

случаях переносными. Характеристики станций «Гроза» и ЦСТР-Л приближаются к лучшим зарубежным аналогам.

Указанные отечественные станции являются фактически гражданскими, что делает тропосферную связь более доступной для широкого спектра отраслей экономики, особенно в районах с неподготовленной инфраструктурой, например, таких как Арктический регион, а также позволяет закрывать потребности в связи на шельфовых территориях, где невозможно размещение ретрансляторов классической радиорелейной связи.

#### Список использованных источников

1. Основные направления совершенствования тропосферной связи /И.Р. Сиваков, С.В. Ионов //Информационно-телекоммуникационные технологии. Системы, средства связи и управления, 2015. - №4.

2. Тропосферная связь /Л.И. Яковлев, Г.В. Дедюкин, Э.С. Каграманов и др. - М.: Воениздат, 1984. - 256 с.

3. Comtech Systems. (2015, Mar. 27). Technical Information. Introduction to troposcatter communications: A brief synopsis of over-the-horizon troposcatter. [Online]. Available: <http://www.comtechsystems.com/wp-content/uploads/2014/05/Troposcatter-Introduction-Nov-2013.pdf>

4. 50 Mbps Digital Troposcatter Modem | Model CS67500 //Comtech Systems Inc URL: <https://www.comtechsystems.com/wp-content/uploads/2018/06/CS-Datasheet-CS67500.pdf> (дата обращения: 15.12.2019).

Лучин Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, главный конструктор филиала, ФГУП НИИР – СОНИИР. E-mail: [dmyl@soniir.ru](mailto:dmyl@soniir.ru).

УДК 535-14

## **МЕТОДЫ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ФОТОНИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, МОНИТОРИНГА И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В.С. Павельев

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», г. Самара  
ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
г. Самара

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, дифракционная оптика, кремниевая фотоника, алмазная фотоника.

Появление источников терагерцового излучения, в том числе когерентных – гиротронов [1], квантово-каскадных лазеров [2], лазеров на свободных электронах [3], привело к началу активного освоения этого диапазона. Интерес к терагерцовому диапазону определяется следующими факторами:

1. В нем возможна передача сигналов с более высокой скоростью, чем в освоенных радиодиапазонах. Поэтому, даже несмотря на относительно высокое поглощение терагерцового излучения парами воды в атмосфере, диапазон привлекает большой интерес специалистов в области телекоммуникаций и лидарных систем [4,5,6].

2. Излучение терагерцового диапазона обладает своей спецификой – в частности, большинство диэлектриков прозрачно для такого излучения, что позволяет рассматривать терагерцовое излучение в качестве “мягкой” альтернативы рентгеновскому излучению в решении задач мониторинга [7].

3. В терагерцовом диапазоне лежат спектральные линии (в т.ч. вращательные и колебательные) значительного количества веществ. Поэтому терагерцовая спектроскопия представляет большой интерес для исследователей [8]. Так как терагерцовый диапазон занимает промежуточное положение между радиодиапазоном и оптическим диапазоном, при освоении терагерцового диапазона используются методы как радиофизики [9] так и фотоники [10]. Появление когерентных источников терагерцового излучения [1-3] открывает широкие возможности использования методов и технологий дифракционной оптики, разработанных и активно применяемых для управления излучением оптического диапазона [11].

Данный доклад посвящен применению методов дифракционной оптики и когерентной фотоники терагерцового диапазона для решения задач телекоммуникаций, мониторинга и научных исследований. Приведенные в докладе результаты получены в рамках совместной работы научных групп Самарского университета, ИСОИ РАН (г. Самара), ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), ИОФ РАН (г. Москва). Были созданы и исследованы дифракционные оптические элементы (ДОЭ) для фокусировки излучения терагерцового лазера в заданные области, что важно для решения задач мониторинга объектов и лазерных технологий [12]; ДОЭ для формирования терагерцовых лазерных пучков с заданным поперечно-модовым составом [13-16], что позволило построить и исследовать натуральный макет многоканальной системы терагерцовой связи с некриптографической защитой информации [5], а также исследовать устойчивость одномодовых терагерцовых пучков к распространению в неоднородных средах [16]; ДОЭ для формирования терагерцовых пучков с заданным поперечно-модовым составом и заданным поляризационным распределением [17]. Для исследования созданных элементов использовалось излучение

терагерцового лазера на свободных электронах НОВОФЭЛ [3], расположенного в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск). Для изготовления кремниевых элементов в работах [12-17] в Самарском университете использовалась технология литографического травления (Бош-процесс), для изготовления высокоэффективных фокусирующих кремниевых [18] и алмазных [19] элементов с непрерывным профилем дифракционного микрорельефа использовались технологии лазерной абляции, разработанные в ИОФ РАН (г. Москва).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-72-20202.

Список использованных источников

1. Glyavin M.Yu., Development and applications of THz gyrotrons/ EPJ Web of Conferences, 2017, v.149, 01008.

2. Williams B., Terahertz quantum-cascade lasers/ Nature Photonics, 2007, v.1, pp. 517–525.

3. Kulipanov G.N., Bagryanskaya E.G., Chesnokov E.N., Choporova Yu.Yu., Gerasimov V.V., Getmanov Ya.V., Kiselev S.L., Knyazev B.A., Kubarev V.V., Peltek S.E., Popik V.M., Salikova T.V., Scheglov M.A., Seredniakov S.S., Shevchenko O.A., Skirinsky A.N., Veber S.L., Vinokurov N.A., Novosibirsk Free Electron Laser—Facility Description and Recent Experiments/ IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, v.5(5), pp. 798-809.

4. Кулипанов Г.Н., Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Бабченко С.В., Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем /Оптика атмосферы и океана, 2014. т. 27, № 12, С. 1070-1073.

5. Pavelyev V.S., Tukmakov K.N., Choporova Yu.Yu., Osintseva N.D., Knyazev B.A., Towards multichannel terahertz telecommunication based on mode division multiplexing/ AIP Conference Proceedings, 2020, v. 2299, 030002.

6. Jornet J.M., Akyildiz I.F., Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band/ IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, v.10(10), pp. 3211-3221.

7. Cherkassky V.S., Gerasimov V.V., Ivanov G.M., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Lukyanchikov L.A., Merzhievsky L.A., Vinokurov N.A., Techniques for introscopy of condense matter in terahertz spectral region/ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, v. 575(1–2), pp. 63-67.

8. Baxter J.B., Guglietta G.W., Terahertz Spectroscopy/ Analytical Chemistry, 2011, v. 83(12), pp. 4342–4368.

9. Atakramians Sh., Afshar V.Sh., Monro T.M., Abbott D., Terahertz dielectric waveguides/ Advances in Optics and Photonics, 2013, v.5(2), pp.169-215.

10. Pavelyev V., THz Diffractive Optics: methods, applications, perspectives/ *Materials of 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, Samara, Russia, 2020, pp. 1-4

11. Soifer V.A. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002.

12. Agafonov A.N., Volodkin B.O., Kachalov D.G., Knyazev B.A., Kropotov G.I., Tukmakov K.N., Pavelyev V.S., Tsypishka D.I., Choporova Yu.Yu., Kaveev A.K., Focusing of Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) radiation into paraxial segment/ *Journal of Modern Optics*, 2016, v. 63(11), pp.1051-1054.

13. Agafonov A.N., Choporova Yu.Yu., Kaveev A.K., Knyazev B.A., Kropotov G.I., Pavelyev V.S., Tukmakov K.N., Volodkin B.O. Control of transverse mode spectrum of Novosibirsk free electron laser radiation/ *Applied Optics*, 2015, v. 54(12), pp. 3635-3639.

14. Knyazev B.A., Choporova Yu.Yu., Mitkov M.S., Pavelyev V.S., Volodkin B.O., Generation of Terahertz Surface Plasmon Polaritons Using Nondiffractive Bessel Beams with Orbital Angular Momentum/ *Physical Review Letters*, 2015, v. 115, 163901.

15. Choporova Yu.Yu., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Pavelyev V.S., Scheglov M.A., Vinokurov N.A., Volodkin B.O., Zhabin V.N., High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range/ *Physical Review A*, 2017, v. 96, 023846.

16. Knyazev B.A., Choporova Yu.Yu., Pavelyev V.S., Osintseva N.D., Volodkin B.O., Transmission of high-power terahertz beams with orbital angular momentum through atmosphere/ *Materials of 41th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Copenhagen, 2016, pp. 1-2.

17. Хонина С.Н., Тукмаков К.Н., Дегтярев С.А., Решетников А.С., Павельев В.С., Князев Б.А., Чопорова Ю.Ю., Расчёт, изготовление и исследование субволнового аксикона для поляризационного преобразования излучения терагерцового диапазона/ *Компьютерная оптика*, 2019, т. 43, № 5, С. 756-764.

18. Kononenko T.V., Knyazev B.A., Sovyk D.N., Pavelyev V.S., Komlenok M.S., Komandin G.A., Konov V. I., Silicon kinoform cylindrical lens with low surface roughness for high-power terahertz radiation/ *Optics and Laser Technology*, 2020, v. 123, 105953.

19. Komlenok M., Kononenko T., Sovyk D., Pavelyev V., Knyazev B., Ashkinazi E., Reshetnikov A., Komandin G., Pashinin V., Ralchenko V., Konov V., Diamond diffractive lens with a continuous profile for powerful terahertz radiation/ *Optics Letters*, 2021, v. 46(2), pp. 340-343.

Павельев Владимир Сергеевич, д.-ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой наноинженерии, E-mail: [pavelyev10@mail.ru](mailto:pavelyev10@mail.ru)