

**Глявин М.Ю.**  
Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук

## **Субтерагерцовая вакуумная электроника и ее приложения**

*Выполнен обзор современного состояния разработок электровакуумных приборов терагерцового диапазона и их перспективных приложений. Особое внимание уделяется гиротронам, для которых в ИПФ РАН получены рекордные (5 кВт на частоте 1 ТГц, 200 кВт на частоте 0.7 ТГц). Проанализированы основные тенденции дальнейшего развития и проблемы на этом пути. Сформулированы основные проблемы препятствующие повышению мощности, эффективности и частоты гиротронов и перспективные подходы к их решению. Проведен анализ физических процессов в терагерцовых гиротронах, отмечены особенности и преимущества той или иной конструкции приборов. Отмечены особенности некоторых оригинальных конструкций. Показано, что возможности дальнейшего развития гироприборов в терагерцовом диапазоне частот, как в непрерывном, так и в импульсном режиме далеко не исчерпаны.*

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, мощность, вакуумная электроника, гиротрон.

Терагерцовый (ТГц) диапазон, занимающий промежуточное положение между микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитных волн, оставался в течение долгого времени наименее освоенным и казался слишком коротковолновым для методов классической вакуумной электроники и слишком низкочастотным для методов квантовой электроники. Вместе с тем этот диапазон обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины [1,2]. Терагерцовое излучение уже находит применение в ЭПР и ЯМР спектроскопии, используются для диагностики плазмы и синтеза новых материалов, а также для создания «точечного» (характерный размер 0,5 мм) разряда в плазме. При использовании в качестве плазмообразующего газа ксенона, в разряде образуются многозарядные ионы, линейчатое излучение которых лежит в области мягкого рентгеновского излучения (13,5 нм), что позволяет рассчитывать на возможность источника рентгеновского излучения для проекционной литографии высокого разрешения. Круг потенциальных приложений, связанных с использованием ТГц излучения, не исчерпывается указанными областями и постоянно расширяется [3,4].

Согласно замыслу, доклад представляет обзор наиболее ярких результатов современной российской вакуумной электроники терагерцового диапазона в сравнении как с зарубежными результатами, так и другими источниками ТГц излучения (твердотельные приборы, лазеры, лазеры на свободных электронах). Особое внимание уделяется гироприборам [5], которые позволяют достигать на частоте 1 ТГц киловаттного

уровня мощности при длительности импульса в десятки микросекунд, оставаясь относительно компактными и дешевыми изделиями [6]. Следующий раздел доклада посвящен анализу перспективных приложений мощного ТГц излучения, поскольку именно они определяют не только развитие, но и само существование мощной вакуумной электроники терагерцового диапазона.

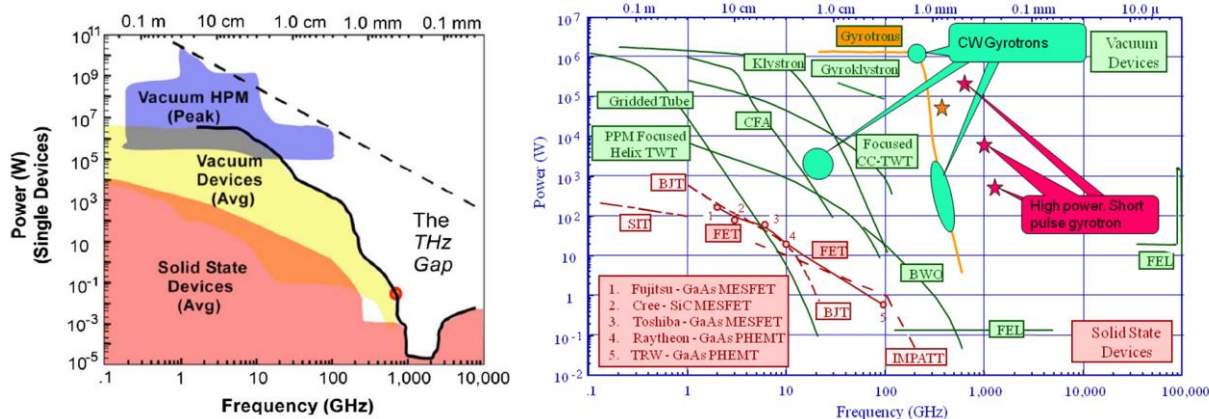


Рис.1. Уровни мощности, реализованные вакуумными и твердотельными источниками излучения в различных частотных диапазонах (левый рисунок заимствован из работы [7], правый рисунок представляет дополненную версию данных работы [8]).

Подводя итог можно отметить, что во многих научных центрах (США, Япония, Китай, Европейский союз, Россия) ведется активная разработка электрвакуумных источников ТГц излучения, а также поиск и освоение новых приложений для этих источников. Несмотря на объективные сложности, есть все основания рассчитывать на создание в ближайшем будущем относительно мощных, компактных и удобных в эксплуатации источников излучения в указанном частотном диапазоне.

Разработка ТГц гиротронов в ИПФ РАН с 2014 года ведется при поддержке РНФ рамках проектов № 14-12-00887, 14-29-00192.

#### Библиографический список

1. В. Л. Братман, А. Г. Литвак, Е. В. Суворов Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения УФН, 181 (2011), 86 867-874
2. R.A.Lewis A review of terahertz sources Journal of Physics D: Applied Physics, 47 (2014), 37, 374001.
3. Idehara T., Sabchevski S.P. Development and Applications of High—Frequency Gyrotrons in FIR FU Covering the sub-THz to THz Range. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 33 (2012), 7, 667-694.
4. V.L.Bratman, A.A.Bogdashov, G.G.Denisov, M.Yu.Glyavin, Yu.K.Kalynov, A.G.Luchinin, V.N.Manuilov, V.E.Zapevalov, N.A.Zavolsky, V.G.Zorin Gyrotron development for high power THz technologies in IAP RAS Int. J. IRMM&THz Waves, 33, 7, 715-723 (2012)
5. G.S. Nusinovich, M.K.A. Thumm, M.I. Petelin, The gyrotron at 50: historical overview. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 35 (2014), 325–381.
6. M.Yu.Glyavin, T.Idehara, S.P.Sabchevski Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and high–power THz technologies. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 5 (2015), 5, 788-797.
7. J.H. Booske, Plasma physics and related challenges of millimeter wave to terahertz and high power microwave generation, Phys. Plasm. 15 (1-16) (2008) 055502.
8. V.L. Granatstein, R.K. Parker, C.M. Armstrong, Vacuum electronics at the dawn of the twenty first century, Proc. IEEE 87 (1999) 702–716.