

12;15

Экспериментальное исследование электронных пушек для вакуумных усилителей терагерцового диапазона

© А.А. Бурцев, Ю.А. Григорьев, И.А. Навроцкий, В.И. Роговин,
Г.В. Сахаджи, К.В. Шумихин

Научно-производственное предприятие „Алмаз“, Саратов
E-mail:antbourtsev@gmail.com

Поступило в Редакцию 28 декабря 2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования электронных пушек с ленточным и многолучевым электронными пучками на основе мини-термокатоде для лампы бегущей волны терагерцового диапазона. Представлены результаты по исследованию импрегнированного термокатода лезвийной формы размером 0.1×0.7 мм, с плотностью тока 114 A/cm^2 в импульсном режиме. Предложен вариант пятилучевой электронной пушки с цилиндрическими мини-катодами диаметром 0.25 мм в ячейках управляющей сетки с плотностью тока 85.5 A/cm^2 при потенциале сетки 900–1000 В.

В настоящее время освоение терагерцового диапазона от 200 GHz и выше связано с практическим использованием вакуумно-твердотельных усилителей в различной аппаратуре для развития следующих научных направлений: молекулярной спектроскопии, радиолокации, радиоастрономии и др. Одним из наиболее приоритетных подходов к решению данной задачи является создание миниатюрных аналогов приборов вакуумной СВЧ-электроники О-типа. В таких прототипах приборов, как лампа бегущей волны О-типа и клистроны терагерцового диапазона, из-за роста ВЧ-потерь и трудностей прохождения электронных пучков в микроразмерных пролетных каналах существенно падает эффективность взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной (электронный КПД меньше 0.5%) [1,2]. Следствием уменьшения диаметра пролетного канала является повышение требования к величине токопрохождения высокоплотного (более 100 A/cm^2) электронного пучка. Планарная геометрия представленных в работах [2,3] замедляющих структур предполагает использование ленточных и многолучевых электронных пучков, обладающих высоким показателем токопрохождения

при относительно высоких значениях мощности выходного сигнала. Как правило, в таких системах первичный электронный поток становится меньше, чем $10^{-7} \text{ A/V}^{3/2}$, вследствие высокого ускоряющего напряжения при относительно малом значении тока пучка. Из этого следует, что при фокусировке пучка увеличивается влияние начальных тепловых скоростей электронов при малом действии пространственного заряда. Существует ряд работ по численному моделированию и экспериментальным исследованиям электронной оптики терагерцовых приборов [4–6]. Так, авторами в работе [4] была предложена и испытана электронная пушка со сходящимся высокоплотным электронным потоком на основе термоэмиссионного катода с плоской поверхностью. Компьютерное моделирование электронной пушки проводилось в программе CST. В рамках численного моделирования напряжение на аноде составило 10 kV, а диаметр термокатода 0.8 mm, температура на поверхности катода 1060°C. Плотность тока на катоде составила 10 A/cm², а в пролетном канале за счет компрессии плотность тока $\sim 526 \text{ A/cm}^2$. В публикации [5] представлены результаты компьютерного моделирования электронной пушки и электронно-оптической системы (ЭОС) с пролетным каналом длиной 50 mm и диаметром 0.5 mm. Формирование электронного пучка обеспечивалось нарастающим магнитным полем с максимальной величиной 0.56 T. Тем не менее практически для всех спроектированных прототипов прибора существует ряд недостатков, в основном связанных с несовершенством конструкции ЭОС. К примеру, в представленном авторами в работе [6] макете прибора, работающего в диапазоне 0.85 THz, при измерениях с коэффициентом заполнения импульса напряжения до 1% наблюдалось токооседание пучка на замедляющую структуру порядка 60% тока и дальнейшее падение тока пучка, что в результате приводило к снижению выходной мощности прибора.

Задача данной работы заключалась в экспериментальном исследовании ВАХ электронных пушек с ленточным и многолучевым электронными потоками на основе численных моделей. Известно, что формирование протяженных пучков с прямоугольным поперечным сечением сопровождается деформацией формы пучка в магнитном поле. В ходе моделирования ленточного электронного пучка, сформированного с помощью электронной пушки, для лампы бегущей волны, работающей в диапазоне 200 GHz, исследована возможность получения низкопервичного ленточного потока с незначительной

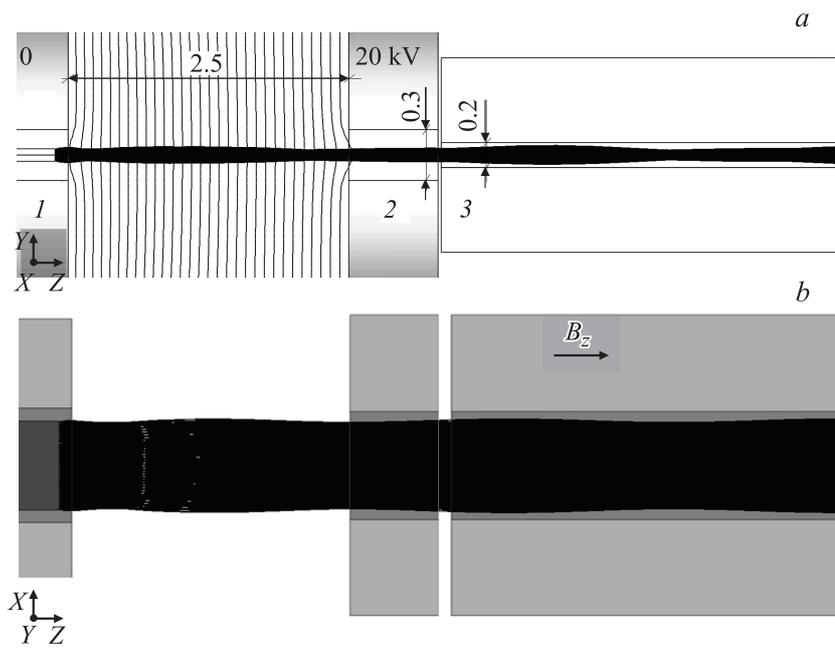


Рис. 1. Моделирование ЭОС с ленточным потоком ($B_z = 1.12$ Т): *a* — в плоскости YZ , *I* — катод и фокусирующий электрод, *2* — анод, *3* — пролетный канал; *b* — в плоскости XZ .

деформацией формы в поперечном сечении. Был проведен трехмерный анализ структуры электронного пучка, формируемого в ЭОС с катодом в однородном магнитном поле с током 100 мА, при площади катода $S_c = 0.07 \text{ mm}^2$. Положения электродов в электронной пушке были определены аналитически согласно работе [7]. Расстояние катод–анод $d_{c-a} = 2.5 \text{ mm}$, размер пролетного канала $0.2 \times 0.85 \text{ mm}$. Напряжение на аноде составляло 20 кВ. Величина магнитного поля выбиралась из численного эксперимента с учетом влияния начальных тепловых поперечных скоростей электронов и составила 1.12 Т при заполнении пролетного канала пучком 0.8 (толщина электронного пучка в пролетном канале составила 0.16 мм). На рис. 1 представлен результат моделирования ЭОС с ленточным электронным пучком с током 100 мА.

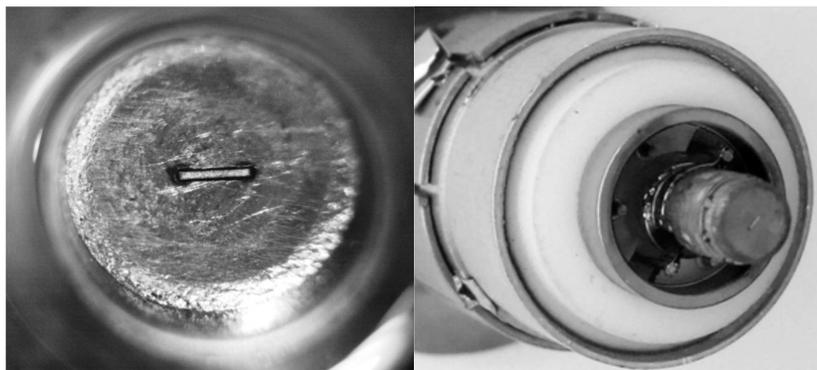


Рис. 2. Микрофотография лезвийного термокатода и макета электронной пушки (0.1×0.7 mm).

В качестве катода в данной работе используется прессованный импрегнированный катод (рис. 2) с рабочей температурой 1200°C . Катод и антиэмиссионная сетка изготавливались по технологии размерной электроэрозионной обработки. Для уменьшения работы выхода данного катода на его рабочую поверхность осаждается пленка Os. В результате экспериментальных измерений ВАХ диода получена в импульсном режиме, максимальная плотность тока 114 A/cm^2 (ток с поверхности катода 80 mA).

Также значительный интерес представляет применение наряду с ленточными электронными потоками конструкций электронных пушек с многолучевыми цилиндрическими, расположенными в ряд пучками. Такие системы позволяют сформировать электронные потоки в плоских каналах волноведущих систем лампы бегущей волны терагерцового диапазона. Одним из основных преимуществ таких ЭОС является меньшая деформация электронного пучка в магнитном поле. Кроме того, использование электронной пушки с нарастающим магнитным полем позволяет заметно снизить величину этого поля. Многолучевая электронная пушка является пушкой с пятью аксиально-симметричными парциальными электронными пучками, расположенными в ряд. Диаметр одного катода составляет 0.25 mm . Исходя из начальных данных анализа взаимодействия, ток одного пучка должен составлять 30 mA . Каждый из

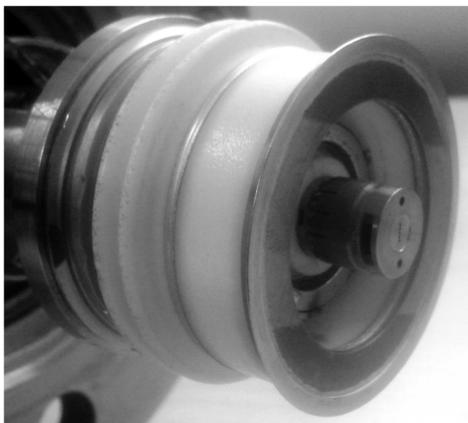
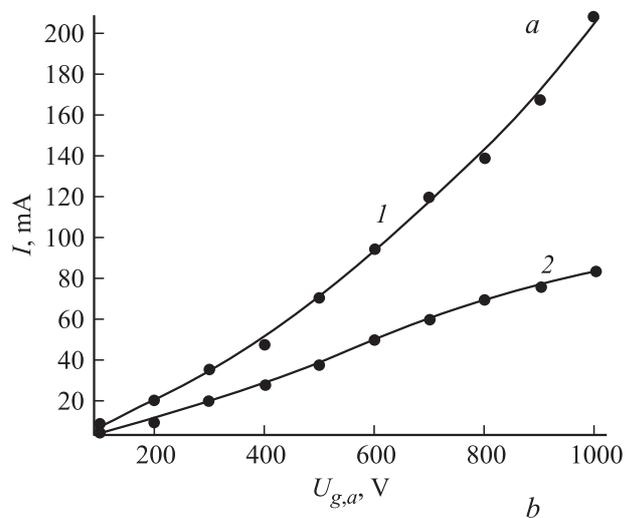


Рис. 3. *a* — ВАХ диодной пятилучевой электронной пушки: *1* — ток катода, *2* — ток сетки. *b* — фотография пятилучевой электронной пушки.

пучков пролетает в отдельный пролетный канал диаметром 0.25 mm. Электронный пучок имел в ходе траекторного анализа небольшую компрессию при умеренных поперечных скоростях. Такая компрессия возможна в пушке с плоским катодом за счет использования электростатической линзы, образованной теневого и управляющей сетками, выступающими над поверхностью катода на 0.05 и 0.6 mm соответственно. Необходимо отметить, что управляющая сетка имеет пять отверстий с диаметрами 0.3 mm. Анод также играет роль магнитного экрана магнитной системы. Предварительно ускоряющее напряжение на сетке составило 1500 V при токе пучка 30 mA, причем запирающее напряжение — 100 V. По результатам траекторного анализа заполнение электронного пучка в канале не превышало 0.7 при фокусировке магнитным полем 0.44 T.

В ходе экспериментальных исследований ВАХ пятилучевой электронной пушки в вакуумном макете использовался подвижный анод с малым отверстием $D = 0.05$ mm и измерительным коллектором для измерения структуры формируемого электронного потока. Первоначально в эксперименте управляющая сетка и анод были под одним потенциалом. Измерения проводились как и для макета с лезвийным катодом в импульсном режиме с длительностью импульса $\tau = 10 \mu\text{s}$ и периодом $T = 20$ ms; давление в макете составляло $3 \cdot 10^{-7}$ Torr. Потенциал сетки уточнен в ходе экспериментальных исследований электронной пушки, при этом ток 150 mA был получен при более низком потенциале (рис. 3, *a*). По результатам компьютерного моделирования и экспериментальных исследований была изготовлена электронная пушка, представленная на рис. 3, *b*.

Таким образом, для разработки ЭОС для терагерцовых вакуумных усилителей, работающих в диапазоне 200 GHz, проведены исследования ВАХ электронных пушек с ленточным и пятилучевым электронным пучком. Получены результаты по исследованию импрегнированного термокатода лезвийной формы с током 80 mA и пятилучевого термокатода с током 210 mA в импульсном режиме при ускоряющем напряжении 1000 V, при этом токопрохождение на коллектор составило 67%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе „УМНИК“ на 2015–2016 гг. (договор № 6196ГУ/2015, код 0010867).

Список литературы

- [1] *Devereux Palmer W.* // 13th IEEE International Vacuum Electronics Conference. IVEC 2012. USA, Monterey, 2012. P. 17–19.
- [2] *Shin Y.M., Barnett L.R., Luhmann N.C.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. V. 56. N 5. P. 706–712.
- [3] *Ruilin Zheng, Per Ohlckers, Xuyuan Chen* // IEEE Trans. Electron Devices. 2011. V. 58. N 7. P. 2164–2171.
- [4] *Anurag Srivastava, K. Santosh Kumar, Shivnath Kumar et al.* // 16th IEEE International Vacuum Electronics Conference. IVEC 2015. Beijing, China, April 27–29, 2015.
- [5] *Naidu V.B., Rao K.V., Datta S.K. et al.* // 16th IEEE International Vacuum Electronics Conference. IVEC 2015. Beijing, China, April 27–29, 2015.
- [6] *Jack C. Tucek, Mark A. Basten, David A. Gallagher et al.* // 15th IEEE International Vacuum Electronics Conference. IVEC 2014. Monterey, USA, April 22–24, 2014.
- [7] *Алямовский И.В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966. 453 с.