

## КРИТИЧЕСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ В ВОЛНОВОДЕ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ НЕЛИНЕЙНЫМ КРИСТАЛЛОМ

А.С. НИКОГОСЯН<sup>1\*</sup>, В.Р. ТАТЕВОСЯН<sup>1</sup>,  
Г.Н. ГОЛЬЦМАН<sup>2,3</sup>, С.В. АНТИПОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский институт электроники и математики, Москва, Россия

\*e-mail: nika@ysu.am

(Поступила в редакцию 10 сентября 2021 г.)

Исследована ширина полосы пропускания в системе «нелинейно-оптический кристалл, частично заполняющий поперечное сечение металлического прямоугольного волновода». Частичное заполнение металлического волновода нелинейно-оптическим кристаллом применено с целью обеспечения фазового синхронизма для эффективной генерации ТГц излучения в нелинейном кристалле, при освещении его фемтосекундным оптическим лазерным импульсом. Численным методом определены критические длины волн металлического волновода с центральным симметричным расположением кристаллических пластин в волноводе, в зависимости от степени частичного заполнения и диэлектрической проницаемости кристалла. Показано, что частичное заполнение металлического волновода кристаллом приводит к расширению полосы пропускания основного нечетного типа колебания  $H_{10}$ , не улучшая условия распространения ближайшего, высшего четного типа колебания  $H_{20}$ , а наоборот, при определенной величине заполнения кристаллом исключает его возникновение.

### 1. Введение

Источники и детекторы ТГц диапазона (на основе различных физических процессов) в последнее десятилетие нашли применение в таких областях, как телекоммуникация, биозондирование, медицинская визуализация с высоким разрешением, биотехнология, военная безопасность, радиоастрономия [1–6]. Астрономические наблюдения в ТГц диапазоне [7] становятся все более и более важными в научных исследованиях – космические проекты SMA, ALMA и Herschel. Важность различных приложений стимулировали исследование и разработку ТГц волноводов, направляющих излучение от компактных ТГц антенн к детекторам. Линии передачи ТГц излучения являются также ключевыми компонентами ТГц систем и устройств, в частности, ТГц спектроскопа во временной области (THz-TDS). Для решения проблемы предложены и экспериментально исследованы различные терагерцевые направляющие структуры [8–13], включая

волновод с параллельными пластиинами [11–13].

Однако эффективный ТГц волновод (с низкой дисперсией и потерями, сверхширокополосный) все еще остается проблемой из-за высоких потерь, обусловленных конечной проводимостью металлов и высоким коэффициентом поглощения диэлектрических материалов в этой частотной области.

В работе [12] сообщается о бездисперсионном распространении в волноводе с параллельными пластиинами. Однако, в этом случае распределение электромагнитного поля заполняет всю площадь поперечного сечения волновода, вызывая недопустимо высокие радиационные потери.

Для подавления нежелательных потерь на излучения (на разрывах диэлектрического волновода) был разработан безизлучательный диэлектрический (nonradiative dielectric (NDR)) волновод – диэлектрик, помещенный между параллельными металлическими пластиинами, с сохранением низких потерь [13].

Волноводы с диэлектрическим заполнением – многообещающие волноводы для схем миллиметрового и ТГц диапазонов [13–15]. Преимуществом частичного заполнения волновода диэлектриком является: возможность обеспечения фазового синхронизма оптической волны с терагерцовой для эффективной генерации ТГц излучения; уменьшение потерь в стенах металлического волновода и в диэлектрике [15], а также потерь на согласование мод. В случае генерации и детектирование ТГц излучения вне волновода в процессе ввода ТГц излучения в волновод и вывода ее из него, возникают потери при согласования моды ТГц излучателя с основной модой волновода  $H_{10}$  [8,16]. В случае генерации и детектировании широкополосного [17–19] ТГц излучения внутри волновода потери на согласование мод отсутствуют.

В данной работе исследована ширина полосы пропускания в системе «нелинейно-оптический кристалл, частично заполняющий поперечное сечение металлического прямоугольного волновода». Частичное заполнение металлического волновода нелинейно-оптическим кристаллом применено с целью обеспечения фазового синхронизма т.е. для эффективной генерации ТГц излучения в самом волноводе в процессе оптического выпрямления фемтосекундного оптического лазерного импульса в нелинейном кристалле. Степень заполнения волновода кристаллом – толщина кристалла, определяется численно из дисперсионного уравнения.

## **2. Критическая длина волны $H_{10}$ волновода, частично заполненного кристаллом**

Уравнения для определения критических длин волн в частично заполненном кристаллом волноводе (рис.1) являются трансцендентными уравнениями и поэтому не имеют аналитического решения. Численное определение корней трансцендентного уравнения – определение критических длин волн типа  $H_{10}$  и

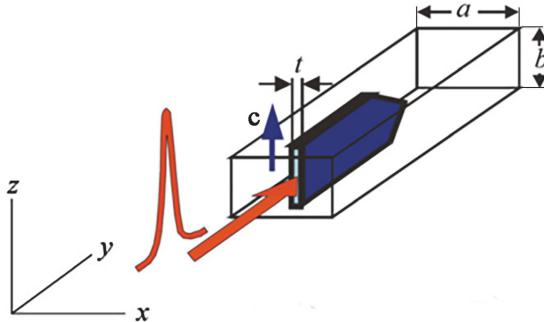


Рис.1. Генерация ТГц излучения в нелинейном кристалле  $\text{LiNbO}_3$ , частично заполняющем прямоугольный волновод, при освещении фемтосекундным лазерным импульсом. Оптическая ось кристалла –  $c$ , параллельна широкой стенке волновода  $b$  для обеспечения генерации ТГц излучения с линейной поляризацией, благодаря наибольшей компоненте тензора нелинейной восприимчивости кристалла  $\text{LiNbO}_3$  –  $\chi_{33}$ . Нелинейная поляризация  $P_z = \chi_{33} E_z E_z^*$  [8,14].

$H_{20}$ , проводилось с помощью программы Mathcad. Рассмотрены случаи когда волновод частично заполнен нелинейно-оптическим кристаллом  $\text{LiNbO}_3$  ( $\epsilon = 26.5$ ), DAST ( $\epsilon = 10$ ) или  $\text{ZnTe}$  ( $\epsilon = 5.2$ ).

Уравнения для определения критических длин волн получаются, полагая в дисперсионных уравнениях (1, 2) коэффициент замедления  $m = n_{\text{eff}}$  равным нулю. В случае центрально-симметричного расположения кристаллической пластины в волноводе дисперсионное уравнение для четных и нечетных TE типов волн волновода имеет вид [14]:

$$\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - 1} \cdot \operatorname{tg}(\pi k_1 k_2 \sqrt{\epsilon - n_{\text{eff}}^2}) = \sqrt{\epsilon - n_{\text{eff}}^2} \cdot \operatorname{th}(\pi(1 - k_1) k_2 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - 1}), \quad (1)$$

$$\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - 1} \cdot \operatorname{ctg}(\pi k_1 k_2 \sqrt{\epsilon - n_{\text{eff}}^2}) = \sqrt{\epsilon - n_{\text{eff}}^2} \cdot \operatorname{th}(\pi(1 - k_1) k_2 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - 1}), \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость ТГц волны,  $k_1 = 2t/a$  – толщина кристалла, нормированная к ширине волновода;  $k_2 = a/\lambda_{10}$  – ширина волновода, нормированная к критической длине волны первого нечетного типа колебаний  $H_{10}$ ;  $n_{\text{eff}}(\lambda_{\text{DFR}}) = c/v_p(\lambda_{\text{DFR}}) = m$  – коэффициент замедления ТГц волны или эффективный показатель преломления структуры «кристалл – волновод». Критическая длина волны основного нечетного типа колебания  $H_{10}$  для различных диэлектрических проницаемостей определяются из уравнения (3):

$$\cot(\pi k_1 k_2 \sqrt{\epsilon}) = \sqrt{\epsilon} \tan[\pi k_1 (1 - k_2)]. \quad (3)$$

На рис.2 приведены графики зависимостей ширины волновода, нормированной к критической длине волны для первого нечетного типа колебаний, от величины заполнения. Из графиков следует, что с увеличением значения диэлектрической проницаемости увеличивается величина критической длины волны для ТГц волны типа  $H_{10}$  в системе «кристалл + волновод». Увеличение критической длины волны существенно при таком частичном заполнении

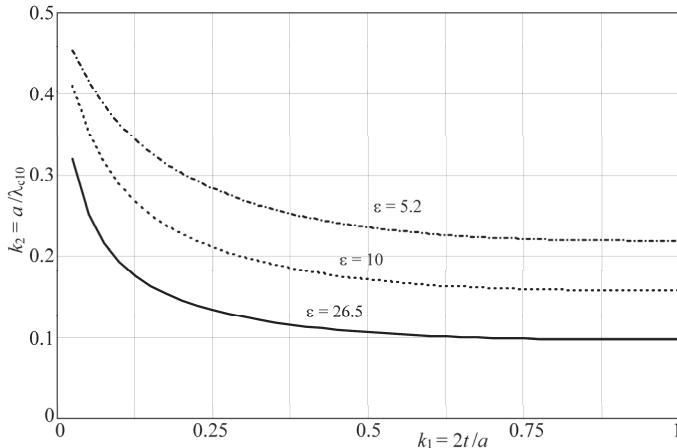


Рис.2. Зависимость ширины волновода, нормированной к критической длине волны первого нечетного типа колебаний  $k_2$  от  $k_1 = 2t/a$  – толщины кристалла, нормированной к ширине волновода.

кристаллом волновода когда  $k_1 \leq 0.2$ . С увеличением значения  $k_1$  критическая длина волны медленно изменяется, а при приближении к случаю полного заполнения кристаллом волновода почти не меняется.

Увеличение критической длины волны типа  $H_{10}$ , при центрально-симметричном расположении тонкого кристалла в волноводе обусловлена тем, что кристалл располагается в месте максимальной напряженности электрического поля, где сильнее проявляется эффект концентрации поля диэлектриком. В случае полного заполнения кристаллом волновода  $k_1 = 1$ , все поле полностью заключено в диэлектрике.

### 3. Критическая длина волны $H_{20}$ волновода, частично заполненного кристаллом

Для определения ширина полосы пропускания волны основного типа в системе «нелинейно-оптический кристалл, частично заполняющий поперечное сечение металлического прямоугольного волновода», необходимо знать также критическую длину волны четного типа колебаний  $H_{20}$ , ближайшей к волне основного типа  $H_{10}$ . Уравнение для определения критических длин волн четных типов колебаний, полученное из уравнения (2) имеет вид:

$$\sqrt{\epsilon} \tan[\pi k_1(1 - k_2)] = -\tan(\pi k_1 k_2 \sqrt{\epsilon}). \quad (4)$$

На рис.3 приведена зависимость корня уравнения (4) –  $a/\lambda_{20}$  волны  $H_{20}$  от толщины кристалла, нормированной к ширине волновода –  $k_1 = 2t/a$ , при значении диэлектрической проницаемости кристалла  $\text{LiNbO}_3$   $\epsilon = 26.5$ , заполняющего волновод. Из сравнения рис.1 и рис.2 следует, что критическая длина волны типа  $H_{20}$  медленнее меняется от величины заполнения при  $k_1 \leq 0.2$ . Это обусловлено тем, что для четных типов колебаний в центре волновода располагается узел напряженности электрического поля, если кристалл тонкий. В

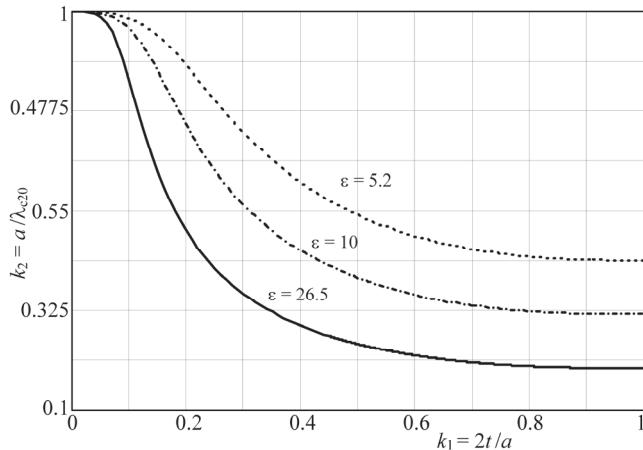


Рис.3. Ширина волновода, нормированная к критической длине волны первого высшего типа колебаний  $H_{20}$ , как функция заполнения.

результате концентрация поля проявляется слабо. При увеличении толщины кристалла –  $2t/a$ , концентрация поля увеличивается.

Таким образом, диэлектрическая пластина расширяет полосу пропускания основной волны  $H_{10}$  в область низких частот, при этом в области высокий частот не улучшает распространение ближайшего высшего типа волны –  $H_{20}$ , а скорее мешает ее возникновению.

#### 4. Результаты и их обсуждение

Из полученных результатов следует, что если при воздушном заполнении волновода с величиной широкой стенки  $a = 2.4$  мм критическая частота волны основного типа  $f_{c10} = 62.5$  ГГц, то в частично заполненном кристаллом  $\text{LiNbO}_3$  волноводе  $f_{c10} = 25$  ГГц (из рис.2 следует, что значению  $t/a = 0.1$  соответствует  $a/\lambda_{c10} = 0.2$ ). Для волны типа  $H_{20}$  в пустом волноводе  $f_{c20} = 125$  ГГц. В частично заполненном кристаллом  $\text{LiNbO}_3$  волноводе  $f_{c20} = 107$  ГГц, так как значению  $t/a=0.1$  соответствует  $a/\lambda_{c20} = 0.858$ , (рис.3). В волноводе, полностью заполненном кристаллом  $\text{LiNbO}_3$   $f_{c10} = 12$  ГГц, а  $f_{c20} = 24.3$  ГГц. Следовательно, в частично заполненном кристаллом волноводе полоса пропускания  $\Delta f = f_{20} - f_{10} = 107 - 25 = 82$  ГГц увеличивается в ~7 раз по сравнению с полосой пропускания полностью заполненного кристаллом волновода – 12 ГГц. Увеличение полосы пропускания является еще одним преимуществом частично заполненного волновода (с центральной симметрично расположенной кристаллической пластиной) по сравнению с полностью заполненным нелинейным кристаллом волноводом. Следует отметить что экспериментально в [14] показано что в частично заполненном кристаллом  $\text{LiNbO}_3$  волноводе генерируется ТГц импульс в полосе 25 ГГц – 3 ТГц. Ранее в работе [9] было показано что распространение ТГц импульса через волновод фактически более чем на 98% одномодовое распространение типа  $H_{10}$ , при линейной поляризации излучения.

## 5. Заключение

Исследована ширина полосы пропускания в системе «нелинейно-оптический кристалл, частично заполняющий поперечное сечение металлического прямоугольного волновода». Рассмотрены кристаллы LiNbO<sub>3</sub>, DAST и ZnTe, благодаря их высокоэффективному нелинейному преобразованию оптического импульса в ТГц диапазон. Кристаллы обладают эффективной нелинейной восприимчивостью второго порядка и имеют различные диэлектрические проницаемости, для которых выполняется условие фазового синхронизма при определенной толщине кристалла. Показано, что при малой толщине кристалла ( $2t/a < 0.2$ ) значение  $\lambda_{10}$  основной нечетной волны типа H<sub>10</sub> увеличивается по сравнению с пустым волноводом. Благодаря этому, полоса пропускания основной волны расширяется в область низких частот. Медленное изменение значения  $\lambda_{20}$  в области высокий частот не улучшает условия распространения высшего четного типа волны H<sub>20</sub>, ближайшего к H<sub>10</sub>, а наоборот препятствует ее формированию. Полученные результаты показывают, что частичное заполнение волновода кристаллом, приводит к значительному расширению полосы пропускания основного нечетного типа колебания H<sub>10</sub>, по сравнении с полностью заполненным.

Таким образом, для обеспечения эффективной и широкополосной генерации ТГц излучения в волноводе, целесообразно использовать частично, а не полностью заполненный нелинейным кристаллом волновод. Частично заполненный нелинейным кристаллом волновод одновременно является как перспективным источником генерации широкополосного ТГц излучения, так и его направляющей средой, необходимой для различных приложений ТГц излучения: как телекоммуникация, оборона, безопасность, медицина и разработка высокоскоростных интегрированных волноводных устройств с низкими потерями [20].

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения контракта № 075-15-2021-970.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **J.H. Shin, D.H. Choi, E.S. Lee, et al.** Electronics and Telecommunications Trends, **35**(4), 53 (2020).
2. **W. Xu, Y. Huang, R. Zhou, et al.** ACS Appl. Mater. Interfaces, **12**(39), 44281 (2020), DOI: 10.1021/acsami.0c11461.
3. **N.N. Zinov'ev, A.S. Nikoghosyan, J.M. Chamberlain.** Proceedings of SPIE, **6257**, 62570P1 (2006).
4. **Y. Liu, H. Liu, M. Tang, et al.** RSC Adv., **9**, 9354 (2019)
5. **A.U. Sokolniko.** THz Identification for Defense and Security Purposes, (2013), <https://doi.org/10.1142/8729>.
6. **P.H. Siegel.** International Journal of High Speed Electronics and Systems, **13**(2), 351 (2003).
7. **D.L. Woolard, R. Brown, M. Pepper, M. Kemp.** Proceedings of the IEEE, **93**(10), 1722

- (2005). DOI: 10.1109/JPROC.2005.853539
8. **A.S. Nikoghosyan.** Quantum Electronics, **15**, 969 (1988).
  9. **G. Galot, S.P. Jamison, R.W. McGowan, D. Grischkowsky.** J. Opt. Soc. Am. B, **17**(5), 851 (2000).
  10. **R. Mendis, D. Grischkowsky.** J. Appl. Phys., **88**, 4449 (2000).
  11. **Ye. Longfang, Y. Zhang, R. Xu, W. Lin.** Optics Express, **19**(20), 18910 (2011).
  12. **R. Mendis, D. Grischkowsky.** Opt. Lett., **26**, 846 (2001); IEEE Microw. Wirel.Compon. Lett., **11**, 444 (2001).
  13. **T. Yoneyama, S. Nishida.** IEEE Trans. MTT, **29**(11), 1188 (1981).
  14. **A.S. Nikoghosyan, P.M. Martirosyan, A.A. Hakhoumian, J.M. Chamberlain, R.A. Dudley, N.N. Zinov'ev.** Int. J. Electromagnetic Waves and Electronic System, **11**(4), 47 (2006).
  15. **A.S. Nikoghosyan, R.M. Martirosyan, A.A. Hakhoumian, A.H. Makaryan, V.R. Tadevosyan, G.N. Goltsman, S.V. Antipov.** J. Contemp. Phys., **54**, 97 (2019).
  16. **M.S. Vitiello, J.H. Xu, M. Kumar, F. Beltram, A. Tredicucci, O. Mitrofanov, H.E. Beere, and D.A. Ritchie.** Optics Express, **19**(2), 1122 (2011).
  17. **H. Cao, R. Linke, A. Nahata.** Optics Letters, **29**(15), 1751 (2004).
  18. **Y. Amarasinghe, R. Mendis, D. M. Mittleman.** Optics Express, **28**(12), 17997 (2020).
  19. **H. Li, M.X. Low, R.T. Ako, et al.** Adv. Mater. Technol., **5**(7), 2070039 (2020).
  20. **L. Ye, Y. Zhang, R. Xu, W. Lin.** Optics Letters, **19**(20), 18910 (2011).

#### CRITICAL WAVELENGTH IN THE METAL WAVEGUIDE PARTIALLY FILLED WITH NONLINEAR CRYSTAL

A.S. NIKOGOSYAN, V.R. TADEVOSYAN, G.N. GOLTSMAN, S.V. ANTIPOV

The bandwidth in the system of nonlinear optical crystal partially filling the cross section of a rectangular metal waveguide is investigated. Partial filling of a metal waveguide with a nonlinear optical crystal is used to ensure phase matching, for effective generation of THz radiation in a nonlinear crystal when it is illuminated with a femtosecond optical laser pulse. The critical wavelengths of a metal waveguide with a central symmetric arrangement of crystal plates in the waveguide are numerically calculated depending on the degree of partial filling and the dielectric permittivity of the crystal. It is shown that partial filling of the waveguide with a crystal leads to an expansion of the bandwidth of the fundamental mode of the odd type  $H_{10}$ , without improving the propagation conditions for the nearest higher even mode  $H_{20}$ , but on the contrary, at a certain degree of filling with the crystal excludes its occurrence.