

# Эффективность технологий антенных модулей терагерцового диапазона

А. Г. Черевко, Ю. В. Моргачев, Е. М. Ильин, А. И. Полубехин

Рассмотрены перспективы технологий антенных модулей (АМ) в соответствии с критерием Джонсона. Представлен результат моделирования терагерцовой антенны в программе CST MWS, оптимальной с точки зрения авторов. Проведено сравнение параметров модели с экспериментом.

*Ключевые слова:* антенны, терагерцы (ТГц), моделирование, антенные массивы, технологии изготовления.

## 1. Введение

Терагерцовый (ТГц) частотный спектр может быть определен как часть субмиллиметрового электромагнитного (ЭМ) спектра между 1 мм и 100 мкм (300 ГГц – 3 ТГц). Этот диапазон лежит между диапазонами с хорошо развитой технологией – миллиметровым и инфракрасным. Поэтому области применения ТГц-излучения интенсивно исследуются. В настоящее время ТГц-излучение находит применение в системах безопасности для сканирования багажа и людей. В отличие от рентгеновского ТГц-излучение не наносит вреда организму [1]. В медицинскую практику начинают внедряться ТГц-томографы [2]; методы, использующие ТГц-излучение, разрабатываются для искусствоведения [3], для таможенного контроля продукции в пластмассовой упаковке. Исследуются возможности применения камер ТГц-диапазона в устройствах для круиз-контроля и помощи водителю в вождении автомобиля [4], а также для бескабельной связи между отдельными блоками устройств [5]. Существенная часть излучения астрофизических объектов лежит в ТГц-диапазоне, поэтому исследования в этой области спектра очень важны для астрофизики. В чилийских Андах на высоте 5100 м работает первый в мире телескоп, принимающий излучение от Солнца и других космических светил в диапазоне 0.2–1.5 мм [6]. Рассматривается возможность разработки высокоскоростных ТГц-систем связи [7] и ТГц-локации для больших высот и космоса.

Одним из основных элементов разрабатываемых ТГц-систем являются антенные модули. Учитывая интенсивное развитие технологий для ТГц-диапазона, целесообразно на основе критериев Джонсона и многокомпонентности провести анализ перспективности соответствующих технологий и их пригодности для создания антенных решеток, ФАР и АФАР.

Для работы в ТГц-диапазоне наибольший интерес представляет создание СВЧ-приборов, имеющих высокие предельные частоты и высокое напряжение лавинного пробоя –  $(F_0 \cdot V_m)$  [12, 13], т.е. приборов с высоким критерием качества Джонсона (JFOM), рис. 1, что позволяет получить большую выходную мощность в ТГц-диапазоне, которая падает с частотой. Кроме того, важным является критерий многоэлементности, что позволит создавать ФАР и АФАР с требуемыми параметрами.

Машинное моделирование позволяет снизить затраты на создание антенных систем. Эффективность такого моделирования определяется выбором оптимальной программы моделирования, а ее эффективность – сравнением с экспериментом. Как правило, для модели-

рования антенн и антенных модулей используются следующие пакеты программ: CST MWS, HFSS и FEKO. Их сравнительный анализ приведён в [8]. В ТГц-области погрешность результатов моделирования таких параметров, как КНД, КСВН, S11 оценивается в 2–3 дБ.

## 2. Моделирование антенн

На рис. 1 представлены значения критерия качества для различных технологий создания твердотельных фотоприемников и антенных решеток. В ряде случаев антенные модули, т.е. фотоприемники и антенные решетки, могут создаваться в едином технологическом цикле.

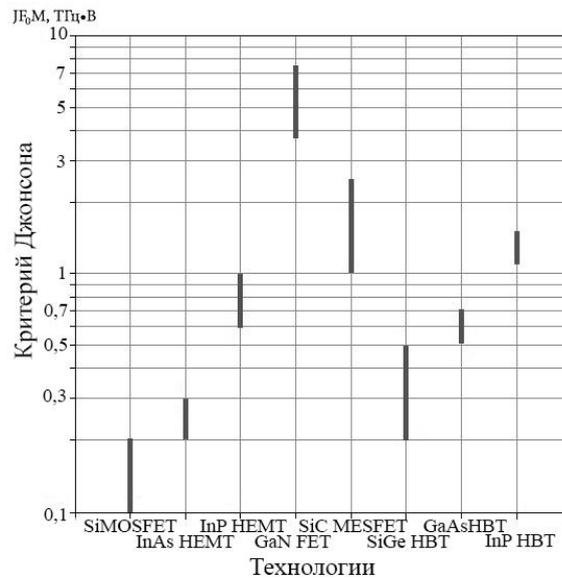


Рис. 1. Критерий Джонсона для различных технологий создания АМ

Рис. 2 иллюстрирует возможности различных технологий для создания многоэлементных антенных решеток и антенных модулей с такими решетками. Из рисунка видно, что число элементов в антенной решетке может быть порядка ста тысяч.

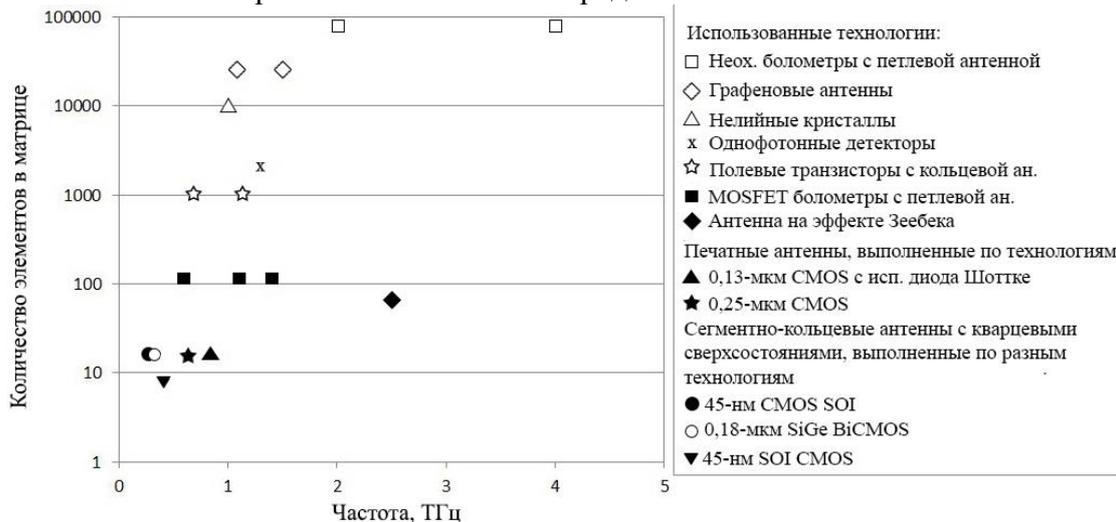


Рис. 2. Технологии создания твердотельных антенных решеток

В табл. 1 систематизированы характеристики антенных модулей терагерцового диапазона с указанием основных параметров диаграммы направленности, чувствительности и уровня собственного шума. В табл. 2 систематизированы характеристики ТГц-антенных решеток различных типов.

Таблица 1. Антенные модули ТГц-диапазона

В табл. 1 использованы следующие аббревиатуры: **ДШ** – диод Шоттки, **К** – комнатная температура, **КНД** – коэффициент направленного действия, **МКИД** – микроволновый кинетический индуктивный диод, **NEP** - эквивалентная мощность шума.

Вид антенны	Рабочие частоты, ТГц	КНД, дБ	NEP, пВт / Гц <sup>0.5</sup>	Амплитуда боковых лепестков, дБ	Рабочая температура, К	Чувствительность, В/Вт	Тип приемника	Интегрирование линзы возможно: +	КПД антенны, %	К-т отражения, дБ	Литература
Спиральная	0.1–2.7				К			–			[19]
Плоская самокомплементарная квадратная спиральная	0.1–3	29	–57 дБм	–8 – –9	К		ДШ	+			[20]
Плоская логарифмическая спиральная	(1.6–5) (0.6–3)			–20	9		Охлаждаемый болометр	+			[1]
Петлевая широкодиапазонная антенна	0.1–1.2		26 * 10 <sup>-3</sup>		4		Охлаждаемый болометр	–	18		[21]
Логарифмическая периодическая плоская спиральная	1.5–5				9		Охлаждаемый болометр	+			[1]
Извилистая спиральная плоская	0.15–0.6	24–32	5–20	–13	К	300–1000	ДШ	+			[22]
Антенна-бабочка	0.128–2				К		Детектор - двойная квантовая яма	–			[19]
Антенна-бабочка	0.2–1		1		К		Термически изолированный болометр	–			[23]
Двойная дипольная	0.8–1.6		2·10 <sup>-2</sup>		4.2	4.4·10 <sup>4</sup>	Болометр на горячих электронах	–			[24]

Вид антенны	Рабочие частоты, ТГц	КН Д, дБ	NEP, $\frac{\text{пВт}}{\text{Гц}^{0,5}}$	Амплитуда боковых лепестков, дБ	Рабочая температура, К	Чувствительность, В/Вт	Тип приемника	Интегрирование линзы возможно: +	КПД антенны, %	К-т отражения, дБ	Литература
Двухщелевая антенна	2.2–2.5										[1]
Угловая кубическая	3				К			–			[25-30],
Интегрированная ТГц ТЕМ рупорная	0.1–1				К			–		–10	[31]
Кольцевая щелевая	0.375		100		К	$1.8 \cdot 10^3$	ДШ	+	12		[32, 33]
Кольцевая щелевая с кварцевыми сверхсостояниями(КСС) с металлическими вставками(МВ)	0.375		100		К	$1.9 \cdot 10^3$	ДШ	+	35		[32, 33]
Кольцевая щелевая с КСС и без МВ	0.375	4	100		К	$2 \cdot 10^3$	ДШ	+	57		[32, 33]
Линзовая антенна вытекающих волн	0.29–0.35			–10	< 1		Суперпроводящий детектор МКID	+		–7	[9]
Линзовая антенна вытекающих волн	0.64–0.71			–12	< 1		Суперпроводящий детектор МКID	+		–4	[9]
Линзовая антенна вытекающих волн	0.79–0.91			–14	< 1		Суперпроводящий детектор МКID	+		–2	[9]

Таблица 2. Антенные решетки ТГц-диапазона

В табл. 2 использованы следующие аббревиатуры: **АР** – антенная решетка, **ФАР** – фазированная АР, **АФАР** – активная фазированная АР; **ДШ** – диод Шоттки, **EIRP** – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность, **FET** – полевой транзистор, **HBD** – гетероструктурный обращенный диод; в колонке «Примечание»: **Э** – расположение антенных модулей эквидистантное, **НЭ** – неэквидистантное; **У** – в состав АМ входит усилитель; **Умн** – в состав АМ входит умножитель.

Тип антенны	Детектор в составе АМ	Рабочая частота, ТГц	Примечание	Управление лучом	Число элементов	Технология	$\frac{NEP, \text{ пВт}}{\Gamma_{\text{ц}}^{0,5}}$	Боковые лепестки, уровень дБ	Антенна антенного модуля	Линзы	EIRP, дБм	Чувствительность, В/Вт	Литература
Планарная АР		0.64	Э	–					Дипольная антенна	+			[34]
Планарная миниатюрная ФАР	Детектор с HBD структурой	0.8–1.2	НЭ	–	225		1	–25	Двойная щелевая	+		$16 \cdot 10^4$	[35]
Планарная ФАР			Э	+	786432					–			[36]
ФАР	ДШ или FET	0.28	Э, Умн, У	+	16	45 нм SOI CMOS		–15	Кольцевая	–	9.4		[37]
Масштабируемая ФАР	ДШ или FET	0.338	Э, Умн, У	+	16	65 нм CMOS			Дипольная антенна	–	17		[38]
АФАР	ДШ или FET	0.42	Э, Умн(x4), У	+	8	45-нм SOI CMOS		–5	Щелевая кольцевая с кварцевыми сверхсостояниями (КСС)	–	3		[32]
Низкошумящая АР для радиовидения	ДШ или FET	0.32	Э, Умн, У	–	16	0.18 мкм SiGe BiCMOS			Щелевая кольцевая с КСС	–		18000	[10]

Тип антенны	Детектор в составе АМ	Рабочая частота, ТГц	Примечание	Управление лучом	Число элементов	Технология	$\frac{NEP, \text{ пВт}}{\Gamma_{\text{ц}}^{0,5}}$	Боковые лепестки, уровень дБ	Антенна антенного модуля	Линзы	EIRP, дБм	Чувствительность, В/Вт	Литература
АР для радиовидения	ДШ или FET	0.300	Э, Умн, У	–	16	45 нм SOI CMOS			Щелевая кольцевая с КСС	–		20000	[33]
АР	ДШ или FET	0.650	Э, Умн, У	–	15	0.25 мкм CMOS			Кольцевая	–		80000	[39]
АР	Фотопроводящая антенна	0.4	Э	–	200				Фотопроводящая	+			[40-42]
АР	Болометры	0.5–1.5	Э	–	117	180 нм SOI CMOS			Четырехэлементная	–			[16]
АР	ДШ	0.86	Э	–	16	0.13 мкм CMOS	29		Микрополосковая	–			[43]
Камера, с кольцевыми антеннами	ДШ	0.7–1.1	Э	–	16				Кольцевая антенна	–			[44]
Камера, с кольцевыми антеннами	ДШ	0.7–1.1	Э	+	1024	65-нм CMOS	$12 \cdot 10^3$		Кольцевая антенна	+			[45]
Камера, болометрическая	Болометры	2–4	Э	–	76800	60 мкм CMOS	100		Индукцированная антенна	–			[46]
Графеновая АР		1.3	Э	–	25 000				Графеновая антенна	–			[47]

Как видно из таблиц, ТГц-антенные массивы могут содержать более 100000 элементов. Поэтому важность компьютерного моделирования таких антенн и антенных систем трудно переоценить. Анализ 12 программ показал, что оптимальной является программа CST MWS. С использованием этой программы нами смоделирована двухщелевая антенна с вытянутой полусферической линзой для работы на частоте 497 ГГц (рис. 3). Наши результаты приведены на рис. 4. Они не противоречат данным, полученным в работе [14], и удовлетворительно согласуются с экспериментальной диаграммой направленности такой антенны.

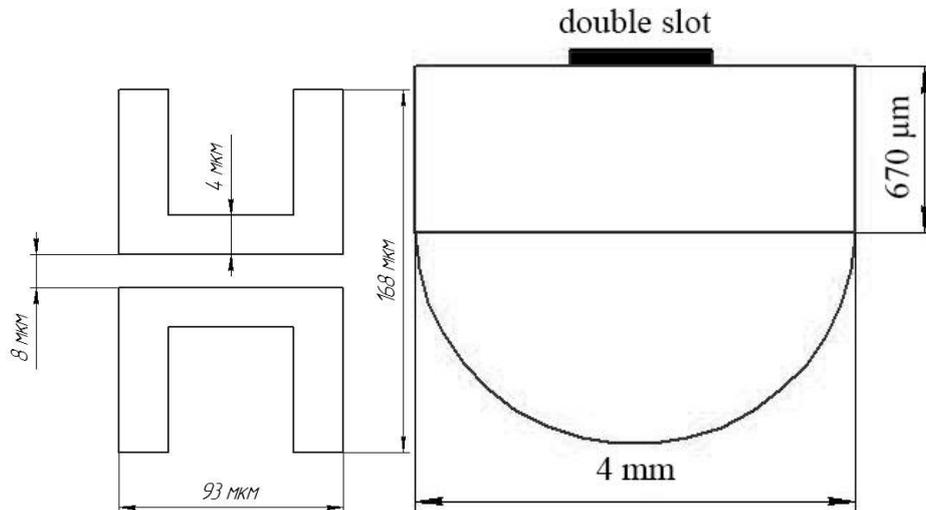


Рис. 3. Размеры проектируемой антенны

Были получены диаграммы направленности в плоскостях Е и Н, близкие к экспериментальным. Результат моделирования ДН представлен на рис. 4 и 5 соответственно.

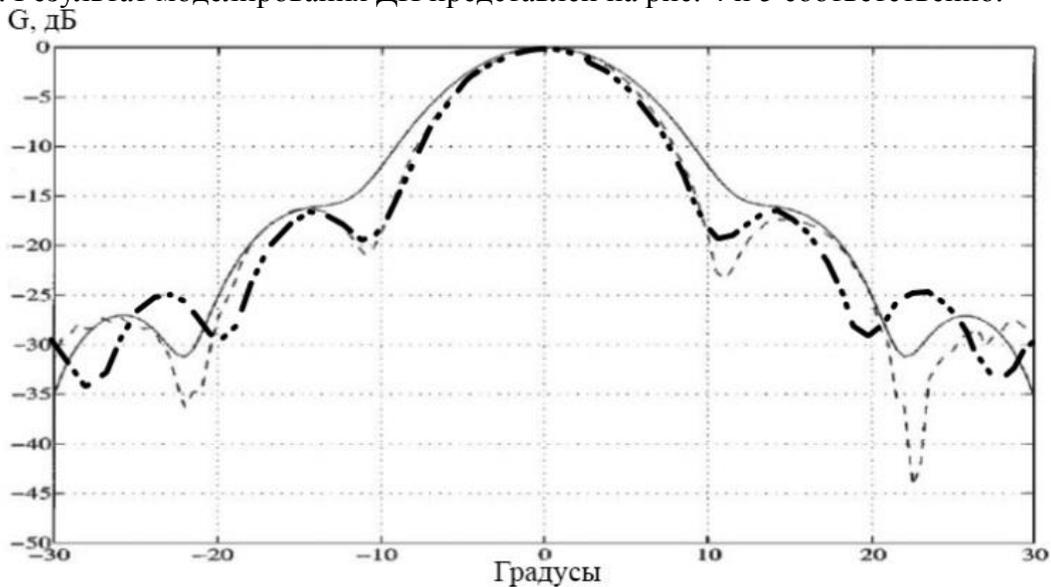


Рис. 4. Диаграммы направленности в плоскости Е:  
 рассчитанная в работе [14] (—), экспериментальная (---)  
 и результаты моделирования (-...-)

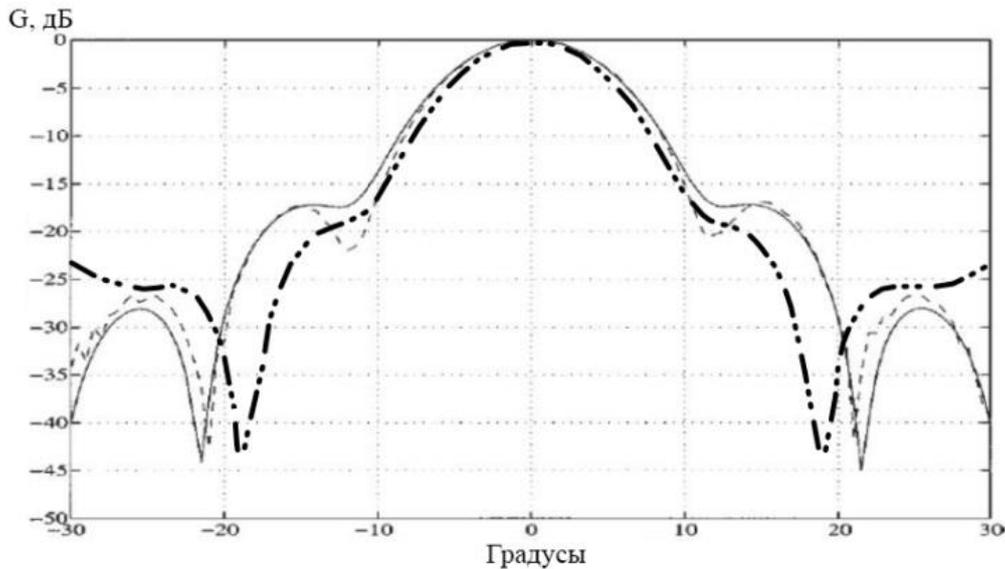


Рис. 5. Диаграммы направленности в плоскости Н: рассчитанная в работе [14] (—), экспериментальная (---) и результаты моделирования (-.-.-)

В области основного лепестка диаграммы направленности совпадение полученных авторами и экспериментальных данных наиболее хорошее. Полученные результаты подтверждают эффективность машинного моделирования терагерцовых антенн с использованием программы CST MWS.

### 3. Выводы

При создании антенных модулей используются различные современные полупроводниковые технологии, но согласно критерию качества Джонсона особый интерес представляют GaN FET, SiC MESFET и InP HBT технологии.

Весьма перспективными являются АМ на основе болометрических фотоприемников. Неохлаждаемые АМ такого типа могут содержать порядка 100 тысяч элементов с петлевыми антеннами. Наиболее предпочтительным и освоенным материалом для изготовления микроантенн является золото [11]. К перспективным материалам относятся наноматериалы, такие как графен и графеновые нанотрубки. На их базе уже создаются антенные решетки с удовлетворительными характеристиками [15].

Мощность, эквивалентная шуму (МЭШ), для неохлаждаемых приемников [16] может достигать значения  $10^{-12}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup>, что позволяет использовать такие приемники только в верхних слоях атмосферы (более 5 км) из-за высокого поглощения ТГц-излучения парами воды. Более низкошумящими являются охлаждаемые ТГц-приемники. Так приемники на базе микроболометров, работающих вблизи сверхпроводящего перехода в классических сверхпроводниках, могут обеспечить МЭШ порядка  $10^{-19}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup>. Однако это требует использования сверхнизких температур. Поэтому достаточно проблематичным является их использование в бортовой аппаратуре. Перспективными являются болометры, работающие вблизи перехода в высокотемпературных сверхпроводниках.

Как показывает анализ, технология создания терагерцовых антенных модулей развивается в основном за рубежом [17]. Однако в России разработана технология создания матричных фотонных приемников, работающих при 4.2 К на базе структур PbSnTe:In [18]. В инфракрасном диапазоне их МЭШ  $\sim 10^{-18}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup>. Проводимые исследования показывают, что близкие шумовые характеристики могут сохраниться и в ТГц-диапазоне. Такие приемники

могут стать основой антенных модулей ТГц-диапазона и использоваться как для бортовой локационной аппаратуры, так и для локационной аппаратуры космических аппаратов. Показана эффективность машинного моделирования антенн терагерцового диапазона.

## Литература

1. *Asncombe N. A.* No place to hide [millimeter wave imaging] // *IEEE Review*, 2005. P. 26–30.
2. *Wang S, X-C Zhang X-C.* Pulsed terahertz tomography // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37, 2004. P. 1–36.
3. Hidden Art Could be Revealed by New Terahertz Device Newswise, Retrieved on 21 September, 2008.
4. Smart Antennas Could Open Up New Spectrum For 5G By Theodore S. Rappaport, Wonil Roh & Kyungwhoon Cheun [Электронный ресурс]. URL: <http://spectrum.ieee.org/> (дата обращения: 12.02.2016).
5. THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor environments // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2008. V. 14. № 2.
6. *Jackson B. D., Korte P. A., Kuur J., et.al.* The SPICA-SAFARI Detector System: TES Detector Arrays with Frequency Division Multiplexed SQUID Readout // *IEEE Transactions on Terahertz Science And Technology*. 2012. V. 2. № 1. P. 1–4.
7. *Jacob P. M.* Performance analysis of future multi-gigabit wireless communication systems / M. Koch, J. Schoebel and T. Kürner // *IEEE Journal OF Selected Topics IN Quantum Electronics*. 2008. V. 14, № 2. P. 421–430.
8. *Vandenbosch G. E., Vasylychenko A.* Practical Guide to 3D Electromagnetic Software Tools // *Microstrip Antennas*. 2011. P. 507–539.
9. *Neto A., Llombart N., Baselmans J.A., Baryshev A., Yates S.J.* Demonstration of the leaky wave antenna at submillimeter wavelengths // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2014. V. 4, № 1. P. 26–32.
10. *Uzunkol M. A., Ozan D. G., Golcuk F., Rebeiz G. M.* 0.32 THz SiGe 4x4 Imaging Array Using High-Efficiency On-Chip Antennas // *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*. 2013. № 9. P. 2056–2066.
11. *Semenov A. D., Richter H., Hübers H.-W., Günther B., Smirnov A., Il'in K. S., Siegel M., Karatmarkovic J. P.* Terahertz Performance of Integrated Lens Antennas With a Hot-Electron Bolometer // *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*. 2007. № 2. P. 239–247.
12. *Johnson A.* Physical limitations on frequency and power parameters of transistors // *RCA Review*. 1965. V. 26. P. 163–177.
13. *Майская В.* Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон // *Электроника: НТБ*. 2011. № 8. С. 74–87.
14. *Maarten J. M., Peter J. I., Andrea N., Andrew L. R., Heeres R. M., Luinge W., Herben M. H.* Effect of Internal Reflections on the Radiation Properties and Input Impedance of Integrated Lens Antennas – Comparison Between Theory and Measurements // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001. V. 49. № 6. P. 1118–1125.
15. *Carrasco E.* Carrier Reflectarray Antenna at Terahertz Using Graphene / Eduardo Carrasco, Julien Perruisseau // *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*. 2013. № 02. P. 253–255.
16. *Morf T.* Wide bandwidth room-temperature THz imaging array based on antenna-coupled MOSFET bolometer // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. № 3. P. 1–7.
17. *Черевко А. Г. Ильин Е. М., Моргачев Ю. В., Полубехин А. И.* Анализ патентной активности в области перспективных локационных технологий терагерцового диапазона // *Вестник СибГУТИ*. 2015. № 2. С. 164–173.
18. *Неизвестный И. Г., Климов А. Г., Шумский В. Н.* Матричные фотонные приемники для дальней инфракрасной и субмиллиметровой области спектра // *УФН*. Т. 185. № 10. С. 1031–1042.

19. *Dwivedi V.* Review Of Antennas Designed For Infrared Detection A Brief Literature Study // IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings. 2005. P. 342–345.
20. *Brown E. R., Lee A. W., Navi B. S., Bjarnason J. E.* Characterization of a planar self-complementary squaerspiral antenna in the THz region // Microwave and optical technology letters. 2005. № 3. P. 524–529.
21. *Luukanen A., Gronberg L., Helisto P., Penttila J. S., Seppa H., Sipola H., Dietlein C. R., Grossman E. N.* An array of antenna-coupled superconducting microbolometers for passive indoors real-time THz imaging // 2013. DOI [10.1109/EMICC.2006.282743]
22. *Liu L., Hesler J. L., Xu H., Lichtenberger A. W., Weikle II R. M.* Broadband Quasi-Optical Terahertz Detector Utilizing a Zero Bias Schottky Diode // IEEE Microwave And Wireless Components Letters. 2010. № 9. P. 504–506.
23. *Peytavit E., Agnese P., Buffet O., Beguin A., Simoens F.* Room Temperature Terahertz Microbolometers // Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics. 2005. P. 257–258.
24. *Santavicca D. F., Reese M. O., True A. B., Schmuttenmaer C. A., Prober D. E.* Antenna-Coupled Niobium Bolometers for Terahertz Spectroscopy // IEEE Transactions On Applied Superconductivity. 2007. № 2. P. 412–415.
25. *Sauter E., Schultz G. V., Wohleben R.* Antenna Pattern of an Open Structure Mixer at a Submillimeter Wavelength and of Its Scaled Model // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1984. № 5. V. 4. P. 451–463.
26. *Zmuidzinas A., Betz A. L., Boreiko R. T.* Corner-Reflector Mixer for Far-Infrared Wavelengths. // Infrared Phys. 1989. № 29. P. 119–131.
27. *Roser H. P., Dunven E. J., Wattenbach R., Schultz G. V.* Investigation of a Heterodyne Receiver with Open Structure Mixer at 324 and 693 GHz. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1984. № 5 V. 3. P. 301–314.
28. *Kelly W. M., Gans M. J., Eivers J. G.* Modeling the Response of Quasi-Optical Comer Cube Mixers // Instrumentation for Submillimeter Spectroscopy. 1986. № 5. P. 72–78.
29. *Mukherjee P., Gupta B.* Terahertz (THz) Frequency Sources and Antennas – A Brief Review // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2008. P. 1091–1102.
30. *Fumeaux C., Boreman G. D., Herrmann W., Neubuhi F. K., Rothuizen H.* Spatial Impulse Response of Lithographic Infrared Antennas // Appl. Phys. Lett. 1999. № 38. P. 37–46.
31. Electromagnetic Analysis of Horn Antennas in the Terahertz region / Mairead Bevan, B.Sc. // Master of Science. 2013. 124 p.
32. *Golcuk F. A.* W-Band SiGe 4x4 Polarimetric Transmit-Receive Phased Array and CMOS THz Multiplier Arrays [Текст]: дис.доктора.тех.наук – Сан Диего, 2013. 117 p.
33. *Uzunkol M.* Low noise Millimeter-wave and THz Receivers, Imaging Arrays, Switches in Advanced CMOS and SiGe Processes [Текст]: дис.доктора.тех.наук – Сан Диего, 2013. 140 p.
34. Пат US 6,943,742 B2 Соединённые штаты Америки МПК H01Q 19/06 Focal Plane Array For Thz Imager And Associated Methods [Текст] / Sandor Holly; заявитель The Boeing Company; патентообладатель Чикаго. № US 6,943,742 B2 заявл. 16.02.04; опубл. 13.09.05. 9 с.
35. Пат US 20140191351A1 Соединённые штаты Америки МПК H01L 27/146 Focal Miniature Phase-Corrected Antennas For High Resolution Focal Plane Thz Imaging Arrays [Текст] / Kubilay Sertel и Gokhan Mumcu; заявитель Ohm State university патентообладатель Коламбус. № US 2014/0191351 A1 заявл. 13.03.14; опубл. 10.06.14. 22 с.
36. Пат US006815683B2 Соединённые штаты Америки МПК G01N 21/00 Terahertz Imaging System And Method [Текст] / John Federici, Robert Barat и Dale E. Gary; заявитель New Jersey Institute of Technology патентообладатель Неварк. № US 6,815,683 B2 заявл. 23.05.03; опубл. 9.11.04. 12 с.
37. *Sengupta K., Hajimiri A.* A 0.28 THz Power-Generation and Beam-Steering Array in CMOS Based on Distributed Active Radiators // IEEE Journal Of Solid-State Circuits. 2012. № 12. P. 3013–3030.

38. *Tousi Y., Afshari E.* A Scalable THz 2D Phased Array with +17dBm of EIRP at 338GHz in 65nm Bulk CMOS // *Millimeter-Wave And Terahertz Techniques*. 2014. № 14. P. 258–260.
39. *Öjefor E., Pfeiffer U. R., Lisauskas A.* A 0.65 THz Focal-Plane Array in a Quarter-Micron CMOS Process Technology // *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*. 2009. № 7. P. 1968–1976.
40. Пат. DE 102011015384 A1 Германия МПК H01Q21/0093 Photoconductive antenna array for receiving terahertz radiation in terahertz spectrometer for determining e.g. material thickness of objects, has dipoles whose signals are amplified such that signals form measure for course of radiation [Текст] / Rico Hohmuth, Dr. Richter Wolfgang заявитель Bator GmbH патентообладатель Германия. № 201110015384 заявл. 2011-03-29; опубл. 2012-10-04. 6 с.
41. Пат. CN 203277643 U Китай МПК H01Q21/0093 Array type photo-conductive antenna structure [Текст] / 施卫 吴宇杨汇鑫 侯磊 Заявитель; 西安理工大学东莞市五峰科技有限公司 патентообладатель Китай. № 203277643 заявл. 2013-04-10 опубл. 2013-11-06. 6 с.
42. Пат US20110080329 Соединённые штаты Америки МПК H01Q 13/10 THZ Antenna Array, System And Method For Producing a THZ Antenna Array [Текст] / Michael Nagel заявитель RWTH AACHEN UNIVERSITY патентообладатель Аахен, Германия. № 20110080329 заявл. 2007-03-29; опубл. 2010-12-28. 16 с.
43. *Han R.* 280GHz and 860GHz Image Sensors Using SchottkyBarrier Diodes in 0.13µm Digital CMOS // *International Solid-State Circuits Conference*. 2012. P. 254–256.
44. Nagatsuma H-J Handbook of Terahertz Technologies Devices And Applications / Ho-Jin Song Tadao Nagatsuma // Taylor & Francis Group. 2015. 584 p.
45. *Sherry H., Grzyb J., Zhao Y., Al Hadi R., Cathelin A., Kaiser A., Pfeiffer U.* A 1kPixel CMOS Camera Chip for 25fps Real-Time Terahertz Imaging Applications // *International Solid-State Circuits Conference*. 2012. P. 252–254.
46. *Simoens F.* Terahertz real-time imaging uncooled array based on antenna- and cavity-coupled bolometer // *Philosophical transactions of the royal society*. 2014. P. 5–17.
47. *Carrasco E., Perruisseau J.* Carrier Reflectarray Antenna at Terahertz Using Graphene // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2013. № 2. P. 253–255.

*Статья поступила в редакцию 10.07.2016;  
переработанный вариант — 30.10.2016*

**Черевко Александр Григорьевич**

к.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-39-20, e-mail: cherevko@mail.ru.

**Моргачев Юрий Вячеславович**

инженер лаборатории физических основ телекоммуникаций СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: morgachev.yury@gmail.com.

**Ильин Евгений Михайлович**

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: evgil45@mail.ru.

**Полубехин Александр Иванович**

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8-925-821-0631, e-mail: polub1980@mail.ru.

**Technology efficiency of terahertz antenna modules****Alexander G. Cherevko, Yury V. Morgachev, Evgeny M. Ilyin, Alexander I. Polubekhin**

Antenna modules technologies prospects in accordance with Johnson criterion are considered. The result of terahertz antenna simulation in CST MWS program considered optimal from the authors' point of view is presented. Model parameters and experimental data are compared.

*Keywords:* antenna, THz, simulation, antenna arrays, fabrication technique.