УДК 621.372

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ОДНОДОМЕННОМ КРИСТАЛЛЕ LINbO₃ С ПОМОЩЬЮ СТУПЕНЧАТОЙ ФАЗОВОЙ МАСКИ

Г.К. АБГАРЯН^{*}, Ю.О. АВЕТИСЯН, А.О. МАКАРЯН, В.Р. ТАТЕВОСЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: gevorg.gak@gmail.com

(Поступила в редакцию 14 октября 2015 г.)

Рассмотрена новая схема для эффективной генерация широкополосного терагерцового излучения с помощью оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в монодоменном кристалле ниобата лития, оснащенном ступенчатой фазовой маской (СФМ). Показано, что с помощью СФМ можно обеспечить синхронизм для всех спектральных компонент терагерцового импульса, осуществляя тем самим эффективное преобразование лазерного излучения в терагерцовый диапазон. Исследовано угловое распределение спектральных компонент, а также временная форма терагерцовых импульсов в волновой зоне. Результаты исследований могут найти применение в спектроскопии временной области, визуализации скрытых объектов и т. д.

1. Введение

Электромагнитные волны терагерцового диапазона (~0.1–10 ТГц) занимают промежуточную область между СВЧ и ИК диапазонами и представляют значительный интерес для различных применений в областях высокоскоростной связи, молекулярной спектроскопии, медицинской диагностики, в системах безопасности, для визуализации объектов и т. д. [1,2]. Несмотря на большой прорыв последних десятилетий в области создания источников терагерцового излучения, эта область по-прежнему остается одним из технически слабообеспеченных участков спектра. Это стимулирует многих исследователей к поиску новых методов для создания высокоэффективных и доступных терагерцовых источников с необходимыми параметрами для применения в различных областях. Для многих приложений необходимы широкополосные терагерцовые импульсы. В частности, сверхширокополосные терагерцовые импульсы. В частности, ники спектроскопии временной области [3,4].

Генерация разностной частоты и оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов – широко используемые методы для генерации терагерцового излучения [4,5]. В работах [6–8] было показано, что при применении широкоапертурных пучков в кристалле ниобата лития, периодически поляризованном в поперечном направлении, может быть получена генерация квазимонохроматического терагерцового излучения с центральной частотой, определяемой пространственным периодом Λ периодически поляризованного кристалла ниобата лития (ППЛН). Периодически инвертированная доменная структура ППЛН кристалла служит для получения конструктивной интерференции терагерцовых волн, излучаемых из отдельных областей ППЛН. Однако, в этом случае частота генерации предопределена пространственным периодом доменной структуры ППЛН и поэтому она не может быть изменена после изготовления образцов.

Для преодоления этого недостатка при генерации узкополосного терагерцового излучения недавно были использованы монодоменные кристаллы ниобата лития, оснащенные различными фазовыми масками (ФМ). С помощью теневой или бинарной ФМ, размещенной перед монодоменным нелинейным кристаллом LiNbO₃ образуется виртуальная квазипериодическая структура, обеспечивающая фазовый синхронизм для определенной частоты терагерцового излучения. Частоту излучения можно перестраивать изменением шага ФМ.

В настоящей работе исследована эффективность генерации широкополосных терагерцовых импульсов при оптическом выпрямлении лазерного излучения в монодоменном кристалле LiNbO₃, имеющем форму треугольной призмы и оснащенном ступенчатой фазовой маской (СФМ). Исследованы также угловое распределение спектральных компонент и временная форма терагерцового импульса в волновой зоне.

2. Условие синхронизма при генерации широкополосного терагерцового излучения

Для получения широкополосного терагерцового излучения необходимо, чтобы терагерцовые импульсы, испускаемые из каждого слоя кристалла, достигали выходной поверхности кристалла одновременно. Это возможно, если терагерцовые импульсы, испускаемые от каждого слоя кристалла, достигают следующего слоя одновременно с оптическим импульсом. Для обеспечения этого условия необходимо иметь оптические пучки с наклонным амплитудным фронтом. Этого можно достичь, если оптический пучок пропустить через призмообразную ФМ, как показано на рис.1.

Для выполнения условия фазового согласования необходимо, чтобы

$$\frac{l_1}{c}n_m + \frac{l_2}{c}n_{\rm op} = \frac{l_1}{c} + \frac{l_3}{c}n_{\rm THz}, \qquad (1)$$

где $l_1 = AO = CD$, $l_2 = OM$, $l_3 = DM$, n_{op} – показатель преломления кристалла для оптического излучения, n_{THz} – показатель преломления кристалла для терагерцовых волн и n_m показатель преломления среды маски для оптического излучения (считается, что дисперсия пренебрежимо мала).



Рис.1. Схема генерации широкополосных терагерцовых импульсов.

Из (1) следует, что для получения желаемого наклона амплитудного фронта, угол α призмообразной ФМ (рис.1) должен быть равен:

$$\alpha = \arctan \frac{n_{\text{THz}} - n_{\text{op}} \cos \theta_{\text{Ch}}}{(n_m - 1) \sin \theta_{\text{Ch}}}, \qquad (2)$$

где $\theta_{Ch} = \arccos(n_{op} / n_{THz})$ – угол Черенкова для терагерцового излучения. Очевидно, что призма не может быть использована для получения необходимого наклона амплитудного фронта из-за преломления оптического луча.

В работе [9] был предложен метод обеспечения условия (1) для эффективной генерации широкополосных терагерцовых импульсов в монодоменном кристалле LiNbO₃. Метод основан на использовании СФМ, которая создает квазилинейные временные задержки фемтосекундного лазерного импульса в поперечном сечении оптического пучка.

3. Генерация терагерцовых импульсов в монодоменном кристалле LiNbO₃

Схематическое изображение кристалла LiNbO₃ с СФМ представлено на рис.2. Пучок фемтосекундного лазера распространяется параллельно оси x и поляризован вдоль оптической оси z кристалла. Каждый слой кристалла (вдоль направления распространения лазерного луча) излучает терагерцовые импульсы под углом Черенкова. При правильном выборе параметров СФМ терагерцовые импульсы достигнут выходной поверхности кристалла одновременно.

Параметры СФМ следует выбрать, исходя из следующих соображений. Для обеспечения распространения лазерного пучка в СФМ без дифракции размер шага маски должен быть значительно больше длины волны лазерного излучения. Однако, для обеспечения конструктивной интерференции всех испускаемых терагерцовых импульсов из разных слоев кристалла размер шага СФМ не может быть выбран больше половины длины волны терагерцового излучения [7].

Принимая во внимание потери терагерцового излучения в нелинейном кристалле, нет смысла использовать лазерные пучки с поперечными размерами



Рис.2. Схематическое изображение кристалла LiNbO₃ со СФМ для эффективной генерации широкополосных терагерцовых импульсов.

более, чем $1/\beta$ (β – коэффициент поглощения). Следовательно, разумно ограничить также поперечный размер *d* нелинейного кристалла ($d_{\text{max}} \approx 1/\beta$). При использовании в качестве материала СФМ кристаллического кварца с поперечным размером *d* = 1 мм для длины маски получим *l* ≈ 8 мм. Во избежание дифракционных искажений возбуждающих лазерных импульсов, слои маски можно отделить друг от друга тонкими зеркальными покрытиями.

4. Угловая зависимость спектра и временная форма терагерцовых импульсов в волновой зоне

При правильном выборе параметров СФМ разные части выходной поверхности кристалла будут излучать терагерцовые импульсы одновременно. Однако, амплитуды импульсов, излучаемых из разных частей поверхности кристалла будут отличаться друг от друга.

Терагерцовое поле по выходной поверхности нелинейного кристалла будет распределяться следующим образом:

$$E(t) = kS_1(t), \tag{3}$$

где $S_1(t)$ – терагерцовое поле, испускаемое под углом Черенкова от одной ячейки нелинейного кристалла (рис.2), а k – количество ячеек (слоев) от нижнего торца до выходной поверхности кристалла. Если СФМ имеет m ступеней, то количество синфазно излучающих участков на выходной поверхности кристалла также будет равняться m.

Нетрудно увидеть, что для первых *p* участков количество *k* ячеек с возрастанием количества *i* ступеней (начиная с точки В на рис.2) увеличивается по закону k = i [q / p], а для дальнейших *q* участков – уменьшается с возрастанием *i* по закону k = m - i. Отметим, что p + q = m и $q = m[\sin^2 \theta_{Ch}]$.

Таким образом, для распределения терагерцового поля по выходной поверхности нелинейного кристалла в зависимости от *i* получим

$$E_i(t) = \begin{cases} \left(\frac{iq}{p}\right) S_1(t), \ i \le p, \\ (m-i)S_1(t), \ i > p. \end{cases}$$

$$\tag{4}$$

В силу обеспечения синхронизма для всего спектра амплитуды всех спектральных составляющих терагерцового импульса на выходной поверхности нелинейного кристалла будут распределены аналогичным образом:

$$E_i(f) = \begin{cases} (iq/p)S_1(f), i \le p, \\ (m-i)S_1(f), i > p. \end{cases}$$
(5)

Для получения углового распределения спектральных компонент терагерцового излучения в волновой зоне необходимо просуммировать поле, излучаемое со всей выходной поверхности кристалла с учетом фазовых задержек

$$E(\alpha, f) = S(f) \left(\sum_{j=1}^{p} (jq/p) \cos\left[j\varphi(f, \alpha)\right] + \sum_{j=p+1}^{m} (m-j) \cos\left[j\varphi(f, \alpha)\right] \right), \quad (6)$$

где α – угол между нормалью к выходной поверхности кристалла и направлением наблюдения, $\varphi(f, \alpha) = 2\pi f b \sin \alpha / (cm \cos \theta_{Ch})$ – элементарная фазовая задержка (между соседними излучающими участками) спектральной компоненты с частотой f под углом наблюдения α и c – скорость света в вакууме.

На рис.За показано угловое распределение спектральных компонент терагерцового импульса в волновой зоне при гауссовской форме спектра терагерцового импульса $(S(f) = \exp(f - 0.5)^2)$ с центральной частотой 0.5 ТГц, излучаемого из одной элементарной ячейки кристалла, когда поперечный размер фазовой маски составляет d = 1 мм, а количество ступеней СФМ m = 40.

С помощью обратного преобразования Фурье нетрудно найти временную форму и угловое распределение терагерцовых импульсов

$$E(\alpha,t) = \int_{\Delta f} S(f) \cos(2\pi ft) \times \left(\sum_{j=1}^{p} (jq/p) \cos[j\varphi(f,\alpha)] + \sum_{j=p+1}^{m} (m-j) \cos[j\varphi(f,\alpha)] \right) df.$$
(7)

Как видно из рис.3а. высокочастотные спектральные компоненты терагерцового импульса концентрируются вокруг нормали к выходной поверхности кристалла. Раскрыв диаграммы направленности для спектральной компоненты с частотой f = 1 ТГц на уровне 0.5 (по мощности) составляет примерно 5°



Рис.3. (а) Угловое распределение спектральных компонент широкополосного ТГц излучения. (б) Зависимость временной формы терагерцового импульса от направления излучения.

(~ 0.085 рад), а низкочастотные составляющие излучаются с большим раскрывом диаграммы. Для спектральной компоненты с f = 0.1 ТГц раскрыв составляет почти 60° (~1 рад). Такое угловое распределение приводит к искажению временной формы терагерцового импульса в зависимости от направления излучения (рис.3b). Неискаженные импульсы излучаются только по направлению нормали к выходной поверхности нелинейного кристалла ($\alpha = 0$).

5. Заключение

Рассмотрена генерация широкополосного терагерцового излучения с помощью оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в монодоменном кристалле ниобата лития, оснащенном СФМ. Показано, что с помощью СФМ можно обеспечить синхронизм для всех спектральных компонент терагерцового импульса, обеспечивая тем самим эффективное преобразование лазерного излучения в терагерцовый диапазон. Рассчитано угловое распределение спектральных компонент широкополосного терагерцового излучения, а также временная форма терагерцового импульса.

Таким образом, с помощью ступенчатой фазовой маски можно генерировать остронаправленное и достаточно широкополосное терагерцовое излучение, которое можно использовать для визуализации скрытых предметов, в спектроскопии временной области и др.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. J. Federici, L. Moeller. J. Appl. Phys., 107, 111101 (2010).
- S. Yoshida, K. Suizu, E. Kato, Y. Nakagomi, Y. Ogawa, K. Kawase. J. Mol. Spectrosc, 256, 146 (2009).
- 3. G.Kh. Kitaeva. Laser Phys. Lett., 5, 559 (2008).
- 4. M. Tonouchi. Nat. Photonics, 1, 97 (2007).
- 5. Y.S. Lee. Principles of Terahertz Science and Technology, Springer, 2009.
- 6. C. Zhang, Yu. Avetisyan, A. Glosser, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi. Optics Express, **20**, 5784 (2012).
- 7. Yu. Avetisyan, M. Tonouchi. Optics Letters, 37, 4155 (2012).
- 8. C. Zhang, Y. Avetisyan, G. Abgaryan, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi. Opt. Lett., **38**, 953, (2013).
- G.K. Abgaryan, Yu.H. Avetisyan, A.H. Makaryan, V.R. Tadevosyan. Proc. Int. Conf. Microwave and THz Technologies and Applications, 13–16 (2014).

INVESTIGATION OF PARAMETERS OF TERAHERTZ PULSES GENERATED IN SINGLE-DOMAIN LINBO₃ CRYSTAL BY STEP-WISE PHASE MASK G.K. ABGARYAN, YU.H. AVETISYAN, A.H. MAKARYAN, V.R. TADEVOSYAN

A new scheme for the efficient generation of broadband terahertz radiation by optical rectification of femtosecond laser pulses in the single-domain lithium niobate crystal, equipped with the step-wise phase mask (SPM) was considered. It is shown that using SPM can provide phase matching for all spectral components of the terahertz pulse by providing effective conversion of laser radiation in the terahertz region. The angular distribution of the spectral components, as well as a temporal form of terahertz pulses in the wave zone was investigated. Results of studies can be used in time-domain spectroscopy, imaging of hidden objects, etc.