

## Чувствительность протяженного терагерцового волновода к влажности заполняющего воздуха

© З.Ч. Маргушев,<sup>1</sup> А.В. Шилов,<sup>2</sup> В.В. Тепляков,<sup>3</sup> А.Б. Сотский,<sup>2</sup> М.М. Назаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кабардино-Балкарский научный центр РАН,  
360006 Нальчик, Россия

<sup>2</sup> Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова,  
212022 Могилев, Беларусь

<sup>3</sup> НИЦ „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия  
e-mail: zmargush@yandex.ru

Поступило в Редакцию 20 февраля 2026 г.

В окончательной редакции 27 апреля 2026 г.

Принято к публикации 5 мая 2026 г.

Изготовленный гибкий полимерный волновод терагерцового диапазона с поллой сердцевинной и отражающей капиллярной оболочкой протестирован на чувствительность к влажности заполняющего газа при пропускании через него мощного широкополосного терагерцового импульса. Для отрезка волновода длиной 1 м получено существенное различие в измеренных значениях прошедшей энергии ТГц-импульса при заполнении поллой сердцевины атмосферным воздухом и выдыхаемым влажным воздухом. В случае заполнения сердцевины сухим азотом достигнуты затухание сигнала менее 3 дБ/м и доставка излучения в полосе частот 1.9–2.1 ТГц на длину более 3 м, что превосходит аналогичные величины для известных в литературе гибких протяженных ТГц-волноводов. Показано, что изготовленный волновод может использоваться как сенсор влажности выдыхаемого воздуха в реальном времени. Определены спектральная полоса прозрачности, диапазон изменений прошедшей энергии ТГц-импульса и характерные времена изменения сигнала при изменении влажности заполняющего газа.

**Ключевые слова:** волновод, терагерцовый диапазон, влажность.

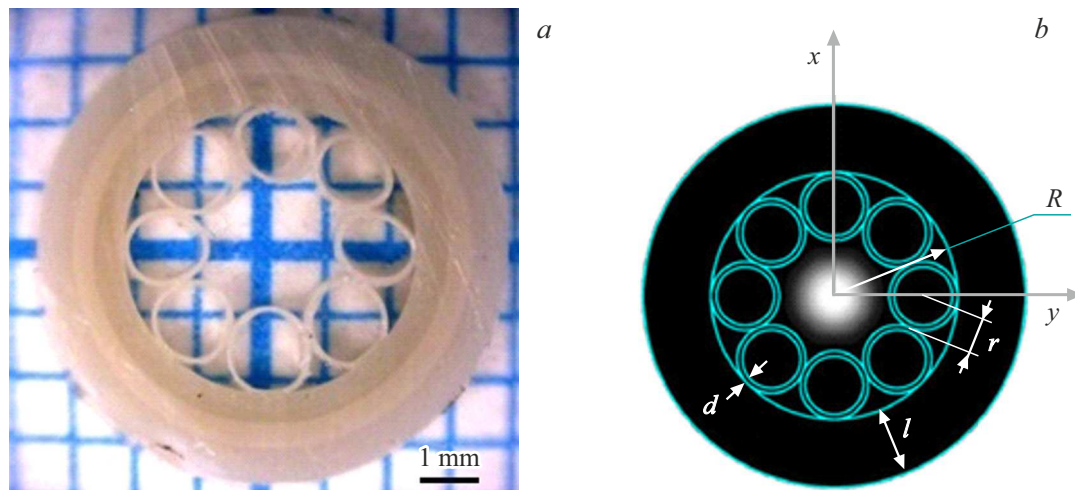
DOI: 10.61011/JTF.2026.08.63369.34-26

### Введение

Растущий интерес к применению терагерцовых (ТГц) технологий в последние годы приводит к росту потребности в разработке новых компонентов для эффективного управления и передачи излучения указанного диапазона [1]. Потенциал применения ТГц-излучения охватывает такие области, как помехозащищенная связь на малых расстояниях [2], неинвазивная визуализация патологических тканей в медицине [3], контроль качества фармацевтических препаратов, а также обнаружение скрытых предметов в сфере безопасности. При этом излучение диапазона 0.1–1 ТГц легко проникает сквозь пластик, картон и одежду [4], а в диапазоне 0.5–3 ТГц большинство поликристаллических веществ имеют характеристические спектральные полосы поглощения. Таким образом, диапазон 0.7–2.5 ТГц наиболее востребован в приложениях как компромисс между прозрачностью веществ и атмосферы и информативностью/чувствительностью спектра. Этот диапазон достаточно исследован за последние 20 лет благодаря наличию современных ТГц-источников и приемников на основе фемтосекундных (fs) лазерных импульсов, облучающих фотопроводящие антенны, либо нелинейные кристаллы. В биомедицинской диагностике ТГц-диапазон более предпочтителен по сравнению с ИК волнами, поскольку обладает более низкой энергией

фотонов, а также большей чувствительностью к наличию молекул воды и вариациям их состояния [3].

По сравнению с разработками ТГц-источников и детекторов, создание устройств для передачи излучения указанного диапазона является отстающим звеном. Передача в свободном пространстве исключена для большей части ТГц-спектра ввиду сильного поглощения водяными парами [5] и сильной дифракционной расходимостью (стабильный ТГц-пучок должен в диаметре на 2–3 порядка превышать длину волны субмиллиметрового масштаба). Поэтому актуальным решением является волноводная передача. Волноводы с малыми потерями и низкой дисперсией также необходимы для создания ТГц-систем связи нового поколения [6]. Основным препятствием в этом направлении по сравнению с активным использованием оптических волокон ИК-диапазона является отсутствие достаточно прозрачных веществ в ТГц-диапазоне. Исключения составляют высокоомный кремний, некоторые полимеры, сухой воздух и инертные газы, что создает перспективу для разработки волноводов с поллой воздушной (вакуумированной или заполненной газом) сердцевиной, окруженной отражающей и мало поглощающей оболочкой для эффективного удержания и передачи ТГц-излучения внутри волновода [7–9]. В отличие от случая оптических волокон ИК-диапазона со сплошной сердцевиной из кварцевого



**Рис. 1.** *a* — фотография поперечного среза изготовленного ТНз-волновода с полый сердцевинной и восьмикapиллярной оболочкой на фоне мм-сетки; *b* — характерные геометрические параметры конфигурации волновода, градации серого в центре — расчетное распределение интенсивности используемой волноводной моды [18].

стекла в рассматриваемом случае решается задача о передаче излучения в среде с показателем преломления меньшим, чем в оболочке самого волокна. Это приводит к необходимости учета открытого характера рассматриваемых волноводных структур и количественной оценки эффекта вытекания полей излучения и направляемых ими мод при моделировании [8,10]. Если для передачи ИК-излучения преимущественно используются собственные моды, то для ТНз-излучения — вытекающие моды [10], за исключением коаксиальных волноводов [11] и конфигурации волокон с подвесной сердцевинной [12]. При этом полые каналы с диаметром миллиметрового порядка позволяют быстро заполнять их малым количеством газа на большой длине взаимодействия, что оптимально для сенсоров состава газа, особенно если полоса прозрачности волновода с полый сердцевинной и структурированной капиллярной оболочкой охватывает линии поглощения целевого газа.

Попытки разработки сенсоров на основе ТНз-волноводов [13–16] показали, что для их достаточной эффективности требуется существенно повысить длину взаимодействия излучения с газовой средой. Известные современные подходы ограничены либо возможностями изготовления протяженных (единицы метров) волноводов [17], либо величиной пропускания излучения самим волноводом.

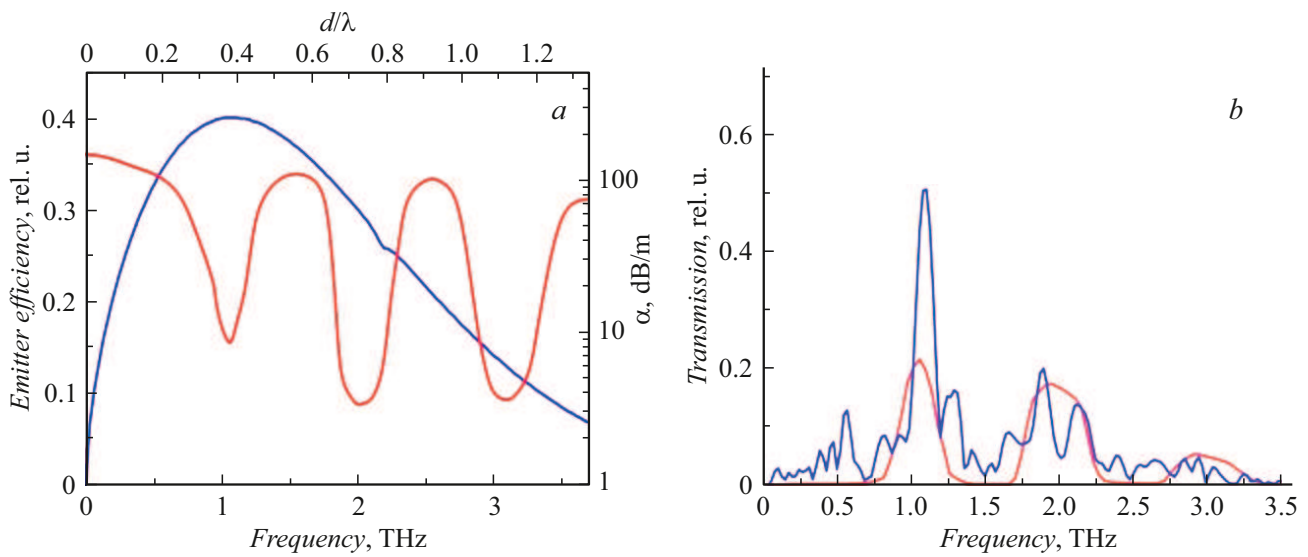
Цель настоящей работы — улучшить фактическую прозрачность ТНз-волноводов с полый сердцевинной и отражающей капиллярной оболочкой из восьми соприкасающихся капилляров [8,9] за счет удаления паров воды из волноведущего канала, исследовать чувствительность прошедшей энергии широкополосного импульса к влажности заполняющего воздуха. Для этого измерено пропускание ТНз-волновода при заполнении его полый сердцевинной сухим азотом и воздухом различной степени влажности.

## 1. Оценки пропускания ТНз-волновода и атмосферного воздуха

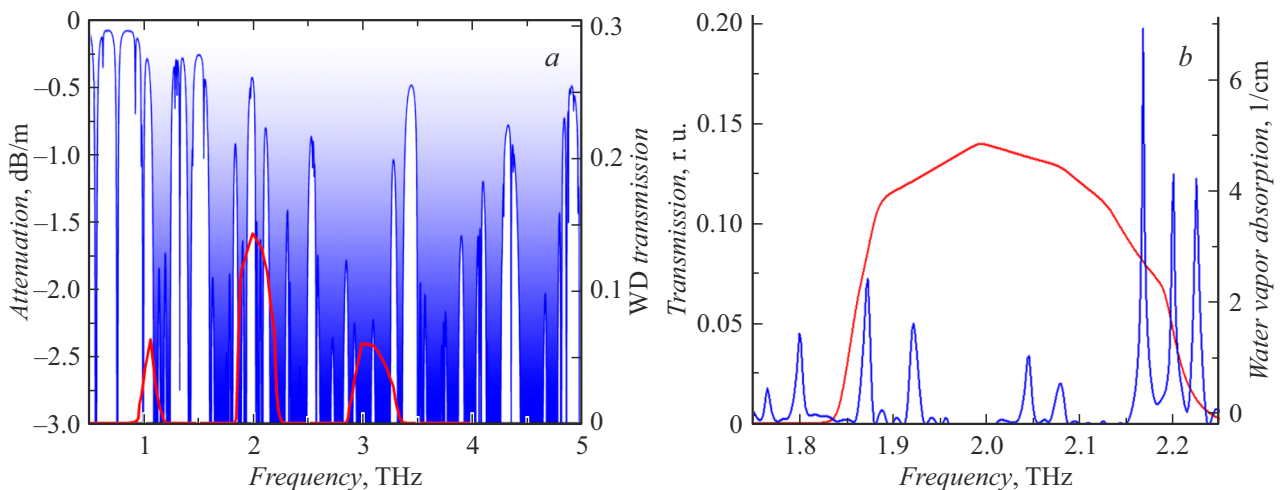
Фото поперечного среза исследуемого ТНз-волновода представлено на рис. 1, *a*. Его конфигурация аналогична волноводу, описанному в нашей работе [18], и он изготовлен нами из полипропилена по технологии „сборки и перетяжки“ [8,9,18]. В эксперименте использовались сегменты длиной 0,1, 1 и 3 м, отрезанные от единого образца с исходной длиной 4,5 м. Геометрические параметры конфигурации поперечного сечения, влияющие на спектр пропускания, обозначены на рис. 1, *b* и имеют следующие значения: толщина стенок капилляров  $d = (100 \pm 5) \mu\text{m}$ , средний радиус капилляра  $r = (630 \pm 20) \mu\text{m}$ , толщина внешней оболочки  $l = (1.35 \pm 0.05) \text{mm}$ , внутренний радиус оболочки  $R = (2.26 \pm 0.05) \text{mm}$ , радиус полый сердцевинной  $R_c = R - 2r = (1.00 \pm 0.04) \text{mm}$ .

Положение полос пропускания в спектре такого волновода в первую очередь определяется величиной  $d$  и масштабируется в широком диапазоне частот и толщин. Для восьмикapиллярной оболочки из полипропилена длины волн первых трех окон прозрачности соответствуют соотношениям  $d/\lambda_1 \approx 0.3$ ,  $d/\lambda_2 \approx 0.7$ ,  $d/\lambda_3 \approx 1.1$  (рис. 2, *a*) [8], где  $\lambda = c/f$  — длина волны ТНз-излучения с частотой  $f$ ,  $c$  — скорость света. Спектр поглощения волновода с учетом разброса толщины стенок капилляров рассчитан в соответствии с ранее развитой нами теорией [8,9] (рис. 2, *a*). При этом выходящий сигнал (рис. 2, *b*) рассчитывается с учетом формы спектра используемого ТНз-источника, известного из предыдущих исследований [19,20].

Из сравнения экспериментального и расчетного спектров пропускания короткого 10 см фрагмента волновода (рис. 2, *b*) можно подтвердить значения частот



**Рис. 2.** *a* — рассчитанный спектр поглощения капиллярного волновода (красная кривая, правая вертикальная ось) и спектр падающего импульса (синяя кривая, левая вертикальная ось); *b* — экспериментальный (синяя кривая) и рассчитанный (красная кривая) спектры THz-импульса, прошедшего через отрезок волновода длиной 10 см.

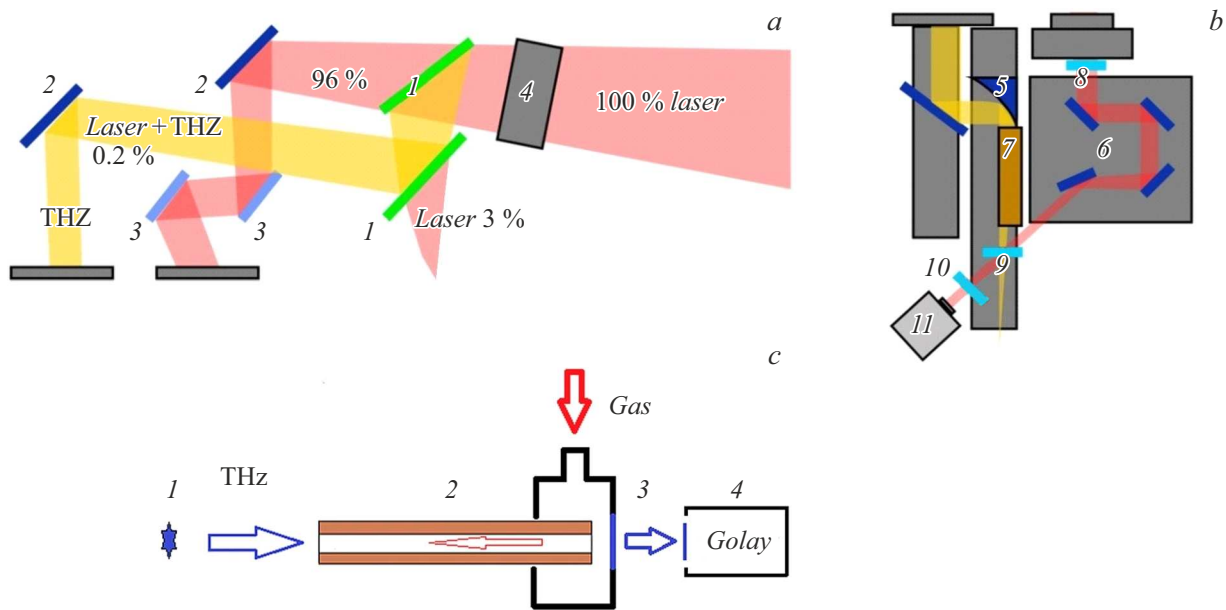


**Рис. 3.** *a* — расчетное атмосферное затухание при температуре 23 °С и относительной влажности 40%, полученное с использованием HITRAN 2004 (синяя заливка, левая вертикальная ось), и расчетный спектр на выходе волновода длиной 1 м без атмосферы (красная кривая, правая вертикальная ось); *b* — спектр поглощения паров воды (синяя кривая, правая вертикальная ось) на фоне второго окна прозрачности волновода (красная кривая, левая вертикальная ось).

первых двух диапазонов прозрачности, в которые попадает спектр THz-источника:  $f_1$  — (0.9–1.2) THz;  $f_2$  — (1.9–2.1) THz. Доля энергии в третьем диапазоне (2.8–3.4) THz мала. При этом оценки показывают, что в итоговом сигнале поглощение на выходе волновода будет порядка 3 dB/m во втором окне без учета поглощения атмосферы.

Поскольку планируется в итоге провести измерения THz-пропускания с разной средой заполнения волновода (атмосферный воздух, влажный воздух и азот), вначале оценим пропускание с атмосферной средой заполнения. Прозрачность атмосферы известна, поэтому

по пересечению окон прозрачности волновода и среды заполнения можно оценить полосы, в которых можно ожидать наиболее эффективное пропускание (рис. 3, *a*). Для оценки энергии выходящего импульса эти два спектра перемножаются с учетом длины волновода. На рис. 3, *b* более детально представлен участок спектра поглощения паров воды при нормальных (комнатных) условиях, измеренный ранее THz-спектрометром во временном представлении (THz-TDS) на фоне второго окна пропускания волновода. Из рис. 3 видно, что в данном исследовании наиболее перспективна полоса 1.8–2.2 THz, где есть как прозрачность системы



**Рис. 4.** Схема THz-генерации и детектирования с нелинейными кристаллами: *a* — генерация в ниобате лития (4), фильтрация THz-пучка от лазерного излучения двумя пластинами TiO (1), установленными под углом Брюстера. Вывод пучков при помощи зеркал (2) и кремниевых пластин (3) из вакуумной камеры; *b* — детектирование длительности и спектра THz-импульса снаружи вакуумной камеры: 5 — параболическое зеркало, 6 — линия задержки пробного импульса, 7 — место для измеряемого волновода, 8 — чистка входной поляризации, 9 — электрооптический кристалл ZnTe, 10 — скрещенный выходной поляризатор, 11 — ПЗС камера; *c* — схема измерения длинных волноводов: 1 — источник THz-излучения, синяя стрелка направление THz-луча; 2 — THz-волновод; 3 — система для заполнения волновода газом, а также для вывода THz-излучения из волновода, красная стрелка направление потока газа; 4 — THz-детектор (ячейка Голея).

(атмосфера имеет полосы пропускания до 0.5 dB/m на частотах 1.95 и 2.15 THz), так и чувствительность к концентрации паров воды на частотах 1.87, 2.04 THz и других.

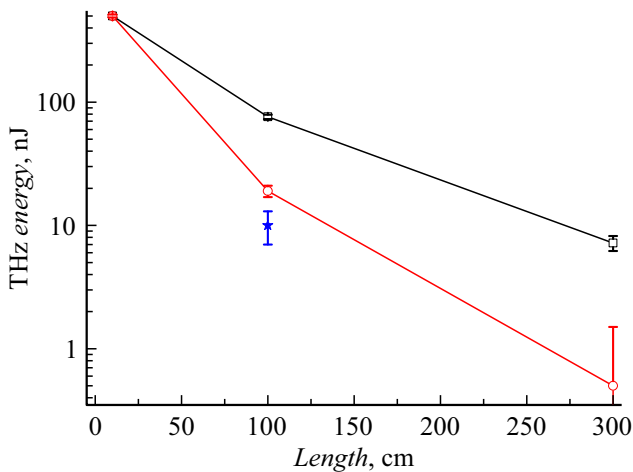
В третьем окне прозрачности волновода (2.8–3.4) THz поглощение влажного воздуха существенно выше (более 5 dB/m), а в первом окне преобладает поглощение самого волновода (10 dB/m). Поэтому считаем, что на метровых длинах энергия прошедшего THz-импульса определяется только вторым окном прозрачности ( $f_2 = (2.0 \pm 0.1)$  THz). Таким образом, оптимальная длина волны соответствует второму диапазону и составляет  $c/f_2 = \lambda_{\text{THz}} \approx 150 \mu\text{m}$ , тогда  $Rc/\lambda_{\text{THz}} \approx 6$  и минимальные потери могут быть  $\sim 1$  dB/m, согласно расчетам, приведенным на рис. 3 в работе [8].

## 2. Описание эксперимента

Для заполнения волновода газовой средой использовалась кювета КГ01-К (ООО „Инфраспек“, С-Петербург) с фиксированной длиной 100 mm, специально переделанная под данный эксперимент. На выходном торце кюветы кварцевое окно  $\varnothing 40$  mm в заводском исполнении было заменено на полипропиленовое окно с таким же диаметром и толщиной 1.5 mm. На входном торце вместо второго кварцевого окна был вставлен специальный держатель, который позволял герметично вводить вол-

новод в кювету на длину  $\sim 90$ –95 mm (практически до окна на противоположном торце) и центрировать вдоль продольной оси кюветы. Таким образом, THz-излучение подводилось практически вплотную (1 cm между торцом волновода и входом в THz-детектор) к входной апертуре детектора (ячейка Голея, Tindex). Из предыдущих исследований известна расходимость THz-пучка на выходе из волновода, составляющая  $\sim 15$ –20° от оси, что позволяет собрать  $\sim 70$  % THz-энергии в такой максимально простой схеме вывода.

Схема эксперимента представлена на рис. 4. THz-излучение генерировалось методом оптического выпрямления fs лазерных импульсов в нелинейном кристалле ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), оптимизированного на основе предыдущих работ [19,20]. Особенность  $\text{LiNbO}_3$  состоит в высокой лучевой прочности и в большом значении электрооптического коэффициента, что позволяет использовать несинхронную генерацию широкополосного THz-импульса в тонком слое. Специально изготовленный кристалл толщиной 100  $\mu\text{m}$  и апертурой  $40 \times 40$  mm [20] накачивался излучением мультитераваттного fs титан-сапфирового (Ti:Sapphire) лазерного комплекса в НИЦ „Курчатовский институт“ (частота лазерных импульсов 10 Hz, центральная длина волны  $\lambda = 800$  nm, длительность 30 fs, энергия 200 mJ в данных исследованиях).



**Рис. 5.** Величины прошедшего ТГц-сигнала для трех длин волновода в случае азота (серые символы и ломаная), атмосферного воздуха (40% влажность, красные символы и ломаная линия) и выдыхаемого воздуха (около 100% влажность, синий символ).

Оптимальная плотность энергии накачки подбиралась исходя из размера сходящегося пучка на кристалле и составила  $60 \text{ mJ/cm}^2$ , что соответствует интенсивности лазерного излучения  $2 \text{ TW/cm}^2$  с энергией импульса  $200 \text{ mJ}$  и диаметром пучка  $3 \text{ cm}$ , энергия сгенерированного ТГц-импульса составляла  $3 \mu\text{J}$ . Для удаления из ТГц-пучка излучения накачки лазера он подвергался двум последовательным 80% отражениям от стекол с покрытием из оксида индия-олова (ИТО), расположенных под углом Брюстера для излучения накачки  $\lambda = 800 \text{ nm}$ . При этом 96% лазерного излучения проходит сквозь такую пластину и удаляется из ТГц-пучка [21]. Такой способ фильтрации вносит меньше потерь для частот выше  $2 \text{ THz}$  по сравнению с ранее использованным способом с широкоапертурным спектроделителем на кварцевой подложке [20].

Исследуемый газ запускался через вентиль внутрь кюветы под давлением  $0.1 \text{ bar}$  (рис. 4, c) и, проходя через волновод, вытекал на другом свободном торце перед источником излучения. ТГц-излучение фокусировалось параболическим зеркалом с числовой апертурой  $0.3$  ( $25 \text{ mm}$  диаметр,  $75 \text{ mm}$  фокусное расстояние) точно в центр полого канала открытого торца волновода с помощью тонкой 3D-координатной трансляции фокусирующего зеркала, поскольку точность совмещения перетяжки ТГц-излучения с входным каналом волновода критично влияет на регистрируемый сигнал: при ошибке настройки  $\sim 100 \mu\text{m}$  в поперечном направлении приводили к росту потерь в несколько раз.

### 3. Результаты и обсуждение

Временной профиль ТГц-импульса на выходе короткого  $10 \text{ cm}$  образца измерен по схеме на рис. 4, b

методом электрооптического детектирования (ЭОД) за один импульс. Суть метода состоит в использовании 2D-изображения пробного, наклонного пучка в скрещенных поляризаторах, совмещенного по времени с ТГц-импульсом на ЭОД кристалле  $\text{ZnTe}$  толщиной  $0.3 \text{ mm}$  [20]. Качество данных такого метода неизбежно хуже, чем в традиционном способе спектроскопии во временном представлении (ТГц–TDS) [8], где тысячи слабых импульсов усредняются при измерении каждой точки во времени. Фурье-преобразованием измеренного временного профиля получили спектр прошедшего импульса (рис. 2, b), который согласуется с пропусканием, рассчитанным ранее строгим методом функции Грина [10]. Из измеренного спектра импульса уточнили частоты полос прозрачности, а из них фактические толщины капилляров  $d$ .

В дальнейшем измерили ТГц-энергию (интегральную по всему спектру импульса), прошедшую через сегменты длиной  $0.1$ ,  $1$  и  $3 \text{ m}$ . Каждый сегмент измерялся с заполнением волновода азотом и атмосферным воздухом (рис. 5). Потери (в  $\text{dB/m}$ ) рассчитывались из отношения энергий импульса  $E_{in}/E_{out}$  на входе и выходе с учетом разницы длин соответствующих участков волновода  $L_{out} - L_{in}$  следующим образом:  $L_{\text{loss}} = \log_{10}(E_{in}/E_{out}) / (L_{out} - L_{in})$ .

Эксперимент показал, что в случае азотного заполнения на самом коротком участке длиной  $L_1 = 0.1 \text{ m}$  энергия ТГц-импульса на выходе составляет  $E_1 = (500 \pm 10) \text{ nJ}$ . Для следующего сегмента волновода  $L_2 = 1 \text{ m}$  выходная энергия составила  $E_2 = (76 \pm 3) \text{ nJ}$ . Соответственно ослабление  $L_{\text{loss}0.1-1} = \log_{10}((500/76)/(1-0.1)) = (8.6 \pm 0.2) \text{ dB/m}$ . Аналогично на участке между  $L_2 = 1 \text{ m}$  и  $L_3 = 3 \text{ m}$  сигнал ослабляется в 4 раза, что соответствует потерям  $L_{\text{loss}2-3} = (3.0 \pm 0.1) \text{ dB/m}$  (для второго окна прозрачности в диапазоне  $1.9-2.1 \text{ THz}$ ). Такое существенное различие в ослаблениях между сегментами в  $1$  и  $3 \text{ m}$  объясняется тем, что в величину  $E_1$  значимый вклад вносят другие (первое и третье) окна прозрачности, искажая тем самым расчет затухания для обсуждаемого диапазона  $1.9-2.1 \text{ THz}$ . Таким образом, мы считаем, что на длинах  $1$  и  $3 \text{ m}$  основной вклад в измеряемую энергию дает только указанный диапазон.

В случае атмосферного воздуха выходной сигнал на длине  $3 \text{ m}$  слишком слаб для анализа. Разницу в ослаблении азотного и атмосферного заполнения на длине  $3 \text{ m}$  можно объяснить тем, что передача основной ТГц-энергии осуществляется во втором окне прозрачности волновода с центральной длиной волны  $\lambda_2 \approx 150 \mu\text{m}$  ( $f_2 \approx (2.0 \pm 0.1) \text{ THz}$ ), в котором, наряду со значимой полосой пропускания, также присутствуют полосы поглощения влажного воздуха (рис. 3). Эксперимент также показал, что самый короткий  $10 \text{ cm}$  фрагмент волновода практически не чувствителен к заполнению газом.

Заполнение азотом  $1 \text{ m}$  волновода повышает выходной сигнал по сравнению с атмосферным воздухом в 4 раза. Тестирование этого же волновода с выдыхаемым

человеком воздухом (для здорового человека влажность выдыхаемого воздуха близка к 100%) показало падение сигнала до двух раз по сравнению с атмосферным заполнением. Эксперименты показали, что при смене газовой среды изменение сигнала начинают наблюдаться за 1–2 с, что, например, достаточно для измерения ритма дыхания человека (за 1 с сигнал изменяется на 50%–70% от стационарного значения). Для точного измерения величины влажности при изменении исследуемого газа потребуется 20 с для выхода сигнала сенсора на истинное значение, а также стабильная влажность газа в течение нескольких секунд измерения. В частности, после использования влажного воздуха внутри волновода продувка азотом восстановила сигнал (на длине 1 м) за 20 с на 95%, т.е. возможное осаждение молекул воды на внутренних стенках волновода обратимо и не критично влияет на THz-пропускание в данной конфигурации.

## Заключение

Методом вытяжки из полипропиленовых труб изготовлен четырехметровый волновод с полый сердцевинной и отражающей капиллярной оболочкой для проведения экспериментов по измерению зависимости пропускания THz-излучения от газовой среды заполнения. Зафиксировано существенное изменение прошедшей энергии мощного THz-импульса при заполнении полый сердцевинной волокна сухим азотом, атмосферным воздухом и выдыхаемым влажным воздухом.

Показано, что можно в разы повысить пропускание полых метровых THz-волноводов, если в рабочих спектральных полосах избежать поглощения передаваемых сигналов парами воды. Этого можно достичь путем подбора спектрального положения окон прозрачности волокна за счет вариации толщины стенок капилляров в оболочке. Также продемонстрировано, что заменой влажного воздуха сухим азотом во внутреннем объеме волновода можно эффективно повысить его пропускание.

При частичном совпадении спектрального положения окон прозрачности и линий паров воды THz-волновод капиллярной структуры и метровой длины может использоваться как сенсор влажности выдыхаемого воздуха в реальном времени. Продемонстрировано четырехкратное изменение энергии прошедшего широкополосного THz-импульса при изменении влажности от минимальной до максимально достигаемой в измерениях. Определены характерные времена изменения сигнала, связанного с изменением влажности заполняющего газа.

Предложенный метод позволит эффективнее использовать излучение непрерывного, узкополосного THz-источника, например, квантово-каскадного лазера или гармоники СВЧ-генераторов. В перспективе частоты доступных, компактных квантово-каскадных лазеров станут менее 3 THz, а гармоники СВЧ генераторов станут

более 1 THz, что попадает в диапазоны прозрачности исследованного волновода со стороны высоких и низких частот соответственно.

В зависимости от целей поставленной задачи, сдвиг полос прозрачности волновода, осуществляемый изменением толщин стенок капилляров, относительно полос поглощения атмосферы может существенно улучшить прозрачность волновода и/или его чувствительность к влажности.

## Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории ССП/НИЦ КИ за помощь в измерениях, коллегам из МГУ за предоставление доступа к THz-TDS-спектрометру для измерения спектра пропускания атмосферы.

## Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке гос. задания НИЦ КИ пункт 2П1, гос. задания FMEW-2025-0019 ИИПРУ КБНЦ РАН, Государственной программы научных исследований Республики Беларусь „5.1. Фотоника и лазерно-оптические технологии“ и гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф25М-032).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] D.M. Mittleman. *J. Appl. Phys.*, **122** (23), 230901 (2017). DOI: 10.1063/1.5007683
- [2] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebel, T. Kurner. *IEEE Antennas Propag Mag.*, **49** (6), 24 (2007). DOI: 10.1109/MAP.2007.4455844
- [3] K.I. Zaytsev, I.N. Dolganova, N.V. Chernomyrdin, G.M. Katyba, A.A. Gavidush, O.P. Cherkasova, V.V. Tuchin. *J. Opt.*, **22** (1), 013001 (2019). DOI: 10.1088/2040-8986/ab4dc3
- [4] W.L. Chan, J. Deibel, D.M. Mittleman. *Rep. Prog. Phys.*, **70** (8), 1325 (2007). DOI: 10.1088/0034-4885/70/8/R02
- [5] Y. Huang, P. Sun, Z. Zhang, C. Jin. *Appl. Opt.*, **56** (20), 5698 (2017). DOI: 10.1364/AO.56.005698
- [6] Md.S. Islam, C.M.B. Cordeiro, M.A.R. Franco, J. Sultana, A.L.S. Cruz, D. Abbott. *Opt. Express*, **28** (11), 16089 (2020). DOI: 10.1364/OE.389999
- [7] H. Li, Y. Cao, M. Skorobogatiy, S. Atakaramians. *APL Photon.*, **10** (2), 021101 (2025). DOI: 10.1063/5.0239310
- [8] M.M. Nazarov, A.V. Shilov, K.A. Bzheumikhov, Z.Ch. Margushev, V.I. Sokolov, A.B. Sotsky, A.P. Shkurinov. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **8** (2), 183 (2018). DOI: 10.1109/TTHZ.2017.2786030

- [9] M. Nazarov, A. Shilov, Z. Margushev, K. Vzheumikhov, I. Ozheredov, A. Angeluts, A. Shkurinov. *Appl. Phys. Lett.*, **113** (13), 131107-1 (2018). DOI: /10.1063/1.5040306
- [10] А.Б. Сотский. *Теория оптических волноводных элементов* (УО МГУ им. А.А. Кулешова, Могилев, 2011)
- [11] А.В. Шилов, М.М. Назаров. *Материалы междунауч.-техн. конф. „Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии“* (Могилев, Беларусь, 2020), с. 307.
- [12] G. Xu, K. Nallappan, Y. Cao, M. Skorobogatiy. *Sci. Rep.*, **12** (1), 4551 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-08334-6
- [13] J.Y. Lu, B. You, J.Y. Wang, S.S. Jhuo, T.Y. Hung, C.P. Yu. *Sensors*, **20** (21), 6268 (2020). DOI: 10.3390/s20216268
- [14] P.X. Neumaier, K. Schmalz, J. Borngreber, R. Wylde, H.W. Hübers. *Analyst*, **140** (1), 213 (2015). DOI: 10.1039/C4AN01570C
- [15] T. Katagiri, T. Suzuki, Y. Matsuura. *Opt. Engineer.*, **57** (5), 054104 (2018). DOI: 10.1117/1.OE.57.5.054104
- [16] B. You, J.Y. Lu. *Opt. Exp.*, **25** (5), 5651 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.005651
- [17] G. Humbert, J.L. Auguste, G. Ducournau, J.F. Lampin. *The 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (IEEE, 2023), p. 1–2.
- [18] З.Ч. Маргушев, К.А. Бжеумихов, М.М. Назаров. *Письма в ЖТФ*, **49** (12), 22 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.12.55569.19558
- [19] М.М. Назаров, Р.А. Шчеглов, В.В. Тепляков, М.В. Чашчин, А.В. Митрофанов, Д.А. Сидоров-Бирюков, В.У. Панченко, А.М. Желтиков. *Opt. Lett.*, **46** (23), 5866 (2021). DOI: 10.1364/OL.434759
- [20] В.В. Тепляков, О.П. Черкасова, М.М. Назаров, М.Р. Конникова, В.А. Твердислов, П.М. Готовцев. *Опт. и спектр.*, **133** (5), 585 (2025). DOI: 10.61011/OS.2025.05.60798.22-25
- [21] D. Jang, K.Y. Kim. *Opt. Exp.*, **28** (14), 21220 (2020). DOI: 10.1364/OE.398268