

М.М. Назаров, А.Г. Савельев,
А.А. Ангелуц, И.А. Ожередов (Москва, Россия),
З.Ч. Маргушев (Нальчик, Россия)
А.В. Шилов (Могилев, Беларусь)

КАПИЛЛЯРНЫЕ ВОЛНОВОДЫ ДЛЯ ДОСТАВКИ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ РАСТВОРОВ

Гибкие полимерные волноводы востребованы для передачи широкополосного терагерцового (ТГц) излучения. С позиций минимизации потерь и сохранения качества передаваемого сигнала оптимизирована капиллярная структура с полостью сердцевинной. Измерения, проведенные с помощью импульсного ТГц спектрометра и квантово-каскадного лазера, подтверждают теоретические расчеты. Разработаны методы изготовления полимерных микроструктурных волноводов с системой воздушных каналов методом сборки-перетяжки. Созданы гибкие волноводы для доставки как низкочастотного, импульсного, так и высокочастотного узкополосного ТГц излучения. Показана возможность диагностики уровня глюкозы в плазме крови с помощью капиллярного ТГц сенсора.

Ключевые слова: ТГц, полимер, капиллярные волноводы, сенсор.

For transmission of a broadband THz radiation flexible waveguides are developed. To minimize losses, both experimentally and theoretically capillary polymer waveguides with air core are investigated. Modeling of the transmission spectrum and the dispersion of the waveguide coincide with measurements made by THz-TDS. Solution sensing application is demonstrated.

Keywords: THz, polymer, capillary waveguide, sensor.

Терагерцовое (ТГц) излучение перспективно в таких приложениях, как передача информации, спектроскопия газов и растворов, неразрушающая дистанционная диагностика объектов. Однако вопрос о доставке ТГц излучения на большие расстояния остается нерешенным, поскольку все известные в настоящее время вещества, кроме сухого воздуха, обладают в этом диапазоне значительным поглощением [1]. Поэтому в качестве материалов стенок волноводов, направляющих излучение по полости сердцевинной, нами были использованы наиболее прозрачные полимеры-термопласты, которые позволяют сделать волокно достаточно гибким и удовлетворительно прозрачным для передачи ТГц излучения. Разработанные капиллярные волноводы могут найти применение при дистанционном зондировании объектов, для контроля следов вредных веществ в атмосфере, анализа состава биологических растворов [2], локальных измерений влажности кожи.

Для изготовления опытных образцов структурированных полимерных волноводов [3; 6] была адаптирована к полимерным материалам стекловолоконная технология «сборки и перетяжки». Для ее реализации использовалась экспериментальная вытяжная башня КБНЦ РАН вертикального исполнения, высотой 6 м. Установка содержит трехзонную печь и механизм вытягивания заготовки из зоны нагрева, которые расположены вертикально на одной линии. В отличие от классической стекловолоконной технологии, в стадию изготовления включены дополнительные этапы для изменения пропорций толщины стенок к внутреннему диаметру капилляров. Эта операция позволяет изготавливать из одной и той же исходной заготовки волноводы для различных диапазонов частот.

Ряд изготовленных из полипропилена структур показан на рис. 1. а)-d). Основным управляющим параметром является толщина стенки капилляра – d [3], меняя которую можно двигать окна прозрачности по оси частот – рис. 1. е).

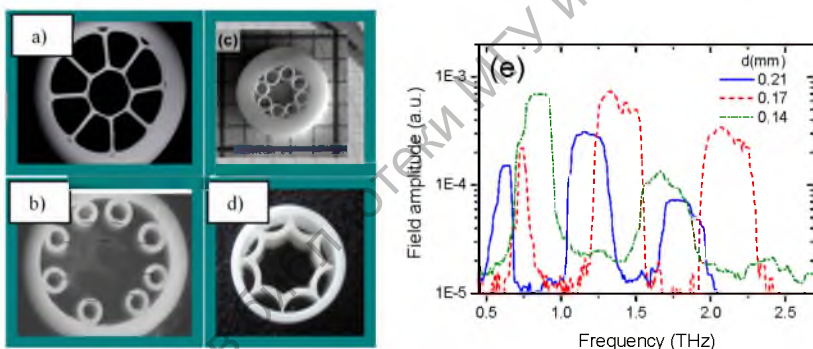


Рис. 1. а)-d) Изготовленные типы полимерных волноводов с полой сердцевиной; е) спектр ТГц импульса, прошедшего через волновод с различной толщиной стенки капилляра d

Экспериментальные измерения проведены с помощью импульсного ТГц спектрометра в диапазоне частот 0.1-3.2 ТГц, а также с помощью квантово-каскадного лазера (ККЛ) на частоте 3.1 ТГц [6]. Профиль поля в волноводе измерялся с помощью камеры микроболометров. Оценки комплексных постоянных распространения волноводных мод получены путем нормировки спектра импульса, прошедшего через волновод, на спектр падающего импульса [3].

Теоретически показано [4], что капиллярные фотонно-кристаллические волокна (рис. 1-2) – перспективная конфигурация, позволяющая минимизировать потери и дисперсию передаваемого ТГц сигнала. В оптиче-

ском диапазоне частот такие волокна трудно изготовить технологически, но при переходе к ТГц частотам абсолютные размеры волокон увеличиваются на три порядка, поэтому прецизионное создание капиллярных волокон упрощается. При использовании толстостенных капилляров (большое отношение толщины стенки к радиусу трубки) волноводная структура может быть одномодовой.

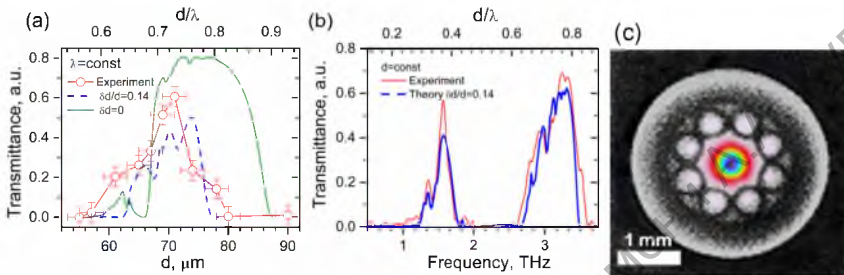


Рис. 2. Пропускание капиллярного волновода в зависимости от: а) толщины стенки d (при частоте $f = 3.1$ ТГц) и б) от частоты при фиксированном $d = 74$ мкм. Красные точки и линии соответствуют эксперименту, синие и зеленые – теоретическим расчетам. в) измеренное распределение ТГц поля по сечению волновода

Капиллярный волновод может исправлять пространственное распределение поля моды, отсекал лишние боковые частоты и доставлять гибким образом на расстояние до 1 метра излучение ККЛ. Были определены оптимальные размеры волноводной структуры, минимально возможные и реально достижимые величины потерь (рис. 2). Для согласования теории с экспериментом необходимо учитывать разброс толщины стенки – δd , который составлял 14% от толщины d (рис. 2). В итоге, оптимальный волновод для частоты 3.1 ТГц имел общий диаметр менее 3 мм, потери – 10 дБ/м, и он эластично сгибается без увеличения потерь до радиуса кривизны 7 см [3].

Использование волноводного эффекта позволяет увеличить более чем на порядок длину взаимодействия излучения с исследуемым веществом, существенно повысить чувствительность к малым изменениям оптических свойств в исследуемых веществах. Появляется задача создать гибкий волновод для субТГц излучения для применения в медицинской ТГц диагностике труднодоступных органов, для биомедицинских сенсорных приложений. Нами показано, что с точки зрения спектроскопии биотканей и жидкостей наиболее информативным является диапазон частот $f = 0.02$ -0.5 ТГц [5]. Создание гибкого волновода в данном диапазоне осложнено резким возрастанием потерь при малом отношении диаметра волновода D_{out} к длине волны излучения – λ (отношение D_{out}/λ должно быть меньше 5 для

сохранения гибкости, а само $D_{\text{out}} < 4$ мм). При условии $D_{\text{out}}/\lambda \sim 1$ капиллярное кольцо обладает высокими потерями и недостаточной гибкостью, поэтому также изучались другие типы структур, показанные на рис. 1 а. Пока наиболее практичным оказывается 8-капиллярная структура, где два диаметрально противоположных капилляра заполняются исследуемым раствором – рис. 3 а.

Для оптимизации волноводной структуры под сенсорные приложения предположим, что ТГц сигнал на выходе волокна обрабатывается по стандартной схеме ТГц спектроскопии во временной области. В этом случае на частоте f измеряемый сигнал связан с характеристиками волновода как:

$$kz \operatorname{Im} \Delta\beta = \ln \left| \hat{E} / \hat{E}_0 \right|, \quad (1)$$

где $k = 2\pi f / c$ – волновое число в вакууме, z – длина волновода, $\Delta\beta = \beta - \beta_0$. β и β_0 – безразмерные постоянные распределения основной моды волновода, E и E_0 – преобразования Фурье напряженности электрического поля моды на частоте f на выходе волновода. В соответствии с (1) в линейном по концентрации приближении:

$$C = \ln \left| \hat{E} / \hat{E}_0 \right| \left[kz \operatorname{Im} (\partial\beta / \partial\varepsilon \cdot \partial\varepsilon / \partial C) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость раствора на частоте f , а производные рассчитываются при $C = 0$.

Для задания ε использована дисперсионная модель водного раствора глюкозы на основе наших данных из [5]:

$$\varepsilon = 2.5 + 75(1 - 0.00074 * C) (1 + i19\pi f)^{-1} + 1.47(1 + i * 0.46\pi f)^{-1} + 32(28.09 - f^2 + i5.35f)^{-1}, \quad (3)$$

где C – концентрация глюкозы в мг/мл, f берется в ТГц. Данные на рис. 3 соответствуют предельным случаям $C = 0$ и $C = 800$ мг/мл.

Уровень ошибок, определяемый конфигурацией волокна, записывается в виде:

$$P = \left| \operatorname{Im} \beta_0 \right| \left| \operatorname{Im} (\partial\beta / \partial\varepsilon \cdot \partial\varepsilon / \partial C) \right|^{-1}. \quad (4)$$

Коэффициент P выбран в качестве критерия оптимизации [2], в результате среди изготовленных сенсоров наиболее чувствительным оказался волновод с толщиной стенки 265 мкм и общим диаметром 10 мм, работающий на частотах 0.32-0.5 ТГц. Все сенсоры протестированы на растворе глюкозы и сравниваются со случаем заполнения водой.

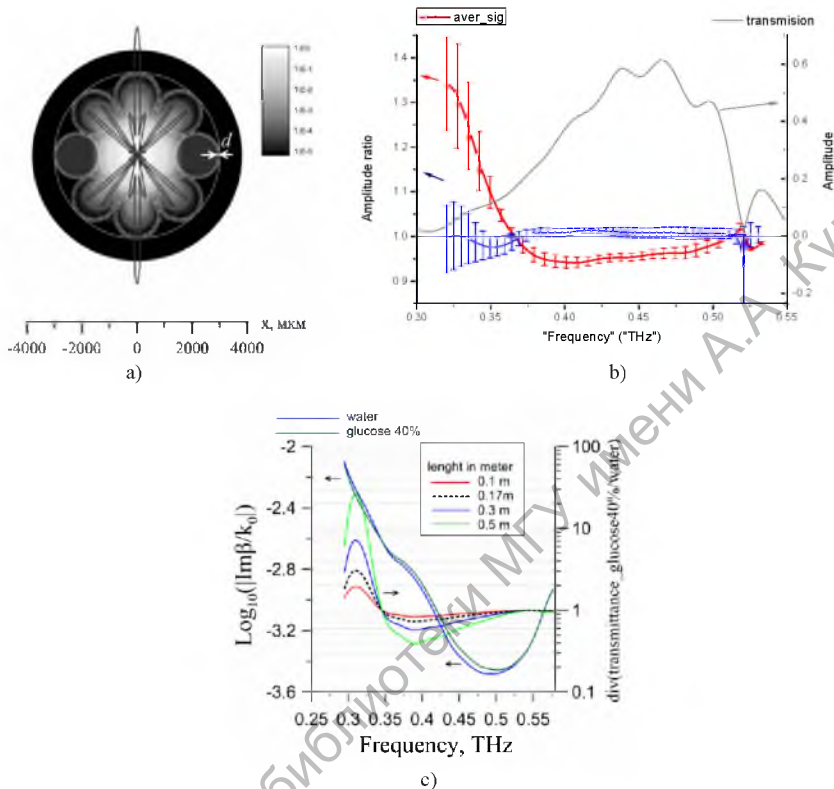


Рис. 3. Схема заполнения капиллярного сенсора раствором а) экспериментальные б) и теоретические в) спектры пропускания сенсора с раствором глюкозы 800 мг/мл, нормированные на пропускание сенсора с водой.

На правой шкале приведена форма и границы окна прозрачности

Показано, что использование капиллярных сенсоров позволяет определять концентрацию глюкозы в воде (в частности раствор глюкозы 200 мг/мл надежно отличается от случая дистиллированной воды). Для увеличения чувствительности необходимо уменьшить толщину стенок капилляра и проводить измерения в диапазоне низких частот.

Между случаями заполнения 2 капилляров раствором и водой на рис. 3 видны ожидаемые отличия в прошедшем через волновод сигнале. Например, для случая наличия глюкозы в воде происходит увеличение амплитуды пропускания и возрастание фазы на низкочастотном краю окна

прозрачности. Величина наблюдаемых отличий согласуется с теоретическим расчетом.

Кроме сенсорных приложений, такие ТГц волноводы можно использовать для создания зондов, используемых для сканирования поверхности органов. Зная, как изменяется концентрация белка и глюкозы (максимум на 5% от всего объема) в крови больного субъекта мы моделируем отличия в спектре ТГц отражения, получаемого с помощью волноводного зонда. Максимум чувствительности таких зондов наблюдается в районе 0.3 ± 0.2 ТГц. Для этих частот наиболее практичной волноводной структурой является полимерный коаксиал.

В заключение отметим, что за счет перераспределения энергии моды из диэлектрика в воздух удалось в сотни раз снизить потери в ТГц волноводах и целенаправленно оптимизировать дисперсионные характеристики мод. Созданы прозрачные и гибкие ТГц волноводы для диапазона частот 0.5-3 ТГц, для доставки ТГц излучения и диагностики водных растворов. Результаты работы могут найти применение при создании компактных ТГц зондов и сенсоров.

Авторы благодарны проф. А.П. Шкуринову за экспериментальную базу и проф. А.Б. Сотскому за теоретическую поддержку. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №18-52-00040, 17-00-00270 и БРФФИ F18R-143/1.

Литература

1. Ахманов, А.С. Терагерцовая оптоэлектроника и ее применения / А.С. Ахманов, А.А. Ангелуц, А.В. Балакин [и др.] // Современные лазерно-информационные технологии, РФФИ, Москва. – 2014 г. – С. 758.
2. Shilov, A.V. Hollow-core capillary waveguide as sensitive element of a water solution THz sensor / A.V. Shilov, A.B. Sotsky, M.M. Nazarov // <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/6511>.
3. Nazarov, M. Eight-capillary cladding THz waveguide with low propagation losses and dispersion / M.M. Nazarov, A.V. Shilov, K.A. Bzheumikhov, Z.Ch. Margushev, V.I. Sokolov, A.B. Sotsky, A.P.Shkurinov // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2018. – Vol.8, Issue 2. – P. 183–191.
4. Сотский, А.Б. Моды капиллярных фотонно-кристаллических волокон с поллой сердцевиной / А.Б. Сотский, О.А. Бельская, Л.И. Сотская // Оптика и спектроскопия. – 2010. – Т. 109, № 5. – С. 862–869.
5. Nazarov, M.M. Study of the dielectric function of aqueous solutions of glucose and albumin by THz time-domain spectroscopy / M.M. Nazarov, O.P. Cherkasova, A.P. Shkurinov // Quant. Electron. – 2016. – Vol. 46, No.6. – P. 488–495.
6. Nazarov, M. A flexible terahertz waveguide for delivery and filtering of quantum-cascade laser radiation / M. Nazarov, A. Shilov, Z. Margushev, K. Bzheumikhov, I. Ozheredov, A. Angeluts, A. Sotsky and A. Shkurinov // APPLIED PHYSICS LETTERS. – 2018. – Vol. 113, 131107.