

**LiNbO₃ КЛИНООБРАЗНАЯ ТГц АНТЕННА,
ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЯЮЩАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД**

A.S. Nikoghosyan

Ереванский Государственный университет
Республика Армения, 0025, Ереван, ул. А.Манукяна, д. 1
Тел.: (37410) 53-74-79, факс: (37410) 55-46-41, e-mail: nika@ysu.am

Заключение совета рецензентов: 07.02.15 Заключение совета экспертов: 10.02.15 Принято к публикации: 13.02.15

В работе представлены результаты генерации широкополосного ТГц излучения в области 0,1-2 ТГц. Генерация ТГц излучения осуществлена в нелинейном кристалле LiNbO₃ клинообразной формы благодаря нелинейному эффекту – оптическому выпрямлению фемтосекундных световых лазерных импульсов. Показано, что временные и частотные характеристики ТГц поля, излученного нелинейным клинообразным кристаллом, частично заполняющим металлический волновод, меняются, если кристалл расположить в свободном пространстве. В спектре ТГц импульса интенсивные спектральные линии наблюдались на частотах 279 ГГц и 1 ТГц.

Ключевые слова: оптическое выпрямление, фемтосекундный лазер, терагерцовое излучение, клинообразная ТГц антенна, частично заполненный металлический волновод.

**LiNbO₃ TAPERED THz ANTENNA
PARTIALLY FILLING THE METAL WAVEGUIDE**

A.S. Nikoghosyan

Yerevan State University
1 A.Manukyan str., Yerevan, 0025, Armenia
Tel.: (37410) 53-74-79, fax: (37410) 55-46-41, e-mail: nika@ysu.am

Referred: 07.02.15 Expertise: 10.02.15 Accepted: 13.02.15

Results on generation of ultrabroadband terahertz (THz) radiation in band 0.1-2 THz via optical rectification of femtosecond laser pulses in nonlinear tapered crystal are presented. It is shown that placing the LiNbO₃ crystal in the free space and in the hollow waveguide both the time and spectral features of the emitted THz field are changed. Several intense spectral regions (at 279 GHz and 1 THz) whose frequency depends on the LiNbO₃ size are observed. Excitation of THz radiation in the tapered nonlinear crystal antenna, partially filling the metal waveguide with the help of an optical femtosecond laser pulse permits the resolution of problems connected with input/output coupling – mode matching and single mode propagation.

Keywords: optical rectification, femtosecond laser, terahertz radiation, tapered THz antenna, partially filling the metallic waveguide.



*Анаит Сергеевна
Никогосян
Anahit S. Nikoghosyan*

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики СВЧ и телекоммуникаций Ереванского гос. университета.

Образование: физический факультет Ереванского гос. университета, квалификация “Радиофизик”.

Область научных интересов: физика ультракоротких импульсов и квантовая радиофизика, генерация и детектирование терагерцового излучения, терагерцовая спектроскопия во временной области и визуализация, терагерцовые волноводы и антенны, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП).

Публикации: 89, 1 авторское свидетельство СССР.

Information about the author: PhD, Associate Professor, Department of Microwave Radiophysics and Telecommunications at Yerevan State University.

Education: Physics Department at Yerevan State University, Armenia. Graduation with excellent marks. Qualification “Radiophysics”.

Research area: physics of ultra-short laser pulses and quantum radiophysics, generation and detection of terahertz (THz) radiation, THz spectroscopy (TDS) and imaging, THz waveguides and antenna, high temperature superconductors (HTSC).

Publications: 89 and 1 copyright certificate USSR.

Введение

Клинообразные диэлектрические структуры широко используются при конструировании компонент миллиметровых, субмиллиметровых (аттенюатор, фазовращатель) и оптических устройств (в ближне-полевом оптическом микроскопе, для концентрации падающего излучения) [1]. Клиновидные волноводы для направления и увеличения ТГц излучения в ограниченной области были применены в работах [2–5]. Увеличение чувствительности ТГц волноводной спектроскопии во временной области, благодаря адиабатическому сжатию ТГц излучения клиновидным плоскопараллельным волноводом (рис. 1), исследовалось в [6]. Суперфокусирование терагерцовых волн ниже величины $\lambda/250$, используя плазмонный клиновидный плоскопараллельный волновод, было продемонстрировано в [7]. В статье [8] при визуализации изображения измерение ТГц поля с субволновым пространственным разрешением было достигнуто благодаря приданию наконечнику измерительной головки клиновидной формы. Клиновидная диэлектрическая стержневая антенна миллиметрового диапазона с прямоугольным поперечным сечением была разработана для диэлектрических интегральных схем [9]. Металл-диэлектрическая пирамидальная антенна (рис. 2), излучающая ТГц импульсы или непрерывную волну на частоте 80 ГГц, была использована для построения изображения в ближнем поле [10]. Частотно-независимое пространственное разрешение было около 20 мкм, соответствовало $\lambda/200$ на частоте 80 ГГц и ограничивалось только величиной выходной грани острия. Все вышеупомянутые антенны были изготовлены из линейных материалов.

ТГц излучение в диэлектрическом волноводе, в пластине из нелинейно-оптического кристалла LiNbO_3 с клинообразным выходным торцом (рис. 3), и LiNbO_3 клинообразная ТГц антенна, расположенные в свободном пространстве, были исследованы в [11, 12].

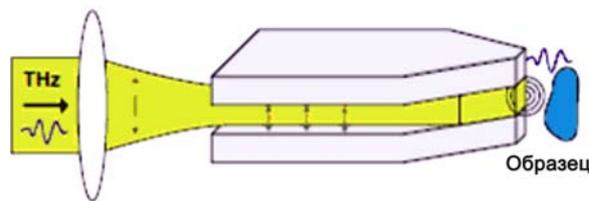


Рис. 1. Клиновидный плоскопараллельный волновод
Fig. 1. Wedge-shaped plane-parallel waveguide

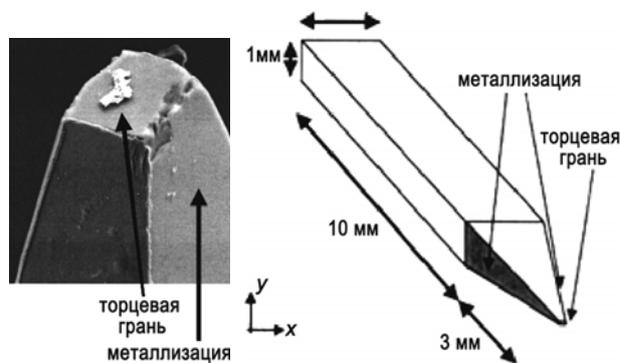


Рис. 2. Металл-диэлектрическая пирамидальная антенна
Fig. 2. Metal-dielectric pyramidal antenna

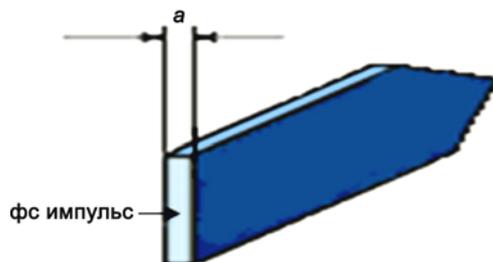


Рис. 3. Клинообразная ТГц антенна из нелинейно-оптического кристалла LiNbO_3 , управляемая фемтосекундным оптическим лазерным импульсом
Fig. 3. Wedge-shaped THz antenna of the nonlinear optical crystal LiNbO_3 , controlled by optical femtosecond laser pulse



**Генерация ТГц излучения
в клинообразной антенне,
помещенной в металлический волновод
и в свободное пространство**

В статье представлены экспериментальные результаты эффективной генерации ультраширокополосного терагерцового излучения в полосе 0,1-2 ТГц посредством оптического выпрямления фемтосекундных (фс) лазерных импульсов в нелинейном клинообразном кристалле LiNbO₃, частично заполняющем металлический волновод. Во избежание отражения ТГц волны от выходной поверхности кристалла вследствие рассогласования комплексного сопротивления кристалла со свободным пространством выходная поверхность кристалла была срезана под углом. Клиновидная форма кристалла обеспечивает широкополосное согласование полного сопротивления кристалла со свободным пространством, вследствие которого интенсивность ТГц излучения возрастает по сравнению со случаем, когда кристалл имеет прямоугольную форму [2, 13]. Высота b прямоугольного кристалла размерами (a, b, L) уменьшалась линейно от величины b до нуля, в то время как узкая сторона a сохранялась постоянной (рис. 4). Полуугол клина был $\alpha = 11^\circ$ ($E_{ТГц} \sim 1/\alpha$), а длина кристалла $L = 8$ мм. Нам неиз-

вестны сведения о результатах симуляции или экспериментов с нелинейным клиновидным кристаллом, так как они пока еще не опубликованы в периодической научной литературе.

Оптическое возбуждение широкополосного ТГц импульса осуществлялось с 100 фс импульсами Тисапфирового лазера ($\lambda = 800$ нм) [14]. Генерация линейно поляризованного ТГц поля типа E_{nm}^x (ТЕ-мода) обусловлена наибольшей компонентой тензора нелинейной восприимчивости второго порядка d_{33} . Временная волновая форма ТГц поля клинообразного кристалла LiNbO₃, расположенного в свободном пространстве, и терагерцовый спектр, полученный после быстрого преобразования Фурье (FFT), показаны на рис. 4.

В спектре ТГц импульса интенсивные спектральные линии наблюдались на частотах 0,279 и 1 ТГц. На рис. 5 показаны временная волновая форма и амплитудный спектр терагерцового излучения клиновидного кристалла LiNbO₃, когда он расположен в полном металлическом волноводе. Вследствие непрерывно изменяющейся высоты b волновода изменяется критическая частота и групповая скорость ТГц волны. ТГц волна проходит из многомодового режима к одномодовому, и ТГц поле концентрируется.

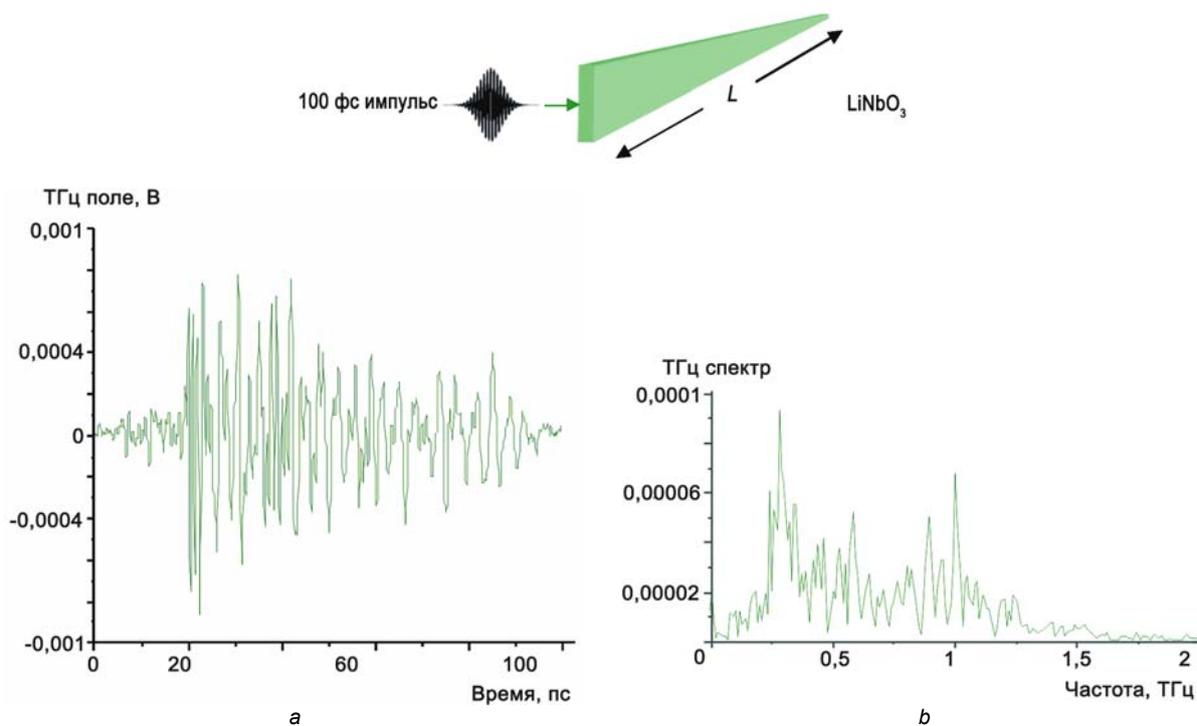


Рис. 4. Временная форма (а) и амплитудный спектр (б) ТГц импульса, генерированного 100 фс лазерным импульсом в клинообразной LiNbO₃ широкополосной антенне, расположенной в свободном пространстве
Fig. 4. Temporary form (a) and the amplitude spectrum (b) of THz pulse generated by 100 fs laser pulse in a wedge-shaped LiNbO₃ broadband antenna located in free space

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

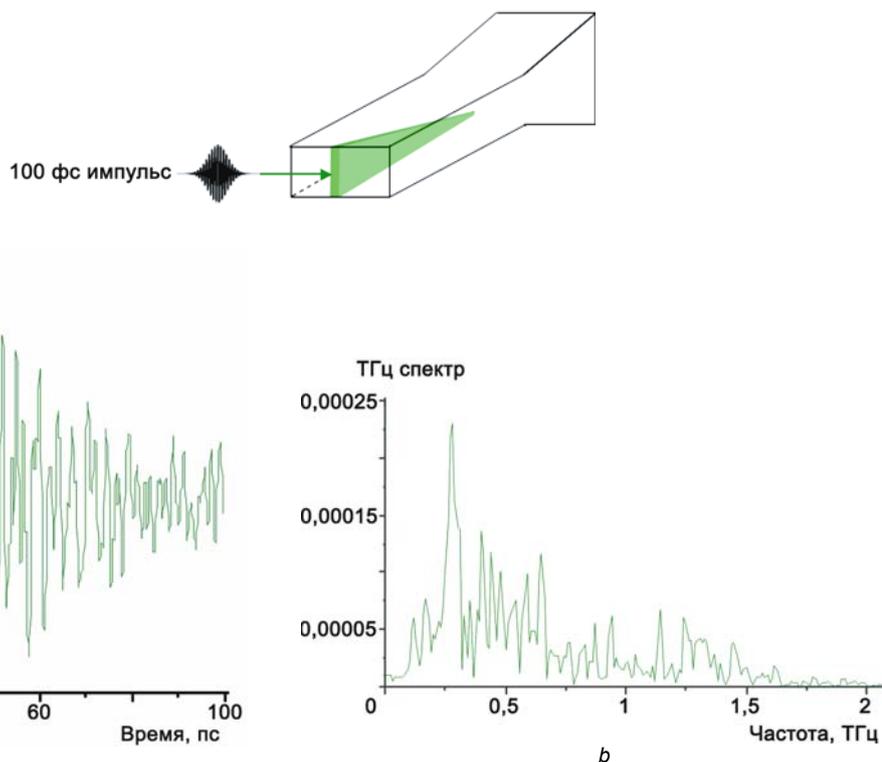


Рис. 5. Временная форма (a) и амплитудный спектр (b) ТГц импульса от клинообразной LiNbO₃ широкополосной антенны, расположенной в металлическом волноводе. LiNbO₃ антенна частично заполняет металлический волновод
Fig. 5. Temporary form (a) and the amplitude spectrum (b) of THz pulse from the wedge LiNbO₃ broadband antenna located in a metal waveguide. LiNbO₃ antenna partially fills the metal waveguide

Показано, что как временные, так и спектральные особенности излученного ТГц поля клиновидного кристалла LiNbO₃, расположенного в свободном пространстве или в полном металлическом волноводе, отличаются. Интенсивная спектральная линия на частоте 279 ГГц в металлическом волноводе возросла в 2,4 раза.

Заключение

Полная энергия ТГц излучения, распространяющаяся вдоль прямой, параллельной z -оси кристалла, состоит из двух слагаемых, обусловленных как внешним (вне кристалла), так и внутренним (внутри кристалла) электромагнитными полями. Такой тип передачи полного поля позволяет эффективно генерировать ТГц излучение в прямоугольном металлическом волноводе, частично заполненном нелинейным кристаллом, если для данных оптических и терагерцевых частот условие коллинеарного фазового синхронизма выполняется. Условие фазового синхронизма можно обеспечить для терагерцевых волн данных частот посредством соответствующего выбора поперечного сечения металлического волновода и толщины пластины нелинейного кристалла [13, 14]. Отношение сторон волновода b/a влияет на по-

тери при распространении: чем больше b/a отношение, тем потери распространения меньше. Влияние дифракции на распространение ТГц волны в диэлектрическом волноводе также зависит от размера и формы кристалла. Коническая форма кристаллической антенны устраняет дифракцию ТГц волны, которая проявляется в кристалле прямоугольной формы.

Изменение модовой структуры ТГц излучения в течение распространения в кристалле клиновидной формы сопровождается изменением фазовой и групповой скоростей.

Возбуждение ТГц излучения в диэлектрической антенне, в коническом нелинейном кристалле LiNbO₃, дистанционно, с помощью оптического фемтосекундного лазерного импульса, позволяет решить проблемы, обусловленные связью ТГц излучения с волноводом (ввод ТГц излучения в волновод и ее вывод), согласованием мод и распространением одной моды. В результате значительно уменьшаются потери ТГц излучения.

Компрессия ТГц поля вдоль конического волновода объясняет результат, полученный экспериментально, что ТГц излучение в области 0,1-2 ТГц от кристалла LiNbO₃ с суживающимся концом (рис. 3), превышает ТГц излучение, полученное от прямоугольного кристалла, примерно в 5-10 раз [13-15].

Демонстрация увеличения ТГц поля клиновидным LiNbO₃ кристаллом, частично заполняющим металлический волновод, открывает ряд возможностей для ТГц спектроскопии наноструктур или молекул при низкой концентрации, а также визуализации невидимых объектов в ближнем поле [16]. Любой нелинейный кристалл с высокой нелинейной восприимчивостью второго порядка, имеющий низкий коэффициент поглощения и слабую дисперсию, может также быть использован в ультраскоростных электронных интегральных схемах [17].

Список литературы

1. Stockman M.I. Nanofocusing of optical energy in tapered plasmonic waveguides // *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 137404.
2. Nikoghosyan A.S. Generation of ultrashort pulses of millimeter and centimeter radiation in a waveguide partly filled with a nonlinear crystal // *Sov. J. Quantum Electron.* 18, No.5 (1988) 624.
3. Rusina A., Durach M., Nelson K.A. and Stockman M.I. Nanoconcentration of terahertz radiation in plasmonic waveguides // *Opt. Express.* 23 (2008) 18576–89.
4. Kim S-H., Lee E.S., Ji Y. and Jeon T.I. Improvement of THz coupling using a tapered parallel-plate waveguide // *Opt. Express.* 18 (2010) 1289–95.
5. Zon V.B. and Zonm B.A. Terahertz surface plazmon polaritons on a conductive right circular cone: Analytical description and experimental verification // *Phys. Rev. A* 84 (2011) 013816.
6. Zhang J. and Grischkowsky D. Adiabatic compression of parallel-plate metal waveguides for sensitivity enhancement of waveguide THz time-domain spectroscopy // *Appl. Phys. Lett.* 86 (2005) 061109.
7. Zhan H., Mendis R., and Mittleman D.M. Superfocusing terahertz waves below $\lambda/250$ using plasmonic parallel-plate waveguides // *Opt. Express.* 18 (2010) 9643–9650.
8. Wachter Nagel Mand M., Kurz H. Tapered photoconductive terahertz field probe tip with subwavelength spatial resolution // *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 041112.
9. Kobayashiand S., Mittra R. Dielectric tapered rod antennas for millimeter-wave applications // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 30, No.1 (1982) 54-58.
10. Klein N., Lahl P., and Poppe U. A metal-dielectric antenna for terahertz near-field imaging // *Journal of Applied Physics.* 98, (2005) 014910.
11. Nikoghosyan A.S., Roeser H.P., Martirosyan R.M., Chamberlain J.M., Hakobyan H.S., Bohr A., Haslam D.T., López J.S., Stepper M. THz radiation in the tapered LiNbO₃ ribbon waveguide // 38 International Conference on IRMMW – THz 2013, Th P3-04.
12. Nikoghosyan A.S. Laser-driven LiNbO₃ crystal wedge THz antenna // 38 International Conference on IRMMW – THz 2013, Th P3-15.
13. Laziev E.M., Nikoghosyan A.S. Phaze synchronizm and ultrashort SHF pulses generation in waveguides // *Proc. SPIE. Mode-Locked Lasers and Ultrafast Phenomena*, 1842 (1992) 113, November 30.
14. Nikoghosyan A.S., Martirosyan P.M., Hakhoumian A.A., Chamberlain J.M., Dudley R.A., Zinov`ev N.N. Generation of THz radiation in waveguides partially loaded with nonlinear crystal // *Inter. J. Electromagnetic Waves and Electronic System.* 11, No.4 (2006) 47-55.
15. Zinov`ev N.N., Nikoghosyan A.S., Dudley R.A., Chamberlain J.M. Conversion of short optical pulses to terahertz radiation in a nonlinear medium: Experiment and Theory // *Physical Review B*, 76 (2007) 1235114–1235114-16.
16. Huber A.J., Keilmann F., Wittborn J., Aizpurua J., Hillenbrand R. Terahertz near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices // *Nano Lett.* 8, No.11 (2008) 3766.
17. Bowen J.W., Hadjiloucas S., Towlson B.M., Davies S.R., McIntosh C.E., Chamberlain J.M., Miles R.E. and Pollard R.D. Micromachined waveguide antennas for 1.6 THz // *Electronics Letters* (2006) 20th July.

