

**Вендик И.Б., Козлов Д.С., Мунина И.В.,
Одит М.А., Туральчук П.А., Тургалиев В.М.**

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

Электромагнитное излучение терагерцового диапазона: способы управления и возможные области применения

*Обсуждаются свойства электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне.
Рассматриваются свойства метаматериалов с управляемыми свойствами в ТГц
диапазоне. Описываются принципы ТГц томографии*

Ключевые слова: электромагнитные волны, терагерцовый диапазон, метаматериалы, метаматериалы с управляемыми свойствами, терагерцовая томография

Введение

Интерес к электромагнитным (ЭМ) волнам терагерцового диапазона объясняется возможностью его эффективного использования в новых приложениях, таких как системы терагерцового изображения, системы медицинского сканирования, системы досмотра и контроль безопасности, контроль состояния атмосферы, системы космической связи и т.д. [1,2]. Развитие ТГц технологии долгое время сдерживалось отсутствием эффективных источников и приемников ТГц излучения. В настоящее время эти проблемы в значительной степени решены. Другая причина существования так называемой «терагерцовой щели», не используемой для технических приложений, связана с отсутствием специфических откликов природных материалов в этом диапазоне частот. Резонансный отклик обычных магнитных материалов наблюдается в диапазоне СВЧ, в то время как плазменная частота в металлах находится за пределами среднего инфракрасного диапазона. Этот недостаток природных материалов может быть устранен путем создания новых искусственных материалов. Среди новых материалов, искусственные структуры играют важную роль, особенно в разработке функциональных устройств ТГц. Новые искусственные материалы, известные как электромагнитные метаматериалы (МТМ) активно изучаются с целью эффективного управления электромагнитными волнами и улучшения характеристик существующих систем для применений в любом диапазоне частот. Метаматериалы могут устранить "ТГц щель" частотного спектра и стимулировать научные исследования и технические разработки с использованием специфических свойств терагерцового излучения. Электромагнитные МТМ характеризуются экзотическими электромагнитными явлениями и, что важно, допускают управление их электромагнитными свойствами за счет внешних воздействий: электрического поля, оптического излучения, изменения температуры и пр. [3], [4].

В настоящем обзоре мы остановимся на двух направлениях исследований применительно к терагерцовому диапазону: 1) свойства управляемых ТГц метаматериалов и 2) возможность применения ТГц ЭМ волн в устройствах томографии. **Основные свойства ЭМ волн ТГц диапазона**

К терагерцовому диапазону принято относить частоты в интервале от 300 ГГц до 20 ТГц. Соответствующие длины волн 10^{-3} - 10^{-5} м и энергия излучения 10^{-3} - 10^{-1} эВ. Низкая

энергия излучения не сопровождается ионизацией биологических тканей, что принципиально важно при использовании ТГц диапазона для исследования живых объектов.

ТГц излучение характеризуется высокой степенью поглощения в атмосфере земли, в основном, молекулами воды, что препятствует применению ТГц волн для наземных систем связи. Однако другие области применения оказываются весьма привлекательными. При этом следует учесть следующие свойства ТГц волн: большинство диэлектриков прозрачно для ТГц излучения; ТГц излучение проникает в органические материалы, оставаясь безопасным для живых объектов; системы, работающие в ТГц диапазоне, характеризуются высоким пространственным разрешением (0,3 мм для 1 ТГц); существуют ТГц «отпечатки пальцев», позволяющие анализировать молекулярную структуру природных материалов и идентифицировать состав различных соединений.

Наиболее эффективным является использование ТГц волн в следующих областях науки, техники и народного хозяйства:

- науки о Земле и атмосфере, включая метеорологию;
- биомедицинские приложения: томография и диагностика заболеваний;
- сверхширокополосные каналы передачи данных со скоростью до 100 Гб/с;
- системы безопасности, включающие обнаружение скрытых объектов;
- контроль материалов, включая контроль качества;
- фармацевтический контроль, включая обнаружение наркотиков;
- высокоскоростные системы связи на близком расстоянии;
- системы космической связи (межспутниковая связь)

Применение метаматериалов позволяет конструировать ТГц структуры для различных применений, используя принцип масштабирования известных структур, разработанных для СВЧ-диапазона. Управление свойствами таких структур позволяет разрабатывать ТГц-устройства с перестраиваемыми техническими характеристиками: рабочая частота, вносимое затухание, знак и величина эффективных электродинамических параметров. Управление может осуществляться за счет включения в состав метаматериалов сегнетоэлектриков, полупроводников, жидких кристаллов. Перспективным также является применение микро-электромеханических систем (МЭМС).

Свойства управляемых терагерцовых метаматериалов.

Различные варианты перестраиваемых метаматериалов для контроля терагерцового излучения представлены в обзоре [5], где обсуждаются МТМ на основе расщепленных колец (РК); МТМ на резонансных диэлектрических включениях; МТМ с применением сегнетоэлектриков и ферромагнетиков; МТМ с использованием материалов с фазовым переходом; слоистые металло-диэлектрические структуры; МТМ на основе жидких кристаллов.

Используются различные способы перестройки свойств МТМ структур: изменение температуры, контроль с помощью оптического излучения, изменение напряженности электрического или магнитного поля. Контроль температуры используется для управления диэлектрической проницаемостью или проводимостью материалов в структуре МТМ. В случае активного диэлектрика (сегнетоэлектрика) используется контроль диэлектрической проницаемости путем изменения температуры. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика может быть также изменена путем регулирования напряжения, хотя напряженность электрического поля достаточно высока: 50-100 В/мкм. Сочетание сегнетоэлектрических и ферромагнитных материалов выглядит перспективным для разработки перестраиваемых МТМ. Структура МТМ может быть разработана с использованием жидких кристаллов, диэлектрические свойства которых могут управляться изменением температуры и электрическим полем.

Оптический контроль является одним из наиболее интересных способов осуществления перестройки параметров искусственных структур. Это самый быстрый

способ управления, позволяющий к тому же получить более равномерное управляющее воздействие по сравнению с контролем температурой.

Среди различных конструкций МТМ, разработанных для работы в ТГц диапазоне, наиболее популярными являются МТМ с использованием резонансных расщепленных колец (РК). Такие МТМ хорошо изучены, и для их производства не существует принципиальных трудностей. Контроль рабочего спектра МТМ на РК основан на перестройке резонансной частоты при изменении параметров зазора в кольце, что связано с изменением проводимости или емкости. Существенным недостатком РК является достаточно высокий уровень потерь в проводящей части кольца при переходе в ТГц диапазон, по сравнению с СВЧ-применениями.

МТМ на основе диэлектрических резонаторов [6, 7] не используют проводящие материалы, и соответственно в них отсутствует этот вид потерь, что особенно важно для ТГц применений. Диэлектрические резонаторы могут иметь сферическую, цилиндрическую или кубическую форму. Регулярные массивы таких резонаторов могут образовывать изотропные 3D МТМ для ТГц диапазона. Для управления свойствами таких МТМ могут использоваться жидкие кристаллы в качестве материала основы, в которой формируется регулярная решетка резонаторов. Диэлектрические резонаторы кубической формы, в которых возбуждаются резонансы "Ми", эффективно могут применяться для формирования перестраиваемых МТМ ТГц диапазона в режиме возмущенного "Ми"-резонанса при использовании металлической полоски на одной грани куба [8]. Для перестройки резонансной частоты необходимо изменять электрическую длину полоски, что может быть выполнено за счет внешнего воздействия на параметры зазора в центре полоски.

Весьма эффективным способом разработки перестраиваемых МТМ является использование МЭМС-структур в составе резонансных элементов регулярной структуры. В качестве структурных элементов могут использоваться планарные резонаторы или структуры металл-диэлектрик-металл со встроенными пьезо-актюаторами, которые обеспечивают изменение емкости в составе резонатора под действием приложенного напряжения или изменения температуры [9].

Наконец, разработка управляемых устройств ТГц диапазона может быть осуществлена путем использования фотонных кристаллов с точечными или линейными дефектами. В [10] представлены результаты моделирования двумерного фотонного кристалла, предназначенного для полного переизлучения мощности ТГц излучения в различные каналы при подаче управляющего сигнала. Структура выполнена на жидком кристалле с управляемой диэлектрической проницаемостью.

В каждом конкретном случае структура МТМ и способ управления ее параметрами определяются конкретной задачей.

Возможность применения ЭМ волн ТГц диапазона в устройствах томографии.

Диагностика различных патологий, в том числе, обнаружение раковых опухолей на ранних стадиях является актуальной задачей, стоящей на стыке междисциплинарных исследований в области медицины, радиофизики и радиотехники, компьютерного моделирования и обработки сигналов. Как правило, исследования выполняются с использованием рентгеновского излучения, ультразвуковой диагностики, а также магниторезонансной томографии. Эти технологии являются достаточно дорогими и сопровождаются вредным воздействием ионизирующего излучения. Альтернативные методики ранней диагностики новообразований основаны на использовании микроволновой неионизирующей технологии. Получение изображений скрытых неоднородностей (опухолей) в биологических тканях с использованием излучения СВЧ волн основано на сильном контрасте диэлектрических свойств неоднородностей и здоровых тканей. Кроме того, такая система томографии является экономически более эффективной, широкодоступной, простой в использовании и позволяет обеспечить объективность анализа и простую интерпретацию результатов. Качество изображения, как

правило, оценивается по уровню разрешения, то есть наименьшего расстояния между двумя близко расположенными, но еще различимыми деталями. Разрешающая способность системы зависит от длительности импульса, генерируемого для сканирования объекта, и повышается с уменьшением длительности импульса. В этом случае рабочий диапазон частот должен быть максимально широким, что достаточно легко обеспечивается при работе в области высоких частот. Однако в случае радиотомографии живых тканей это означает, что глубина проникновения излучения при уменьшении длины волны будет также невелика. Таким образом, возникает проблема выбора оптимального частотного диапазона, который удовлетворял бы требованиям, предъявляемым к разрешающей способности, и, в то же время, обеспечивал возможность приема сигналов требуемой мощности.

Актуальной проблемой является достижение высокой разрешающей способности, необходимой для обнаружения опухоли на излечимой стадии. В этом плане предпочтительной является терагерцовая томография, которая получила значительное развитие в последнее время. Система ТГц изображений в состоянии обнаружить ранние раковые образования, прежде чем он будет виден или чувствительным к любым другим способом. В терагерцовой системе формирования изображения излучение не является ионизирующим и не сильно рассеивается в тканях (в отличие от оптического излучения), что делает его предпочтительным для использования в биомедицине [11, 12]. В терагерцовом диапазоне изучаются такие свойства, как коэффициент поглощения и показатель преломления образцов в случае рака молочной железы и рака толстой кишки. Коэффициент поглощения и показатель преломления молочной железы в опухолевой ткани выше, по сравнению с нормальной тканью. Эти изменения определяются более высоким содержанием воды, а также структурными изменениями, такими как рост клеток и плотность протеинов. Спектр поглощения воды имеет сильно выраженный, широкий пик с центром в 5,6 ТГц, что связано с резонансным растяжением водородной связи между молекулами воды. Эффект этого пика поглощения, который наблюдается до частот, используемых в системах терагерцовой импульсной визуализации, делает метод чувствительным к определению концентрации воды. Таким образом, терагерцовый пик поглощения воды проявляется и фиксируется в мягких тканях, что объясняет контраст между различными тканями, например, мышечной и жировой тканями, здоровой и поврежденной тканью.

За последнее десятилетие достигнуты большие успехи в области генерации ТГц волн, обнаружении и визуализации ТГц излучения, дальнейшее улучшение положения в области медицинской ТГц томографии зависит от принятия этого комплекса медицинским сообществом и его дальнейшего использования. Продолжение усовершенствования источников, детекторов и компонентов с точки зрения уменьшения размеров, цены и простоты использования способствуют продвижению компактных и надежных системы ТГц медицинской томографии из инженерной лаборатории в клиники.

Библиографический список

1. Wai Lam Chan, Jason Deibel and Daniel M Mittleman, Imaging with terahertz radiation, *Reports on Progress in Physics*, Volume 70, Number 8, 2007, pp. 1325–1379.
2. Peter de Maagt, Terahertz technology for space and earth applications. *First European Conference on Antennas and Propagation*, 6-10 Nov. 2006, pp. 1 – 4.
3. S. J. Pendry, “Metamaterials and the Control of Electromagnetic Fields,” in *Conference on Coherence and Quantum Optics*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), paper CMB2.
4. D. Schurig, et al., “Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies,” *Science* 314, (2006), pp. 977-980.
5. I.B.Vendik, O.G. Vendik, M.A. Odit, D.V. Kholodnyak, S.P. Zubko, M.F. Sitnikova, P.A. Turalchuk, K.N. Zemlyakov, I.V. Munin., D.S. Kozlov, V.M. Turgaliev, A.B. Ustinov, Y. Park, J. Kihm, C.-W. and Lee, “Tunable Metamaterials for Controlling THz Radiation”, *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, Vol. 2, Issue 5, Sept. 2012, pp. 538-549
6. M. Odit, I. Vendik, D. Kozlov, I. Munina, V.Turgaliev, “Tunable metamaterial structures for controlling THz radiation”, *Proc. MSMW'13, Kharkov, Ukraine, June 23-28*, pp. 40-44 (2013).

7. I. Vendik, M. Odit, and D. Kozlov, "3D Metamaterial Based on a Regular Array of Resonant Dielectric Inclusions," *Radioengineering, Proc. of Czech and Slovak Techn. Universities and URSI Commities*, Vol. 18, No. 2, pp. 111-116, June 2009.
8. D.S. Kozlov, · M.A. Odit, · I.B. Vendik, · Young-Geun Roh, · Sangmo Cheon, · Chang-Won Lee, Tunable terahertz metamaterial based on resonant dielectric inclusions with disturbed Mie resonance, *Appl. Phys. A, Materials Science & Processing*, 2012, Vol. A 106, No. 3, March 2012, pp.465-470
9. И.В. Мунина, В.М. Тургалиев, И.Б. Вендик, Перестраиваемые терагерцовые метаматериалы с использованием электрически управляемых пьезоэлектрических актюаторов, *Письма в ЖТФ*, 2012, том 38, вып. 12, с.59-65.
10. И.В. Мунина, В.Н. Яценко, И.Б. Вендик, С. Биргермейер, «Перестраиваемый направленный ответитель на основе фотонных кристаллов для ТГц диапазона частот», Сб. трудов конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2-5 июня 2014, с. 286-288.
11. Z. D. Taylor, R. S. Singh, D. B. Bennett, P. Tewari, C. P. Kealey, N. Bajwa, M. O. Culjat, A. Stojadinovic, H. Lee, Jean-Pierre Hubschman, E. R. Brown, and W. S. Grundfest, "THz Medical Imaging: *in vivo* Hydration Sensing", *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, V. 1, No. 1, September 2011, pp. 201-219.
12. F. Friederich, W. von Spiegel, M. Bauer, F. Meng, M. D. Thomson, S. Boppel, A. Lisauskas, B. Hils, V. Krozer, A. Keil, T. Löffler, R. Henneberger, A. K. Huhn, G. Spickermann, P. H. Bolívar, and H.G. Roskos, "THz Active Imaging Systems With Real-Time Capabilities", *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, V. 1, NO. 1, September 2011, pp. 183-200.