

**Неохлаждаемые матричные терагерцовые микроболометрические приемники****Н. А. Кульчицкий**, А. В. Наумов, В. В. Старцев, М. А. Демьяненко

*Продолжается обсуждение вопросов, связанных с развитием детекторов излучения терагерцового диапазона. Рассматриваются методы повышения коэффициента поглощения терагерцового излучения, применяемые при разработке и создании матричных неохлаждаемых микроболометрических приемников ТГц-излучения. Практически полное поглощение ТГц-излучения достигается при использовании: 1) антенн, нагруженных на резистивную нагрузку, 2) тонких металлических поглотителей, 3) метаматериалов или частотно-селективных поверхностей, 4) золотой черни и 5) углеродных материалов, в первую очередь, вертикально ориентированных углеродных нанотрубок. В случае антенн и тонких металлических поглотителей, при помощи толстого слоя диэлектрика дополнительно повышается эффективная толщина зазора между отражателем и мембраной болометра, и применяются дополнительные резонаторы, образованные зазором между болометром и входным окном. Для повышения ширины полосы чувствительности применяют болометры инвертированного типа с поглотителями на основе тонких металлических поглотителей.*

*Ключевые слова:* терагерцовое излучение, детектирование, неохлаждаемые матричные болометрические приемники.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-203-209

**Кульчицкий Николай Александрович**<sup>1,2</sup>, зам. начальника управления, д.т.н.

**Наумов Аркадий Валерьевич**<sup>3</sup>, руководитель направления.

E-mail: naumov\_arkadii@mail.ru

**Старцев Вадим Валерьевич**<sup>3</sup>, главный конструктор.

**Демьяненко Михаил Алексеевич**<sup>4</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

<sup>3</sup> Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон».

Россия, 140080, Московская область, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1.

E-mail: info@astrohn.ru

<sup>4</sup> Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 01 марта 2022 г.

© Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В., Демьяненко М. А., 2022

## ЛИТЕРАТУРА

1. Terahertz Spectroscopy: principles and applications / Edited by S. L. Dexheimer. Publisher: CRC Press, 2008.
2. Chan W. L., Deibel J., Mittleman D. M. // Rep. Prog. Phys. 2007. Vol. 70. № 8. P. 1325.
3. Mittleman D. M. // Opt. Express. 2018. Vol. 26(8). P. 9417. Doi:10.1364/OE.26.009417
4. Jepsen P. U., Cooke D. G., Koch M. // Laser Photonics Rev. 2011. Vol. 5. P. 124.
5. Hartwick T. S., Hodges D. T., Barker D. H., Foote F. B. // Appl. Opt. 1976. Vol. 15. P. 1919.
6. Hu B. B., Nuss M. C. // Opt. Lett. 1995. Vol. 20. P. 1716.
7. Oda N. // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9836. P. 98362.
8. Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H., Davies A. G., Hoffmann M. C., Booske J., Paoloni C. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol. 50. P. 043001. Doi:10.1088/1361-6463/50/4/043001
9. Oda N. // Comptes Rendus Phys. Elsevier Masson SAS. 2010. Vol. 11. № 7–8. P. 496. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2010.05.001>
10. Simoens F., Meilhan J. // Philos. Trans. R. Soc. A

Math. Phys. Eng. Sci. 2014. Vol. 372. № 2012. P. 20130111.

11. *Simoens F., Meilhan J., Nicolas J.-A.* // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2015. Vol. 36. № 10. P. 961.

12. *Nemoto N. et al.* // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. IEEE. 2016. Vol. 6. № 2. P. 175.

13. *Oda N., Kurashina Seiji, Miyoshi Masaru, Doi Kohei, Ishi Tsutomu, Sudou Takayuki, Morimoto Takao, Goto Hideki, Sasaki Tokuhito* // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2015. Vol. 36. № 10. P. 947.

14. *Oulachgar H., Paultre J.-E., Provençal F., D'Amato D., Beaupré P., Alain C., Jerominek H.* // Proc. of 39th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2014.

15. *Proulx C., Williamson F., Allard M., Baldenberger G., Gay D., Garcia-Blanco S., Côté P., Martin L., Larouche C., Ilias S., Pope T., Caldwell M., Ward K., Delderfield J.* // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7453. P. 74530. Doi: 10.1117/12.829935.

16. *Yung C. S., Tomlin N. A., Straatsma C., Rutkowski J., Richard E. C., Harber D. M., Lehman J. H., Stephens M. S.* // Proc. of SPIE. 2019. Vol. 10980. P. 109800F.

17. *Tomlin N. A., Yung C. S., Castleman Z., Denoual M., Drake G., Farber N., Harber D., Heuerman K., Kopp G., Passe H., Richard E., Rutkowski J., Sprunck J., Stephens M., Straatsma C., Van Dreser S., Vayshenker I., White M. G., Woods S. I., Zheng W., Lehman J. H.* // AIP Adv. AIP Publishing, LLC. 2020. Vol. 10. № 5. P. 055010.

18. *Lee A. W. M., Hu Q.* // Opt. Lett. 2005. Vol. 30. № 19. P. 2563.

19. *Lee A. W. M., Williams B. S., Kumar S., Hu Q., Reno J. L.* // IEEE Photonics Technology Letters. 2006. Vol. 18. № 13. P. 1415.

20. *Oda N., Yoneyama H., Sasaki T., Sano M., Kurashina S., Hosako I., Sekine N., Sudou T., Irie T.* // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69402Y.

21. *Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A.* // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. P. 131116. Doi: 10.1063/1.2898138

22. *Sizov F. F., Reva V. P., Golenkov A. G., Zbudsky V. V.* // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2011. Vol. 32. P. 1192.

23. *Rogalsky A.* Infrared and Terahertz Detectors (Third Edition) / CRC Press of Taylor & Francis Group, 2019.

24. *Алиев В. Ш., Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Фомин Б. И.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 471.

25. *Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н., Фо-*

*мин Б. И., Асеев А. Л., Князев Б. А., Кулипанов Б. А., Винокуров Н. А.* // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 5.

26. *Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н., Фомин Б. И., Марчишин И. В., Алиев В. Ш., Князев Б. А., Герасимов В. В., Кулипанов Г. Н., Винокуров Н. А., Литвинцев В. И.* // Журнал «Вестник НГУ». Сер. «Физика». 2010. Т. 5. № 4. С. 73.

27. *Knyazev B. A., Cherkassky V. S., Choporova Y. Y., Gerasimov V. V., Vlasenko M. G., Dem'yanenko M. A., Esaev D. G.* // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2011. V. 32. № 10. P. 1207.

Doi: 10.1007/s10762-011-9773-x

28. *Oda N., Sano M., Sonoda K., Yoneyama H., Kurashina S., Miyoshi M., Sasaki T., Hosako I., Sekine N., Sudou T., Ohkubo S.* // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 80121B.

29. *Демьяненко М. А.* // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 1. С. 121.

30. *Dem'yanenko M. A., Marchishin I. V., Startsev V. V.* // OSA CONTINUUM. 2019. Vol. 2. № 6. P. 2085.

31. *Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В., Демьяненко М. А.* // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 68. Doi: 10.51368/2307-4469-2021-9-1-68-82

32. *Oulachgar H., Mauskopf P., Bolduc M., Ilias S., Paultre J.-E., D'Amato D., Terroux M., Pope T., Alain C., Topart P., Jerominek H.* // Proc. of 38th conference of IRMMW-THz, (Mainz-Germany, 2013).

33. *Oulachgar H., Marchese L. E., Terroux M., Ilias S., Paultre J.-E., D'Amato D., Tremblay B., Beaupré Patrick, Provençal Francis, Alain C., Topart P., Généreux F., Jerominek H., Bergeron A.* / META'15 (New York – USA. 2015).

34. *Costa F., Monorchio A., Manara G.* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. Vol. 58. № 5. P. 1551.

35. *Panjwani D. R.* Characterization of gold black and its application in un-cooled infrared detectors: Ph.D. dissertation. University of Central Florida, 2015. – 143 p.

36. *Terroux M., Talbot P., Généreux F., Marchese L., Oulachgar E.-H., Bergeron A.* // Proc. of SPIE. 2021. Vol. 11745. P. 117450L.

<https://doi.org/10.1117/12.2586094>

37. *Okamoto A., Gunjishima I., Inoue T., Akoshima M., Miyagawa H., Nakano T., Baba T., Tanemura M., Oomi G.* // Carbon N. Y. 2011. Vol. 49. № 1. P. 294.

38. *Xiao D., Zhu M., Sun L., Zhao C., Wang Y., Teo E. H. T., Hu F., Tu L.* // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2019. Vol. 11. P. 43671.

## Uncooled matrix terahertz microbolometric detectors

**N. A. Kulchitsky**<sup>1,2</sup>, **A. V. Naumov**<sup>3</sup>, **V. V. Startsev**<sup>3</sup>, and **M. A. Dem'yanenko**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)  
78 Vernardsky Ave., Moscow, 119454, Russia

<sup>3</sup> Experimental Design Bureau “ASTROHN”, JSC  
1 Park st., Lytkarino, Moscow region, 140080, Russia  
E-mail: naumov\_arkadii@mail.ru

<sup>4</sup> Rzanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS  
13 Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received, March 01, 2022

*The paper continues the discussion of issues related to the development of detectors of radiation in the terahertz range. Methods for increasing the absorption coefficient of terahertz radiation, which are used in the development and creation of matrix uncooled microbolometric receivers of THz radiation, are considered. Almost complete absorption of THz radiation is achieved using: 1) antennas loaded with a resistive load, 2) thin metal absorbers, 3) metamaterials or frequency-selective surfaces, 4) gold black and 5) carbon materials, primarily vertically oriented carbon nanotubes. In the case of antennas and thin metal absorbers, a thick dielectric layer additionally increases the effective thickness of the gap between the reflector and the bolometer membrane, and additional resonators are used, formed by the gap between the bolometer and the entrance window. To increase the sensitivity bandwidth, inverted bolometers with absorbers based on thin metal absorbers are used.*

**Keywords:** terahertz radiation, detection, uncooled array bolometric detectors.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2022-10-2-203-215

### REFERENCES

1. *Terahertz Spectroscopy: principles and applications* (Edited by S. L. Dexheimer. Publisher: CRC Press, 331, 2008).
2. W. L. Chan, J. Deibel, and D. M. Mittleman, *Rep. Prog. Phys.* **70** (8), 1325 (2007).
3. D. M. Mittleman, *Opt. Express* **26** (8), 9417 (2018). Doi:10.1364/OE.26.009417
4. P. U. Jepsen, D. G. Cooke, and M. Koch, *Laser Photonics Rev.* **5**, 124 (2011).
5. T. S. Hartwick, D. T. Hodges, D. H. Barker, and F. B. Foote, *Appl. Opt.* **15**, 1919 (1976).
6. B. B. Hu, and M. C. Nuss, *Opt. Lett.* **20**, 1716 (1995).
7. N. Oda, *Proc. SPIE* **9836**, 98362P (2016).
8. S. S. Dhillon, M. S. Vitiello, E. H. Linfield, A. G. Davies, M. C. Hoffmann, J. Booske, C. Paoloni et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 043001 (2017). Doi:10.1088/1361-6463/50/4/043001
9. N. Oda, *Comptes Rendus Phys. Elsevier Masson SAS*, **11** (7–8), 496 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2010.05.001>
10. F. Simoens and J. Meilhan, *Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **372** (2012), 20130111 (2014).
11. F. Simoens, J. Meilhan, and J.-A. Nicolas, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **36** (10), 961 (2015).
12. N. Nemoto, et al., *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. IEEE* **6** (2), 175 (2016).
13. N. Oda, Seiji Kurashina, Masaru Miyoshi, Kohei Doi, Tsutomu Ishi, Takayuki Sudou, Takao Morimoto, Hideki Goto, and Tokuhito Sasaki, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **36** (10), 947 (2015).

14. H. Oulachgar, J.-E. Paultre, F. Provençal, D. D'Amato, P. Beaupré, C. Alain, and H. Jerominek, in *Proc. of 39th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz* (2014).
15. C. Proulx, F. Williamson, M. Allard, G. Baldenberger, D. Gay, S. Garcia-Blanco, P. Côté, L. Martin, C. Larouche, S. Ilias, T. Pope, M. Caldwell, K. Ward, and J. Delderfield, *Proc. of SPIE* **7453**, 74530S (2009).  
Doi: 10.1117/12.829935
16. C. S. Yung, N. A. Tomlin, C. Straatsma, J. Rutkowski, E. C. Richard, D. M. Harber, J. H. Lehman, M. S. Stephens, *Proc. of SPIE* **10980**, 109800F (2019).
17. N. A. Tomlin, C. S. Yung, Z. Castleman, M. Denoual, G. Drake, N. Farber, D. Harber, K. Heuerman, G. Kopp, H. Passe, E. Richard, J. Rutkowski, J. Sprunck, M. Stephens, C. Straatsma, S. Van Dreser, I. Vayshenker, M. G. White, S. I. Woods, W. Zheng, J. H. Lehman, *AIP Adv. AIP Publishing, LLC* **10** (5), 055010 (2020).
18. A. W. M. Lee. and Q. Hu, *Opt. Lett.* **30** (19), 2563 (2005).
19. A. W. M. Lee, B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno, *IEEE Photonics Technology Letters* **18** (13), 1415 (2006).
20. N. Oda, H. Yoneyama, T. Sasaki, M. Sano, S. Kurashina, I. Hosako, N. Sekine, T. Sudoh, and T. Irie, *Proc. SPIE* **6940**, 69402Y (2008).
21. M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, B. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, and N. A. Vinokurov, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 131116 (2008). doi: 10.1063/1.2898138
22. F. F. Sizov, V. P. Reva, A. G. Golenkov, and V. V. Zabudsky, *J Infrared Milli Terahz Waves* **32**, 1192 (2011).
23. A. Rogalsky, *Infrared and Terahertz Detectors (Third Edition)*, (CRC Press of Taylor & Francis Group, 2019).
24. V. Sh. Aliev, M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, I. V. Marchishin, V. N. Ovsyuk, and B. I. Fomin, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (4), 471 (2013).
25. M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, V. N. Ovsyuk, B. I. Fomin, A. L. Aseev, B. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, and N. A. Vinokurov, *Opticheskij zhurnal* **76** (12), 5 (2009).
26. M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, V. N. Ovsyuk, B. I. Fomin, I. V. Marchishin, V. Sh. Aliev, B. A. Knyazev, V. V. Gerasimov, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov, and V. I. Litvincev, *Zhurnal Vestnik NGU, seriya Fizika* **5** (4), 73 (2010).
27. B. A. Knyazev, V. S. Cherkassky, Y. Y. Choporova, V. V. Gerasimov, M. G. Vlasenko, M. A. Dem'yanenko, and D. G. Esaev, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **32** (10), 1207 (2011).  
Doi: 10.1007/s10762-011-9773-x
28. N. Oda, M. Sano, K. Sonoda, H. Yoneyama, S. Kurashina, M. Miyoshi, T. Sasaki, I. Hosako, N. Sekine, T. Sudou, and S. Ohkubo, *Proc. SPIE* **8012**, 80121B (2011).
29. M. A. Dem'yanenko, *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* **88** (1), 121 (2018).
30. M. A. Dem'yanenko, I. V. Marchishin, and V. V. Star-tsev, *OSA CONTINUUM* **2** (6), 2085 (2019).
31. N. A. Kul'chickij, A. V. Naumov, V. V. Starcev, and M. A. Dem'yanenko, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (1), 68 (2021).  
Doi: 10.51368/2307-4469-2021-9-1-68-82
32. H. Oulachgar, P. Mausekopf, M. Bolduc, S. Ilias, J.-E. Paultre, D. D'Amato, M. Terroux, T. Pope, C. Alain, P. Topart, and H. Jerominek, in *Proc. of 38th conference of IRMMW-THz*, (Mainz-Germany, 2013).
33. H. Oulachgar, L. E. Marchese, M. Terroux, S. Ilias, J.-E. Paultre, D. D'Amato, B. Tremblay, Patrick Beaupré Francis Provençal, C. Alain, P. Topart, F. Génereux, H. Jerominek, and A. Bergeron, in *Proc. of the 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics. META'15* (New York – USA, 2015).
34. F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **58** (5), 1551 (2010).
35. D. R. Panjwani, *Characterization of gold black and its application in un-cooled infrared detectors*: (Ph.D. dissertation. University of Central Florida, 2015).
36. M. Terroux, P. Talbot, F. Génereux, L. Marchese, E.-H. Oulachgar, and A. Bergeron, *Proc. of SPIE* **11745**, 117450L (2021). <https://doi.org/10.1117/12.2586094>
37. A. Okamoto, I. Gunjishima, T. Inoue, M. Akoshima, H. Miyagawa, T. Nakano, T. Baba, M. Tanemura, and G. Oomi, *Carbon N. Y.* **49** (1), 294 (2011).
38. D. Xiao, M. Zhu, L. Sun, C. Zhao, Y. Wang, E. H. T. Teo, F. Hu, and L. Tu, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11**, 43671 (2019).