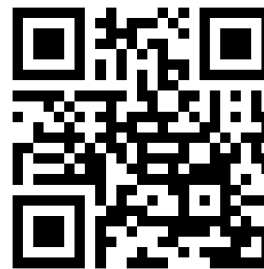


УДК 351.815.2:621.317.799

**ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ТЕРАГЕРЦОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРИ ТАМОЖЕННОМ КОНТРОЛЕ****Афонин Д.Н.***Санкт-Петербургский имени В.Б. Бобкова филиал
Российской таможенной академии***OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION
OF TERAHERTZ TECHNOLOGIES IN CUSTOMS CONTROL****Afonin D.N.***St. Petersburg named after V.B. Bobkov Branch of the Russian Customs Academy***Аннотация**

В настоящей работе проводится всесторонний анализ терагерцовых (ТГц) технологий в контексте таможенного контроля, с акцентом на их возможности для неинвазивного обнаружения скрытых объектов, таких как контрабанда, взрывчатые вещества и наркотики. Терагерцовые волны, работающие в диапазоне частот 0,1–10 ТГц, обеспечивают уникальную проникающую способность через неметаллические материалы без ионизирующего излучения, что делает их подходящими для систем безопасности в условиях высокой пропускной способности, таких как границы и порты. Исследование рассматривает теоретические основы, включая принципы фотодетекции и взаимодействия с материалами, оценивает текущие применения в сканировании международных почтовых отправлений и физических лиц, а также преимущества, такие как высокое разрешение и безопасность. Обсуждаются и проблемы применения ТГц-технологий, включая атмосферное поглощение и высокие затраты, наряду с перспективами интеграции с искусственным интеллектом (ИИ) и новыми материалами, такими как графен. Прогнозы рынка указывают на рост с 729,59 млн долларов США в 2023 году до 2,12 млрд долларов к 2029 году, подчеркивая потенциал ТГц-технологии для повышения эффективности и безопасности таможенного контроля.

Ключевые слова: терагерцовые технологии; таможенный контроль; неинвазивное сканирование; обнаружение скрытых объектов; безопасность границ; фотодетекторы; искусственный интеллект; рыночные перспективы; неразрушающий контроль; спектроскопия.

Ссылка для цитирования: Афонин Д.Н. Возможности и перспективы применения терагерцовых технологий при таможенном контроле // Бюллетень инновационных технологий. – 2026. – Т. 10. – № 1 (37). – С. 5-8. – EDN FBDICB.

В эпоху глобализированной торговли таможенный контроль сталкивается с растущими вызовами из-за увеличивающихся объемов трансграничных поставок, оцениваемых более чем в 28 триллионов долларов США в 2024 году, что требует передовых технологий для эффективного и безопасного инспектирования. Терагерц-

Abstract

This paper provides a comprehensive analysis of terahertz (THz) technologies in the context of customs control, focusing on their potential for the non-invasive detection of concealed objects such as contraband, explosives, and drugs. Terahertz waves, operating in the 0.1–10 THz frequency range, offer unique penetration capabilities through non-metallic materials without ionizing radiation, making them suitable for security systems in high-throughput environments like borders and ports. The study examines the theoretical foundations, including the principles of photodetection and material interaction, evaluates current applications in scanning international mail and individuals, and highlights advantages such as high resolution and safety. The challenges of applying THz technologies are also discussed, including atmospheric absorption and high costs, alongside prospects for integration with artificial intelligence (AI) and new materials like graphene. Market forecasts indicate growth from USD 729.59 million in 2023 to USD 2.12 billion by 2029, underscoring the potential of THz technology to enhance the efficiency and security of customs control.

Keywords: terahertz technologies; customs control; non-invasive screening; concealed object detection; border security; photodetectors; artificial intelligence; market prospects; non-destructive testing; spectroscopy.

овое (ТГц) излучение, расположенное между микроволновым и инфракрасным спектрами (0,1–10 ТГц, соответствующее длинам волн 3 мм–30 мкм), выступает перспективным инструментом для неинвазивного обнаружения запрещенных и ограниченных к перемещению товаров при таможенном контроле. В отличие от рентгеновских

систем, ТГц-волны неионизирующие, что обеспечивает безопасность для операторов и инспектируемых объектов, но при этом они проникают через непроводящие материалы, такие как одежда, пластик и бумага [1]. Данная особенность ТГц-излучения позволяет ему дополнить традиционные технические средства таможенного контроля, такие как металлодетекторы и досмотровые рентгеновские аппараты, которые бывают неэффективны для выявления неметаллических предметов.

Актуальность применения ТГц технологий при таможенном контроле усиливается растущими угрозами безопасности, включая контрабанду наркотиков и взрывчатых веществ, где пассивные ТГц-системы демонстрируют в полевых испытаниях чувствительность обнаружения свыше 90%. Анализ рынка прогнозирует среднегодовой темп роста (CAGR) 11–17,3% для ТГц-технологий, стимулируемый применениями в обороне и пограничной безопасности [2].

Терагерцовые волны генерируются и детектируются с помощью различных механизмов, включая фотопроводящие антенны, квантовые каскадные лазеры и фотодетекторы, обеспечивая оптимальные частоты для спектроскопического анализа [3]. Ключевые принципы применения ТГц излучения включают тепловую детекцию, где поглощенное излучение вызывает изменения температуры в материалах, таких как болометры, фотопроводящую детекцию, возбуждающую носители в полупроводниках, таких как GaAs или InP, и фотогальваническую детекцию через полевые транзисторы (FET) с плазменным резонансом [4]. Новые материалы, такие как графен (с нулевой запрещенной зоной и высокой подвижностью электронов) и дихалькогениды переходных металлов (TMD), повышают чувствительность и обеспечивают работу при комнатной температуре, преодолевая ограничения традиционных детекторов [5].

Для таможенного контроля ТГц-спектроскопии можно использовать вибрационные моды молекул для идентификации взрывчатых веществ (например, RDX на 0,82 ТГц) и наркотиков (например, кокаин на 1,54 ТГц) [6]. Пассивные ТГц системы детектируют естественное тепловое излучение, в то время как активные используют источники ТГц излучения, такие как эмиттеры 100 ГГц, для высокоскоростной визуализации (до 5000 линий/с) [2]. Атмосферное поглощение ТГц излучения водяным паром создает ограничения его применения, сокращая эффективное расстояние до объекта контроля [7].

Терагерцовые технологии могут применяться при таможенном контроле для сканирования физических лиц, международных почтовых отправок, багажа и ручной клади, обеспечивая дистанционное обнаружение запрещенных и ограниченных к перемещению предметов. При сканировании международных почтовых отправок ТГц-визуализаторы, работающие на 100 ГГц, достигают пространственного разрешения 3 мм и

скорости сканирования до 15 м/с, детектируя малые количества (1–5 г) наркотиков или взрывчатых веществ в конвертах без воздействия на них ионизирующим излучением [2]. Исследование данных технологий демонстрирует неразрушающую идентификацию запрещенных веществ в многослойных упаковках с точностью >90% в многокомпонентных образцах [8].

При сканировании физических лиц пассивные ТГц-системы, такие как от Thruvision или TeraSense, обнаруживают скрытые объекты под одеждой на расстояниях до 3–5 м, подходя для пунктов пропуска с высоким потоком пассажиров, например, воздушных [9], но они не позволяют обнаруживать предметы, расположенные в полостях человеческого тела или имплантированные в организм человека, где преимущество остается за просвечивающими рентгеновскими сканерами людей [10, 11]. В морских портах и автомобильных пунктах пропуска ТГц-радары можно применять для сканирования автомобильного транспорта и контейнеров для их мониторинга в режиме реального времени.

Основным преимуществом терагерцовых технологий является их безопасность, поскольку ТГц-волны неионизирующие и с уровнями энергии ниже 1 мэВ, не представляют рисков для здоровья в сравнении с рентгеновским и гамма-излучениями [12]. Высокая проникающая способность через диэлектрики обеспечивает ТГц технологиям обнаружение запрещенных и ограниченных к перемещению через границу предметов через упаковку с субмиллиметровым разрешением, превосходящим микроволны [13]. Экономическая эффективность ТГц технологий проявляется в таких системах, как сканеры TeraSense, предлагающих более низкие эксплуатационные затраты и время развертывания по сравнению с альтернативными рентгеновскими и гамма-установками [2].

При таможенном контроле ТГц технологии могут повысить пропускную способность пунктов пропуска, сканируя до 600 человек/час, и специфичность через спектроскопию, снижая ложные срабатывания [14]. Интеграция с искусственным интеллектом позволит автоматизировать распознавание угроз, повышая эффективность в динамичных средах [15].

Проблемы применения ТГц технологий включают атмосферную аттенуацию, особенно из-за влажности, ограничивающую дальность на открытом воздухе [1]. Кроме того, высокие начальные затраты и необходимость специализированных детекторов препятствуют широкому внедрению ТГц технологий и особенно систем, требующих криогенного охлаждения [4]. Непрозрачность для ТГц излучения металлов и водосодержащих веществ требует гибридных подходов к применению данных технологий с другими техническими средствами таможенного контроля [9, 16]. Регуляторные и этические вопросы, включая

конфиденциальность при сканировании физических лиц, требуют стандартизированных протоколов применения ТГц-технологий.

Основные направления развития терагерцовых технологий для таможенного контроля связаны с преодолением существующих ограничений. Ведутся интенсивные исследования по созданию компактных, мощных и недорогих источников ТГц-излучения, включая квантово-каскадные лазеры, фотонные микросхемы и новые твердотельные генераторы. Параллельно разрабатываются высокочувствительные детекторы на основе болометров и микроэлектромеханических систем.

Большие перспективы связываются с интеграцией ТГц-сканеров в многоуровневые системы досмотра, где они будут работать в синергии с рентгеновскими досмотровыми установками, металлодетекторами и газоанализаторами. Комбинированная информация от разных сенсоров, обработанная с помощью алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения, позволит значительно повысить достоверность и скорость принятия решений.

Разрабатываются методы, позволяющие компенсировать влияние атмосферной абсорбции, а также алгоритмы для реконструкции изображений и спектров сквозь непрозрачные для ТГц-волн барьеры. Активно ведется работа по пополнению и стандартизации библиотек спектров различных запрещенных и опасных веществ.

Перспективы применения ТГц технологий при таможенном контроле связаны с разработкой инновационных материалов, применяемых, например, в графеновых детекторах для работы при комнатной температуре и высоких частотах [5], а их интеграция с искусственным интеллектом обещает автоматизированные, масштабиру-

емые системы с предиктивной аналитикой. Прогнозы рынка предсказывают CAGR 14,87–25% до 2033 года, стимулируемый спросом на безопасность.

Оптимальной стратегией применения ТГц технологий при таможенном контроле представляется многоуровневый подход: на первом этапе потоковое ТГц-сканирование (или предсканирование) выделяет объекты (контейнеры, международные почтовые отправления, багаж, ручная кладь и т.п.) с «аномалиями» по спектральным и имиджевым признакам. На втором этапе применяется более точное, но медленное спектральное исследование и/или рентгеновская томография. На третьем — отбор образцов и лабораторное подтверждение. Для реализации такого подхода требуются программные интерфейсы обмена данными между оборудованием, унифицированные форматы результатов и интеграция алгоритмов машинного обучения, адаптирующихся к локальной базе «легальных» грузов и профилю опасных предметов.

Таким образом, терагерцовые технологии предлагают значительные возможности для усиления таможенного контроля через безопасное и эффективное обнаружение попыток перемещения через границу запрещенных или ограниченных к перемещению предметов, с перспективами широкого внедрения на фоне роста глобального рынка. Развитие инновационных ТГц технологий позволит интегрировать их в глобальные системы безопасности, способствуя содействию торговле и минимизации угроз государственной и экономической безопасности. Интеграция ТГц технологий с существующими техническими средствами таможенного контроля, в т.ч. создание гибридных систем, позволит максимально полно реализовать их потенциал для повышения эффективности таможенного контроля.

Список литературы

1. Federici J., Schulkin B. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs // *Semiconductor Science and Technology*. – 2005. – Vol. 20(7) / - S266.
2. Terahertz Technology Market Size, Share and Forecast Report, 2030 [Electronic resource] // Free Press Release Distribution Service. – URL: www.prlog.org/13054858-terahertz-technology-market-size-share-and-forecast-report-2030.html
3. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // *Nature Photonics*. – 2007. – N 1(2). – P. 97-105.
4. Hu Z., Zhang L.B., Chakraborty A. et al. Terahertz nonlinear Hall rectifiers based on spin-polarized topological electronic states in 1T-CoTe₂ // *Adv. Mater.* – 2023. – N 35(10). – 2209557.
5. Otsuji T., Tombet S.A.B., Satou A., Fukidome H. (2014). Graphene-based devices in terahertz science and technology // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – N 47(37). – 374001.
6. Davies A.G., Burnett A.D., Fan W. et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs // *Materials Today*. – 2008. – N 11(3). – P. 18-26.
7. Appleby R., Wallace H.B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2007. – N 55(11). – P. 2944-2956.
8. Palka N., Szustakowski M., Kowalski M. et al. THz Spectroscopy and Imaging in Security Applications // 19th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON). – Warsaw, Poland. – 2012. – 6233513.
9. Kemp M.C., Taday P. F., Cole B.E. et al. Security applications of terahertz technology // *Proceedings of SPIE*. – 2006. – N 5070. – P. 44-52.
10. Афонин Д.Н. Применение рентгеновских сканеров для выявления внутриполостного сокрытия наркотических средств // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. – 2017. – Т. 13, № 3(348). – С. 563-572.
11. Афонин Д.Н., Афонин П.Н., Шележонкова А.В. Применение рентгеновских сканеров персонального досмотра для выявления наркокурьеров // *Ученые записки Санкт-Петербургского имени В.Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии*. – 2016. – № 4(60). – С. 27-31.
12. Wilmink G.J., Grundt J. E. Invited review article: Current state of research on biological effects

of terahertz radiation // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2011. – N. 32(10). – P. 1074-1122.

13. Chan W.L., Deibel J., Mittleman D. Imaging with terahertz radiation // Reports on Progress in Physics. – 2007. – N 70(8). – P. 1325 - 1379.

14. Appleby R. Sensing with terahertz radiation: A review of recent progress // Sensor Review. – 2018. – N 38 (2). – P. 216–222.

15. Афонин Д.Н. Современные тенденции информатизации таможенной службы // Бюллетень

инновационных технологий. – 2024. – Т. 8, № 4(32). – С. 5-9.

16. Афонин Д.Н., Афонин П.Н. Организация эксплуатации технических средств таможенного контроля в таможенных органах: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский центр "Интермедия", 2021. – 120 с.

Поступила в редакцию 17.12.2025

Сведения об авторе:

Афонин Дмитрий Николаевич – профессор кафедры таможенных операций и таможенного контроля Санкт-Петербургского имени В.Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии, доктор медицинских наук, доцент, e-mail: dnafonin@gmail.com



Электронный научно-практический журнал **"Бюллетень инновационных технологий"** (ISSN 2520–2839) является сетевым средством массовой информации регистрационный номер Эл № ФС77-73203 по вопросам публикации в Журнале обращайтесь по адресу bitjournal@yandex.ru