

УДК 006:61

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-162-180

ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, Плехановского, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, Плехановского, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Целью работы является рассмотрение вопроса безопасного распространения терагерцового излучения в биологических объектах. Приведен краткий обзор исследований механизмов влияния терагерцового излучения на биологические среды. Рассмотрены оптические характеристики крови и ее компонентов в ТГц-диапазоне частот. Установлено, что не определены точно границы терагерцового диапазона длин волн. Установлено, что учет недавно открытого эффекта фотонной струи позволяет проникать терагерцовому излучению в биологические объекты на значительные глубины за счет эффекта квазиоптического мезоразмерного волновода, составленного из сферических или дисковых частиц. Усиление мезоразмерных частиц, формирующих фотонную струю, могут значительно увеличить значение плотности интенсивности излучения на биологическом объекте исследования.

Ключевые слова: фотонная струя, мезоразмерная частица, терагерцовый диапазон длин волн, биологическая среда, квазиоптический мезоразмерный волновод

Введение

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного спектра лежит между инфракрасным диапазоном и областью миллиметровых длин волн. Граница терагерцового диапазона в настоящее время точно не определена. Например, в более широкой интерпретации терагерцовый диапазон занимает область частот от 100 ГГц до 10 ТГц или диапазон длин волн от 3 мм до 30 мкм. Но, в соответствии с ГОСТ 24375–80 и с рекомендациями Международного союза электросвязи, терагерцовый диапазон определяется как диапазон частот от 300 ГГц до 3 ТГц или диапазон длин волн от 1 до

0,1 мм, а в соответствии со стандартом Международной организации по стандартизации (ISO), терагерцовый диапазон находится в интервале от 300 ГГц до 6 ТГц [1].

Активное освоение и внедрение терагерцового излучения в повседневную практику все в большей степени вызывает воздействие данного излучения на человека. Это вызывает беспокойство по поводу возможных рисков для здоровья на фоне недостаточно хорошо изученных биологических эффектов, связанных с этим типом излучения [2]. Возник вопрос о зависимости реакции живых объектов от физических параметров терагерцового излучения и оценке границ безопасности его применения [3].

Существующие в настоящий момент санитарные нормы ограничиваются спектральным диапазоном от 300 кГц до 300 ГГц [4–6]. В Российской Федерации для электромагнитного излучения с частотой, не превышающей 300 ГГц, безопасным уровнем плотности потока энергии, или интенсивности, является величина $2 \cdot 10^{-4}$ Вт/см² за час облучения для работающего персонала [4] и 10^{-5} Вт/см² для населения (при круглосуточном облучении) [7]. Международная комиссия по защите от неионизирующей радиации (ICNIRP) ограничивает интенсивность до 10^{-3} Вт/см² для облучения населения в диапазоне частот от 2 до 300 ГГц в течение шести минут [8]. Эти предельные уровни плотности мощности основаны на тепловых эффектах, возникающих при воздействии электромагнитного излучения на объекты.

Выше 300 ГГц установленных ограничений для общего облучения населения в настоящее время не существует.

Терагерцовый диапазон является областью сближения электроники и фотоники, существенно отличающихся как теоретической базой, так и техникой генерации, осуществления приема и обработки электромагнитных волн [1].

Особенностью терагерцового диапазона является то, что излучение является неионизирующим и не повреждает биологические молекулы; обладает большой проникающей способностью через диэлектрические материалы, такие как дерево, бумага, ткань, пластмасса, керамика; сильно поглощается полярными веществами, в том числе водой; каждое вещество имеет в ТГц-диапазоне свой, присущий только ему спектральный «портрет». Вследствие малой энергии квантов ТГц-излучение сравнительно безопасно для живых организмов и может быть использовано для выявления патологий и инородных образований методами ТГц-томографии.

Основные результаты исследования

В работах [2, 9] приведен обзор исследований механизмов влияния терагерцового излучения на клетки. Обычно рассматриваются два механизма взаимодействия терагерцового излучения с биологическими объектами: тепло-

вое, связанное с нагревом облучаемых объектов вследствие сильного его поглощения водой [10–14], и нетепловой механизм взаимодействия терагерцового излучения с биологическими системами, связанный с резонансным взаимодействием терагерцового излучения с ДНК [15–21]. В одной из первых работ, посвященных этой проблеме, был предсказан ТГц-клеточный резонанс [22]; обширные исследования в этой области проводились и в России [23]. Поскольку в белках и олигонуклеотидах обнаружены резонансные моды, возможно воздействие ТГц-излучения на клеточные и субклеточные процессы. При ТГц-облучении на резонансных частотах возможны изменения молекулярной или кристаллической структуры вещества, следовательно, могут создаваться материалы с новыми свойствами [24].

Эксперименты по воздействию терагерцового излучения на клетки крови демонстрируют увеличение проницаемости клеточной мембраны; влияние на морфологию, пролиферацию и агрегацию клеток; гено- и цитотоксические эффекты [2].

Данные по влиянию терагерцового излучения на клетки кожи показали, что однозначной зависимости эффектов терагерцового излучения от интенсивности излучения не наблюдается [2].

При изучении эффектов терагерцового излучения на нервные клетки установлена селективность. Например, при облучении на низких частотах непрерывным источником терагерцового излучения наблюдается изменение адгезивных свойств мембран и развитие апоптоза, а при облучении с частотой 3,68 ТГц наблюдается образование новой нервной сети. Терагерцовое излучение может приводить либо к обратной проницаемости мембран, при облучении на частоте 2,3 ТГц, либо к гибели клеток, при облучении с частотой 2 ТГц [2].

Проводятся исследования [9, 25] по применению ТГц-излучения для распознавания белковых структурных состояний, мониторинга рецепторных связей, выполнения безмаркерного секвенирования ДНК, визуализации и каталогизации поглощения и контрастного механизма в тканях, исследования радиационных эффектов в биопроцессах и образцах.

Биомедицинские приложения ТГц-излучения в большей степени развиваются в направлениях неинвазивной, малоинвазивной и интраоперационной диагностики. Из-за простоты измерений одним из первых типов биотканей для исследования в ТГц-области спектра была выбрана кожа человека *in vivo* и *in vitro*, а также злокачественные новообразования кожи различного типа [26–34].

Описано применение ТГц-излучения для оценки степени повреждения тканей при ожогах [35], контроля заживления и рубцевания ран без снятия гипса и бинтов [36], обнаружения кариеса [37], неинвазивной диагностики диабета [38, 39]. Описано применение ТГц-излучения для диагностики офтальмологических заболеваний [40].

В настоящее время ведутся интенсивные исследования процессов взаимодействия ТГц-излучения с различными материалами, например, биологическими тканями [41, 42], полимерами [43, 44], древесиной [45].

Терагерцовое излучение используется для томографии и других медицинских исследований [46–48], диагностики живых организмов, в приборах для диагностики рака кожи [49–51], рака груди [52, 53], контроля ожоговых раневых поверхностей [53], влагосодержания биотканей [54, 55], выявления зубного кариеса [56, 57] и т. д. Наличие рака часто вызывает повышенное кровоснабжение пораженных тканей и локальное увеличение содержания воды в тканях. На этом основан механизм терагерцовой визуализации рака по контрасту получаемого терагерцового изображения. Участки тела, пораженные раком кожи, трудно определить на глаз, так как примерно 85 % раковых клеток лежат в эпителии под поверхностью кожи. По сравнению со здоровыми тканями такие клетки содержат больше воды, которая интенсивно поглощает излучение в диапазоне частот от 100 ГГц до 3 ТГц. По ТГц-излучению можно строить полную карту зоны поражения [52].

На основе терагерцового излучения предложены методы лечения: НО-терапия [58, 59], молекулярная ТГц-акустотерапия [60, 61], ТГц-аэротерапия [62, 63], ингаляционная ТГц-акустотерапия [64], термическая деструкция биотканей [65]. Разрабатываются устройства

обнаружения и идентификации предметов, скрытых за препятствиями, например, для задач обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом [63–67].

В работе [68] установлено, что облучение животных в условиях острого и длительного стрессов терагерцовыми волнами на частотах оксида азота 150,176–150,664 ГГц в течение 30 минут приводит к полной нормализации функциональной активности щитовидной железы и концентрации ТТГ гипофиза. Биологические эффекты терагерцового излучения регистрируются при плотности потока мощности излучения значительно ниже 10^{-3} Вт/см². При такой низкой интенсивности излучения интегральный нагрев облучаемых объектов в эксперименте не превышает 0,1 °С.

Особенностью электромагнитных волн терагерцового диапазона при воздействии на биообъекты является то, что здесь расположены собственные частоты колебательно-вращательных переходов воды и биологических молекул как простых, так и сложных, в том числе больших полимеров (полипептиды, белки, нуклеиновые кислоты) [69–71].

Реакция изолированных клеток на излучение субмиллиметровой части терагерцового диапазона на различных частотах проявляется на мембранном и ядерном уровнях [72–74]. Установлено, что указанные электромагнитные волны влияют на стабильность клеточной мембраны. В опытах на эритроцитах человека показано, что излучение меняет проницаемость и осмотическую устойчивость мембраны. Реакция мембраны на облучение не удивительна, поскольку ее проницаемость обуславливается определенным конформационным состоянием транспортных и канальных белков, которое изменяется при облучении.

Новые методы терагерцовой диагностики могут заменить существующий метод биопсии: они позволяют не только обнаруживать, но и следить за развитием и распространением раковых клеток. Этот метод позволяет получить биологически точную трехмерную картину поражения ткани. Методы ТГц-диагностики уменьшают число ненужных хирургических биопсий и ускоряют постановку диагноза до нескольких минут [73, 74].

Развитие нанотехнологий стимулирует расширение областей применения ТГц-излучения, создания наноконтрастных агентов для ТГц-видения [22, 23]. Наноконтрастные агенты служат для увеличения контраста изображения здоровых и патологических областей ткани или молекул. В их качестве могут применяться сферические частицы, углеродные нанотрубки, фуллерены, квантовые точки, наностержни, наноболочки (nanoshells), наноклетки (nanocages), нанопроволоки, различные металлические и оксидные наночастицы.

Терагерцовое и миллиметровое излучение применяется в устройствах дефектоскопии, интроскопии и системах радиовидения [75–78], для поиска взрывчатых веществ и наркотиков [79], а также в археологии и искусствоведении [80].

Оптические характеристики крови и ее компонентов в ТГц-диапазоне частот приведены в работах [81–84]. При средней мощности облучения 10^{-7} Вт в спектральном диапазоне 0,1–3,2 ТГц-изменений в спектральных и морфологических характеристиках клеток крови не происходит [83, 84].

Однако установлено, что в спектральных и морфологических характеристиках клеток крови наблюдаются изменения, которые зависят от времени облучения и интенсивности терагерцового излучения [2].

Ядра и цитоплазматические органеллы в клетках млекопитающих, содержащие схожие концентрации белков и нуклеиновых кислот, имеют показатель преломления, находящийся в диапазоне от 1,38 до 1,41 на длине волны 589 нм. Измеренный показатель преломления для ядра равен 1,39 [85]. Рассеяние самих частиц (органелл, белковых фибрилл, мембран и белковых глобул) имеет более высокую плотность белков и липидов по сравнению с основным веществом и, таким образом, имеет больший показатель преломления, примерно равный 1,39–1,47. Показатель преломления из соединительной ткани составляет приблизительно 1,41 и зависит от гидратаций коллагена, его основного компонента. Показатель преломления внутритканевой жидкости, а также плазма крови человека составляет приблизительно 1,33–1,35, в зависимости от длины волны [85]. Показатель прелом-

ления сухих эритроцитов при длине волны 550 нм находится в диапазоне 1,61–1,66 [85]. Концентрация гемоглобина от 32 г/дл представляет собой типичную концентрацию гемоглобина в эритроцитах человека, а показатель преломления составляет 1,42. Для человеческой крови, в зависимости от длины волны, показатель преломления составляет приблизительно 1,36–1,4 [85].

Средний показатель преломления большинства живых клеток лежит в диапазоне 1,36–1,38 [86–89]. В работе [9] приведены спектры поглощения и преломления деионизованной воды, кожи, жировой и мышечной тканей. Показатель преломления дистиллированной воды (1,33 в видимом диапазоне) меняется от 80 (1 ТГц) до 2 (1 ТГц), как и крови, а также тканей. Таким образом, для идентификации типов тканей более актуально измерение частотного спектра отражения, чем поглощения.

Относительно недавно (2004 г.) впервые было обращено внимание на наличие эффекта фотонной наноструи при исследовании рассеяния лазерного излучения на прозрачных кварцевых микроцилиндрах и позднее – на сферических частицах. Фотонная струя возникает в области теневой поверхности диэлектрических микросферических частиц – в так называемой ближней зоне дифракции – и характеризуется сильной пространственной локализацией и высокой интенсивностью оптического поля в области фокусировки. Было показано, что при падении плоской волны на сфероидальную частицу достижимо пространственное разрешение до трети длины волны, что ниже классического дифракционного предела. Обзор современного состояния по формированию фотонной струи диэлектрическими частицами произвольной формы в электромагнитном спектре приведен в работах [90–98].

Эффект фотонной струи или тераструи в терагерцовом диапазоне длин волн для биологических объектов может приводить к канализации терагерцового излучения на значительные расстояния в объекте в квазиоптическом мезоразмерном волноводе и значительному повышению интенсивности излучения в области фотонной струи. При этом фокусирующие частицы могут иметь различную

форму поверхности, симметричную и несимметричную [95].

В работах авторов предложено устройство формирования фотонной струи, позволяющее повысить пространственное разрешение и энергическую эффективность. Диэлектрическая частица состоит из двух частей, разделенных по ее оси симметрии перпендикулярно направлению падения излучения, выполненных из диэлектриков с различными показателями преломления. Первая часть частицы, на выпуклую сторону которой падает излучение, непосредственно сопряжена плоской стороной со второй частью частицы с показателем преломления меньше показателя преломления первой частицы примерно в 0,8–0,9 раз, а ее теньевая сторона имеет усеченный вид на величину h , равную

$$h = \alpha R \left(1 - \frac{1}{n_1} \right),$$

где α – эмпирический коэффициент, равный 0,9–1,1; R – радиус частицы; n_1 – показатель преломления материала второй части частицы. Кроме того, диэлектрическая частица может быть выполнена в виде сферы.

Пространственное разрешение устройства формирования фотонной струи достигает порядка $\lambda/5$ – $\lambda/6$.

В таблице приведена зависимость интенсивности поля в области фотонной струи от величины усечения ее теньевой части, нормированной на величину интенсивности поля в области фотонной струи, формируемой однородной диэлектрической цилиндрической частицы с радиусом $R = 5\lambda$.

Таблица

Зависимость интенсивности поля в области фотонной струи от величины усечения ее теньевой части, нормированной на величину интенсивности поля в области фотонной струи, формируемой однородной диэлектрической цилиндрической частицы с радиусом $R = 5\lambda$

d/R	Однородная диэлектрическая частица, $d/R = 0$	0	0,03	0,04
I	1	1,42	1,96	1,2

Результаты моделирования цилиндрической частицы диаметром, равным 5λ , с показателем преломления первой части диэлектрической частицы, равным $n_2 = 1,5$; показатель преломления материала второй части диэлектрической частицы $n_1 = 1,3$; показатель преломления окружающего пространства $n_0 = 1$ и усеченной диэлектрической частицы приведены на рис. 1.

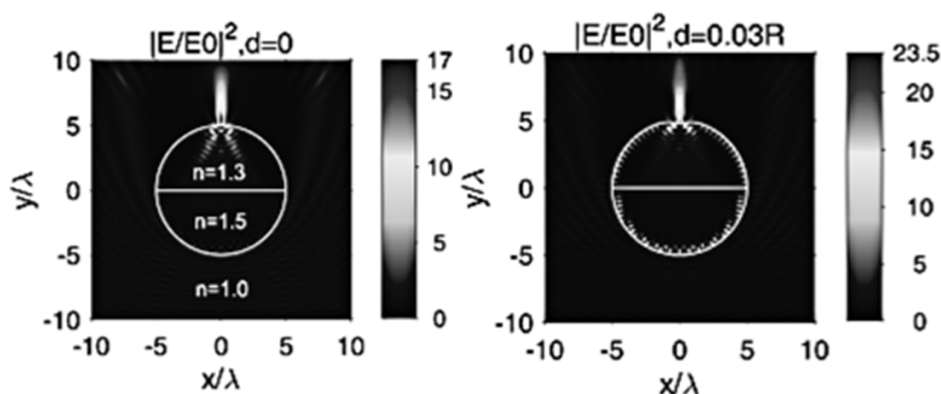


Рис. 1. Результаты моделирования цилиндрической частицы диаметром, равным 5λ , с показателем преломления первой части диэлектрической частицы, равным $n_2 = 1,5$; показатель преломления материала второй части диэлектрической частицы $n_1 = 1,3$; показатель преломления окружающего пространства $n_0 = 1$ и усеченной диэлектрической частицы

Известен квазиоптический мезоразмерный волновод составленный из сферических или дисковых частиц. В работе [98] предложено использовать в качестве оптического микронда последовательно расположенные микросферы или цилиндры, фокусирующие излучение в область менее

длины волны излучения и осуществляющие периодическую фокусировку излучения (рис. 2). При этом микросферы и цилиндры могут иметь одинаковый или различный размер, быть выполнены из материалов с одинаковым или различным показателем преломления.

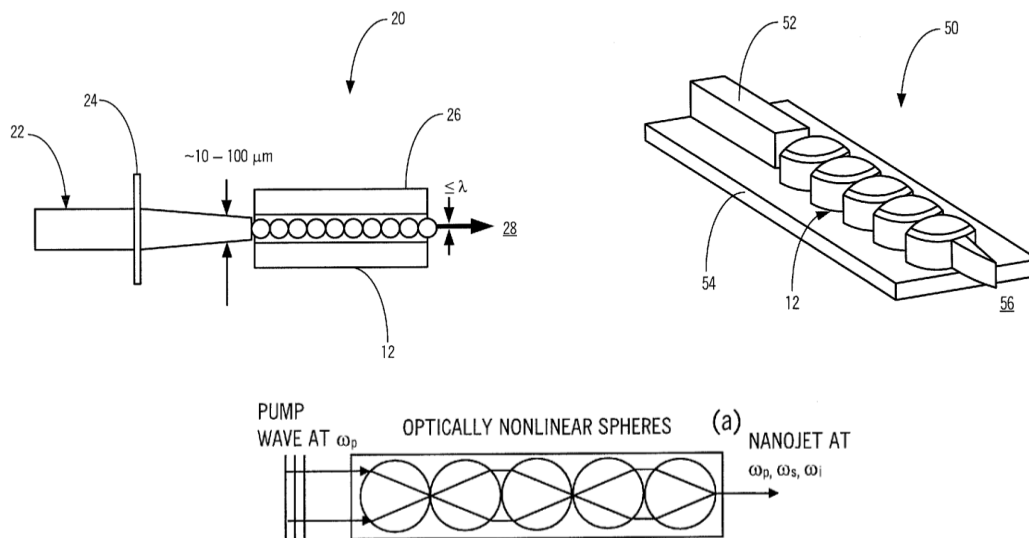


Рис. 2. Оптический микронда. Рисунок из работы [98]

Известно устройство передачи и получения информации посредством сфокусированных поверхностных плазмон-поляритонов [99]. В известных устройствах расстояние, на которое возможна транспортировка поверхностных плазмон-поляритонов, принципиально ограничена длиной фотонной наноструи и не превышает нескольких длин волн. Устройство транспортировки в виде периодически последовательно расположенных микрочастиц в форме прямоугольных параллелепипедов с коэффициентом преломления изменяющегося в диапазоне 1,6–2,2, с толщиной, равной λ_0 , высотой, изменяющейся в диапазоне $(0,05-0,155)\lambda_0$, где λ_0 – длина волны излучения в вакууме (при этом микрочастицы последовательно располагаются одна за другой по направлению распространения поверхностной волны на расстоянии порядка $2,5 \lambda_0$), позволяет реализовать своеобразный квазиоптический волновод для поверхностного плазмон-поляритона. Такое устройство обеспечивает транспортировку поверхностного плазмон-поляритона на большие расстояния.

Оптический микродатчик на основе фотонных струй терагерцовых, ИК или оптических волн (рис. 3) для использования в линиях передачи для канализации энергии в различных датчиках неразрушающего контроля, биомедицинских исследованиях с пространственным сверхразрешением и высокой плотностью энергии рассмотрен в работе [100]. Он представляет собой набор диэлектрических линз. Линзы расположены вдоль направления распространения волн и пространственно разнесены между собой. Линзы расположены торцами по отношению друг к другу и выполнены в виде цилиндра с высотой d , лежащей в диапазоне от $0,85$ до $1,3\lambda$, где λ – длина волны используемого излучения в окружающем пространстве. Относительный коэффициент преломления диэлектрика – N/N_0 (N_0 – коэффициент преломления окружающей среды), лежащий в диапазоне от $1,2$ до $1,75$. Расстояние между соответствующими линзами выбирается в диапазоне от 2 до $3,5d$.

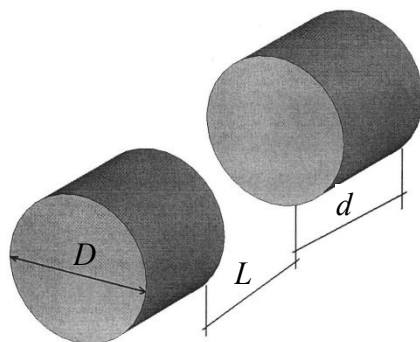


Рис. 3. Микродатчик на основе фотонных струй терагерцовых, ИК или оптических волн. Рисунок из работы [100]

А в работе [101] устройство канализации и транспортировки энергии на основе фотонных струй содержит набор диэлектрических линз, выполненных в виде цилиндров или сфер, расположенных вдоль направления распространения волн. При этом линзы пространственно разнесены между собой и выполнены из диэлектрика с относительным коэффициентом преломления N/N_0 (N_0 – коэф-

фициент преломления окружающей среды), лежащем в диапазоне от 1,2 до 1,95. Расстояние между соответствующими линзами выбирается в диапазоне от 1,8 до $3,2D$ при диаметре линзы не менее длины волны излучения в окружающей среде, где D – диаметр линзы. Линзы могут быть сгруппированы в блок по три, материал линз может иметь различный показатель преломления (рис. 4).

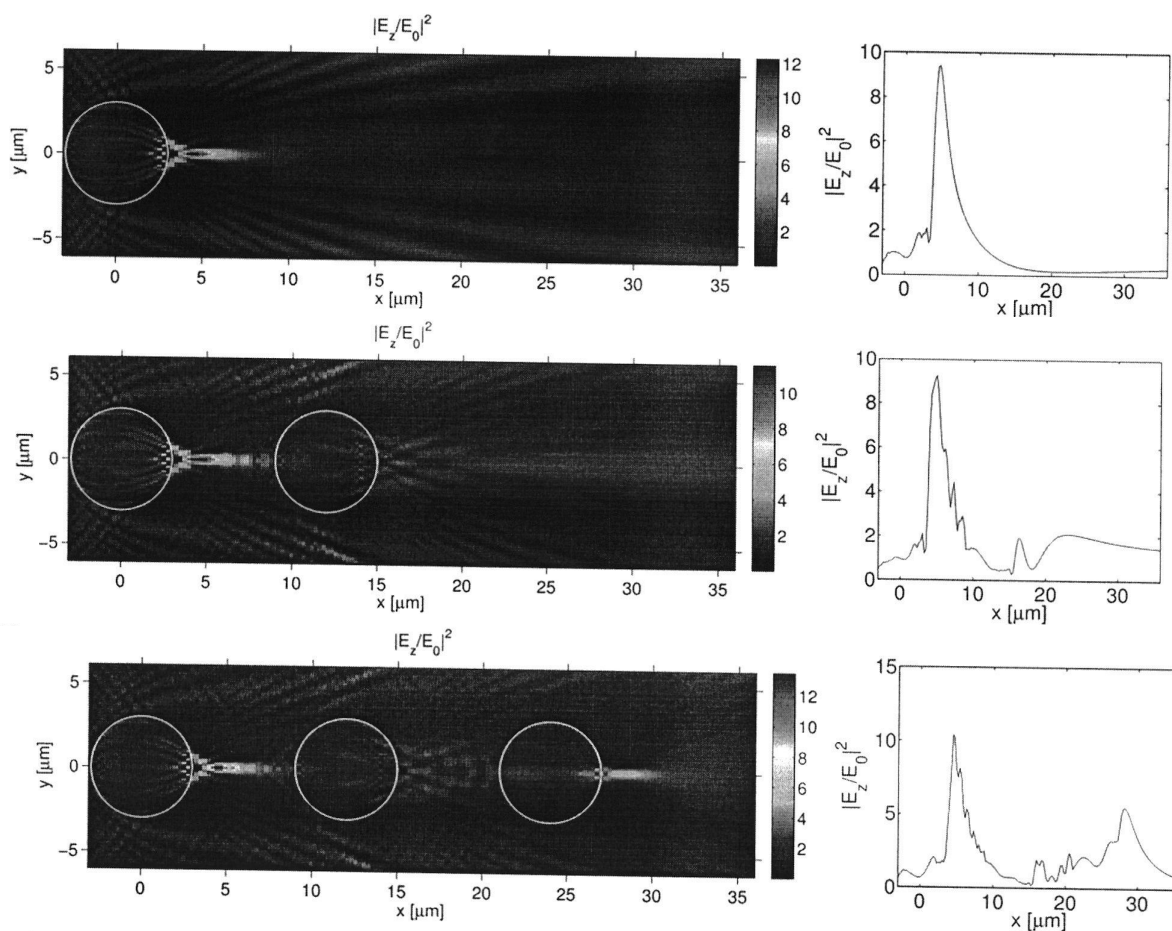


Рис. 4. Устройство канализации и транспортировки энергии на основе фотонных струй. Рисунок из работы [101]

Устройство квазиоптических линий передачи терагерцовых волн может быть использовано для передачи энергии в различных датчиках неразрушающего контроля, биомедицинских исследованиях с пространственным сверхразрешением и высокой плотностью энергии. Устройство квазиоптической линии передачи терагерцовых волн содержит набор диэлектрических линз, пространственно разнесенных между собой и расположенных вдоль направления распростране-

ния волн. Линзы выполнены в виде кубоида с величиной стенки, лежащей в диапазоне от $0,85$ до $1,3\lambda$, где λ – длина волны используемого терагерцового излучения в окружающем пространстве, и выполнены из диэлектрика с относительным коэффициентом преломления N/N_0 (N_0 – коэффициент преломления окружающей среды), лежащим в диапазоне от $1,2$ до $1,6$, а расстояние между соответствующими линзами выбирается в диапазоне от 2 до $3L$ [102] (рис. 5).

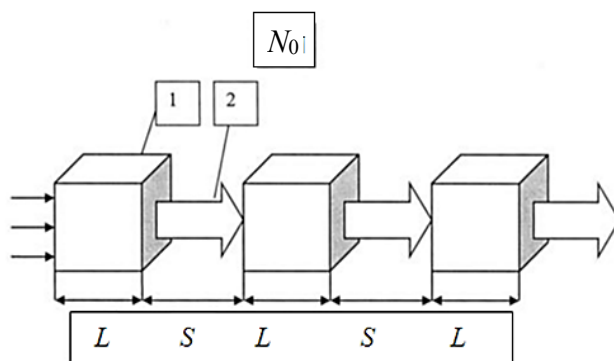


Рис. 5. Устройство квазиоптических линий передачи терагерцовых волн. Рисунок из работы [102]

Эффект фотонных струй используется для усиления излучения комбинационного рассеяния [103]. Рамановское излучение от образца может быть усилено с помощью микросфер, формирующих фотонную струю. При этом микросфера устанавливается между источником излучения и образцом. За счет меньшей

по объему формируемой области фокусировки достигается большая интенсивность облучения образца.

На рис. 6 приведена схема облучения образца и результаты, характеризующие усиление излучения с использованием микросферы и без нее.

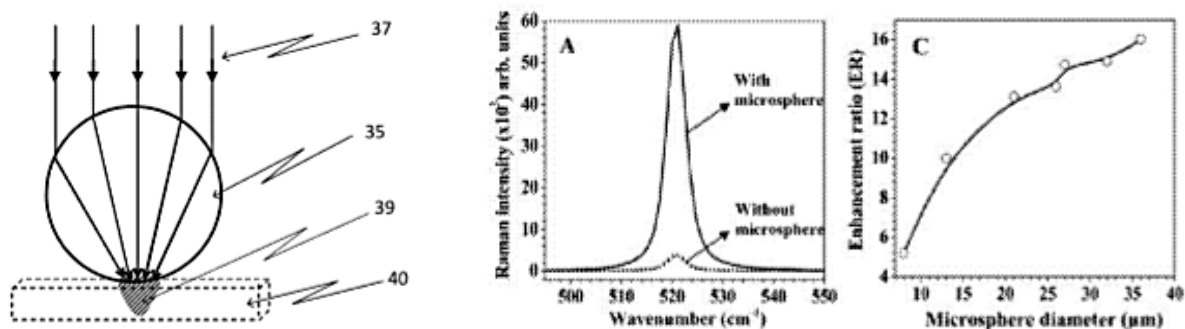


Рис. 6. Схема облучения образца и результаты, характеризующие усиление излучения с использованием микросферы и без нее. Рисунок из работы [103]

Например, для $n \approx 1,65$ усиление такой сферической мезоразмерной частицы достигает около 100. Усиление зависит только от показателя

преломления, в то время как размер пятна (ширина фотонной струи) пропорционален размеру частиц и может быть менее $\lambda/3 - \lambda/5$ [95].

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день точно не определены границы терагерцового диапазона длин волн, с учетом недавно открытого

эффекта фотонной струи не ясна глубина возможного проникновения терагерцового излучения в среду, не выявлено предельное безопасное значение плотности интенсивности излучения на биологическом объекте исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев В. М., Кабанов И. Н., Комаров В. В., Мещанов В. П. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4 (34). – С. 5–16.
2. Черкасова О. П., Сердюков Д. С., Ратушняк А. С., Немова Е. Ф., Козлов Е. Н., Шидловский Ю. В., Зайцев К. И., Тучин В. В. Механизмы влияния терагерцового излучения на клетки // Оптика спектроскопии. – 2020. – Т. 128, вып. 6. – С. 852–864.
3. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF), Health effects of EMF – 2015. – P. 1–288. Available: http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_041.pdf.
4. Об утверждении Санитарных (санитарно-эпидемиологических) правил и норм (СанПиН) 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Электронный ресурс] : постановление от 21.06.2016 № 81. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420362948>.
5. Минин Б. А. СВЧ и безопасность человека. – М. : Советское радио, 1974. – 351 с.
6. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1. – 2005. https://standards.ieee.org/standard/C95_1-2019.html.
7. Кудряшов Ю. Б., Перов Ю. Ф., Рубин А. Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения. – М. : Физматлит, 2008. – 183 с.
8. ICNIRP guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) // Health Phys. – 1998. – Vol. 74. – P. 494.
9. Wilmink G. J., Grundt J. E. Current State of Research on Biological Effects of Terahertz Radiation // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2011. – Vol. 32, № 10. – P. 1074–1122. doi: 10.1007/s10762-011-9794-5.
10. Ramundo-Orlando A., Gallerano G. P. Terahertz radiation effects and biological applications // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2009. – Vol. 30, № 12. – P. 1308–1318. doi: 10.1007/s10762-009-9561-z.
11. Berry E., Walker G. C., Fitzgerald A. J., Zinov'ev N. N., Chamberlain M., Smye S. W., Miles R. E., Smith M. A. Do in vivo terahertz imaging systems comply with safety guidelines? // J. Laser Appl. – 2003. – Vol. 15, № 3. – P. 192–198. doi: 10.2351/1.1585079.
12. Kristensen T. T. L., Withayachumnankul W., Jepsen P. U., Abbott D. Modeling terahertz heating effects on water: // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 4727–4739. doi: 10.1364/OE.18.004727.
13. Alexandrov B. S., Gelev V., Bishop A. R., Usheva A., Rasmussen K. Ø. DNA breathing dynamics in the presence of a terahertz field // Phys. Lett. A. – 2010. – Vol. 374, № 10. – P. 1214–1217. doi: 10.1016/j.physleta.2009.12.077.
14. Chitanvis S. M. Can low-power electromagnetic radiation disrupt hydrogen bonds in dsDNA? // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2006. – Vol. 44 (18). – P. 2740–2747. doi: 10.1002/polb.20910.
15. Alexandrov L. B., Rasmussen K. Ø., Bishop A. R., Alexandrov B. S. Evaluating the role of coherent delocalized phonon-like modes in DNA cyclization // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – P. 9731. doi: 10.1038/s41598-017-09537-y.
16. Kulipanov G. N., Choporova Y. Y., Knyazev B. A., Popik V. M., Skrinisky A. N., Vinokurov N. A. Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiments // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2015. – Vol. 5, № 5. – P. 798–809. doi: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
17. Titova L., Hegmann F. A., Kovalchuk O. Terahertz Biomedical Science and Technology / Joo-Hiuk Son (Eds.). – CRC PressTaylor & Francis Group, 2014. – P. 241. doi: 10.1201/b17060-16.
18. Weightman P. Prospects for the study of biological systems with high power sources of terahertz radiation // Physical Biology. – 2012. – Vol. 9, № 5. – P. 053001. doi: 10.1088/1478-3975/9/5/053001.

19. Wallace V. P., Taday P. F., Fitzgerald A. J., Woodward R. M., Cluff J., Pye R. J., Arnone D. D. Modeling the interaction of DNA with alternating fields // *Faraday Discussions*. – 2004. – Vol. 126. – P. 255. doi: 10.1039/B309357N.
20. Zaytsev K. I., Kudrin K. G., Karasik V. E., Reshetov I. V., Yurchenko S. O. In vivo terahertz spectroscopy of pigmentary skin nevi: Pilot study of non-invasive early diagnosis of dysplasia // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 106. – P. 053702. doi: 10.1063/1.4907350.
21. Zaytsev K. I., Gavdush A. A., Chernomyrdin N. V., Yurchenko S. O. Highly Accurate in Vivo Terahertz Spectroscopy of Healthy Skin: Variation of Refractive Index and Absorption Coefficient Along the Human Body // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2015. – Vol. 5, № 5. – P. 817–827. doi: 10.1109/TTHZ.2015.2460677.
22. Pickwell E., Wallace V. P. Biomedical applications of terahertz technology // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2006. – Vol. 39, № 17. – P. R301. doi: 10.1088/0022-3727/39/17/R01.
23. Woodward R. M., Cole B. E., Wallace V. P., Pye R. J., Arnone D. D., Linfield E. H., Pepper M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue // *Physics in Medicine & Biology*. – 2002. – Vol. 47. – P. 3853. doi: 10.1088/0031-9155/47/21/325.
24. Echchgadda I., Grundt J. A., Tarango M., Ibey B. L., Tongue T. D., Liang M., Xin H., Wilmink G. J. Using a portable terahertz spectrometer to measure the optical properties of in vivo human skin // *Journal of Biomedical Optics*. – 2013. – Vol. 18, № 12. – P. 120503. doi: 10.1117/1.JBO.18.12.120503.
25. Зайцев К. И., Черномырдин Н. В., Кудрин К. Г., Решетов И. В., Юрченко С. О. Терагерцовая спектроскопия пигментных невусов кожи in VIVO // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – Т. 119, № 3. – С. 430. doi: 10.7868/S0030403415090305.
26. Zaitsev K. I., Chernomyrdin N. V., Kudrin K. G., Reshetov I. V., Yurchenko S. O. Terahertz Spectroscopy of Pigmentary Skin Nevi in Vivo // *Optics & Spectroscopy*. – 2015. – Vol. 119, № 3. – P. 404–410. doi: 10.1134/S0030400X1509026X.
27. Zaytsev K. I., Kudrin K. G., Koroleva S. A., Fokina I. N., Volodarskaya S. I., Novitskaya E. V., Perov A. N., Karasik V. E., Yurchenko S. O. Medical diagnostics using terahertz pulsed spectroscopy // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 486, № 1. – P. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/486/1/012014.
28. Mittleman D. THz imaging, in sensing with THz radiation. – Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003. – P. 117–153. doi: 10.1007/978-3-540-45601-8.
29. Woodward R., Wallace V., Cole B., Pye R., Arnone D., Linfield E., Pepper M. Clinical Diagnostic Systems: Technologies and Instrumentation // *Proc. SPIE*. – 2002. – Vol. 4625. – P. 160. doi: 10.1117/12.469785.
30. Pickwell E., Wallace V. P., Cole B. E., Ali S., Longbottom C., Lynch R. J., Pepper M. A comparison of terahertz pulsed imaging with transmission microradiography for depth measurement of enamel demineralisation in vitro // *Caries Res*. – 2007. – Vol. 41. – P. 49–55. doi: 10.1159/000096105.
31. Cherkasova O., Nazarov M., Shkurinov A. Noninvasive blood glucose monitoring in the terahertz frequency range // *Optical and Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 48, № 3. – P. 217. doi: 10.1007/s11082-016-0490-5.
32. Hernandez-Cardoso G. G., Rojas-Landeros S. C., Alfaro-Gomez M., Hernandez-Serrano A. I., Salas-Gutierrez I., Lemus-Bedolla E., Castillo-Guzman A. R., Lopez-Lemus H. L., Castro-Camus E. Terahertz imaging for early screening of diabetic foot syndrome: A proof of concept // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – Article number 42124. doi 10.1038/srep42124.
33. Ozheredov I., Prokopchuk M., Mischenko M., Safonova T., Solyankin P., Larichev A., Angeluts A., Balakin A., Shkurinov A. In vivo THz sensing of the cornea of the eye Terahertz time-domain spectroscopy of human blood // *Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, № 4. – P. 363–367.
34. Reid C. B., Reese G., Gibson A. P., Wallace V. P. Terahertz time-domain spectroscopy of human blood // *Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, № 4. – P. 363–367.
35. Saviz M., Spathmann O., Streckert J., Hansen V., Clemens M., Faraji-Dana R. Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues // *Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, № 5. – P. 635–640. doi: 10.1109/TTHZ.2013.2264327.
36. Fischer B. M., Wietzke S., Reuter M., Peters O., Gente R., Jansen C., Vieweg N., Koch M. Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technology // *Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, № 3. – P. 259–268.
37. Jin Y. S., Kim G. J., Jeon S. G. Terahertz dielectric properties of polymers // *Journal of Korean Physics Society*. – 2006. – Vol. 49, № 2. – P. 513–517.

38. Todoruk T. M., Hartley I. D., Reid M. W. Origin of birefringence in wood at terahertz frequencies // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 123–130.
39. Taylor Z. D., Singh R. S., Bennett D. B., et al. THz medical imaging: in vivo hydration sensing // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 201–219.
40. Ajito K., Ueno Y. THz chemical imaging for biological applications // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 293–300.
41. Гуляев Ю. В., Креницкий А. П., Бецкий О. В., Майбородин А. В., Киричук В. Ф. Терагерцовая техника и ее применение в биомедицинских технологиях // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2008. – № 9. – С. 30–35.
42. Woodward R. M., Cole B. E., Wallace V. P., Pye R. J., Arnone D. D., Linfield E. H., Pepper M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin cancer and skin tissue // *Physics in Medicine and Biology*. – 2002. – Vol. 47. – P. 3853–3855.
43. Pickwell E., Cole B. E., Fitzgerald A. J., Wallace V. P., Pepper M. Simulation of terahertz pulse propagation in biological systems // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Vol. 84. – P. 2190–2192.
44. Calvin Yu, Shuting Fan, Yiwen Sun, Emma Pickwell-MacPherson. The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date // *Quant Imaging Med Surg*. – 2012. – Vol. 2. – P. 33–45. doi: 10.3978/j.issn.2223-4292.2012.01.04.
45. Бецкий О. В., Креницкий А. П. и др. Биофизические эффекты волн терагерцового диапазона и перспективы развития новых направлений в биомедицинской технологии: терагерцовая терапия и терагерцовая диагностика // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. – 2003. – № 12. – С. 3–6.
46. Fitzgerald A. J., Wallace V. P., Jimenez Linan M., Bobrow L., Pye R. J., Purushotham A. D., Arnone D. D. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors // *Radiology*. – 2006. – Vol. 239. – P. 533–540.
47. Ashwort P. C., Pickwell-MacPherson E., Provenzano E., Pinder S. E., Purushotham A. D., Pepper M., Wallace V. P. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17. – P. 12444–12454.
48. Taylor Z. D., Singh R. S., Culjat M. O., Suen J. Y., Grundfest W. S., Lee H., Brown E. R. Reflective terahertz imaging of porcine skin burns // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33. – P. 1258–1260.
49. Bennett D. B., Li W., Taylor Z. D., Grundfest W. S., Brown E. R. Stratified media model for terahertz reflectometry of the skin // *IEEE Sensors*. – 2010. – Vol. 11. – P. 1530–1534.
50. Hirmer M., Danilov S. N., Giglberger S., Putzger J., Niklas A., Jager A., Hiller K. A., Loffler S., Schmalz G., Redlich B., Schulz I., Monkman G., Ganichev S. D. Spectroscopic study of human teeth and blood visible to terahertz frequencies for clinical diagnostics of dental pulp vitality // *International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. – 2012. – Vol. 33. – P. 366–375.
51. Киричук В. Ф., Креницкий А. П., Майбородин А. В. и др. Оксид азота и электромагнитное излучение КВЧ // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. – 2002. – № 10–11. – С. 95–108.
52. Майбородин А. В., Креницкий А. П., Бецкий О. В. Молекулярная КВЧ-акустотерапия // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2003. – № 4. – С. 8–10.
53. Креницкий А. П., Майбородин А. В. КВЧ-аэротерапия – новый, природный, естественный, экологически чистый метод лечения // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2002. – № 4. – С. 21–23.
54. Гуляев Ю. В., Креницкий А. П., Бецкий О. В., Майбородин А. В., Киричук В. Ф. Терагерцовая техника и ее применение в биомедицинских технологиях // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2008. – № 9. – С. 30–35.
55. Neelakanta P. S., Sharma B. Conceiving THz endometrial ablation: feasibility, requirements and technical challenges // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, № 4. – P. 402–408.
56. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – Berlin : Springer, 2009. – P. 159–170.
57. Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications / Edited by Daryoosh Saeedkia. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. – 688 p.
58. Siegel P. H. Terahertz technology // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2002. – Vol. 50, № 3. – P. 910–928.
59. De Maagt P., Bolivar P. H., Mann C. Terahertz science, engineering and systems – from space to earth applications // *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering* / ed. by K. Chang. – N.Y. : Wiley-Interscience, 2005. – P. 5176–5194.
60. Цымбал А. С. Закономерности и механизмы биологического действия электромагнитных волн терагерцового диапазона на частотах активных клеточных метаболитов // *Дисс. ... д-ра мед. наук*. – Саратов, 2014. – 366 с.

61. Грибов Л. А. Колебание молекул. – М. : Книжный дом, 2009. – 544 с.
62. Nishizawa S., Sakai K., Hangyo M. Terahertz time-domain spectroscopy // Terahertz Optoelectronics: of the International Conference. – Berlin-Heidelberg : Springer, 2005. – P. 203–270.
63. Liu H. B., Zhong H., Karpovicz N. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security application // Proc. IEEE. – 2007. – № 8. – P. 1514–1527.
64. Федоров В. И., Клементьева В. М., Хамоян А. Г. и др. Субмиллиметровый лазер как потенциальный инструмент медицинской диагностики // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2009. – № 1-2. – С. 88–97.
65. Fedorov V. I., Khamoyan A. G., Shevela E. Y. et. al. Investigation of possibility of submillimeter laser using as instrument for diagnostics in medicine // Proc. SPIE. – 2007. – № 6734. – P. 6734041–6734047.
66. Бецкий О. В., Козьмин А. С., Яременко Ю. Г. Возможные применения терагерцевых волн // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2008. – № 3. – С. 48–54.
67. Минин И. В., Минин О. В. Сканирующее устройство на основе диска Нипкова с субдифракционным разрешением в миллиметровом, терагерцевом, инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн : Патент РФ 171360. – Оpubл. 29.05.2017. – Бюл. № 16.
68. Минин И. В., Минин О. В. Устройство формирования изображения объектов с субдифракционным разрешением в миллиметровом, терагерцевом, инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн : Патент РФ 182458. – Оpubл. – 17.08.2018 Бюл. № 23.
69. Минин И. В., Минин О. В. Способ формирования изображения объектов с субдифракционным разрешением в миллиметровом, терагерцевом, инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн : Патент РФ 2631006. – Оpubл. 15.09.2017. – Бюл. № 26.
70. Ожегов Р. В., Горшков К. Н., Окунев О. В., Гольцман Г. Н., Кошелец В. П., Филиппенко Л. В., Кинёв Н. В. Флуктуационная чувствительность и стабильность приемников с СИС и НЕВ смесителями для терагерцевого тепловидения. – М. : МПГУ, 2014. – 104 с.
71. Kemp M. C. Explosive detection by terahertz spectroscopy – a bridge too far // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 282–292.
72. Jackson J. B., Bowen J., Walker G., Labaune J., Mourou G., Menu M., Fukunaga K. A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 220–231.
73. Smolyanskaya O. A., Chernomyrdin N. V., Konovko A. A., Zaytsev K. I., Ozheredov I. A., Cherkasova O. P., Nazarov M. M., Guillet J. P., Kozlov S. A., Kistenev Yu. V., Coutaz J.-L., Mounaix P., Vaks V. L., Son J.-H., Cheon H., Wallace V. P., Feldman Yu., Popov I., Yaroslavsky A. N., Shkurinov A. P., Tuchin V. V. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids // Progress in Quantum Electronics. – 2018. – Vol. 62. – P. 1. doi: 10.1016/j.pquantelec.2018.10.001.
74. Черкасова О. П., Назаров М. М., Ангелуц А. А., Шкуринов А. П. Исследование плазмы крови в терагерцевом диапазоне частот // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120, № 1. – С. 59–67.
75. Cherkasova O. P., Nazarov M. M., Angeluts A. A., Shkurinov A. P. Analysis of blood plasma at terahertz frequencies // Optics & Spectroscopy. – 2016. – Vol. 120, № 1. – P. 50–57. doi: 10.1134/S0030400X16010069.
76. Cherkasova O. P., Nazarov M. M., Shkurinov A. P. Study of blood and its components by terahertz pulsed spectroscopy // EPJ Web of Conferences. – 2018. – Vol. 195. doi: 10.1051/epjconf/201819510003.
77. Tuchin V. V. Optical Clearing of Tissues and Blood // SPIE Press, Bellingham, WA, 2006.
78. Curl C. L., Bellair C. J., Harris T., Allman B. E., Harris P. J. Refractive index measurement in viable cell using quantitative phase-amplitude microscopy and confocal microscopy // Cytometry. – 2005. – Vol. A 65. – P. 88–92.
79. Rappaz B., Marquet P., Cuche E., Emery Y., Depeursinge C., Magistretti P. J. Measurement of the integral refractive index and dynamic cell morphometry of living cells with digital holographic microscopy [Electronic resource] // Optics Express – 2005. – Vol. 13, Issue 23. – P. 9361–9373. – Mode of access: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.009361>.
80. Sung Y., Lue N., Hamza B., Martel J., Irimia D., Dasari R. R., Choi W., Yaqoob Z., So P. Three-Dimensional Holographic Refractive-Index Measurement of Continuously Flowing Cells in a Microfluidic Channel // Phys. Rev. Appl. – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 014002.
81. Rappaz B., Charrière F., Depeursinge C., Magistretti P. J., Marquet P. Simultaneous cell morphometry and refractive index measurement with dual-wavelength digital holographic microscopy and dye-enhanced dispersion of perfusion medium [Electronic resource] // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33, Issue 7. – P. 744–746. – Mode of access: <https://doi.org/10.1364/OL.33.000744>.

82. Minin I. V., Minin O. V. Photonics of isolated dielectric particles of arbitrary 3D shape - a new direction of optical information technologies [Electronic resource] // Vestnik NSU. – 2014. – Vol. 12. – P. 59–70. – Mode of access: <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/7717>.
83. Минин И. В., Минин О. В. Квазиоптика: современные тенденции развития : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 163 с.
84. Минин И. В., Минин О. В. Сверхразрешение в акустических фокусирующих устройствах // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 231–244.
85. Минин И. В., Минин О. В. Фотонные струи в науке и технике // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 212–234.
86. Minin I. V., Minin O. V. Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit [Electronic resource]. – Springer, 2016. – Mode of access: <http://www.springer.com/us/book/9783319242514#aboutBook>.
87. Luk'yanchuk B. S., Paniagua-Domínguez R., Minin I., Minin O., Wang Z. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow [Electronic resource] // Optical Materials Express. – 2017. – Vol. 7, Issue 6. – P. 1820–1847. – Mode of access: <https://doi.org/10.1364/OME.7.001820>.
88. Heifetz A., Kong S.-C., Sahakian A. V., Taflove A., Backman V. Photonic Nanojets // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2009. – Vol. 6. – P. 1979–1992.
89. Chen Z. G., Taflove A., Backman V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique // Optics Express. – 2004. – Vol. 12. – P. 1214–1220.
90. Astratov V. N. Focusing multimodal optical microprobe devices : Patent US 8554031 B2, Date of Patent: Oct. 8, 2013.
91. Минин И. В., Минин О. В. Устройство транспортировки сфокусированных поверхностных плазмон-поляритонов оптического диапазона : Патент РФ 166250. – Оpubл. 20.11.2016. – Бюл. № 32.
92. Минин И. В., Минин О. В. Оптический микродатчик на основе фотонных струй терагерцовых, ИК или оптических волн : Патент РФ 161592. – Оpubл. 27.04.2016. – Бюл. № 12.
93. Минин И. В., Минин О. В. Устройство канализации и транспортировки энергии на основе фотонных струй : Патент РФ 163673. – Оpubл. 27.07.2016. – Бюл. № 21.
94. Минин В. Ф., Минин И. В., Минин О. В. Устройство квазиоптической линии передачи терагерцовых волн : Патент РФ 2591282. – Оpubл. 20.07.2016. – Бюл. № 20.
95. Prem Ballabh Bisht, Venkata Ramanaiah Dantham, Raman Namboodiri. Enhancement of Raman scattering : Patent US 2013/0308127 A1, Pub. Date: Nov. 21, 2013.
96. Fitzgerald A. J., Berry E., Zinov'ev N. N., Homer-Vanniasinkam S., Miles R. E., Chamberlain J. M., Smith M. A. Catalogue of human tissue optical properties at terahertz frequencies // J. Biol. Phys. – 2003. – Vol. 29, № 2/3. – P. 123–128.
97. Crawley D. A., Longbottom C., Cole B. E., Ciesla C. M., Arnone D., Wallace V. P., Pepper M. THz pulse imaging: A pilot study of potential applications in dentistry // Caries Res. – 2003. – Vol. 37, № 5. – P. 352–359.
98. Beltskij O., Lebedeva N. Current concepts on the mechanisms of action of low-intensity mm waves on biological objects // Online Journal of United Phys. Soc., Russian Federation. – 2001. – Vol. 4.
99. Frohlich H. Long range coherence and energy storage in biological systems // Int. Quantum Chem. – 1968. – Vol. 2. – P. 641–649, 1968.
100. Pakhomov A. G., Akyel Y., Pakhomova O. N., Stuck B. E., Murphy M. R. Current state and implications of research on biological effects of mm waves: A review of the literature // Bioelectromagnetics. – 1998. – Vol. 19, № 7. – P. 393–413.
101. Sirotkina M. A., Shirmanova M. V., Bugrova M. L., Elagin V. V., Agrba P. A., Kirillin M. Yu., Kamensky V. A., Zagaynova E. V. Continuous optical coherence tomography monitoring of nanoparticles accumulation in biological tissues // J. Nanopart Res. – 2011. – Vol. 13 (1). – P. 283–291.
102. Seung Jae Oh, Inhee Maeng, Hee Jun Shin, Jaewon Lee, Jinyoung Kang, Seunjoo Haam, Yong-Min Huh, Jin-suck Suh, Joo-Hiuk Son. Nanoparticle contrast agents for THz medical imaging [Electronic resource] // 33rd int. conference on IR and mm waves and the 16th int. conference on THz electronics (15–19 September 2008). – Pasadena. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2008.4665813>.
103. Prem Ballabh Bisht, Venkata Ramanaiah Dantham, Raman Namboodiri. Enhancement of Raman scattering : Patent US 2013/0308127 A1, Pub. Date: Nov. 21, 2013.

Получено 19.11.2020

© И. В. Минин, О. В. Минин, 2021

PROBLEMS OF TERAHERTZ RADIATION METROLOGY IN MEDICINE

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, Russia, 630108, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, Russia, 630108, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

The purpose of this work is to consider the issue of safe propagation of terahertz radiation in biological objects. The article gives a brief review of studies of the influence mechanisms of terahertz radiation on biological environments. It considers optical characteristics of blood and its components in the THz frequency range. It is found that the boundaries of the terahertz wavelength range are not precisely defined. It is established that the recently discovered "photon jet" effect allows terahertz radiation to penetrate biological objects to considerable depths, due to the effect of a quasi-optical mesoscale waveguide composed of spherical or disk particles. Amplification of small-sized particles that form a photon jet can significantly increase the value of the radiation intensity density at the biological object of study.

Keywords: photon jet, dimensionless particle, terahertz wavelength range, biological medium, quasi-optical mesoscale waveguide

REFERENCES

1. Isaev, V. M., Kabanov, I. N., Komarov, V. V., & Meshchanov, V. P. (2014). Modern radio-electronic systems of the terahertz range. *Doklady TUSURa [Reports of TUSUR]*, 4(34), 5–16 [in Russian].
2. Cherkasova, O. P., Serdyukov, D. S., Ratushnyak, A. S., Nemova, E. F., Kozlov, E. N., Shidlovsky, Yu. V., Zaitsev, K. I., & Tuchin, V. V. (2020). Mechanisms of influence of terahertz radiation on cells. *Optika spektroskopii [Optika Spectroscopy]*, 128(6), 852–864 [in Russian].
3. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF), Health effects of EMF – 2015 01 20 (1–288 pp).
4. Resolution № 81 of 21 June 2016. On approval of Sanitary (sanitary-epidemiological) rules and regulations (SanPiN) 2.2.4.3359-16 "Sanitary-epidemiological requirements for physical factors in the workplace". Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/420362948> [in Russian].
5. Minin, B. A. (1974). *SVCh i bezopasnost' cheloveka [Microwave and human security]*. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 351 p. [in Russian].
6. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1 (2005).
7. Kudryashov, Yu. B., Perov, Yu. F., & Rubin, A. B. (2008). *Radiatsionnaya biofizika: radiochastotnye i mikrovolnovye elektromagnitnye izlucheniya [Radiation Biophysics: radio frequency and microwave electromagnetic radiation]*. Moscow: Fizmatlit Publ., 183 p. [in Russian].
8. ICNIRP guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). (1998). *Health Phys.*, 74, P. 494.
9. Wilmink, G. J., & Grundt, J. E. (2011). Current State of Research on Biological Effects of Terahertz Radiation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32(10), 1074–1122. doi: 10.1007/s10762-011-9794-5.
10. Ramundo-Orlando, A., & Gallerano, G. P. (2009). Terahertz radiation effects and biological applications. *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 30(12), 1308–1318. doi: 10.1007/s10762-009-9561-z.
11. Berry, E., Walker, G. C., Fitzgerald, A. J., Zinov'ev, N. N., Chamberlain, M., Smye, S. W., Miles, R. E., & Smith, M. A. (2003). Do in vivo terahertz imaging systems comply with safety guidelines? *J. Laser Appl.*, 15(3), 192–198. doi: 10.2351/1.1585079.
12. Kristensen, T. T. L., Withayachumnankul, W., Jepsen, P. U., & Abbott, D. (2010). Modeling terahertz heating effects on water. *Opt. Express*, 18, 4727–4739. doi: 10.1364/OE.18.004727.

13. Alexandrov, B. S., Gelev, V., Bishop, A. R., Usheva, A., Rasmussen, K. Ø. (2010). DNA breathing dynamics in the presence of a terahertz field. *Phys. Lett. A.*, 374(10), 1214–1217. doi: 10.1016/j.physleta.2009.12.077.
14. Chitanvis, S. M. (2006). Can low-power electromagnetic radiation disrupt hydrogen bonds in dsDNA? *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44(18), 2740–2747. doi: 10.1002/polb.20910.
15. Alexandrov, L. B., Rasmussen, K. Ø., Bishop, A. R., & Alexandrov, B. S. (2017). Evaluating the role of coherent delocalized phonon-like modes in DNA cyclization. *Scientific Reports*, 7, P. 9731. doi: 10.1038/s41598-017-09537-y.
16. Kulipanov, G. N., Choporova, Y. Y., Knyazev, B. A., Popik, V. M., Skrinisky, A. N., & Vinokurov, N. A. (2015). Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiments. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 5(5), 798–809. doi: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
17. Titova, L., Hegmann, F. A., Kovalchuk, O. (2014). *Terahertz Biomedical Science and Technology*. Joo-Hiuk Son (Eds.). CRC Press/Taylor & Francis Group, P. 241. doi: 10.1201/b17060-16.
18. Weightman, P. (2012). Prospects for the study of biological systems with high power sources of terahertz radiation. *Physical Biology*, 9(5), P. 053001. doi: 10.1088/1478-3975/9/5/053001.
19. Wallace, V. P., Taday, P. F., Fitzgerald, A. J., Woodward, R. M., Cluff, J., Pye, R. J., & Arnone, D. D. (2004). Modeling the interaction of DNA with alternating fields. *Faraday Discussions*, 126, P. 255. doi: 10.1039/B309357N.
20. Zaytsev, K. I., Kudrin, K. G., Karasik, V. E., Reshetov, I. V., & Yurchenko, S. O. (2015). In vivo terahertz spectroscopy of pigmentary skin nevi: Pilot study of non-invasive early diagnosis of dysplasia. *Applied Physics Letters*, 106, P. 053702. doi: 10.1063/1.4907350.
21. Zaytsev, K. I., Gavdush, A. A., Chernomyrdin, N. V., & Yurchenko, S. O. (2015). Highly Accurate in Vivo Terahertz Spectroscopy of Healthy Skin: Variation of Refractive Index and Absorption Coefficient Along the Human Body. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 5(5), 817–827. doi: 10.1109/TTHZ.2015.2460677.
22. Pickwell, E., & Wallace, V. P. (2006). Biomedical applications of terahertz technology. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(17), P. R301. doi: 10.1088/0022-3727/39/17/R01.
23. Woodward, R. M., Cole, B. E., Wallace, V. P., Pye, R. J., Arnone, D. D., Linfield, E. H., & Pepper, M. (2002). Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue. *Physics in Medicine & Biology*, 47, P. 3853. doi: 10.1088/0031-9155/47/21/325.
24. Echchgadda, I., Grundt, J. A., Tarango, M., Ibey, B. L., Tongue, T. D., Liang, M., Xin, H., & Wilmink, G. J. (2013). Using a portable terahertz spectrometer to measure the optical properties of in vivo human skin. *Journal of Biomedical Optics*, 18(12), 120503. doi: 10.1117/1.JBO.18.12.120503.
25. Zaitsev, K. I., Chernomyrdin, N. V., Kudrin, K. G., Reshetov, I. V., & Yurchenko, S. O. (2015). Terahertz spectroscopy of skin pigment nevi in VIVO. *Optika spektroskopii [Optika Spectroscopy]*, 119(3), P. 430. doi 10.7868/S0030403415090305/.
26. Zaitsev, K. I., Chernomyrdin, N. V., Kudrin, K. G., Reshetov, I. V., & Yurchenko, S. O. (2015). Terahertz Spectroscopy of Pigmentary Skin Nevi in Vivo. *Optics & Spectroscopy*, 119(3), 404–410. doi 10.1134/S0030400X1509026X.
27. Zaytsev, K. I., Kudrin, K. G., Koroleva, S. A., Fokina, I. N., Volodarskaya, S. I., Novitskaya, E. V., Perov, A. N., Karasik, V. E., & Yurchenko, S. O. (2014). Medical diagnostics using terahertz pulsed spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, 486(1), P. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/486/1/012014.
28. Mittleman, D. (2003). *THz imaging, in sensing with THz radiation* (pp. 117–153). Berlin, Germany: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-540-45601-8.
29. Woodward, R., Wallace, V., Cole, B., Pye, R., Arnone, D., Linfield, E., & Pepper, M. (2002). Clinical Diagnostic Systems: Technologies and Instrumentation. *Proc. SPIE*, 4625, P. 160. doi: 10.1117/12.469785.
30. Pickwell, E., Wallace, V. P., Cole, B. E., Ali, S., Longbottom, C., Lynch, R. J., & Pepper, M. (2007). A comparison of terahertz pulsed imaging with transmission microradiography for depth measurement of enamel demineralisation in vitro. *Caries Res.*, 41, 49–55. doi: 10.1159/000096105.
31. Cherkasova, O., Nazarov, M., & Shkurinov, A. (2016). Noninvasive blood glucose monitoring in the terahertz frequency range. *Optical and Quantum Electronics*, 48(3), P. 217. doi: 10.1007/s11082-016-0490-5.
32. Hernandez-Cardoso, G. G., Rojas-Landeros, S. C., Alfaro-Gomez, M., Hernandez-Serrano, A. I., Salas-Gutierrez, I., Lemus-Bedolla, E., Castillo-Guzman, A. R., Lopez-Lemus, H. L., & Castro-Camus, E. (2017). Terahertz imaging for early screening of diabetic foot syndrome: A proof of concept. *Scientific Reports*, 7, Article № 42124. doi 10.1038/srep42124.

33. Ozheredov, I., Prokopchuk, M., Mischenko, M., Safonova, T., Solyankin, P., Larichev, A., Angeluts, A., Balakin, A., & Shkurinov, A. (2013). In vivo THz sensing of the cornea of the eye Terahertz time-domain spectroscopy of human blood. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(4), 363–367.
34. Reid, C. B., Reese, G., Gibson, A. P., & Wallace, V. P. (2013). Terahertz time-domain spectroscopy of human blood. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(4), 363–367.
35. Saviz, M., Spathmann, O., Streckert, J., Hansen, V., Clemens, M., & Faraji-Dana, R. (2013). Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(5), 635–640. doi: 10.1109/TTHZ.2013.2264327.
36. Fischer, B. M., Wietzke, S., Reuter, M., Peters, O., Gente, R., Jansen, C., Vieweg, N., & Koch, M. (2013). Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technology. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(3), 259–268.
37. Jin, Y. S., Kim, G. J., & Jeon, S. G. (2006). Terahertz dielectric properties of polymers. *Journal of Korean Physics Society*, 49(2), 513–517.
38. Todoruk, T. M., Hartley, I. D., & Reid, M. W. (2012). Origin of birefringence in wood at terahertz frequencies. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2(1), 123–130.
39. Taylor, Z. D., Singh, R. S., Bennett, D. B., & et al. (2011). THz medical imaging: in vivo hydration sensing. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 201–219.
40. Ajito, K., & Ueno, Y. (2011). THz chemical imaging for biological applications. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 293–300.
41. Gulyaev, Yu. V., Krenitsky, A. P., Betsky, O. V., Mayborodin, A. V., & Kirichuk, V. F. (2008). Terahertz technology and its application in biomedical technologies. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki [Success of Modern Radio Electronics]*, 9, 30–35 [in Russian].
42. Woodward, R. M., Cole, B. E., Wallace, V. P., Pye, R. J., Arnone, D. D., Linfield, E. H., & Pepper, M. (2002). Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin cancer and skin tissue. *Physics in Medicine and Biology*, 47, 3853–3855.
43. Pickwell, E., Cole, B. E., Fitzgerald, A. J., Wallace, V. P., & Pepper, M. (2004). Simulation of terahertz pulse propagation in biological systems. *Applied Physics Letters*, 84, 2190–2192.
44. Calvin Yu, Shuting Fan, Yiwen Sun, & Emma Pickwell-MacPherson. (2012). The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date. *Quant Imaging Med Surg*, 2, 33-45. doi: 10.3978/j.issn.2223-4292.2012.01.04.
45. Betsky, O. V., Krenitsky, A. P., & etc. (2003). Biophysical effects of terahertz waves and prospects for the development of new directions in biomedical technology: terahertz therapy and terahertz diagnostics. *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika [Biomedical Technologies and Radio Electronics]*, 12, 3–6 [in Russian].
46. Fitzgerald, A. J., Wallace, V. P., Jimenez, L. M., Bobrow, L., Pye, R. J., Purushotham, A. D., & Arnone, D. D. (2006). Terahertz pulsed imaging of human breast tumors. *Radiology*, 239, 533–540.
47. Ashwort, P. C., Pickwell-MacPherson, E., Provenzano, E., Pinder, S. E., Purushotham, A. D., Pepper, M., & Wallace, V. P. (2009). Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer. *Optics Express*, 17, 12444–12454.
48. Taylor, Z. D., Singh, R. S., Culjat, M. O., Suen, J. Y., Grundfest, W. S., Lee, H., & Brown, E. R. (2008). Reflective terahertz imaging of porcine skin burns. *Optics Letters*, 33, 1258–1260.
49. Bennett, D. B., Li, W., Taylor, Z. D., Grundfest, W. S., & Brown, E. R. (2010). Stratified media model for terahertz reflectometry of the skin. *IEEE Sensors*, 11, 1530–1534.
50. Hirmer, M., Danilov, S. N., Giglberger, S., Putzger, J., Niklas, A., Jager, A., Hiller, K. A., Loffler, S., Schmalz, G., Redlish, B., Schulz, I., Monkman, G., & Ganichev, S. D. (2012). Spectroscopic study of human teeth and blood visible to terahertz frequencies for clinical diagnostics of dental pulp vitality. *International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 33, 366–375.
51. Kirichuk, V. F., Krenitsky, A. P., Mayborodin, A. V., & etc. (2002). Nitric oxide and electromagnetic radiation of EHF. *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika [Biomedical Technologies and Radio Electronics]*, 10-11, 95–108 [in Russian].
52. Mayborodin, A. V., Krinitsky, A. P., & Betsky, O. V. (2003). Molecular EHF-acoustic therapy. *Millimetrovye volny v biologii i meditsine [Millimeter Waves in Biology and Medicine]*, 4, 8–10 [in Russian].
53. Krenitsky, A. P., & Mayborodin, A. V. (2002). EHF-aerotherapy – a new, natural, natural, environmentally friendly method of treatment. *Millimetrovye volny v biologii i meditsine [Millimeter Waves in Biology and Medicine]*, 4, 21–23 [in Russian].

54. Gulyaev, Yu. V., Krenitsky, A. P., Betsky, O. V., Mayborodin, A. V., & Kirichuk, V. F. (2008). Terahertz technology and its application in biomedical technologies. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki [Success of Modern Radio Electronics]*, 9, 30–35 [in Russian].
55. Neelakanta, P. S., & Sharma, B. (2013). Conceiving THz endometrial ablation: feasibility, requirements and technical challenges. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(4), 402–408.
56. Lee, Y.-S. (2009). *Principles of Terahertz Science and Technology* (pp. 159–170). Berlin: Springer.
57. Daryoosh Saeedkia. (Ed.). (2013). *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 688 p.
58. Siegel, P. H. (2002). Terahertz technolgy. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 910–928.
59. De Maagt, P., Bolivar, P. H., & Mann, C. (2005). Terahertz science, engineering and systems – from space to earth applications. In *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering* (pp. 5176–5194). K. Chang (ed.). N.Y.: Wiley-Interscience.
60. Tsymbal, A. S. (2014). Regularities and mechanisms of biological action of terahertz electromagnetic waves at the frequencies of active cellular metabolites. *Doctor's thesis*. Saratov, 366 p. [in Russian].
61. Gribov, L. A. (2009). *Kolebanie molekul [Oscillation of molecules]*. Moscow: Knizhny Dom Publ., 544 p. [in Russian].
62. Nishizawa, S., Sakai, K., Hangyo, M. (2005). Terahertz time-domain spectroscopy. *Terahertz Optoelectronics: of the International Conference* (pp. 203–270). Berlin-Heidelberg: Springer.
63. Liu, H. B., Zhong, H., & Karpovicz, N. (2007). Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security application. *Proc. IEEE*, 8, 1514–1527.
64. Fedorov, V. I., Klementieva, V. M., Khamoyan, A. G., & et al. (2009). Sub-Millimeter laser as a potential tool for medical diagnostics. *Millimetrovye volny v biologii i meditsine [Millimeter Waves in Biology and Medicine]*, 1-2, 88–97 [in Russian].
65. Fedorov, V. I., Khamoyan, A. G., Shevela, E. Y., & et. al. (2007). Investigation of possibility of sub-millimeter laser using as instrument for diagnostics in medicine. *Proc. SPIE*, 6734, 6734041–6734047.
66. Betsky, O. V., Kozmin, A. S., & Yaremenko, Yu. G. (2008). Possible applications of terahertz waves. *Biomeditsinskaya radioelektronika [Biomedical Radioelectronics]*, 3, 48–54 [in Russian].
67. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Scanning device based on The nipkov disk with sub-diffraction resolution in the millimeter, terahertz, infrared and optical wavelength ranges. Patent of the Russian Federation 171360.
68. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2018). Device for forming images of objects with sub-diffraction resolution in the millimeter, terahertz, infrared and optical wavelength ranges. Patent of the Russian Federation 182458.
69. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Method for forming images of objects with sub-diffraction resolution in the millimeter, terahertz, infrared and optical wavelength ranges. Patent of the Russian Federation 2631006.
70. Ozhegov, R. V., Gorshkov, K. N., Okunev, O. V., Goltsman, G. N., Koshelets, V. P., Filippenko, L. V., & Kinev, N. V. (2014). *Fluktuatsionnaya chuvstvitel'nost' i stabil'nost' priemnikov s SIS i NEV smesitelyami dlya teragertsovogo teplovideniya [Fluctuation sensitivity and stability of receivers with SIS and NEV mixers for terahertz thermal imaging]*. Moscow: Moscow State Pedagogical University Publ. 104 p. [in Russian].
71. Kemp, M. C. (2011). Explosive detection by terahertz spectroscopy – a bridge too far. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 282–292.
72. Jackson, J. B., Bowen, J., Walker, G., Labaune, J., Mourou, G., Menu, M., & Fukunaga, K. (2011). A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(1), 220–231.
73. Smolyanskaya, O. A., Chernomyrdin, N. V., Konovko, A. A., Zaytsev, K. I., Ozheredov, I. A., Cherkasova, O. P., Nazarov, M. M., Guillet, J. P., Kozlov, S. A., Kistenev, Yu. V., Coutaz, J.-L., Mounaix, P., Vaks, V. L., Son, J.-H., Cheon, H., Wallace, V. P., Feldman, Yu., Popov, I., Yaroslavsky, A. N., Shkurinov, A. P., & Tuchin, V. V. (2018). Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids. *Progress in Quantum Electronics*, 62, P. 1. doi 10.1016/j.pquantelec.2018.10.001.
74. Cherkasova, O. P., Nazarov, M. M., Angeluts, A. A., & Shkurinov, A. P. (2016). Investigation of blood plasma in the terahertz frequency range. *Optika i spektroskopiya [Optics and Spectroscopy]*, 120(1), 59–67 [in Russian].

75. Cherkasova, O. P., Nazarov, M. M., Angeluts, A. A., & Shkurinov, A. P. (2016). Analysis of blood plasma at terahertz frequencies. *Optics & Spectroscopy*, 120(1), 50–57. doi: 10.1134/S0030400X16010069.
76. Cherkasova, O. P., Nazarov, M. M., & Shkurinov, A. P. (2018). Study of blood and its components by terahertz pulsed spectroscopy. *EPJ Web of Conferences*, 195. doi: 10.1051/epjconf/201819510003.
77. Tuchin, V. V. (2006). *Optical Clearing of Tissues and Blood*. SPIE Press, Bellingham, WA.
78. Curl, C. L., Bellair, C. J., Harris, T., Allman, B. E., & Harris, P. J. (2005). Refractive index measurement in viable cell using quantitative phase-amplitude microscopy and confocal microscopy. *Cytometry*, A65, 88–92.
79. Rappaz, B., Marquet, P., Cuche, E., Emery, Y., Depeursinge, C., & Magistretti, P. J. (2005). Measurement of the integral refractive index and dynamic cell morphometry of living cells with digital holographic microscopy. *Optics Express*, 13(23), 9361–9373. Retrieved from <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.009361>.
80. Sung, Y., Lue, N., Hamza, B., Martel, J., Irimia, D., Dasari, R. R., Choi, W., Yaqoob, Z., & So, P. (2014). Three-Dimensional Holographic Refractive-Index Measurement of Continuously Flowing Cells in a Microfluidic Channel. *Phys. Rev. Appl.*, 1(1), P. 014002.
81. Rappaz, B., Charrière, F., Depeursinge, C., Magistretti, P. J., & Marquet, P. (2008). Simultaneous cell morphometry and refractive index measurement with dual-wavelength digital holographic microscopy and dye-enhanced dispersion of perfusion medium. *Optics Letters*, 33(7), 744–746. Retrieved from <https://doi.org/10.1364/OL.33.000744>.
82. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2014). Photonics of isolated dielectric particles of arbitrary 3D shape - a new direction of optical information technologies. *Vestnik NSU*, 12, 59–70. Retrieved from <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/7717>.
83. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2015). *Kvazioptika: sovremennye tendentsii razvitiya [Quasi-optics: modern development trends]*. Novosibirsk: SSUGT Pubk., 163 p. [in Russian].
84. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2018). Superresolution in acoustic focusing devices. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 231–244 [in Russian].
85. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Photonic jets in science and technology. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 212–234 [in Russian].
86. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). *Diffraction optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit*. Springer. Retrieved from <http://www.springer.com/us/book/9783319242514#aboutBook>.
87. Luk'yanchuk, B. S., Paniagua-Domínguez, R., Minin, I., Minin, O., & Wang, Z. (2017). Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow. *Optical Materials Express*, 7(6), 1820–1847. Retrieved from <https://doi.org/10.1364/OME.7.001820>.
88. Heifetz, A., Kong, S.-C., Sahakian, A. V., Taflove, A., & Backman, V. (2009). Photonic Nanojets. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 6, 1979–1992.
89. Chen, Z. G., Taflove, A., & Backman, V. (2004). Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique. *Optics Express*, 12, 1214–1220.
90. Astratov, V. N. (2013.) Focusing multimodal optical microprobe devices. Patent US 8554031 B2, Date of Patent Oct. 8.
91. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). Device for transporting focused surface plasmon-polaritons of the optical range. Patent of the Russian Federation 166250.
92. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). Optical micro-sensor based on photon jets of terahertz, IR or optical waves. Patent of the Russian Federation 161592.
93. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). Device for Sewerage and energy transportation based on photon jets. Patent of the Russian Federation 163673.
94. Minin, V. F., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). Device of quasi-optical transmission line of terahertz waves. Patent of the Russian Federation 2591282.
95. Prem Ballabh Bisht, Venkata Ramanaiah Dantham, Raman Namboodiri. Enhancement of Raman scattering. Patent US 2013/0308127 A1, Pub. Date: Nov. 21, 2013.
96. Fitzgerald, A. J., Berry, E., Zinov'ev, N. N., Homer-Vanniasinkam, S., Miles, R. E., Chamberlain, J. M., & Smith, M. A. (2003). Catalogue of human tissue optical properties at terahertz frequencies. *Journal of Biological Physics*, 29(2/3), 123–128.
97. Crawley, D. A., Longbottom, C., Cole, B. E., Ciesla, C. M., Arnone, D., Wallace, V. P., & Pepper, M. (2003). THz pulse imaging: A pilot study of potential applications in dentistry. *Caries Research Journal*, 37(5), 352–359.

98. Beltskij, O., & Lebedeva, N. (2001). Current concepts on the mechanisms of action of low-intensity mm waves on biological objects. *Online Journal of United Phys. Soc., Russian Federation*, 4.
99. Frohlich, H. (1968). Long range coherence and energy storage in biological systems. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2, 641–649.
100. Pakhomov, A. G., Akyel, Y., Pakhomova, O. N., Stuck, B. E., & Murphy, M. R. (1998). Current state and implications of research on biological effects of mm waves: A review of the literature. *Bioelectromagnetics*, 19(7), 393–413.
101. Sirotkina, M. A., Shirmanova, M. V., Bugrova, M. L., Elagin, V. V., Agrba, P. A., Kirillin, M. Yu., Kamensky, V. A., & Zagaynova, E. V. (2011). Continuous optical coherence tomography monitoring of nanoparticles accumulation in biological tissues. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(1), 283–291.
102. Seung Jae Oh, Inhee Maeng, Hee Jun Shin, Jaewon Lee, Jinyoung Kang, Seunjoo Haam, Yong-Min Huh, Jin-suck Suh, & Joo-Hiuk Son. (2008). Nanoparticle contrast agents for THz medical imaging. In *33rd International Conference on IR and MM Waves and the 16th International Conference on THz Electronics*. Pasadena. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2008.4665813>.
103. Prem Ballabh Bisht, Venkata Ramanaiah Dantham, Raman Namboodiri. (2013). Enhancement of Raman scattering. Patent US 2013/0308127 A1.

Received 19.11.2020

© I. V. Minin, O. V. Minin, 2021