

Генерация перестраиваемого по частоте импульсного терагерцевого излучения хром-форстеритовой лазерной системой с акустооптическим управлением временным профилем импульсов

А.В.Овчинников, О.В.Чефонов, В.Я.Молчанов, К.Б.Юшков, К.Викарио, К.Хаури

Представлены результаты экспериментальных исследований генерации импульсного терагерцевого излучения, перестраиваемого по частоте в диапазоне 0.5–2 ТГц. Генерация ТГц импульсов осуществлялась методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейном органическом кристалле ОН1. Перестройка ТГц излучения по частоте была получена при адаптивной фазово-амплитудной модуляции импульсов накачки фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы с длиной волны излучения 1230 нм с помощью акустооптической дисперсионной линии задержки.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, оптическое выпрямление, терагерцевое излучение, акустооптическая дисперсионная линия задержки.

1. Введение

Прогресс в области генерации терагерцевого излучения в последние годы открыл новые возможности для получения импульсных источников с высокими значениями энергии импульса и напряженности электрического поля [1–6]. Как правило, такие источники обладают широким спектром, перекрывающим частотный диапазон в несколько ТГц, тогда как для многих практических применений желательнее использовать узкополосный импульс ТГц излучения, перестраиваемый в определенном диапазоне частот. Например, с помощью такого импульса можно избирательно возбуждать моды, находящиеся в резонансе с частотой ТГц источника, без воздействия на соседние моды, вести поиск новых частотных компонент, которые могут существовать при нелинейных ТГц процессах и т.д. Однако до настоящего времени эффективные методы адаптивного формирования ТГц импульсов с заданными спектральной и временной формами отсутствуют.

Для генерации субпикосекундных импульсов ТГц излучения с высокой энергией используются методы нелинейного взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) накачки с различными нелинейными кристаллами. В работе [7] были получены импульсы ТГц излучения с широким спектром при накачке неорганического нелинейного кристалла ZnTe фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 800 нм. Средняя мощность излучения достигала 150 мкВт при частоте сле-

дования импульсов 100 Гц [8], но средняя эффективность преобразования энергии лазерного импульса в энергию ТГц импульса (коэффициент преобразования) в кристалле не превышала 10^{-5} . Эффективная генерация таких импульсов методом оптического выпрямления лазерного импульса с длиной волны излучения 1.03 мкм в кристалле LiNbO₃ в оптической схеме с наклонным, для достижения фазового синхронизма, волновым фронтом была получена в работе [9]. Энергия импульса достигала 100 нДж в спектральном диапазоне до 2.5 ТГц, а коэффициент преобразования составлял 2.5×10^{-4} , что на порядок больше коэффициента преобразования в кристаллах ZnTe или GaP. Значительное увеличение эффективности генерации ТГц излучения в кристалле LiNbO₃ было достигнуто при криогенном охлаждении [3]. Коэффициент преобразования был на два порядка выше и достигал $3.8\% \pm 0.4\%$. Для получения такого коэффициента преобразования требуется высокая плотность энергии накачки с оптимизированными длительностью импульса и шириной спектра.

Относительно недавно разработанные органические нелинейные электрооптические кристаллы для генерации импульсов ТГц излучения методом оптического выпрямления позволяют получить сравнимый коэффициент преобразования в более простой схеме коллинеарного синхронизма (как в кристаллах ZnTe и GaP) и при более низких энергиях лазерных импульсов накачки [10]. Максимальная энергия импульса ТГц излучения 0.9 мДж с коэффициентом преобразования 3% была получена при использовании оптического выпрямления фемтосекундного лазерного импульса хром-форстеритовой лазерной системы в нелинейном органическом кристалле DSTMS [11].

Широкий спектр излучения фемтосекундных лазеров позволяет получать генерацию ТГц импульсов с узким спектром методом смешения двух задержанных относительно друг друга линейно чирпированных импульсов в нелинейной среде [12]. В работе [13] импульсы ТГц излучения с энергией несколько микроджоулей, перестраиваемые в частотном диапазоне 0.3–1.3 ТГц, были получены методом оптического выпрямления при накачке кристалла LiNbO₃ многопиковым оптическим импульсом. Ге-

А.В.Овчинников, О.В.Чефонов. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 12541 Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2; e-mail: ovch2006@yandex.ru, oleg.chefonov@gmail.com

В.Я.Молчанов, К.Б.Юшков. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049 Москва, Ленинский просп., 4

С.Vicario, С.Hauri. Paul Scherrer Institute, SwissFEL, 5232 Villigen PSI, Switzerland

Поступила в редакцию 13 октября 2016 г., после доработки – 10 ноября 2016 г.

нерация ТГц импульсов с перестраиваемой центральной частотой излучения в диапазоне 0.3 – 0.8 ТГц в нелинейном органическом кристалле НМQ-TMS методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов на длине волны излучения 800 нм с модифицированной временной формой импульса была исследована в [14]. В рассмотренных выше работах для генерации перестраиваемого по частоте ТГц излучения с целью получения двух задержанных абсолютно одинаковых chirпированных импульсов использовались интерферометры различного типа.

Еще одним достаточно простым методом генерации импульсов ТГц излучения с изменяемой частотой является использование фемтосекундного лазерного импульса накачки с амплитудной модуляцией в поперечном сечении пучка. Этот метод был применен в работе [15], где для модуляции лазерного пучка использовалась теневая маска, представляющая собой периодическую последовательность пропускающих лазерное излучение щелей. Частота ТГц излучения определялась периодом щелей теневой маски. Альтернативой методу генерации перестраиваемых по частоте импульсов ТГц излучения с помощью теневой маски является метод с использованием фазовой маски [16].

Генерация узкополосных ТГц импульсов осуществлялась также с помощью программируемого жидкокристаллического модулятора для формирования требуемой временной формы лазерных импульсов накачки [17]. Методом оптического выпрямления импульсов фемтосекундного титан-сапфирового лазера в кристалле ZnTe была получена генерация импульсов с центральной частотой, лежащей в диапазоне 0.5 – 2 ТГц с шириной спектра ~ 0.2 ТГц, но с очень низкой (~ 10 фДж) энергией в импульсе.

Общим недостатком рассмотренных методов генерации перестраиваемого по частоте ТГц излучения являются значительные (до 50%) потери энергии фемтосекундного лазерного импульса накачки, что в свою очередь снижает выходную энергию импульса этого излучения.

Целью настоящей работы является демонстрация нового метода формирования лазерных импульсов с заданными временными профилями интенсивности и их применение для генерации перестраиваемых по частоте импульсов ТГц излучения. В основе метода лежит изменение периода амплитудно-фазовой модуляции фемтосекундных лазерных импульсов накачки с помощью акустооптической дисперсионной линии задержки (АОДЛЗ) с комплекснозначной спектральной функцией пропускания [18–20]. Применение адаптивной АОДЛЗ позволяет обеспечить одновременную и независимую перестройку как по частоте, так и по ширине спектра ТГц излучения. Потери энергии импульса в АОДЛЗ могут быть полностью скомпенсированы в усилительных каскадах, работающих в режиме насыщения. Генерация узкополосных перестраиваемых по частоте ТГц импульсов осуществлялась методом оптического выпрямления chirпированных лазерных импульсов мощной хром-форстеритовой лазерной системы в нелинейном органическом кристалле ОН1 ((2-(3-(4-Hydroxystyryl)-5,5-dimethylcyclohex-2-enylidene)malononitrile)). Применение нелинейных органических кристаллов, как было показано в работах [11, 21], обусловлено высокой эффективностью преобразования энергии импульса лазерной накачки хром-форстеритовой лазерной системы в энергию ТГц импульса.

2. Экспериментальная установка

Мощные ФЛИ генерировались тераваттной хром-форстеритовой лазерной системой [22], в стартовой части которой была установлена электронно-управляемая АОДЛЗ. Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Лазерная система была собрана по стандартной СРА-схеме усиления chirпированных импульсов и состояла из задающего генератора, стретчера, регенеративного усилителя, трех многопроходных усилителей и временного компрессора. Задающий генератор формировал импульсы с энергией 3 нДж, длительностью 60 фс, шириной спектра 45 нм на центральной длине волны 1260 нм и частотой следования 70 МГц. АОДЛЗ была установлена между задающим генератором и стретчером и осуществляла фазово-амплитудную модуляцию спектра лазерного импульса для формирования на выходе лазерной системы излучения с требуемым временным профилем. На выходе лазерной системы энергия импульса достигала 40 мДж с шириной спектра 25 нм на длине волны излучения 1230 нм и частотой следования импульсов 10 Гц.

АОДЛЗ на основе монокристалла парателлурита имела квазиколлимерную геометрию взаимодействия и обладала высоким спектральным разрешением [23, 24]. Длина акустооптического кристалла равнялась 67 мм. Ширина аппаратной функции АОДЛЗ на длине волны 1260 нм составляла 0.24 нм по уровню –3 дБ. Поскольку АОДЛЗ может создавать как положительную, так и отрицательную дисперсию, за нулевые значения были приняты дисперсии второго и третьего порядков, равные по величине и противоположные по знаку собственной дисперсии кристалла парателлурита. Таким образом, при отсутствии модуляции ФЛИ на выходе АОДЛЗ оставались спектрально ограниченными. АОДЛЗ формировала два сдвинутых по времени на величину τ идентичных chirпированных импульсов. Комплексная функция пропускания в таком случае имеет вид

$$H(\omega) = [1 + \exp(i\omega\tau)] \exp[iD_2(\omega - \omega_0)^2], \quad (1)$$

где D_2 – дисперсия второго порядка; ω_0 – циклическая частота излучения, соответствующая центральной длине волны спектра. Длительность chirпированного импульса T_1 определяется величиной дисперсии D_2 и длительностью

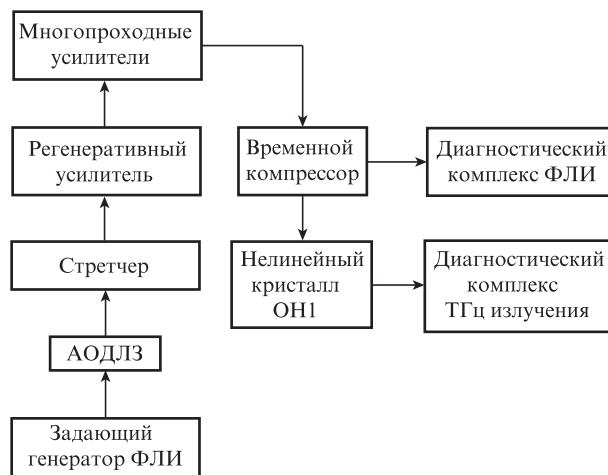


Рис.1. Схема экспериментальной установки (АОДЛЗ – акустооптическая дисперсионная линия задержки).

спектрально ограниченного ФЛИ T_0 , и если $D_2 \gg T_0^2$, то имеет место приближенное соотношение

$$T_1 = \frac{|D_2|}{T_0}, \tag{2}$$

где T_0 и T_1 соответствуют полным длительностям огибающей соответствующих импульсов по интенсивности по уровню $1/e^2$.

Первый множитель в выражении (1) имеет переменную абсолютную величину, благодаря чему наблюдается модуляция выходного спектра излучения с периодом

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi c\tau}$$

(c – скорость света). Это, в свою очередь, приводит к синусоидальной временной модуляции chirпированных импульсов с периодом, пропорциональным D_2 и $\Delta\lambda$. Таким образом, комплексная функция пропускания АОДЛЗ (1), приводит к периодической модуляции огибающей выходных chirпированных импульсов.

В результате использования такого метода управления спектром лазерного импульса на выходе лазерной системы были получены два импульса с регулируемой задержкой между ними, которые направлялись в нелинейный органический кристалл ОН1 для оптического выпрямления в коллинеарной геометрии в условиях фазового синхронизма. На рис.2 представлены измеренные автокорреляционные функции второго порядка для двух импульсов с относительной задержкой $\tau = 1.1$ пс. Временной профиль лазерного импульса измерялся автокоррелятором в неколлинеарной геометрии. При увеличении задержки между импульсами период модуляции chirпированных импульсов будет уменьшаться, а число максимумов – расти.

Спектр ТГц излучения восстанавливался по автокорреляционной функции первого порядка, измеренной с помощью автокоррелятора, собранного по схеме интерферометра Майкельсона [25], в котором в качестве детектора использовался оптоакустический преобразователь – ячейка Голя. Терагерцевое излучение фокусировалось на входное окно ячейки Голя с помощью внеосевого параболического зеркала с эффективным фокусным расстоянием 76 мм. Для подавления излучения накачки на длине волны 1230 нм и излучения второй гармоники на дли-

не волны 615 нм, генерируемого в кристалле ОН1, использовался специальный фильтр, который пропускал только излучение с длиной волны более 25 мкм. Измерения автокорреляционных функций ТГц излучения проводились в камере с осушенным воздухом (относительная влажность воздуха не превышала 2%), для того чтобы минимизировать искажения в спектре, вызванные сильным поглощением терагерцевого излучения водяными парами.

Как было отмечено ранее, генерацию ТГц импульсов с узким спектром можно получить методом смешения в нелинейной среде двух задержанных относительно друг друга линейно chirпированных импульсов. В этом случае центральная частота f_0 и ширина спектра Δf генерируемого ТГц излучения определяется следующими выражениями [26]:

$$f_0 = \frac{\tau}{\pi T_1 T_0}, \tag{3}$$

$$\Delta f = \frac{\sqrt{8}}{2\pi T_1}. \tag{4}$$

Максимально возможная длительность chirпированного импульса, измеренная в экспериментах с помощью АОДЛЗ, была равна 2.2 пс, при этом ожидаемая минимальная ширина спектра излучения, в соответствии с выражением (4), должна составить ~ 0.2 ТГц. Следует отметить, что для дополнительного увеличения длительности лазерного импульса и, следовательно, уменьшения ширины спектра ТГц излучения можно использовать механические настройки компрессора лазерной системы, однако целью настоящей работы было электронное управление спектром такого излучения исключительно с помощью АОДЛЗ.

Восстановленный спектр однопериодного импульса ТГц излучения, генерируемого в кристалле ОН1 при накачке излучением фемтосекундного хром-форстеритового лазера, приведен на рис.3. По ширине спектра можно определить диапазон изменений временных задержек τ между двумя chirпированными импульсами, необходимый для перестройки частоты излучения внутри спектрального диапазона 0.5–2.5 ТГц. В соответствии с выражением (3) диапазон временных задержек между двумя chirпированными импульсами находится в интервале 0.5–1.5 пс.

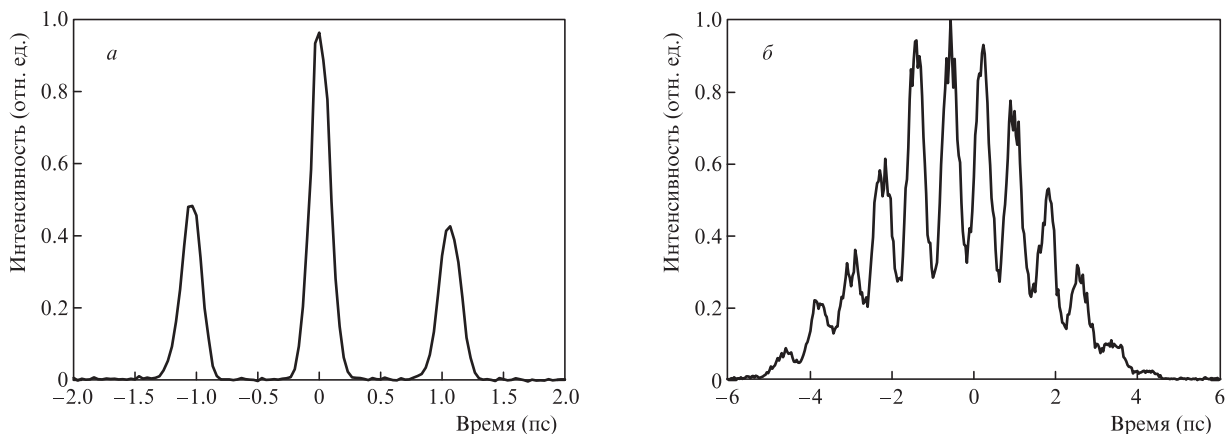


Рис.2. Автокорреляционная функция двух спектрально ограниченных импульсов длительностью $T_0 = 120$ фс (а) и двух chirпированных импульсов длительностью $T_1 = 2.2$ пс (б). Временная задержка между импульсами $\tau = 1.1$ пс.

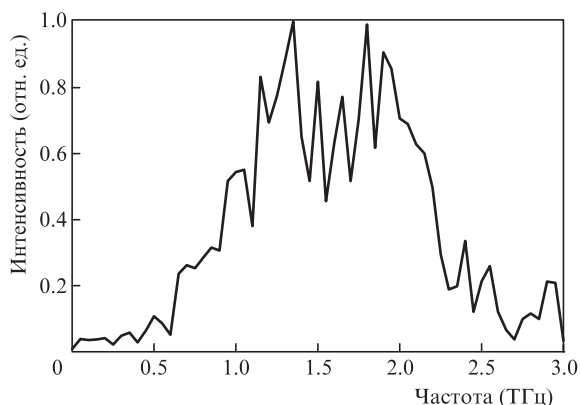


Рис.3. Спектр терагерцевого излучения на выходе кристалла ОН1.

Для получения максимальной энергии импульса ТГц излучения с максимальной эффективностью преобразования необходимо обеспечить плотность энергии лазерного импульса накачки на кристалле ~ 10 мДж/см² [21].

В экспериментах мы использовали кристалл ОН1 диаметром 4 мм, поэтому энергия лазерного импульса, падающего на кристалл, должна быть ~ 1.3 мДж. Для получения требуемого значения энергии импульса на выходе лазерной системы сначала была уменьшена до 5 мДж путем изменения времени задержки между импульсом накачки многопроходных усилителей и усиливаемых импульсов на длине волны излучения 1230 нм. Далее энергия плавно регулировалась с помощью поляризационного ослабителя, состоящего из полуволновой пластины и призмы Глана–Томпсона. Согласование диаметров лазерного пучка и кристалла ОН1 осуществлялось с помощью телескопа.

3. Результаты экспериментов

В экспериментах по генерации импульсного ТГц излучения с различной центральной частотой использовались лазерные импульсы, временная форма которых соответствовала временным задержкам между двумя chirпированными импульсами длительностью 2.2 пс, равным 0.5, 1 и 1.5 пс.

По измеренным автокорреляционным функциям импульсов ТГц излучения были получены спектры, пока-

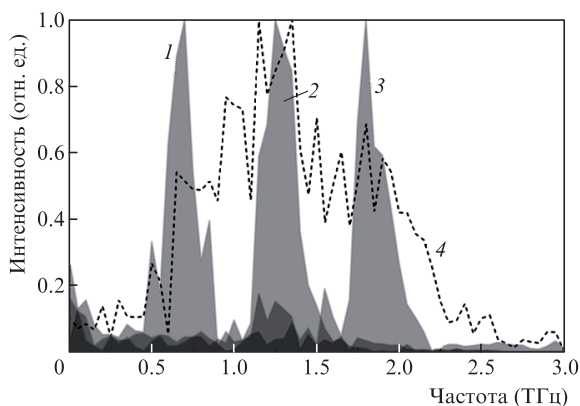


Рис.4. Спектры терагерцевого излучения при накачке кристалла ОН1 лазерными импульсами различной временной формы при задержке между двумя chirпированными импульсами 0.5 (1), 1 (2) и 1.5 пс (3); 4 – спектр при накачке одним спектрально-ограниченным импульсом.

занные на рис.4. Видно, что центральная частота ТГц импульса сдвигается в зависимости от задержки между лазерными импульсами, а ширина его спектра составляет ~ 0.25 ТГц. Энергия импульсов терагерцевого излучения измерялась с помощью пироэлектрического детектора SPI-D (Spectrum Detector Inc.) и составила 1.3, 6.2 и 1.7 мкДж на частотах 0.6, 1.2 и 1.8 ТГц соответственно.

4. Заключение

В настоящей работе впервые экспериментально продемонстрирована генерация многопериодных узкополосных импульсов терагерцевого излучения с различной центральной частотой методом оптического выпрямления в нелинейном органическом кристалле ОН1 профилированных лазерных импульсов хром-форстеритовой лазерной системы. Адаптивная перестройка центральной частоты генерации происходит в результате формирования соответствующего многопериодного временного профиля лазерного импульса накачки на длине волны 1230 нм. Впервые для формирования лазерного импульса необходимой формы была использована акустооптическая дисперсионная линия задержки, которая позволяла адаптивно изменять временную задержку между двумя chirпированными импульсами и, следовательно, изменять центральную частоту генерации терагерцевых импульсов, а также управлять шириной их спектров, изменяя длительность chirпированного импульса накачки.

Получена генерация импульсов терагерцевого излучения с шириной спектра 250 ГГц в частотном диапазоне 0.5–2 ТГц с энергиями от 1 до 6 мкДж. Преимуществом метода является возможность компенсировать уменьшение энергии лазерного импульса после дифракции в акустооптической дисперсионной линии задержки в усилительных каскадах лазерной системы, работающих в режиме насыщения. Данный метод позволяет практически в реальном времени адаптивно управлять частотой и шириной спектра генерируемых импульсов терагерцевого излучения.

Необходимо отметить, что применение данного метода формирования многопериодного режима генерации лазерной системы требует тщательной регулировки коэффициента усиления, т. к. в схеме усиления chirпированного импульса вместо одного растянутого во времени импульса усиливается последовательность более коротких импульсов.

Эксперименты проведены с использованием разработанной в ОИВТ РАН уникальной тераваттной фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы и оборудования, входящего в состав ЦКП «Лазерный фемтосекундный комплекс» ОИВТ РАН.

Акустооптическая дисперсионная линия задержки разработана в НТУЦ Акустооптики НИТУ «МИСиС» при поддержке проекта 278, выполняемого в рамках базовой части Государственного задания в сфере научной деятельности № 2014/113.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.613.21.0056, RFMEFI61316X0056) и Швейцарского национального научного фонда (проект IZLRZ2_164051).

1. Yeh K.-L., Hoffmann M.C., Hebling J., Nelson Keith A. *Appl. Phys. Lett.*, **90** (3), 177721 (2007).

2. Hirori H., Doi A., Blanchard F., Tanaka K. *Appl. Phys. Lett.*, **98** (3), 091106 (2011).
3. Huang S.W., Granados E., Huang W.R., Hong K.H., Zapata L.E., Kaertner F.X. *Opt. Lett.*, **38** (5), 796 (2013).
4. Juranić P.N., Stepanov A., Ischebeck R., Schlott V., Pradervand C., Patthey L., Radović M., Gorgisyan I., Rivkin L., Hauri C.P., Monoszlai B., Ivanov R., Peier P., Liu J., Togashi T., Owada S., Ogawa K., Katayama T., Yabashi M., Abela R. *Opt. Express*, **22** (24), 30004 (2014).
5. Hochstrasser D.J., Cook R.M. *Opt. Lett.*, **25** (16), 1210 (2000).
6. Daranciang D., Goodfellow J., Fuchs M., Wen H., Ghimire Sh., Reis D.A., Loos H., Fisher A.S., Lindenberg A.M. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 141117 (2011).
7. Nahata A., Weling A.S., Heinz T.F. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2321 (1996).
8. Blanchard F., Razzari L., Bandulet H., et al. *Opt. Express*, **15** (20), 13212 (2007).
9. Hoffmann M.C., Yeh Ka-Lo, Hebling J., Nelson K.A. *Opt. Express*, **15** (18), 11706 (2007).
10. Fabian Brunner D.J., Lee S.-H., Kwon O., Feurer T. *Opt. Mater. Express*, **4** (8), 1587 (2014).
11. Vicario C., Ovchinnikov A.V., Ashitkov S.I., et al. *Opt. Lett.*, **39** (23), 6632 (2014).
12. Krause J., Wagner M., Winnerl S., et al. *Opt. Express*, **19** (20), 19114 (2011).
13. Chen Z., Zhou X., Werley C.A., Nelson K.A. *Appl. Phys. Lett.*, **99** (3), 071102 (2011).
14. Lu J., Hwang H.Y., Li X., Lee S.-H., et al. *Opt. Express*, **23** (17), 22723 (2015).
15. Avestisyan Y., Zhang C., Kawayama I., et al. *Opt. Express*, **20** (23), 25752 (2012).
16. Zhang C., Avetisyan Y., Abgaryan G., Kawayama I., Murakami H., Tonouchi M. *Opt. Lett.*, **38** (6), 953 (2013).
17. Ahn J., Efimov A.V., Averitt R.D., Taylor A.J. *Opt. Express*, **11** (20), 2486 (2003).
18. Molchanov V.Ya., Chizhikov S.I., Makarov O.Yu., Solodovnikov N.P., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Lozhkarev V.V., Yakovlev I.V. *Appl. Opt.*, **48** (7), 118 (2009).
19. Molchanov V.Ya., Yushkov K.B. *Opt. Express*, **22** (13), 15668 (2014).
20. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г. *Теория и практика современной акустооптики* (М.: Изд. дом «МИСиС», 2015).
21. Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Hauri C.P. *Opt. Express*, **23** (4), 4573 (2015).
22. Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Конященко А.В., Овчинников А.В., Фортгов В.Е. *Квантовая электроника*, **34** (6), 506 (2004).
23. Молчанов В.Я., Волошинов В.Б., Макаров О.Ю. *Квантовая электроника*, **39** (4), 353 (2009).
24. Chizhikov S.I., Garanin S.G., Goryachev L.V., Molchanov V.Ya., Romanov V.V., Rukavishnikov N.N., Sokolovskii S.V., Voronich I.N., Yushkov K.B. *Laser Phys. Lett.*, **10** (1), 015301 (2013).
25. Lee Yun-Shik, Hurlbut W.C., Vodopyanov K. L., Fejer M.M., Kozlov V.G. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (3), 181104 (2006).
26. Weling A.S., Auston D.H. *J. Opt. Soc. Am. B*, **13** (12), 2783 (1996).