

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА В НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЯЮЩЕМ ВОЛНОВОД С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

А.С. НИКОГОСЯН^{1*}, Г.А. ПАРСАМЯН¹,
А.А. ПОГОСЯН², В.Р. ТАТЕВОСЯН¹

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²University of Manchester, Manchester, United Kingdom

*e-mail: nika@ysu.am

(Поступила в редакцию 19 марта 2025 г.)

Проведено исследование модового состава терагерцового (ТГц) импульса в волноводе с параллельными пластинами, между которыми расположен нелинейный кристалл LiNbO_3 или 4-N,N-диметиламино-4'-N'-метилстилбазолия тозилат (DAST). ТГц импульс возбуждается дистанционно в нелинейном кристалле с помощью фемтосекундного импульса лазера Ti:Sapphire. Численный анализ модового состава терагерцового импульса в структуре «волновод из металлических параллельных пластин, частично заполненный нелинейным кристаллом» был проведен с использованием программного обеспечения MATCAD и COMSOL. Показана возможность достижения одномодовой связи между входным линейно-поляризованным оптическим импульсом и терагерцовым импульсом со сверхширокой спектральной полосой 0.1–2.6 ТГц. Численным определением ширины и высоты нелинейного кристалла, при известных значениях размеров волновода и диэлектрической проницаемости кристалла ϵ , достигнута возможность одномодового распространения ТГц-импульса. По мере увеличения частоты в спектре ТГц-импульса большая часть энергии импульса распространяется внутри кристалла, а остальная часть снаружи.

1. Введение

Эффективные широкополосные ТГц волноводы необходимы для различных приложений ТГц излучения [1–5], включая зондирование, спектроскопию, а также в разработке интегральных волноводных схем, способных генерировать как непрерывное, так и импульсное ТГц-излучение и когерентно их детектировать. Широкополосные ТГц волноводы с различными преимуществами и ограничениями были разработаны и исследованы в работах [6–13]. Параллельно-пластинчатый волновод, обеспечивающий неискаженное распространение одномодовых поперечных электромагнитных (ТЕМ) терагерцовых волн, был исследован в работе [11]. Для преодоления проблемы слабой пространственной локализации ТГц поля в параллельном металлическом волноводе в работе [12] был предложен волновод с диэлектрической пластиной из линейного материала

(стекло с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 5.5$), находящейся между параллельными пластинами. В таком волноводе ТГц-излучение, возбуждаемое коаксиальным штырем, распространялось в виде основной моды TE_{10} в диапазоне частот 0.4–1.0 ТГц, при этом ТГц мощность была почти полностью локализована внутри диэлектрической пластины, без излучения из волновода. Режим основной моды устраняет состояние отсечки и позволяет использовать физически более тонкие волноводы, что является важным преимуществом для применения в ТГц интегральных схемах. В прямоугольном металлическом волноводе, частично заполненном нелинейным кристаллом, возможно обеспечить фазовое согласование между групповой скоростью оптического импульса и фазовой скоростью ТГц волны [14], уменьшить потери на поглощение [15], изменить критические частоты [16] и обеспечить распространение ТГц-импульса в виде основной моды [17].

В настоящей работе впервые исследована новая волноведущая структура – волновод с параллельными пластинами и нелинейным кристаллом, расположенным между ними. В качестве нелинейных материалов рассматриваются кристаллы $LiNbO_3$ и DAST, которые являются эффективными преобразователями частоты оптического излучения. Этот волновод отличается от волноводов [6–13] тем, что ТГц-излучение возбуждается дистанционно внутри волновода (генерируется в нелинейном кристалле), а не традиционно – с помощью коаксиального зонда [12] или рупора [18]. Основной целью данной работы является исследование модового состава широкополосного ТГц-импульса в диапазоне частот от 0.1 до 2.6 ТГц. Терагерцовый импульс представлен как линейная суперпозиция связанных мод TE_{m0} (где n – нечетное целое число), распространяющихся в нелинейном кристалле, расположенном центрально-симметрично между параллельными металлическими пластинами [7].

2. Результаты и обсуждение

Терагерцовый импульс генерируется дистанционно в нелинейном кристалле (ТГц антенне) с помощью фемтосекундного импульса Ti:Sapphire лазера с длительностью импульса 100 фс и центральной длиной волны 800 нм (рис.1). Линейно-поляризованный по оси z оптический импульс распространяется вдоль

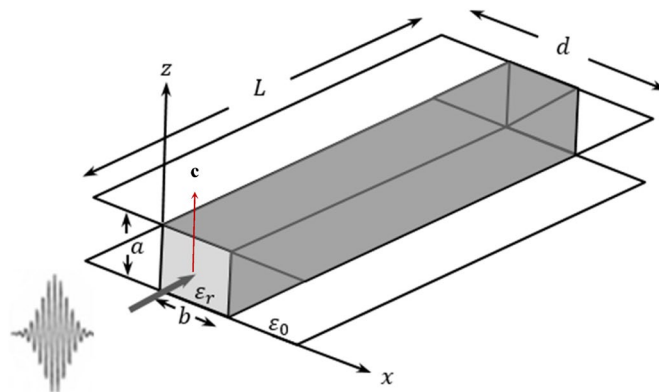


Рис.1 Нелинейный кристалл, частично заполняющий волновод с параллельными металлическими пластинами.

оси y . Терагерцовый импульс формируется в нелинейном кристалле за счет оптического выпрямления – нелинейного процесса второго порядка, при котором происходит смешивание спектральных компонент фемтосекундного оптического лазерного импульса. Оптическая ось кристалла LiNbO_3 (ось c) ориентирована вдоль оси z для обеспечения генерации ТГц излучения с линейной поляризацией, что связано с наибольшей компонентой тензора нелинейной восприимчивости кристалла χ_{33} .

Спектр ТГц-импульса, полученный путем применения быстрого преобразования Фурье к временному профилю электрического поля ТГц-импульса, в кристаллах LiNbO_3 и DAST, изменяется от 0.1 до 2.6 ТГц [19]. Когерентное детектирование линейно-поляризованного фемтосекундного ТГц-импульса в диапазоне 0.1–2.6 ТГц осуществлялось с помощью динамической электрооптической ячейки (EOSC), состоящей из кристалла ZnTe толщиной 1 мм с ориентацией (110). Для различных приложений существенное значение имеет распространение широкополосного ТГц-импульса в волноводе в виде фундаментальной моды.

Распределение нормированных электрических компонент E_z в спектре ТГц-импульса в плоскости xz волновода с кристаллами LiNbO_3 или DAST было численно исследовано с целью определения модового состава распространяющегося терагерцового импульса с широким спектром в диапазоне 0.1–2.6 ТГц. Определены условия, когда ТГц-излучение распространяется в виде фундаментальной моды TE_{10} , или линейной суперпозиции высших нечетных типов волн TE_{n0} ($n = 1, 3, 5, \dots$).

Уравнения для электрической компоненты терагерцового поля E_z (спектральной компоненты ТГц-импульса) в волноводе с параллельными пластинами с кристаллом, расположенным центрально-симметрично между пластинами, в зависимости от частоты и диэлектрической восприимчивости кристалла высотой a и шириной b ($a = b$) (рис.1), имеют вид [12]:

$$E_z(x, f) = \begin{cases} E \exp[\gamma_0(x + b/2)] & -\infty < x \leq -b/2 \\ E \left\{ \cos \gamma_r(x + b/2) + \frac{\gamma_0}{\gamma_r} \sin[\gamma_r(x + b/2)] \right\} & -t/2 \leq x \leq b/2 \\ E \left[\cos(\gamma_r b) + \frac{\gamma_0}{\gamma_r} \sin(\gamma_r b) \right] \exp[-\gamma_0(x - b/2)] & b/2 \leq x < \infty, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\gamma_r = \sqrt{k_0^2 \epsilon_r - \beta^2} = k_0 \sqrt{\epsilon - \epsilon_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_0} = k_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} - 1}, \quad (3)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_0} = k_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} - 1}. \quad (4)$$

В уравнениях (2–4) β – постоянная распространения волновода с параллельными пластинами и кристаллом, k_0 – волновое число в свободном пространстве, ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость кристалла, ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость внешней области (воздуха) $\epsilon_0 = 1$, и $\mu = 1$ магнитная проницаемость воздуха. Численное определение E_z проводилось с использованием программного обеспечения MATCAD.

Распределение модуля нормированных электрических полей $|E_z|$ в плоскости

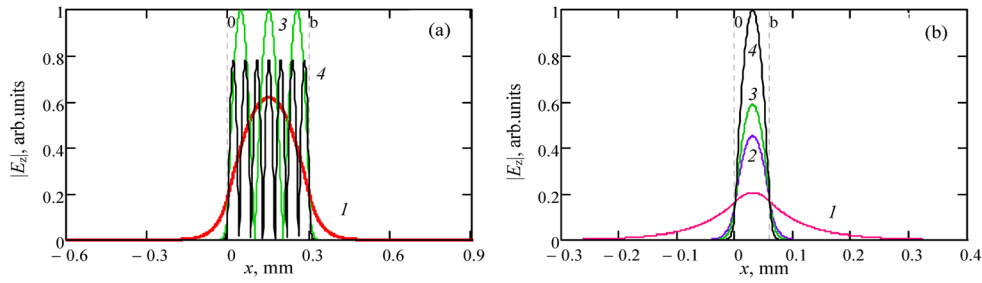


Рис.2 Распределение нормированной составляющей модуля электрического поля $|E_z|$ в волноводе с кристаллом LiNbO₃ в плоскости xz при толщине кристалла (a) $b = 0.3$ мм и (b) $b = 0.06$ мм, $d = 2.4$ мм при частотах спектральных компонент ТГц-импульса: 0.239 (1), 0.997 (2), 1.4 (3) и 2.6 ТГц (4).

xz кристалла LiNbO₃ ($\epsilon_r = 28$) показано на рис.2a,b, а для кристалла DAST ($\epsilon_r = 5.2$) – на рис.3a,b, для нескольких спектральных компонент в спектре ТГц импульса.

При толщине кристалла LiNbO₃ 0.3 мм (рис.2a) волны с частотами 0.239, 1.4 и 2.6 ТГц распространяются в виде мод TE₁₀, TE₃₀ и TE₇₀, соответственно. В спектральной полосе ТГц-импульса от 1.4 до 2.6 ТГц находятся частоты, которые могут распространяться как TE₅₀ мода (на рис.2a они не приведены, чтобы не нагромождать рисунок). Таким образом, ТГц-импульс с шириной спектра от 0.1 до 2.6 ТГц может распространяться не как сумма TE₁₀ + TE₃₀ + TE₇₀, а как сумма TE₁₀ + TE₃₀ + TE₅₀ + TE₇₀ мод. При уменьшении толщины кристалла до 60 мкм спектральные компоненты ТГц-импульса в полосе от 0.1 до 2.6 ТГц распространяются в виде основной моды TE₁₀ (рис.2b).

В кристалле DAST толщиной 1.92 мм волны с произвольно выбранными частотами из спектра ТГц-импульса – 0.118, 0.81 и 2.6 ТГц распространяются в виде мод TE₁₀, TE₅₀ и TE_{11,0}, соответственно (рис.3a). Следовательно, сверхширокополосный ТГц-импульс со спектральной полосой 0.1–2.6 ТГц распространяется в виде линейной суперпозиции типов волн TE₁₀ + TE₃₀ + TE₅₀ + ... + TE _{n ,0}, где $n = 11$ – нечетное число. Как видно из рис.3b, при уменьшении толщины кристалла до 115 мкм все спектральные компоненты ТГц-импульса распространяются в виде основной моды TE₁₀.

Картины распределения электрического поля внутри волновода для волн

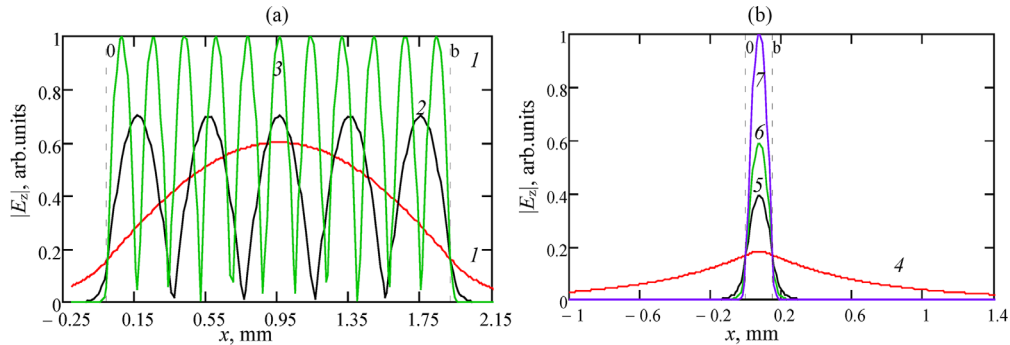


Рис.3 Распределение нормированной составляющей модуля электрического поля $|E_z|$ в кристалле DAST в плоскости xz при ширине кристалла (a) $b = 1.92$ мм для частот 0.118 (1), 0.810 (2) и 2.6 ТГц (3) и (b) $b = 115$ мкм для частот 0.118 (4), 0.810 (5), 1.4 (6) и 2.6 ТГц (7), $d = 2.4$ мм.

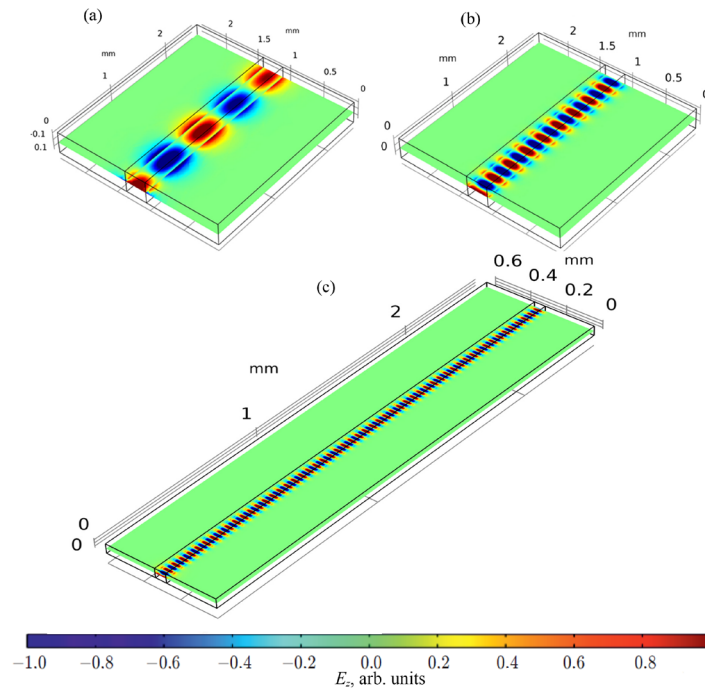


Рис.4. Распределение электрического поля моды TE_{10} внутри волновода с кристаллом $LiNbO_3$ для спектральных компонент ТГц-импульса (а) 0.14, (b) 0.24 ТГц при ширине кристалла $b = 0.3$ мм и (с) 1.4 ТГц при ширине кристалла $b = 0.06$ мм.

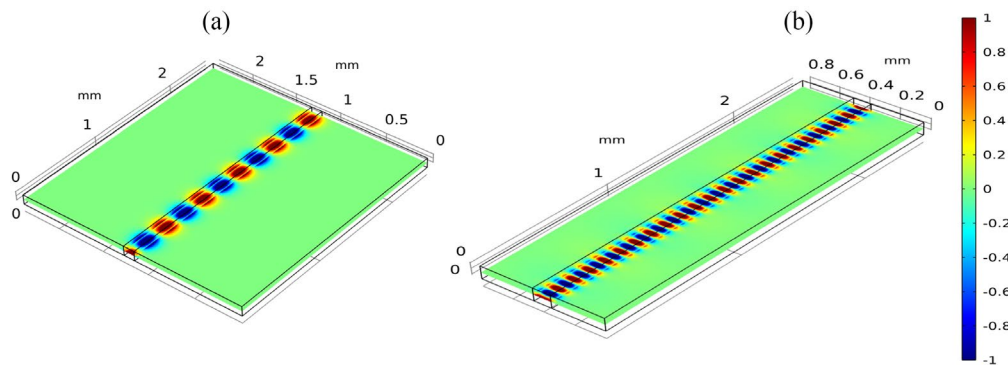


Рис.5. Распределение электрического поля в виде моды TE_{10} внутри волновода с кристаллом DAST для спектральных компонент ТГц-импульса с частотами (а) 0.81 и (b) 1.4 ТГц при ширине кристалла $b = 115$ мкм.

TE_{10} , полученные с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics®, показаны на рис.4 для кристалла $LiNbO_3$ и на рис.5 для кристалла DAST.

Распределение электрического поля TE_{10} моды внутри волновода с кристаллом DAST приведено для спектральных компонент ТГц-импульса на частотах 0.8 и 1.4 ТГц, поскольку на этих частотах экспериментально наблюдаются два максимума спектральной плотности [19].

Для увеличения масштаба области, занимаемой ТГц полем внутри кристаллов, на рис.4с представлен фрагмент волновода шириной 0.6 мм с кристаллом

LiNbO₃, а на рис.5b шириной 0.8 мм с кристаллом DAST, полученные из картины распределения электрического поля внутри волновода для волн TE₁₀ при заданной ширине волновода $d = 2.4$ мм.

Из рис.2–5 видно, что с увеличением частоты ТГц-излучения возрастает доля энергии, локализованной в кристалле. Волны, распространившись внутри кристалла на всю длину волновода $L = 2.5$ мм, остаются практически неизменными. Вся ТГц-энергия сосредоточена в кристаллической области, и излучение не выходит за пределы металлических пластин.

Отношение потока мощности, передаваемого вдоль нелинейного кристалла P_c , к общему потоку мощности P , распространяющемуся на единицу длины вдоль оси z волновода (где R – коэффициент локализации мощности в кристалле), определяется следующим уравнением:

$$R = \frac{P_c}{P} = \frac{1}{t + 2/\gamma_0} \left[t + \frac{2\gamma_0}{\gamma_r^2 + \gamma_0^2} \right]. \quad (5)$$

На рис.6 показана зависимость коэффициента локализации мощности R в кристалле от частоты для различных толщин кристалла LiNbO₃: 80, 150, 240 и 300 мкм. При фиксированной частоте ТГц-волны значение коэффициента R увеличивается с ростом толщины кристалла. Ниже 0.4 ТГц часть мощности моды HE₁₀ распространяется за пределами кристалла в воздухе между параллельными пластинами, не выходя за пределы волновода. Это обусловлено большим значением диэлектрической проницаемости кристалла LiNbO₃ по сравнению с кри-

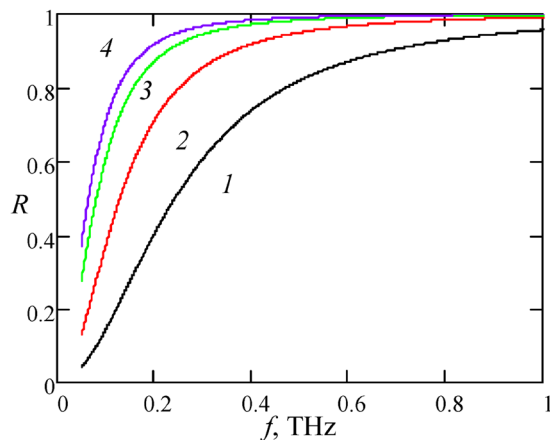


Рис.6 Зависимость коэффициента локализации мощности R в кристалле LiNbO₃ от частоты для различных значений толщины кристалла b : 0.08 (1), 0.15 (2), 0.24 (3) и 0.3 мм (4).

сталлом DAST. Распространение части ТГц-излучения в воздухе приводит к снижению потерь при распространении в волноводе и изменению эффективного показателя преломления в зависимости от толщины кристалла и частоты.

Распространение ТГц-импульса в волноводе, как фундаментальной TE₁₀ моды, имеет решающее значение в приложениях, где требуется управление пространственными и временными свойствами электромагнитной волны. Режим TE₁₀ обеспечивает четко определенное пространственное ограничение поля. При

работе в одномодовом режиме можно предотвратить дисперсию мод, а также помехи и, следовательно, ухудшение сигнала, поскольку моды высшего порядка имеют разные константы распространения, что приводит к уширению и искажению импульса.

Одномодовый источник терагерцовых-импульсов необходим для следующих современных приложений: высокоразрешающая волноводная терагерцовая спектроскопия и характеристика материалов, таких как полупроводники, сверхпроводники и биомолекулы, для обнаружения мельчайших изменений в материалах [20–22].

В ТГц-визуализации одномодовое распространение улучшает пространственное разрешение и контрастность [23, 24] при досмотре скрытых предметов в целях безопасности (например, наркотиков, взрывчаток и оружия).

В сверхширокополосных системах связи ТГц диапазона [25–28] с малыми потерями одномодовые источники в интегральных схемах обеспечивают эффективную генерацию и передачу ТГц-волн с минимальными потерями сигнала в одном компоненте. Одномодовое распространение обеспечивает низкую дисперсию и сохраняет целостность сигнала на больших расстояниях.

В квантовых вычислениях и квантовом управлении одномодовые ТГц-импульсы облегчают переходы в квантовых точках, сверхпроводящих кубитах, улучшая манипуляцию квантовым состоянием и управление им [23, 29].

В области ТГц-зондирования одномодовый ТГц-импульс позволяет проводить точные измерения показателя преломления, коэффициента поглощения и толщины тонких нанометрических пленок без многомодовых искажений, что повышает точность характеристики материалов [30–32].

3. Заключение

Проведен численный анализ распространения терагерцового импульса в волноводе с металлическими параллельными пластинами, частично заполненном нелинейным кристаллом, с использованием программных пакетов MATCAD и COMSOL.

Показано, что с уменьшением толщины нелинейного кристалла между пластинами расширяется полоса частот одномодового распространения ТГц-импульса в волноводе. В частности, для кристалла LiNbO_3 толщиной и высотой $a = b = 0.06$ мм спектральные компоненты терагерцового импульса распространяются внутри волновода с размерами $d = 2.4$ мм и $L = 2.5$ мм как основная волна TE_{10} , охватывая полосу частот от 0.239 до 2.6 ТГц. Аналогично, для кристалла DAST с $a = b = 115$ мкм терагерцовое излучение в полосе частот от 0.119 до 2.6 ТГц распространяется как волна TE_{10} . По мере увеличения диэлектрической проницаемости кристалла и частоты компонентов ТГц-импульса большая часть энергии импульса распространяется внутри кристалла, а остальная часть — снаружи. Таким образом, в волноводе с параллельными пластинами и встроенным кристаллом одномодовая связь линейно-поляризованного оптического импульса, сфокусированного на кристалле, с ТГц импульсом может быть достигнута в широком спектральном диапазоне частот (0.1–2.6 ТГц).

Выражаем благодарность Комитету по высшему образованию и науке Армении за финансовую поддержку научной работы Лаборатории субмиллиметровых волн ЕГУ.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **H.-W. Hübers, R. Eichholz, S.G. Pavlov, H. Richter.** J. Infrared Milli, Terahz. Waves, **34**, 325 (2013).
2. **N.N. Zinov'ev, A.S. Nikoghosyan, J.M. Chamberlain.** Proceedings of SPIE, **6257**, 62570P1 (2006).
3. **J.F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, D. Zimdars.** Semicond. Sci. Technol., IETE Technical Review, **20**, S266 (2005).
4. **Yi. Huang, Y. Shen, J. Wang.** Engineering, **22**, 106 (2023).
5. **X. Yang, X. Zhao, K. Yang, Y. Liu, Y. Liu¹, W. Fu, Y. Luo.** Trends in Biotechnology, **34**, 810 (2016).
6. **R.W. McGowan, G. Gallot, D. Grischkowsky.** Opt. Lett., **24**, 1431 (1999).
7. **G. Gallot, S.P. Jamison, R.W. McGowan, D. Grischkowsky.** J. Opt. Soc. Am., **B 17**, 851 (2000).
8. **S.P. Jamison, R.W. McGowan, D. Grischkowsky.** Appl. Phys. Lett., **76**, 1987 (2000).
9. **R. Mendis, D. Grischkowsky.** J. Appl. Phys., **88**, 4449 (2000).
10. **R. Wang, N. Knepper, N. Hossain, P. Marthi, J.-F. Milithaler, M. Margala.** Proc. 20th Int. Conf. on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 20), Buffalo, New York, USA, 1–4 (2017).
11. **R. Mendis, D. Grischkowsky.** Opt. Lett., **26**, 846 (2001).
12. **Y. Longfang, X. Ruimin, W. Zhihui, W. Lin.** Optics Express, **18**, 21725 (2010).
13. **G. de los Reyes, A. Quema, C. Ponseca, Jr., R. Pobr, R. Quiroga, S. Ono, H. Murakami, E. Estacio, N. Sarukura, K. Aosaki, Y. Sakane, H. Sato.** Applied Physics Letters, **89**, 211119 (2006).
14. **A.S. Nikoghosyan.** Quantum Electronics, **15**, 969 (1988).
15. **A.S. Nikoghosyan, R.M. Martirosyan, A.A. Hakhounian, A.H. Makaryan, V.R. Tadevosyan, G.N. Goltsman, S.V. Antipov.** J. Contemp. Phys., **54**, 97 (2019).
16. **A.S. Nikoghosyan, V.R. Tadevosyan, G.N. Goltsman, S.V. Antipov.** J. Contemp. Phys., **56**, 366 (2021).
17. **A.S. Nikoghosyan, V.R. Tadevosyan, G.N. Goltsman, S.V. Antipov.** Contemporary Physics: Conference Series, **2548**, 012013I (2023).
18. **J.A. G. Malherbe, J.H. Cloete, I.E. Losch.** IEEE Trans. Microwave Theory Tec., MTT-**33**, 539 (1985).
19. **A.S. Nikoghosyan, R.M. Martirosyan, A.A. Hakhounian.** Armenian Journal of Physics, **11**, 263 (2018).
20. **R. Mendis.** Electron. Lett., **42**, 19 (2006).
21. **G. Gallot, S.P. Jamison, R.W. McGowan, D. Grischkowsky.** J. Opt. Soc. Am., **B 17**, 851 (2000).
22. **N. Laman, S. Sree Harsha, D. Grischkowsky, Joseph S. Melinger.** Biophysical Journal, **94**, 1010 (2008).

23. **M.M. Awad, R.A. Chevillea.** Appl. Phys. Lett., **86**, 221107 (2005).
24. **K.-E. Peiponen, J.A. Zeidler, M. Kuwata-Gonokami.** Terahertz Spectroscopy and Imaging. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013.
25. **L. Ye, Y. Zhang, R. Xu, W. Lin.** Optics Express, **19**, 18910 (2011).
26. **P. Heydari.** IEEE Open J. Solid-State Circuits Soc., **1**, 18 (2021).
27. **H.-J. Song, T. Nagatsuma.** Handbook of Terahertz Technologies Devices and Applications. U.S., Taylor & Francis Group, 2015.
28. **M. Westig, H. Thierschmann, A. Katan, M. Finke, T. M. Klapwijk.** AIP Advances, **10**, 015008 (2020).
29. **K.-X. Yang, M. Abulizi, Y.-H. Li, B.-Y. Zhang, S.-L. Li, W.-Y. Liu, J. Yin, Y. Cao, J.-G. Ren, C.-Z. Peng.** arXiv:2012.04394v1 [quant-ph].
30. **J. Zhang, D. Grischkowsky.** Opt. Lett., **29**, 1617 (2004).
31. **C.H. Brode, I. Spotts, H. Reguigui, C.A. Leclerc, M.E. Mitchell, J.F. Holzman, C.M. Collier.** Optical Materials Express, **12**, 3379 (2022).
32. **K.I. Zaytsev, A.A. Gavdush, N.V. Chernomyrdin, S.O. Yurchenko.** IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, **5**, 817, (2015).

INVESTIGATION OF THE MODE COMPOSITION OF A TERAHERTZ PULSE IN A NONLINEAR CRYSTAL PARTIALLY FILLING A WAVEGUIDE WITH PARALLEL PLATES

A.S. NIKOGHOSYAN, V.R. TADEVOSYAN, G.A. PARSAMYAN, A.A. POGHOSYAN

The modal properties of terahertz (THz) pulse propagating in a parallel-plate waveguide partially filled with a nonlinear crystal—either lithium niobate (LiNbO_3) or 4-N,N-dimethylamino-4'-N'-methylstilbazolium tosylate (DAST)—are investigated. THz pulses are generated remotely in the nonlinear crystal via optical rectification of a femtosecond Ti:sapphire laser pulse. A numerical analysis of the mode composition of the THz pulse in the structure of a "metallic parallel-plate waveguide partially filled with a nonlinear crystal" was performed using MATCAD and COMSOL software. The study demonstrates the possibility of achieving single-mode coupling between the input linearly polarized optical pulse and the THz pulse with an ultra-broad spectral bandwidth of 0.1–2.6 THz. By numerically determining the width and height of the nonlinear crystal for given waveguide dimensions and known dielectric permittivity (ϵ) of the crystal, conditions for single-mode propagation of the THz pulse were achieved. It is also shown that, as the THz frequency increases, a greater portion of the pulse energy is confined within the nonlinear crystal. At the same time, the remainder propagates in the surrounding air-filled region.