

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОДНОМОДОВЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ И ФАЗОВОЕ СОГЛАСОВАНИЕ В ВОЛНОВОДЕ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ НЕЛИНЕЙНЫМ КРИСТАЛЛОМ GaSe

А.С. НИКОГОСЯН*, В.Р. ТАТЕВОСЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: nika@ysu.am

(Поступила в редакцию 1 июля 2026 г.)

Представлен численный анализ распространения терагерцовых (ТГц) импульсов и фазового согласования (ФС) в волноводе с параллельными металлическими пластинами, частично заполненном нелинейным кристаллом (НВП, PPNW). Терагерцовое излучение генерируется посредством оптического выпрямления лазерного импульса в нелинейном кристалле GaSe, частично заполняющем поперечное сечение волновода. Модовый состав ТГц импульса и выполнение условия фазового согласования анализируются численно с использованием пакетов Mathcad и COMSOL Multiphysics. Анализ проводится для двух типов оптико-ТГц взаимодействия: $eo \rightarrow o$ и $ee \rightarrow e$, с использованием как экспериментальных, так и численно моделированных данных по показателю преломления в ТГц диапазоне частот. Результаты показывают, что уменьшение толщины кристалла между пластинами волновода существенно расширяет полосу одномодового распространения спектральных компонент ТГц импульса. В частности, для кристалла GaSe с поперечным размером 0.15×15 мм одномодовое распространение основной моды TE_{10} достигается в диапазоне частот от 0.2 до 2 ТГц. Уменьшение толщины и высоты кристалла до 80 мкм расширяет этот диапазон до 4.5 ТГц, а уменьшение до 60 мкм — до 5 ТГц. Показано, что при указанных толщинах кристалла фазовое согласование достигается в определенных полосах ТГц частот, причем ширина полосы фазового согласования увеличивается с уменьшением толщины кристалла в волноводе. Результаты показывают, что толщина кристалла является одним из определяющих параметров управления дисперсией волновода, обеспечивающим широкополосное одномодовое распространение ТГц излучения и выполнение условия фазового согласования.

1. Введение

Во многих терагерцовых приложениях, включая спектроскопию, зондирование, биомедицинскую и охранную визуализацию, радиолокационные системы, радиоэлектронную борьбу и высокоскоростную связь, востребованы эффективные широкополосные терагерцовые волноводы и линии передачи [1–10].

Эффективная генерация ТГц-излучения в металлическом прямоугольном волноводе, частично заполненном нелинейно-оптическим кристаллом, была впервые предложена и исследована в работах [11, 12]. Высокая эффективность

преобразования достигалась за счет выбора толщины нелинейного кристалла, обеспечивающей выполнение условия фазового согласования согласно дисперсионному уравнению волновода. Коэффициент преобразования энергии был порядка 10^{-3} . В эксперименте использовались прямоугольные волноводы с поперечными размерами (ширина a и высота b) 23×10 , 16×8 до 2.4×1.2 и 1.8×0.9 мм и длиной 50 см. Экспериментальные и численные исследования показали, что спектральными характеристиками ТГц-импульсов можно управлять посредством выбора нелинейного кристалла, его диэлектрической проницаемости и нелинейной восприимчивости, а также размеров волновода, толщины кристалла и его положения в поперечном сечении волновода. Эти параметры влияют на величину максимальной спектральной амплитуды, на значения критических частот, и определяют величину потерь вследствие поглощения в кристалле и омических потерь в металлических стенках волновода [12, 13].

Один из основоположников современной терагерцовой спектроскопии во временной области Д. Гришковски с соавторами экспериментально исследовали распространение широкополосных ТГц-импульсов в полых металлических прямоугольных и круглых волноводах субмиллиметровых размеров [7, 8]. Прямоугольные волноводы имели поперечные размеры $a \times b = 250 \times 800$, 250×250 , и 250×125 мкм, и длину 25 мм. ТГц-импульс охватывал частотный диапазон от 0.65 до 3.5 ТГц и перекрывал частоты отсечки большого числа собственных мод волновода. Однако, из-за условий связи между падающим линейно поляризованным ТГц-лучом и собственными модами волновода, эффективно возбуждалось лишь ограниченное число мод. Было показано, что можно спроектировать полый прямоугольный волновод, рабочий диапазон которого охватывает несколько октав по частоте, причем в этом диапазоне могут распространяться более 35 собственных мод. Несмотря на это, благодаря условиям возбуждения входной линейно поляризованный ТГц-импульс эффективно возбуждает только моду H_{10} [6]. Экспериментальная демонстрация одномодового режима распространения импульса в моде H_{10} в диапазоне частот 0.7–4 ТГц в полном металлическом прямоугольном волноводе сечением 250×125 мкм и длиной 25 мм подтвердила возможность широкополосной передачи ТГц-излучения с низкой дисперсией.

Для реализации компактных терагерцовых устройств были предложены и исследованы волноводные структуры на основе прямоугольного металлического волновода, частично заполненного одним слоем графена [14], а также плазмонный волновод на основе металл-графенового композита [15]. В статье [14] рассматривался линейный режим распространения ТГц-поля с частотой 4 ТГц. При отношении сторон волновода $a/b = 1$ влияние боковых стенок на распределение поля вблизи тонкого графенового слоя было незначительным. Электромагнитное поле локализовалось вблизи графенового слоя с уменьшением b волновода, а влияние боковых стенок становилось особенно заметным при $a/b \ll 1$. Для решения проблемы достижения хорошего баланса между локализацией моды и потерями при распространении в статье [15] был предложен и исследован плазмонный ТГц-волновод на основе металл-графенового композита. В волноводе однослойный графен, отделенный от серебряной пленки кремниевым (Si) слоем, был расположен на подложке из диоксида кремния (SiO_2). Сильная локализация модового поля в слое Si достигалась за счет изменения

толщины кремниевого зазора в подложке. Моды более высоких порядков обрываются при уменьшении ширины зазора до значений $w < 2$ мкм. Однако разработка компактных малопотерных ТГц-устройств [14, 15] по-прежнему остается сложной задачей, а длина распространения ограничена величиной порядка 192 мкм. Исследования ограничиваются пока теоретическими и имитационными работами, а экспериментальных исследований проводится сравнительно мало.

Волноводы с параллельными металлическими пластинами представляют особый интерес благодаря низкой дисперсии и возможности передачи сверхширокополосных ТГц-импульсов на значительные расстояния с малыми потерями. Эти свойства делают их перспективной платформой для генерации, передачи и обработки ТГц-излучения. Терагерцовый полый металлический волновод с параллельными пластинами (PPWG) был предложен и исследован Мендисом и соавторами [16].

В работах [17, 18] было показано, что в прямоугольном металлическом волноводе, частично заполненном нелинейно-оптическим кристаллом LiNbO_3 или DAST, с помощью линейно поляризованного оптического излучения можно генерировать широкополосный ТГц-импульс, распространяющийся в виде суперпозиции мод TE_{n0} , либо основной моды TE_{10} . Кроме того, в такой структуре возможно обеспечить фазовое согласование между групповой скоростью оптического импульса и фазовой скоростью ТГц волны, а также управлять критическими частотами волноводных мод. Несмотря на достигнутые результаты, возможность выполнения условия фазового согласования и эффективной генерации широкополосного ТГц-излучения в волноводах с параллельными металлическими пластинами с использованием нелинейного кристалла до настоящего времени практически не исследована. Предлагаемая структура, названная нелинейным волноводом с параллельными металлическими пластинами, частично заполненным нелинейным кристаллом (НВПП, PPNW), представлена на рис.1.

В настоящей работе впервые представлена и исследована эффективная генерация широкополосного ТГц-излучения в НВПП, частично заполненном нелинейным кристаллом GaSe , расположенным симметрично между металлическими пластинами. Проведен также численный анализ модового состава сверхширокополосного ТГц-импульса в диапазоне частот от 0.2 до 5 ТГц. Терагерцовый импульс представлен в виде линейной суперпозиции связанных мод TE_{n0} , где n – нечетное целое число. Исследуемый волновод отличается от ранее рассмотренных волноводов [1–10] тем, что ТГц-импульс возбуждается

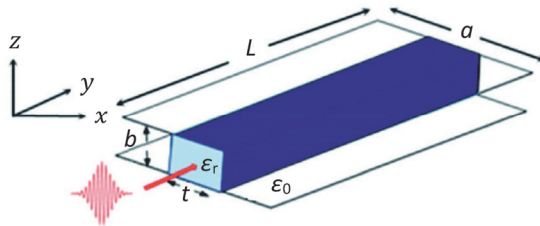


Рис.1. Нелинейный кристалл GaSe , частично заполняющий волновод с параллельными металлическими пластинами. Оптическая ось c кристалла параллельна оси z при оптическом выпрямлении типа $ee \rightarrow e$.

дистанционно внутри волновода, вследствие нелинейно-оптического преобразования в кристалле GaSe, расположенном между металлическими пластинами, тогда как в традиционном подходе ТГц-излучение вводится в волновод от внешнего источника.

2. Фазовое согласование и одномодовое распространение ТГц-импульсов в волноводе с параллельными пластинами, частично заполненном нелинейным кристаллом GaSe

Генерация широкополосного ТГц-импульса в волноводе с параллельными металлическими пластинами, частично заполненном нелинейным кристаллом GaSe (рис.1) эффективна при выполнении условия ФС между взаимодействующими оптическим и ТГц-излучениями. Выбор кристалла GaSe обусловлен его высоким коэффициентом качества ($FOM = \frac{d_{eff}^2}{n_{opt}^2 n_{THz}}$ при $\alpha_{THz} L \ll$

1 и $FOM_A = \frac{d_{eff}^2}{n_{opt}^2 n_{THz} \alpha_{THz}^2}$ при $\alpha_{THz} L \gg 1$), а также высокой нелинейно-оптической восприимчивостью второго порядка d_{eff} , низким поглощением в ТГц-диапазоне и вторым по величине порогом оптического повреждения среди анизотропных ИК-кристаллов [19, 20].

Коэффициент качества кристалла GaSe на частоте 1 ТГц достигает значения порядка 10^3 , тогда как коэффициент поглощения составляет α (1 ТГц) $\approx 0.2 \text{ см}^{-1}$ [20, 21]. Однако вблизи частоты 0.59 ТГц наблюдается резонансный пик, связанный с колебаниями кристаллической решетки, при котором коэффициент поглощения возрастает до α (0.59 ТГц) $\approx 19.6\text{--}30 \text{ см}^{-1}$. В дальнейшем наблюдается его спад и последующее плавное увеличение в диапазоне частот 0.7–2.0 ТГц до значения $\alpha = 5.0\text{--}10 \text{ см}^{-1}$. На более высоких частотах кристалл вновь становится высокопрозрачным и успешно используется для генерации и детектирования сверхширокополосного ТГц-излучения вплоть до 30–41 ТГц. Благодаря перечисленным характеристикам кристалл GaSe является перспективным материалом для генерации широкополосного ТГц-излучения методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов при взаимодействиях типа $ee \rightarrow e$ и $eo \rightarrow o$. Поляризации обыкновенной и необыкновенной волн обозначены, соответственно, символами (o) и (e).

Оптическая ось кристалла c направлена вдоль оси z , что обеспечивает генерацию линейно поляризованного ТГц-излучения за счет компоненты χ_{33} тензора нелинейной восприимчивости кристалла GaSe. Нелинейная поляризация, возникающая при оптическом выпрямлении типа $ee \rightarrow e$, определяется компонентой $P_z(\omega_i - \omega_j) = \chi_{33} E_z(\omega_i) E_z^*(\omega_j)$, где символ $*$ обозначает комплексное сопряжение. При оптическом выпрямлении типа $eo \rightarrow o$ линейная поляризация определяется компонентой χ_{22} тензора нелинейной восприимчивости.

Предыдущие исследования [7, 13, 18] показали, что при размещении нелинейного кристалла в прямоугольном металлическом волноводе, или волноводе с параллельными металлическими пластинами, поглощение ТГц-излучения существенно уменьшается как с уменьшением толщины кристалла t так и расстояния между металлическими пластинами b . При этом потери в

волноводе с параллельными пластинами, частично заполненном кристаллом, в широком диапазоне частот оказываются ниже, чем в прямоугольном и планарном волноводах. Уменьшение толщины кристалла снижает не только поглощение внутри кристалла, но и омические потери в металлических стенках волновода. Следовательно, затухание ТГц-излучения значительно ниже, чем наблюдаемое при генерации и распространении ТГц-волн в объемном кристалле без волноводного ограничения. Для численного исследования условия фазового согласования в ППНВ с кристаллом GaSe, с использованием программы Mathcad, из дисперсионного уравнения определялась зависимость эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{eff}}(f)$ от ТГц-частоты при заданной толщине кристалла. Дисперсионное уравнение было получено путем согласования тангенциальных составляющих полей на границе раздела сред $x = t/2$ для ТГц-волны, распространяющейся в НВПП (рис.1), и имеет следующий вид:

$$\tan[(t/2)k_0\sqrt{\epsilon_r - \epsilon_{\text{eff}}}] = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_0}}{\sqrt{\epsilon_r - \epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (1)$$

где k_0 – волновое число свободного пространства, $\epsilon_{\text{eff}}(f_{\text{THz}})$ – эффективная диэлектрическая проницаемость НВПП, $\epsilon_r(f_{\text{THz}})$ – относительная диэлектрическая проницаемость кристалла GaSe, t – толщина кристалла. В свободном пространстве, в отличие от волновода, показатель преломления кристалла определяется соотношением $n(f) = \sqrt{\epsilon(f)}$, и следовательно, скорость распространения ТГц-волны не зависит от толщины кристалла (от его геометрических размеров).

Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} от частоты в спектре ТГц-импульса для различных толщин кристалла GaSe в НВПП, при взаимодействиях типа $ee \rightarrow e$ и $eo \rightarrow o$, приведены на рис.2а,б. Из рисунков видно, что условие фазового согласования выполняется в точках пересечения зависимостей $\epsilon_{\text{eff}}^e(f_{\text{THz}})$ и $\epsilon^e(f_{\text{opt}})$. Это соответствует равенству групповой скорости оптического импульса $v_g^{\text{opt}} = c/n_g^{\text{opt}}$, где $n_g^{\text{opt}}(\omega_{\text{opt}}) = n(\omega_{\text{opt}}) - \omega_{\text{opt}} \partial n / \partial \omega|_{\omega=\omega_{\text{opt}}}$, и фазовой скорости ТГц-волны $v_p = c/n_{\text{eff}}$, для данной толщины кристалла. Значения $\epsilon^e(f_{\text{opt}}) = 6.86$ и 7.29 на рис.2а соответствуют минимальному и максимальному значениям эффективной диэлектрической проницаемости кристалла GaSe,

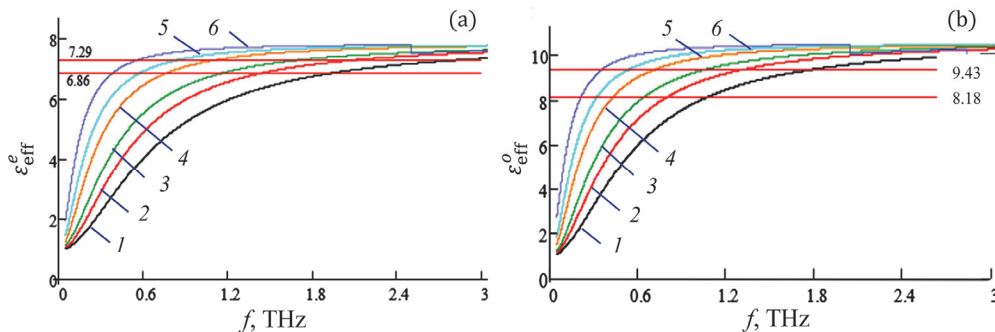


Рис.2. Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} от частоты спектральной компоненты ТГц-импульса для различных толщин кристалла GaSe: 0.06 (1), 0.08 (2), 0.1 (3), 0.15 (4), 0.2 (5), 0.3 мм (6), при взаимодействии типа $ee \rightarrow e$ (а) и $eo \rightarrow o$ (б).

приведенных в литературе [21, 22–25]. Наблюдаемый разброс опубликованных экспериментальных и теоретических данных может быть обусловлен различиями в качестве исследуемых образцов, а также особенностями технологий выращивания кристаллов и методик измерения показателя преломления. Для толщины кристалла $t = 0.3$ мм условие фазового согласования, соответствующее равенству $\varepsilon_{\text{eff}}^e(f_{\text{THz}})$ и $\varepsilon_{\text{min,gr}}^e(f_{\text{opt}}) = 6.86$, выполняется на частоте 360 ГГц, тогда как для $\varepsilon_{\text{max,gr}}^e(f_{\text{opt}}) = 7.29$ — на частоте 552 ГГц. Аналогично, для толщины кристалла 0.1 мм двум значениям $\varepsilon^e(f_{\text{opt}})$ соответствуют частоты фазового согласования 1152 и 1584 ГГц. Для кристаллов толщиной 0.08 мм соответствующие частоты составляют 1440 и 1900 ГГц, тогда как для кристаллов толщиной 0.06 мм — 2040 и 3000 ГГц.

Для кристалла толщиной 0.3 мм фазовое согласование при взаимодействии типа $eo \rightarrow o$ выполняется на частотах 200 и 333 ГГц соответственно, что соответствует значениям $\varepsilon_{\text{min,gr}}^o(f_{\text{opt}}) = 8.179$ и $\varepsilon_{\text{max,gr}}^o(f_{\text{opt}}) = 9.425$ [24, 26, 27], приведенным на рис.2б. С уменьшением толщины кристалла до 0.06 мм ширина полосы частот, в которой выполняется условие ФС, увеличивается от 1040 до 1800 ГГц. Таким образом, уменьшение толщины кристалла приводит как к смещению полосы ФС в область более высоких частот, так и к ее существенному уширению.

Исследование модового состава широкополосного терагерцового импульса проводилось с использованием программы Mathcad. Широкополосный ТГц-импульс представлен в виде линейной суперпозиции связанных мод TE_{n0} (где n — нечетное целое число), распространяющихся в нелинейном кристалле, расположенном центрально-симметрично между параллельными металлическими пластинами [7]. Модовый состав широкополосного ТГц-импульса в диапазоне частот 0.2–5 ТГц может включать комбинацию мод $TE_{10} + TE_{30} + TE_{50}$. Пр продемонстрирована возможность оптимального выбора размеров нелинейного кристалла для одномодового распространения импульса в диапазоне частот 0.2–5 ТГц. Одномодовое распространение ТГц импульса в виде фундаментальной моды TE_{10} является необходимым условием для эффективной связи волновода с внешними устройствами и передачи информации без модовых искажений.

Распределение амплитуды компоненты электрического поля E_z вдоль оси x было определено численно с использованием выражения, полученного из уравнения Гельмгольца для моды TE_{10} диэлектрического волновода с параллельными пластинами с учетом граничных условий при $(-t/2 < x < t/2)$ [19]. Уравнения для электрической компоненты терагерцового поля E_z в волноводе с параллельными металлическими пластинами, частично заполненном нелинейным кристаллом, зависят от толщины кристалла, частоты ТГц-волны, размеров волновода и диэлектрической восприимчивости кристалла и имеют следующий вид:

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

где

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

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

$$\beta^2 = \epsilon_{\text{eff}} k_0^2. \quad (4)$$

В уравнениях (2–4) β – постоянная распространения НВПП, k_0 – волновое число свободного пространства, ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость НВПП, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость кристалла, ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость внешней оболочки кристалла (воздуха), $\epsilon_0 = 1$. Численное нахождение компонент электрического поля для взаимодействия типа $ee \rightarrow e$ и $eo \rightarrow o$ вдоль оси x было выполнено для параметров $\epsilon^e = 7.84$, $\epsilon^o = 11.56$, $a = 1.8$ мм, $t = 0.3, 0.2, 0.15, 0.1$ мм, и 80, 60 и 50 мкм.

На рис.3а,б представлены распределения электрического поля $|E_z|$ в ППНВ для некоторых спектральных компонент ТГц-импульса с частотами 500 (I),

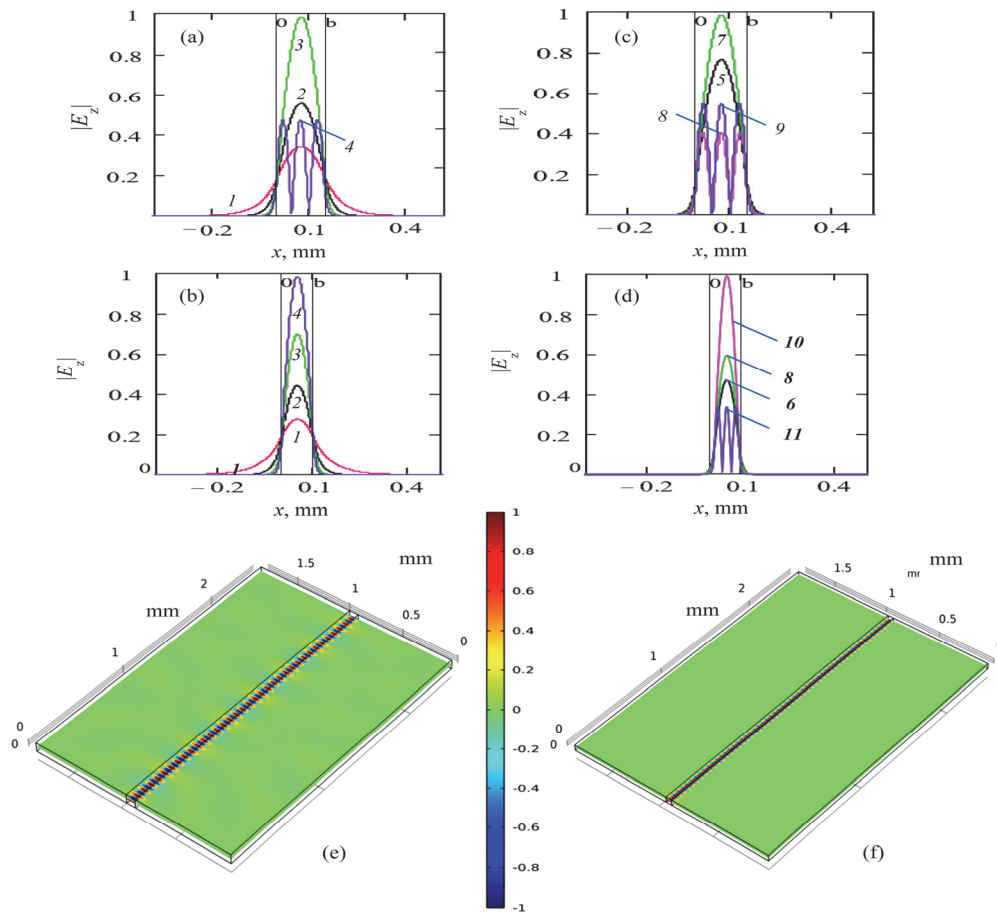


Рис.3. Распределение нормированной компоненты модуля электрического поля $|E_z|$ в ППНВ, в плоскости xz при взаимодействии оптической и ТГц-волны типа $ee \rightarrow e$ в кристалле GaSe (а–д), для различных значений толщины кристалла t и экстремальных значений ϵ^e (ТГц): (а) $t = 0.15$, (б) 0.1 мм, ϵ_{min}^e (THz) = 6.25; (с) $t = 150$, (д) 80 мкм, ϵ_{max}^e (THz) = 7.84. Распределение электрического поля внутри ППНВ для моды TE_{10} для отдельных спектральных компонент ТГц-импульса: (е) 2.1 ТГц при $t = 0.1$ мм, ϵ_{min}^e (THz) = 6.25; и (ф) 3 ТГц при $t = 50$ мкм, ϵ_{max}^e (THz) = 7.84, $a = 1.8$ мм.

1000 (2), 2100 (3), и 3000 ГГц (4), тогда как на рис.3с,d – с частотами 1500 (5), 1900 (6), 2000 (7), 2500 (8), 3500 (9), 4500 (10), и 4600 ГГц (11), соответственно.

Из распределения электрического поля $|E_z|$ в ППНВ (рис.3а, b и 3с, d) следует, что с уменьшением толщины кристалла увеличивается ширина полосы одномодового распространения ТГц-импульса. Например, при уменьшении толщины кристалла с 0.15 мм (рис.3с) до 80 мкм (рис.3d) ширина полосы частот Δf распространяющегося ТГц-импульса увеличивается от 2000 до 4500 ГГц. Волны с частотами 2500 и 3500 ГГц, распространяющиеся в кристалле толщиной $t = 0.15$ мм в виде моды TE_{30} (рис.3с), при $t = 80$ мкм распространяются уже в виде моды TE_{10} (рис.3d).

При взаимодействии типа $oe \rightarrow o$ уменьшение толщины кристалла от 100 до 80 мкм приводит к увеличению ширины полосы частот основной моды TE_{10} , от 460 (рис.4а) до 1800 ГГц (рис.4d). Рис.3е,f и рис.4е,f демонстрируют

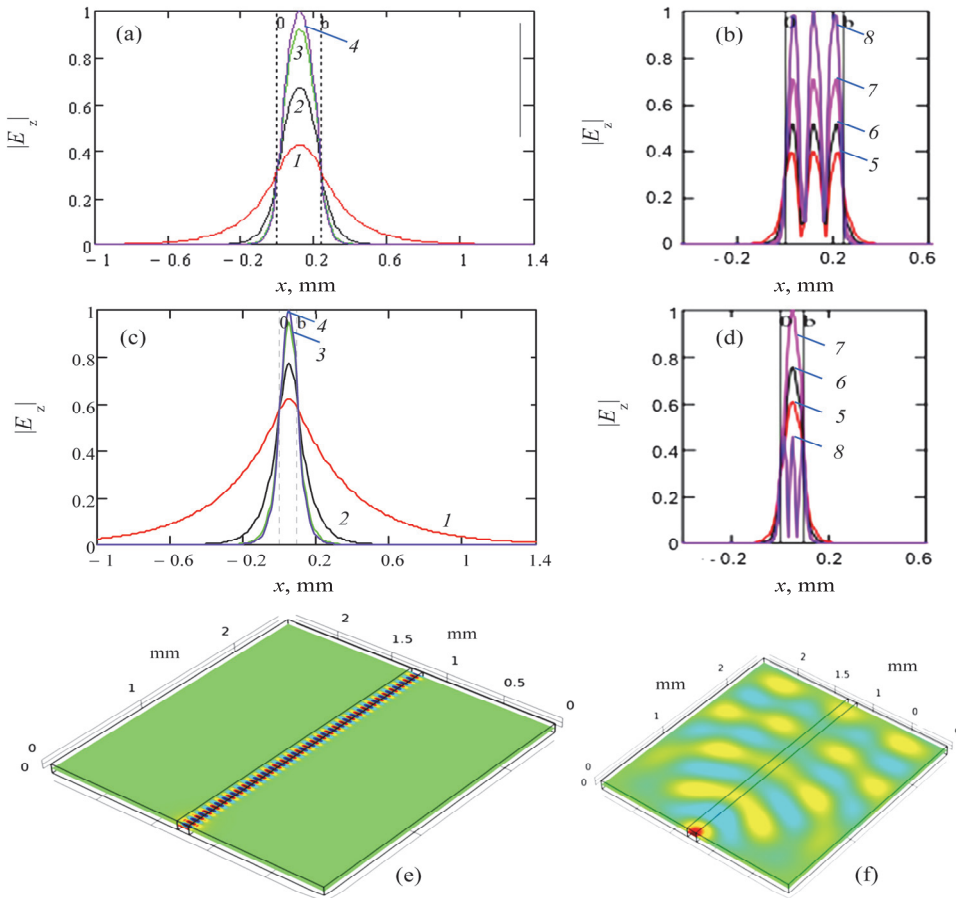


Рис.4. Распределение нормированной компоненты модуля электрического поля $|E_z|$ в ППНВ с кристаллом GaSe в плоскости xz (взаимодействие $oe \rightarrow o$), при $a = 2.4$ мм, $t = 0.1$ мм (а,b), $t = 80$ мкм (с,d). На рис.4а,с представлены распределения $|E_z|$ для некоторых спектральных компонент ТГц-импульса с частотами 115 (1), 270 (2), 415 (3), 460 ГГц (4), а на рис.4б,d с частотами 660 (5), 900 (6), 1280 (7), 1850 ГГц (8), соответственно. Распределение электрического поля внутри ППНВ для моды TE_{10} для спектральной компоненты ТГц-импульса с частотой 1.5 ТГц при $t = 80$ мкм (е). Распространение волны E_z с частотой 1.4 ТГц, когда между пластинами только воздух (f).

распространение волн с частотами 2.1 и 3 ТГц при взаимодействии типа $ee \rightarrow e$, а также волн с частотами 1.2 и 1.5 ТГц при взаимодействии типа $oe \rightarrow o$. Рис.4g демонстрирует распространение волны с частотой 1.4 ТГц в волноводе без кристалла, когда пространство между пластинами заполнено только воздухом. Наличие кристалла в волноводе приводит к концентрации электромагнитного поля преимущественно внутри кристалла. С увеличением частоты ТГц-поля возрастает доля энергии, распространяющейся в кристалле, и уменьшается часть энергии, распространяющейся в воздушной области волновода. При этом потери при распространении ТГц-волны в волноводе с кристаллом существенно меньше, чем при расположении кристалла в свободном пространстве.

3. Результаты и обсуждение

Оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов при взаимодействиях типа $ee \rightarrow e$ и $oe \rightarrow o$ является одним из наиболее перспективных и эффективных методов генерации высокоэнергетических ТГц-импульсов [20, 28, 29]. Достижение полного фазового согласования ($v_g^{\text{opt}} = v_{\text{ph}}^{\text{THz}}$), что эквивалентно условию $n_g^{\text{opt}} = n_{\text{THz}}$, является решающим фактором при выборе нелинейного материала для эффективной генерации ТГц-излучения. В этом случае разность волновых чисел равна нулю ($\Delta k = 0$), а амплитуда ТГц-поля возрастает линейно с длиной кристалла ($E_{\text{THz}} \propto L$). При почти полном фазовом согласовании ($n_g^{\text{opt}} \neq n_{\text{THz}}$, $\Delta k \neq 0$) эффективность генерации ограничивается длиной когерентности L_c , определяемой условием $\Delta k L_c = \pi$. При этом $L_c = \pi / \Delta k$, где $\Delta k = \omega_{\text{THz}}(n_{\text{THz}} - n_g) / c$,

$$L_c = \frac{c}{2f_{\text{THz}} |n_{\text{THz}} - n_g|} \quad (5)$$

в коллинеарной и неколлинеарной конфигурациях. Разница между групповым показателем преломления оптической волны и показателем преломления ТГц-волны, обусловленная дисперсией кристалла GaSe, для необыкновенной волны составляет $\Delta n = 0.3$. При длине волны накачки 800 нм типичными значениями являются $n_g = 2.9$ и $n_{\text{THz}} = 3.2$ [27]. Значению $\Delta n = 0.3$ на частотах 1 и 2 ТГц соответствуют длины когерентности $L_c \approx 1$ мм и $L_c \approx 0.25$ мм, соответственно. При выполнении условия полного фазового согласования, как в нашем случае (рис.2), когда $n_g^{\text{opt}} = n_{\text{eff}}^{\text{THz}}$, длина когерентности стремится к бесконечности ($L_c \rightarrow \infty$). Однако, вследствие поглощения ТГц-излучения в кристалле, эффективная длина взаимодействия ограничивается длиной поглощения $L_a = 1/\alpha$. Поскольку в области частот до 1 ТГц поглощение невелико, и для обыкновенной волны коэффициент поглощения при 1 ТГц составляет $\alpha_o \approx 0.2 \text{ см}^{-1}$ [21], длина поглощения достигает $L_a = 5 \text{ см}$. С увеличением частоты коэффициент поглощения α возрастает и на частоте 3 ТГц достигает значения $\alpha^o = 10 \text{ см}^{-1}$. При этом длина поглощения L_a уменьшается до $L_a \approx 1 \text{ мм}$. Поскольку для кристалла GaSe коэффициент поглощения необыкновенной волны меньше, чем для обыкновенной ($\alpha_e < \alpha_o$) [30,31], и в области 3 ТГц $\alpha_e \approx 6-8 \text{ см}^{-1}$, то необыкновенной волне соответствует большая длина поглощения $L_a \sim 1.7-1.25 \text{ мм}$. Известно, что в волноводе с частичным заполнением кристаллом эффективное поглощение ТГц-излучения уменьшается с уменьшением толщины кристалла [7, 13]. При уменьшении толщины кристалла до 50 мкм эффективное поглощение ТГц-

излучения уменьшается по сравнению со случаем распространения в кристалле, расположенном в свободном пространстве, примерно в 1.83 раза. При этом коэффициент поглощения для необыкновенной волны составляет $\alpha_e \approx 3.3\text{--}4.4 \text{ см}^{-1}$, а длина поглощения увеличивается до $L_a \approx 3.0\text{--}2.5 \text{ мм}$. В наших расчетах, выполненных с использованием программы COMSOL Multiphysics, длина кристалла была выбрана равной 2.5 мм. Демонстрация выполнения условия фазового синхронизма при взаимодействиях типа $ee \rightarrow e$ и $oe \rightarrow o$, в зависимости от частоты в спектре ТГц импульса, при различных толщинах кристалла GaSe представлена на рис.2а.б. С уменьшением толщины кристалла ширина полосы ТГц-частот, находящихся в синхронизме, увеличивается и смещается в более высокочастотную область, вследствие уменьшения крутизны ε_{eff} с увеличением частоты. Например, при взаимодействии типа $ee \rightarrow e$ уменьшение толщины кристалла от 0.3 до 0.06 мм приводит к расширению полосы синхронизма от $\Delta f = 192$ до $\Delta f = 2100 \text{ ГГц}$. В случае взаимодействия типа $oe \rightarrow o$ при тех же толщинах кристалла ширина полосы синхронизма увеличивается от $\Delta f = 133$ до $\Delta f = 760 \text{ ГГц}$. Полученные результаты показывают, что ширина полосы фазового синхронизма для взаимодействию типа $ee \rightarrow e$ больше, чем для взаимодействия типа $oe \rightarrow o$.

Условия фазового синхронизма на практике реализуются путем выбора ориентации кристалла [32], настройки длины волны накачки [33], изменения температуры, или управления дисперсионными свойствами среды [34]. При выполнении условия ФС мощность генерируемого ТГц излучения P квадратично возрастает с длиной нелинейного кристалла L ($P \sim L^2$). В данной работе показано, что замедление ТГц-волны до групповой скорости оптического импульса v_g^{opt} может быть достигнуто путем изменения толщины t нелинейного кристалла. Этот эффект расширяет возможности использования нелинейных материалов со слабой анизотропией, но высокой нелинейной восприимчивостью второго порядка для генерации широкополосного и узкополосного ТГц-излучения.

Результаты показывают, что уменьшение толщины кристалла между пластинами волновода существенно расширяет полосу одномодового распространения спектральных компонент ТГц- импульса. В частности, для кристалла GaSe толщиной и высотой 0.15 мм одномодовое распространение основной моды TE_{10} достигается в диапазоне частот от 0.2 до 2 ТГц. Уменьшение толщины кристалла до 80 мкм расширяет этот диапазон до 4.5 ТГц. а до 60 мкм — до 5 ТГц.

4. Заключение

Металлический волновод с параллельными пластинами, частично заполненный нелинейным кристаллом, обладает рядом преимуществ для генерации терагерцовых импульсов. К ним относятся расширение полосы пропускания основной моды, выполнение условия фазового синхронизма при генерации ТГц-импульса в нелинейном кристалле (оптическое выпрямление фемтосекундного лазерного импульса), а также снижение потерь при распространении ТГц-волн. Исследование проводилось для двух типов взаимодействий $eo \rightarrow o$ и $ee \rightarrow e$, с использованием экспериментальных и расчетных значений показателей преломления в ТГц-диапазоне частот. Результаты численного моделирования показывают, что выбор нелинейного

кристалла, его диэлектрической проницаемости, толщины и положения в поперечном сечении волновода позволяет управлять эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} . Это обеспечивает выполнение условия фазового синхронизма между оптическим и ТГц излучениями, улучшение модового состава ТГц-импульса и расширение полосы пропускания основной моды сверхширокополосного ТГц-импульса. Показано, что уменьшение толщины кристалла приводит к расширению полосы одномодового распространения спектральных компонент ТГц-импульса (рис.3–4). В частности, для кристалла GaSe толщиной и высотой, равными 0.1 мм, основная мода TE_{10} распространяется в диапазоне частот 0.2–3 ТГц, тогда как при уменьшении толщины кристалла до 60 мкм верхняя граница диапазона увеличивается до 5 ТГц. Для каждого вида взаимодействия $ee \rightarrow e$ и $oe \rightarrow o$ при данных толщинах кристалла определены значения частот, при которых выполняется условие фазового синхронизма.

Предложенная PPNW-структура может быть использована в системах ТГц визуализации, неразрушающего контроля, безопасности и биомедицинских технологиях, где широко востребован источник излучения высокой яркости, а также в высокоскоростных широкополосных системах ТГц связи, интегральных схемах и гибридных волноводных устройствах. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании источников ТГц-излучения с улучшенными характеристиками и оптимизации условий генерации и распространения одномодовых терагерцевых волн.

Данная работа выполнена при поддержке текущего институционального финансирования. Дополнительные гранты для проведения или руководства данным исследованием не привлекались.

Мы выражаем благодарность Комитету по высшему образованию и науке Армении за финансовую поддержку научной работы лаборатории субмиллиметровых волн Ереванского государственного университета.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. H.-W. Hübers, R. Eichholz, S.G. Pavlov, H. J Richter. 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. Liu, W. Fu, Y. Luo. Trends in Biotechnology, **34**, 810 (2016).
6. G. Gallot, S.P. Jamison, R.W. McGowan, D. Grischkowsky. J. Opt. Soc. Am., **B17**, 851 (2000).
7. S.P. Jamison, R.W McGowan, D. Grischkowsky. Appl. Phys. Lett., **76**, 1987 (2000).
8. R. Mendis, D. Grischkowsky. J. Appl. Phys., **88**, 4449 (2000).
9. H. Wang, R.W. Knepper, N. Hossain, P. Marthi, J.-F. Millithaler, M. Margala.

- J. Physics: Conference Series**, **906**, 012024 (2017).
10. **R. Mendis, D. Grischkowsky**. Opt. Lett., **26**, 846. (2001).
 11. **E.M. Laziev, A.S. Nikoghosyan**. Proceed. Russian Acad. Sciences, Series Physics., **56**, 123 (1992).
 12. **A.S. Nikoghosyan, R.M. Martirosyan, A.A. Hakhoumian**. Armenian J. Physics, **11**, 263 (2018).
 13. **A.S. Nikoghosyan, R.M. Martirosyan, A.A. Hakhoumian, A.H. Makaryan, V.R. Tadevosyan, G.N. Goltsman, S.V. Antipov**. Armenian J. Physics., **11**, 263 (2018).
 14. **G.A. Kouzaev**. J. Comput. Electronics, **20**, 169 (2021).
 15. **Y. Yang, Y. Zhang, S. Hu, N. Yang, D. Teng**. Plasmonics, **20**, 3563 (2025).
 16. **R. Mendis, D. Grischkowsky**. Optics Letters, **26**, 846 (2001).
 17. **A.S. Nikoghosyan, V.R. Tadevosyan, G.N. Goltsman, S.V. Antipov**. J. Physics: Conference Series. **2548**, 012013 (2023).
 18. **A.S. Nikoghosyana, G.A. Parsamyan, A.A. Poghosyan, V.R. Tadevosyan**. J. Contemp. Phys., **60**, 354 (2025).
 19. **Y. Longfang, X. Ruimin, W. Zhihui, W. Lin**. Optics Express, **18**, 21725 (2010).
 20. **J. Hebling, A.G. Stepanov, G. Almasi, B. Bartal, J. Kuhl**. Appl. Phys. B., **78**, 593 (2004).
 21. **Ch.-W. Chen, T.T. Tang, S.H. Lin, J.Y. Huang, Ch.S. Chang, P.K. Chung, Sh.-T. Yen, C.L. Pan**. J. Opt. Soc. Am. B., **26**, A58 (2009).
 22. **M.M. Nazarov, S. Yu. Sarkisov, A.P. Shkurinov, O.P. Tolbanov**. Applied Physics Letters, **99**, 081105 (2011).
 23. **S.Yu. Sarkisov, M.M. Nazarov, A.P. Shkurinov, O.P. Tolbanov**. Proc. 34th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Busan, South Korea, Sept. 1 (2009).
 24. **K.L. Vodopyanov, L.A. Kulevskii**. Opt. Commun., **118**, 375 (1995).
 25. **L.-M. Zhang, J. Guo, D.-J. Li, J.-J. Xie, Yu.M. Andreev, V.A. Gorobets, V.V. Zuev, K.A. Kokh, G.V. Lanskii, V.O. Petukhov, V.A. Svetlichnyi, A.V. Shaiduko**. J. Appl. Spectroscopy, **77**, 850 (2011).
 26. **Y.J. Ding, Y. Jiang, G. Xu, and I. B. Zotova**. Proc. SPIE, **7600**, 76000G (2010).
 27. **L.-M. Zhang, J. Guo, D.-J. Li, Ji-J. Xie, Yu.M. Andreev, V.A. Gorobets, V.V. Zuev, K.A. Kokh, G.V. Lanskii, V.O. Petukhov, V.A. Svetlichnyi, A.V. Shaiduko**. J. Appl. Spectroscopy, **77**, 850, (2011).
 28. **H.A. Hafez, X. Chai, A. Ibrahim, S. Mondal, D. Férachou, X. Ropagnol, T. Ozaki**. J. Opt., **18**, 093004 (2016).
 29. **K.L. Vodopyanov, M.M. Fejer, X. Yu, J.S. Harris, Y.-S. Lee, W. C. Hurlbut, V.G. Kozlov, D. Bliss, C. Lynch**. Appl. Phys. Lett. **89**, 141119 (2006).
 30. **A.K. Кавеев, Г.И. Кронотов**. УФН, **196**, 182 (2026).
 31. **M.M. Nazarov, S.Yu. Sarkisov, A.P. Shkurinov, O.P. Tolbanov**. Appl. Phys. Lett., **99**, 081105 (2011).
 32. **K.L. Vodopyanov, M.M. Fejer, X. Yu, J.S. Harris, Y.-S. Lee, W.C. Hurlbut, V.G. Kozlov, D. Bliss, C. Lynch**. Appl. Phys. Lett., **89**, 141119 (2006).
 33. **C Bernerd, P. Segonds, J. Debray, J.F. Roux, E. Herault, J.L. Coutaz, I. Shoji, H. Minamide, H. Ito**. Optical Materials Express, **10**, 561 (2020).
 34. **D.E. Thompson, P.D. Coleman**. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., **22**, 995 (1974).

SINGLE-MODE TERAHERTZ PULSE PROPAGATION AND PHASE
MATCHING IN A PARALLEL-PLATE WAVEGUIDE PARTIALLY FILLED
WITH A NONLINEAR GaSe CRYSTAL

A.S. NIKOGHOSYAN, V.R. TADEVOSYAN

A numerical analysis of terahertz (THz) pulse propagation and phase matching (PM) in a parallel-plate metallic waveguide partially filled with a nonlinear crystal (PPNW) is presented. THz radiation is generated through optical rectification of the laser pulse in a GaSe nonlinear crystal partially filling the waveguide cross-section. The modal composition of the THz pulse and the phase-matching condition are numerically analyzed using Mathcad and COMSOL Multiphysics software packages. The study is performed for two types of optical–THz interaction, $eo \rightarrow o$ and $ee \rightarrow e$, employing both experimental and numerically modeled refractive-index data in the THz frequency range. The results show that reducing the crystal thickness between the waveguide plates significantly broadens the single-mode propagation bandwidth of the THz pulse spectral components. For a GaSe crystal with a thickness and height of 0.15 mm, single-mode propagation of the fundamental TE_{10} mode is achieved in the frequency range from 0.2 to 2 THz. Reducing the crystal thickness to 80 μm extends this range up to 4.5 THz, while a thickness of 60 μm increases it to 5 THz. It is shown that, for the considered crystal thickness, phase matching is achieved within specific THz frequency bands, and the phase-matching bandwidth increases as the crystal thickness decreases. The obtained results demonstrate that crystal thickness is a critical design parameter for achieving broadband single-mode THz propagation and efficient phase matching in parallel-plate metallic waveguides partially filled with nonlinear crystals.