LB4) [2–5]. Кристалл LB4 принадлежит к точечной группе симметрии 4mm, это одноосный отрицательный кристалл с пропусканием в вакуумной УФ области до 160 нм, что на 29 нм ниже границы пропускания кристалла ВВО и на 20 нм – границы пропускания кристалла CLBO. Граница пропускания в ближней ИК области находится на длине волны 3500 нм.

Этот кристалл имеет и ряд других преимуществ: у него очень высокий порог оптического повреждения [2], он механически тверд и негигроскопичен, а также легко может быть выращен с сохранением высокого качества до размеров, значительно больших, нежели другие кристаллы группы боратов, такие, например, как ВВО, LBO и CLBO. У кристалла LB4 есть только один недостаток: его эффективный нелинейный коэффициент довольно мал ($d_{31} = 0.15$ пм/В на длине волны 1064 нм) [4].

Несколько групп исследователей уже продемонстрировали синхронизированную с помощью двулучепреломления генерацию суммарной частоты в различных нелинейно-оптических кристаллах как эффективный метод получения перестраиваемого излучения. Критическим параметром, определяющим полезность нелинейного процесса, является эффективность (КПД) преобразования. Эффективность нелинейного процесса, синхронизированного с помощью двулучепреломления, может быть

повышена при увеличении интенсивности падающего излучения, например при фокусировке излучения. Поскольку такие процессы имеют место при облучении кристалла как обыкновенной, так и необыкновенной волной, при фокусировке падающего излучения возникает дополнительное ограничение, обусловленное пространственным сносом необыкновенной волны при ее распространении не вдоль оптической оси кристалла.

Таким образом, эффективность нелинейного преобразования при фокусировке излучения в кристалле определенной длины не может превысить некоей пороговой эффективности. Однако отрицательное влияние сноса необыкновенной волны может быть устранено применением некритического волнового синхронизма. Некритический синхронизм реализуется при использовании неколлинеарного взаимодействия [6], при изменении температуры кристалла или при соответствующем подборе химического состава кристалла с тем, чтобы подходящим образом «подстроить» двулучепреломление кристалла [7]. Однако такая подстройка связана с определенными трудностями.

Для преодоления отрицательного влияния сноса некоторые исследователи [8–11] использовали компенсацию сноса в двух кристаллах. В работе [11] излучение с длиной волны 266 нм генерировалось с помощью удвоения частоты излучения с длиной волны 532 нм в системе из двух кристаллов ВВО с компенсацией сноса, что позволило увеличить эффективность преобразования в два раза по сравнению с преобразованием в одном кристалле. В работах [8, 9] было реализовано удвоение частоты типа II с компенсацией сноса излучений с длинами волн 1.3 и 2.53 мкм в кристалле КТР. При этом выигрыш в эффективности по сравнению с однокристалльной конфигурацией составил 3.2–3.5 раза.

В настоящей работе при суммировании типа I частот излучений Nd:YAG-лазера и лазера на красителе, накачиваемого второй гармоникой Nd:YAG-лазера, с компенсацией сноса в двух кристаллах LB4 мы получили излучение с длиной волны 392 нм. Компенсация сноса необыкновенного излучения позволила увеличить эффективность генерации в 3.8 раза. Насколько нам известно,

†Перевел с англ. Б.Ф.Полковников.

*Laser Laboratory, Physics Department, Burdwan University, burdwan-713104, India; e-mail: buphygcb@dte.vsnl.net.in, tel.: +91 (342) 55 63 74

**Department of Physics, Regional Engineering College, Durgapur-713209, Burdwan, India

Поступила в редакцию 28 августа 2001 г., после доработки – 3 ноября 2001 г.

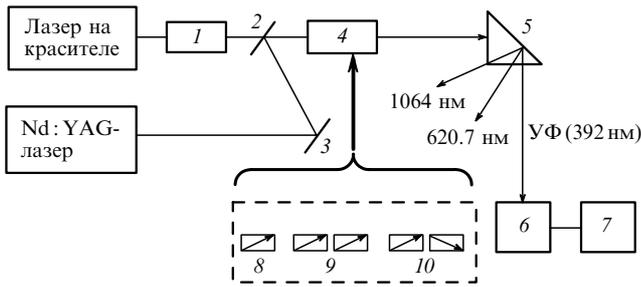


Рис.1. Схема эксперимента:

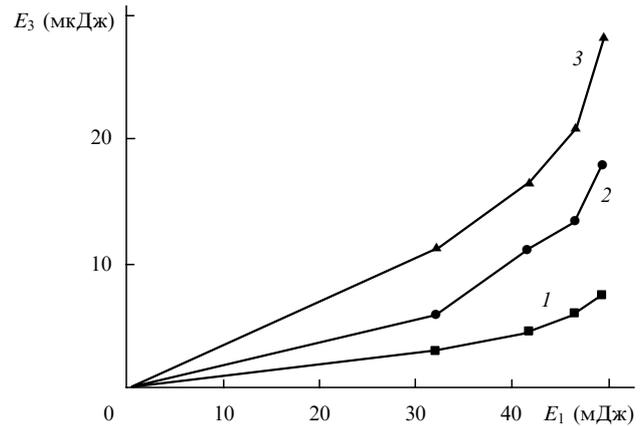
1 – телескоп; 2, 3 – поворотные зеркала; 4 – образец; 5 – призма Пелина–Брока; 6 – измеритель энергии/мощности; 7 – осциллограф; 8 – одиночный кристалл; 9 – два кристалла с пространственным сносом излучения; 10 – два кристалла с компенсацией пространственного сноса излучения.

это первая реализация генерации суммарной частоты с компенсацией сноса в кристалле LB4. Применение такого метода позволяет получить перестройку суммарной частоты до 204.8 нм при перестройке излучения лазера на красителе ниже 600 нм. При использовании излучения Nd:YAG-лазера в качестве одного из суммируемых излучений генерация «глубокого» ВУФ излучения с длиной волны ниже 204.8 нм в кристалле LB4 ограничена возможностью реализации не критического (90-градусного) синхронизма [5].

2. Экспериментальная установка и результаты

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Источником первичного лазерного излучения является Nd:YAG-лазер фирмы Spectra Physics (модель DCR-11) с электрооптической модуляцией добротности (длительность импульса 10 нс, частота повторения 10 Гц). Для получения основного излучения с длиной волны 620.7 нм использовался краситель DCM, накачиваемый второй гармоникой первичного неодимового лазера. Излучение неодимового лазера с длиной волны 1064 нм в эксперименте не фокусировалось, в то время как излучение лазера на красителе фокусировалось телескопом 1, состоящим из двух линз и предназначенным для получения однородного распределения излучения по диаметру пучка.

С помощью зеркал 2 и 3 излучение неодимового лазера совмещалось с излучением лазера на красителе, для излучения которого зеркало 2 имело пропускание более 80%. В эксперименте использовались два идентичных кристалла LB4, вырезанных под углом $\theta = 32^\circ$ для взаимодействия типа I ($o + o \rightarrow e$). При таком взаимодействии поляризация генерируемого УФ излучения ортогональна поляризациям смешиваемых излучений. Это требование удовлетворялось автоматически, т.к. оба

Рис.2. Зависимости энергии генерируемого УФ излучения E_3 от энергии неодимового лазера E_1 при однокристалльной (1), двухкристалльной без компенсации сноса (2) и двухкристалльной с компенсацией сноса (3) конфигурациях.

смешиваемых излучения были поляризованы в вертикальной плоскости, а кристаллы вращались в горизонтальной плоскости.

Исследовались три различные конфигурации эксперимента: один кристалл, два кристалла без компенсации сноса излучения и два кристалла с компенсацией сноса излучения. В однокристалльной конфигурации использовался один кристалл, в двухкристалльной без компенсации сноса – два кристалла с одинаково и параллельно направленными оптическими осями, а в двухкристалльной с компенсацией сноса – два кристалла с различно направленными оптическими осями (см. рис.1). Конфигурация с подходящей компенсацией сноса излучения выбиралась в соответствии с рекомендациями работы [10]. Два кристалла располагались в специально смонтированном устройстве, позволявшем поворачивать оба кристалла в горизонтальной плоскости и смещать второй кристалл относительно первого в направлении распространения излучения.

Призма Пелина–Брока из плавленого кварца использовалась для отделения УФ излучения от исходных излучений. Энергии всех участвовавших в эксперименте излучений регистрировались измерителем энергии и мощности фирмы Generic (модель ED-100A).

На рис.2 показаны экспериментальные зависимости энергии генерируемого излучения E_3 на длине волны 392 нм от энергии излучения неодимового лазера E_1 , полученные для трех упомянутых выше конфигураций. В табл.1 приведены энергии взаимодействующих излучений, энергия суммарного излучения и выигрыш в эффективности взаимодействия для двухкристалльных схем по отношению к однокристалльной. Эффективная длина взаимодействия при компенсации сноса должна вдвое превышать таковую в отсутствие компенсации, так что в этом случае теоретический выигрыш относительно одно-

Табл.1. Энергии генерируемого излучения в однокристалльной (А), двухкристалльной без компенсации сноса (В) и двухкристалльной с компенсацией сноса (С) конфигурациях, а также выигрыш в двухкристалльных конфигурациях относительно однокристалльной.

E_1 (1064 нм) (мДж)	E_2 (620.7 нм) (мДж)	E_3 (мкДж)			Выигрыш относительно А	
		А	В	С	В	С
32.0	0.48	2.99	5.97	11.19	2.0	3.74
41.5	0.96	4.48	10.0	16.42	2.23	3.67
46.3	1.36	5.97	13.40	20.9	2.24	3.50
49.0	1.70	7.46	17.90	28.36	2.40	3.80

кристалльной конфигурации должен составлять 4. Экспериментально при компенсации сноса был получен выигрыш 3.8, а без компенсации – 2.4.

Эффективность сложения частот η определяется выражением $\eta = E_3 / (E_1 E_2)^{1/2}$, где энергии E_1 и E_2 измерены перед первым кристаллом. Максимальные эффективности для однокристалльного и двухкристалльного с компенсацией сноса вариантов равны соответственно 0.08 и 0.31 % при мощностях падающих излучений неодимового лазера и лазера на красителе 49 ± 1 и 1.7 ± 0.05 мДж. Погрешность измерения энергии суммарного излучения составляла ± 1 мкДж. Растворы углов сбора для генерируемого излучения с длиной волны 392 нм и для излучения лазера на красителе с длиной волны 620.7 нм были измерены в однокристалльной и двухкристалльной с компенсацией сноса конфигурациях.

Экспериментально измеренный угол синхронизма внутри кристалла θ_{pm} с высокой степенью точности соответствует теоретическому значению $37.23 \pm 0.005^\circ$, рассчитанному с использованием коэффициентов Селлмейера из работы [4]. Рассчитанный угол сноса для данного случая, также полученный с использованием дисперсионных соотношений работы [4], составил 2.04° . Экспериментальная угловая ширина синхронизма (внутри кристалла) в однокристалльной конфигурации составила 0.70 ± 0.18 мрад·см, что весьма близко к теоретическому значению 0.60 мрад·см. Разница между экспериментальным и теоретическим значениями вполне укладывается в погрешность измерений. Теоретический расчет проводился в приближении плоских волн и без учета истощения накачки [4]. Относительная ширина полосы второго кристалла при компенсации сноса оказалась примерно такой же, как и для одиночного кристалла.

3. Заключение

Таким образом, мы впервые продемонстрировали потенциальные возможности кристалла LB4 для генерации УФ излучения при суммировании частот с компенсацией пространственного сноса излучения. Получено увеличение эффективности преобразования в 3.8 раза по сравнению с эффективностью преобразования в одном кристалле. Максимальная эффективность преобразования энергии в такой конфигурации составила 0.31 % при энергиях излучений с длинами волн 1064 и 620.7 нм, равных 49 и 1.70 мДж соответственно.

В конфигурации с компенсацией сноса в кристалле LB4 вредное влияние сноса удалось почти полностью устранить. Поскольку порог повреждения кристалла LB4

весьма высок, эффективность преобразования может быть увеличена при жесткой фокусировке излучения. При перестройке длины волны излучения лазера на красителе ниже 600 нм возможно получение перестраиваемого УФ излучения с длиной волны до 204.8 нм. При использовании излучения Nd:YAG-лазера в качестве одного из суммируемых излучений генерация излучения с длиной волны ниже 204.8 нм в этом кристалле ограничена возможностью реализации некритического (90-градусного) синхронизма [5]. Хотя в настоящей работе получена генерация излучения с длиной волны 392 нм, находящейся всего лишь в длинноволновой части УФ диапазона, учитывая, во-первых, высокую прозрачность кристалла до длины волны 160 нм, во-вторых, высокую лучевую, механическую и химическую стойкость кристалла и, в-третьих, легкость выращивания больших кристаллов высокого оптического качества, мы должны признать, что кристалл LB4 следует считать перспективным кандидатом на роль активного элемента генератора перестраиваемого излучения в «глубоком» УФ диапазоне.

Авторы выражают благодарность Т.Сугаваре (Mitsubishi Materials Corporation, Japan) за предоставление кристаллов LB4, а также Д.Д.Бхавалкару и В.К.Вадхавану (Center for Advanced Technology, Indore, India) за помощь в обработке кристаллов. Авторы также благодарны У.Чаттерджи (Burdwan University, India) за помощь. Работа была частично финансирована Национальной лазерной программой Правительства Индии.

1. Furusawa S., Chikagawa O., Tange S., Ishidate T., Orihara H., Ishibashi Y., Miwa K. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **60**, 1691 (1991).
2. Komatsu R., Sugawara T., Sassa K., Sarukura N., Liu Z., Izumida S., Segawa Y., Uda S., Fukuda T., Yamanouchi K. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 3492 (1997).
3. Petrov V., Rotermund F., Noack F., Komatsu R., Sugawara T., Uda S. *J. Appl. Phys.*, **84**, 5887 (1998).
4. Sugawara T., Komatsu R., Uda S. *Solid State Commun.*, **107**, 233 (1998).
5. Chatterjee U., Kumbhakar P., Chaudhary A.K., Bhar G.C. *Appl. Phys. B*, **72**, 407 (2001).
6. Bhar G.C., Rudra A.M., Kumbhakar P., Chatterjee U., Nagahori A. *Nonlin. Opt.*, **23**, 83 (1999).
7. Schunemann P.G., Setzler S.D., Pollak M.T. *J. Cryst. Growth*, **211**, 257 (2000).
8. Zondy J.J., Abed M., Khodja S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 2368 (1994).
9. Zondy J.J., Abed M., Khodja A., Bonin C., Rainaud B., Albrecht H., Lupinsky D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2700**, 66 (1996).
10. Armstrong D.J., Alford W.J., Raymond T.D., Smith A.V., Bowers M.S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 460 (1997).
11. Droz C., Kouta H., Kuwano Y. *Opt. Rev.*, **6**, 97 (1999).