

Генерация терагерцового импульса в нелинейном кристалле GaSe, частично заполняющем волновод

А.С. Никогосян¹, М.А. Казарян², В.И. Сачков^{2,3,4*}

¹Факультет радиофизики, Ереванский государственный университет
0025, г. Ереван, ул. А. Манугяна, 1, Армения

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
117991, г. Москва, Ленинский пр., 53, Россия

³СФТИ, Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, Новособорная пл., 1, Россия

⁴Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, Алтайский край, Россия

Поступила в редакцию 22.10.2011 г.

Проведены численные расчеты, показывающие, что фазовый синхронизм может быть осуществлен как для основной моды H_{10} , так и для высших типов мод H_{m0} волновода в области 44 ГГц – 9,615 ТГц. Показано, что, изменяя толщину нелинейного кристалла и его положение по отношению к узкой стороне волновода, можно управлять эффективностью преобразования волн типа H_{m0} , а также спектральным составом и временным поведением терагерцового импульса.

Ключевые слова: генерация терагерцового импульса, нелинейные кристаллы; generation of terahertz impuls, nonlinear cristalls.

Введение

Методы генерации терагерцового (ТГц) излучения с длительностью один или несколько периодов колебаний (в спектральном диапазоне от 0,1 до 30 ТГц, или от миллиметровых волн до далекой инфракрасной области) нашли широкое и перспективное применение в системах имиджинга, используемых в медицине и безопасности, в космических исследованиях, в системах зондирования, а также в системах высокоскоростной связи и терагерцовой волноводной спектроскопии высокого разрешения [1–4]. Однако величина мощности генерируемого терагерцового излучения ограничивает важные технические требования при формировании изображения и томографии.

В терагерцовой спектроскопии во временной области применяются излучатели, основанные как на нелинейном эффекте – преобразование частоты высокоинтенсивного лазерного излучения в нелинейных

оптических кристаллах (оптическое выпрямление), так и на линейном – индуцированном лазерным импульсом генерации носителей в полупроводниках (фотопроводящие антенны). В настоящее время терагерцовая фотопроводящая антенна может в лучшем случае излучать среднюю мощность порядка 1 мВт. Следовательно, увеличение при комнатной температуре мощности терагерцового излучения позволит улучшить эффективность работы систем формирования изображения.

Представлены результаты эффективной генерации терагерцового импульса методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейном кристалле GaSe, частично заполняющем поперечное сечение металлического прямоугольного волновода. Большие величины коэффициентов поглощения нелинейных кристаллов в терагерцовой области ограничивают эффективность преобразования и перестраиваемость терагерцового излучателя (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Кристалл	Показатель преломления		d_{ij} , пм/В	Коэффициент поглощения α , см ⁻¹	Область прозрачности, мкм
	n_{eff} (1,06 мкм)	$n_{eff}(\lambda_{ТГц})$			
LiNbO ₃	2,1567	5,2915	$d_{33} = 34,4$	$\alpha(0,9 \text{ ТГц}) = 14$ $\alpha(0,5 \text{ ТГц}) = 5$	0,33–5,5
GaAs	3,4850	3,5969	$d_{14} = 104$	$\alpha(0,1 \text{ ТГц}) = 0,05$	0,9–20
GaSe	2,5467	2,8314	$d_{22} = 54,4$	$\alpha(3 \text{ ТГц}) = 24$	0,65–18
DAST	2,2090	2,2804	$d_{11} = 313$	$\alpha(0,5 \text{ ТГц}) = 8,5$	0,71–2,1
ZnTe	2,78	3,2	$d_{14} = 65$	$\alpha(0,9 \text{ ТГц}) = 1,4$	0,7–2,4

* Анаида Сергеевна Никогосян (nika@ysu.am); Мишик Айразатович Казарян (kazar@sci.lebedev.ru); Виктор Иванович Сачков (itc@spti.tsu.ru).

Среди нелинейных оптических кристаллов, таких как LiNbO₃, LiIO₃, DAST, ZnTe, ZnSe, GaSe, GaAs, GaP и InAs, кристалл GaSe имеет наименьший коэффициент поглощения. По этой причине фазовый синхронизм в кристалле GaSe может быть достигнут в сверхшироком диапазоне частот. Кроме того, кристалл GaSe имеет высокий порог оптического повреждения ~ 35 МВт/см², высокий коэффициент нелинейности второго порядка $d_{22} = 54$ пм/В и большой показатель качества $d_{eff}^2/n^3\alpha^2$, который на порядок ~ $9 \cdot 10^4$ больше, чем у кристалла LiNbO₃, на частоте 1,5 ТГц [5]. Благодаря этим свойствам кристалл GaSe является превосходным материалом для эффективной генерации терагерцового излучения.

1. Фазовый синхронизм в волноводе, частично заполненном кристаллом GaSe

Генерация широкополосного терагерцового импульса в нелинейном кристалле оптическим выпрямлением фемтосекундного лазерного импульса эффективна, когда условие фазового синхронизма обеспечивается для всех спектральных компонентов лазерного и ТГц-импульсов. В этом случае форма огибающей терагерцовых импульсов повторяет форму огибающей оптических лазерных импульсов. Условие фазового синхронизма является следствием законов сохранения энергии и импульса для волн, участвующих в нелинейном процессе. Условие фазового синхронизма, налагаемое законами сохранения, эквивалентно обеспечению равенства групповой скорости лазерного импульса и фазовой скорости терагерцовой волны. При нелинейном преобразовании частоты, из-за дисперсии в электрооптических кристаллах, очень трудно на практике обеспечить условие фазового синхронизма для всех взаимодействующих спектральных компонент оптического и ТГц-импульсов. Рассогласование Δk между оптической и терагерцовой волнами и длина когерентности L_{coh} определяются следующими соотношениями:

$$\Delta k = \frac{\Omega}{c} \left[n(\omega_0) + \omega_0 \frac{\delta n(\omega_0)}{\delta(\omega_0)} - n(\omega_{ТГц}) \right]; \quad (1)$$

$$L_{coh} = \pi / (\Delta k), \quad (2)$$

где $n(\omega_0)$ и $n(\omega_{ТГц})$ — показатели преломления кристалла GaSe в оптической и терагерцовой областях спектра соответственно; c — фазовая скорость терагерцовой волны; Ω — фазовая скорость оптической волны.

Эффективное преобразование энергии возможно только в пределах длины когерентности, которая является длиной формирования ТГц-поля. Длина когерентности L_{coh} — наименьшая пространственная величина в кристалле, где имеет место накопление нелинейного эффекта. При осуществлении условия фазового синхронизма, $\Delta k = 0$, длина когерентности становится бесконечно большой величиной [6]. В этом случае интенсивность терагерцовой волны пропорциональна квадрату длины кристалла L ($L < L_{coh}$).

При фазовом синхронизме в кристалле с высокой нелинейной восприимчивостью и слабым поглощением оптического и ТГц-излучений можно достичь высокой эффективности преобразования мощности терагерцового излучения при увеличении длины кристалла.

Условие фазового синхронизма для определенной полосы частот может быть реализовано при использовании полого прямоугольного металлического волновода, частично заполненного нелинейными кристаллами [7]. В этом случае кристалл действует как нелинейный преобразователь частоты, а структура «волновод — кристалл» выполняет функцию устройства, изменяющего фазовую скорость терагерцовой волны до групповой скорости лазерного импульса (рис. 1).

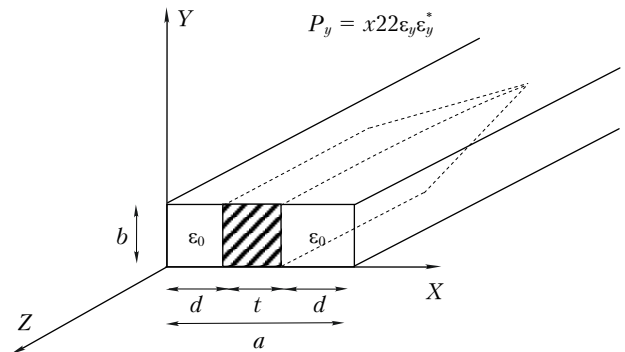


Рис. 1. Кристалл GaSe, расположенный центрально-симметрично в полом металлическом волноводе прямоугольного сечения

В пустом волноводе фазовая скорость терагерцовой волны превышает фазовую скорость электромагнитной волны в свободном пространстве, т.е. скорость света. В максимально заполненном кристаллом волноводе фазовая скорость терагерцовой волны меньше, чем скорость оптической волны, так как показатель преломления кристалла в терагерцовой области, как правило, больше, чем в оптической (см. табл. 1).

Терагерцовый волновод слабо влияет на распространение ультракороткого оптического импульса в кристалле. Следовательно, когда кристалл находится в волноводе или в свободном пространстве, групповая скорость оптического излучения будет иметь одинаковую величину. Таким образом, подбирая степень заполнения волновода кристаллом и ее расположение относительно узкой стенки волновода, можно управлять $n_{eff}(\lambda_{ТГц})$ и областью частот, для которой обеспечивается условие фазового синхронизма.

Значение эффективного показателя преломления $n_{eff}(\lambda_{ТГц})$ для нелинейной структуры «кристалл — волновод» можно получить из уравнений Максвелла, описывающих распространение волны в волноводе. Толщина кристалла, необходимая для обеспечения фазового синхронизма, определяется из дисперсионных трансцендентных уравнений [8]. В случае центрально-симметричного расположения кристалла в волноводе дисперсионные уравнения для нечетных и четных ТЕ-типов волн [9] имеют соответственно следующий вид:

$$\sqrt{n_{eff}^2 - 1} \tan\left(\pi k_1 k_2 \sqrt{\varepsilon - n_{eff}^2}\right) =$$

$$= \sqrt{\varepsilon - n_{eff}^2} \tanh\left(\pi(1 - k_1) k_2 \sqrt{n_{eff}^2 - 1}\right), \quad (3)$$

$$\sqrt{n_{eff}^2 - 1} \cot\left(\pi k_1 k_2 \sqrt{\varepsilon - n_{eff}^2}\right) =$$

$$= \sqrt{\varepsilon - n_{eff}^2} \tanh\left(\pi(1 - k_1) k_2 \sqrt{n_{eff}^2 - 1}\right), \quad (4)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость кристалла для терагерцовой волны; $k_1 = t/a$ – нормированная толщина кристалла, $k_2 = a/\lambda_{ТГц}$ – величина, характеризующая тип волны в волноводе; $n_{eff}(\lambda_{ТГц}) = c/v(\lambda_{ТГц})$ – коэффициент замедления терагерцовой волны, или эффективный показатель преломления структуры «кристалл – волновод»; $v(\lambda_{ТГц})$ – частота, соответствующая длине волны в терагерцевой области.

В выбранной геометрии кристалла вектор нелинейной поляризации P кристалла параллелен напряженности лазерного поля E и узкой стенке прямоугольного волновода, поэтому нелинейная поляризация кристалла $P_y = d_{22}\varepsilon_y \varepsilon_y^*$ определяется нелинейным оптическим коэффициентом второго порядка $d_{22} = 54$ м/В. Оптическое возбуждение кристалла GaSe осуществляется фемтосекундным лазерным импульсом с $\lambda = 0,8$ мкм. Поперечные сечения волноводов имеют размеры $0,25 \times 0,8$ мм, $1,8 \times 0,9$ мм и $2,4 \times 1,2$ мм [5].

При коллинеарном взаимодействии оптической и терагерцовой волн в кристалле GaSe необходимая толщина кристалла определяется зависимостью n_{eff} от k_1 и k_2 для данной величины диэлектрической восприимчивости обыкновенной ТГц-волны $\varepsilon^o(\lambda_{ТГц}) = 11,47644$ [10] из уравнений (3) и (4). Вычисленные значения n_{eff} , зависящие от k_1 (толщины кристалла $t = ak_1$) и некоторых значений k_2 в частотной полосе основной моды типа H_{10} волновода, показаны на рис. 2.

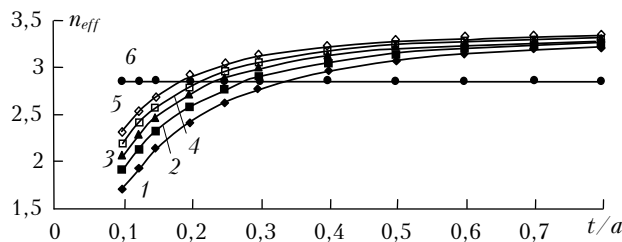


Рис. 2. Коэффициент замедления терагерцового излучения в зависимости от $k_1 = t/a$ для кристалла GaSe, когда $n_{opt}^o(0,8 \text{ мкм}) = 2,8537$: кривая 1 – $k_2 = a/\lambda = 0,5$; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 0,8; 5 – 0,9; 6 – 1

В случае тонкого кристалла ($k_2 < 0,2$) n_{eff} быстро растет и стремится к величине показателя преломления терагерцовой волны кристалла GaSe, находящейся в свободном пространстве. Линия, параллельная оси k_1 , имеющая значение $n_{eff} = n^o(0,8 \text{ мкм}) = 2,85369$ (табл. 2) [11], пересекает семейство кривых $n_{eff} = f(t/a)$ в точках, определяющих $k_1 = t/a$

или толщины кристаллов, для которых выполняется условие фазового синхронизма.

Таблица 2

Оптические показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей кристалла GaSe

λ , мкм	n_o	n_{eff}
0,8	2,853695	2,50466
1,06	2,796581	2,451335
100	3,254576	2,759595
3000	3,387695	2,831383

Примечание.

$n_{eff}(0,8 \text{ мкм}) = 2,5047$; $n_{eff}(3 \text{ ТГц} \leftrightarrow 100 \text{ мкм}) = 2,83138$;
 $n^o(0,8 \text{ мкм}) = 2,85369$; $n^o(3 \text{ ТГц} \leftrightarrow 100 \text{ мкм}) = 2,38769$.

Когда параметры k_1 и k_2 малы, уравнения (3) и (4) имеют одно решение. Рост k_1 и k_2 приводит к увеличению числа корней уравнения. Это означает, что рост толщины кристалла k_2 приводит к увеличению возможности распространения высших мод с тем же самым n_{eff} .

Заключение

Итак, мы выявили, что изменением толщины кристалла и его положения по отношению к узкой стороне волновода можно управлять эффективностью преобразования волн типа H_{n0} , а также спектральным составом и временным поведением терагерцового импульса. В частности, результаты численных расчетов показывают, что фазовый синхронизм может быть осуществлен как для основной моды H_{10} , так и для высших типов мод H_{n0} волновода в области от 44 ГГц до 9,615 ТГц. Волновод, частично заполненный нелинейными кристаллами, может быть использован в качестве перестраиваемого когерентного излучателя. В частично заполненном нелинейным кристаллом волноводе при выполнении условий фазового синхронизма получено увеличение эффективности генерации на два порядка величины. Такой сильный эффект позволит улучшить характеристики когерентных терагерцовых спектрально изображающих и томографических систем в плане глубины проникновения, отношения сигнал-шум и динамического диапазона.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России».

1. Zinov'ev N.N., Nikoghosyan A.S., Chamberlain J.M. // Proc. SPIE. 2006. V. 6257. P. 62570P1–62570P8.
2. Chan W.L., Deibel J., Mittleman D.M. Imagin with terahertz relation // Rep. Prog. Phys. 2007. V. 70, N 8. P. 1325–1379.
3. Chen Q., Jiang Z., Xu G.X., Zhang X.-C. Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture // Opt. Lett. 2000. V. 25, N 15. P. 1122–1124.
4. Jeon T.I., Grischkowsky D., Mukherjee A.K., Menon R. Electrical characterization of conducting polypyrrole by

- THz time – do main spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 77, N 16. P. 2452–2454.
5. Shi W., Ding Y.J., Fernelius N., Vodopyanov K. Efficient, tunable, and coherent 0.18–5.27-THz source based on GaSe crystal // Opt. Lett. 2002. V. 27, N 16. P. 1454–1456.
 6. Yariv A. Quantum. Electron. N.Y.: Wiley, 1988. 570 p.
 7. Nikoghosyan A.S., Martirosyan P.M., Hakhoumian A.A., Chamberlain J.M., Dudley R.A., Zinov'ev N.N. // J. Electromagnetic Waves and Electronic Systems. 2006. V. 11, N 4. P. 47–55.
 8. Piceidi N., Le Toullec R., Mejatty M., Balkans M. Refractive index of GaSe between 0.45 μm and 330 μm // Appl. Opt. 1977. V. 16, N 5. P. 1236–1238.
 9. Vodopyanov K.L., Kulevskii L.A. New dispersion relationships for GaSe in the 0.65–18 μm spectral region // Opt. Commun. 1995. V. 118. P. 375–378.
 10. Tanabe T., Suto Ken, Jun-ichi Nishizawa, Tetsuo Sasaki. Characteristics of THz wave generation from GaSe crystals // J. Phys. D. 2004. V. 37. P. 155–158.
 11. Nikoghosyan A.S., Laziev E.M. Phase Synchronization and ultrashort SHF Pulses Generation in waveguides // Proc. SPIE. 1991. V. 1842. P. 113–118.

A.S. Nikoghosyan, M.A. Kazaryan, V.I. Sachkov. Terahertz pulse generation in the nonlinear crystal GaSe, partly filling the waveguide.

Numerical calculations have shown that the phase synchronism can be realized both for H_{10} ground mode and higher types of H_{n0} modes of the waveguide in range 44 GHz – 9.615 THz. It is shown that it is possible to control for the efficiency of transformation of waves of H_{n0} type as well as spectral composition and time behavior of the THz pulse through variation of the nonlinear crystal thickness and its position relative to the narrow side of the waveguide.