

Особенности разработки электронно-оптических систем для импульсных терагерцовых ламп бегущей волны (Обзор)

© А.А. Бурцев,^{1,2} Ю.А. Григорьев,¹ А.В. Данилушкин,^{1,2} И.А. Навроцкий,¹ А.А. Павлов,³ К.В. Шумихин¹

¹ Акционерное общество Научно-производственное предприятие „Алмаз“, 410033 Саратов, Россия

² Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410054 Саратов, Россия

³ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, 115487 Москва, Россия
e-mail: antbourtsew@gmail.com

(Поступило в Редакцию 11 мая 2017 г. В окончательной редакции 23 августа 2017 г.)

Представлен анализ современного состояния и разработки импульсных усилительных ламп бегущей волны терагерцового излучения, работающих в диапазоне частот от 200 GHz и выше, а также перспектив развития принципов создания электронно-оптических и магнитных систем. Обсуждена возможность применения автоэмиссионных катодов на основе углеродных нанотрубок для конструкции электронно-оптической системы с компрессией ленточного пучка. Представлено численное моделирование автоэмиссионной электронной пушки, формирующей ленточный электронный поток для ламп бегущей волны терагерцового диапазона.

DOI: 10.21883/JTF.2018.03.45608.2331

Современные СВЧ усилители, используемые для широкополосной и космической средств связи, разрабатываются с применением базовых технологий вакуумной электроники. В последние годы в области вакуумной СВЧ электроники особый интерес привлекает проблема освоения терагерцового диапазона, решение которой позволит создать усилители терагерцового диапазона, которые могут найти широкое применение в таких областях, как информационно-коммуникационные системы нового поколения, радиоастрономия дальних космических объектов, спектроскопия, диагностика плазмы, бесконтактный контроль качества производства. Этот диапазон является неосвоенной частью электромагнитного спектра, поскольку в этом диапазоне резко падает мощность как вакуумных, так и твердотельных источников. Наиболее высокие мощности потенциально способны обеспечить гироприборы, оротроны, лазеры на свободных электронах и другие приборы. Различными научными коллективами были предложены миниатюрные аналоги классических приборов ЛБВ, ЛОВ, отражательных клистронов. В начале 2000 гг. Агентство по перспективным оборонным исследовательским проектам Министерства обороны США (DARPA) провело открытый конкурс по стимулированию разработок ведущих американских фирм компактных вакуумных приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона с выходной мощностью порядка десятков ватт и более. Основное внимание тогда и сегодня уделяется созданию приборов на частоты 220, 460, 670, 850 и 1030 GHz. Компактные усилители средней мощности могут быть реализованы на основе миниатюризированных приборов вакуумной СВЧ электроники, таких как ЛБВ, клистрон бегущей волны. По оценкам отечественных и зарубежных исследователей, наиболее приемлемыми к приме-

нению в качестве замедляющих систем (ЗС) для ЛБВ терагерцового диапазона являются ЗС следующих типов: петляющий волновод, плоская гребенка, встречные штыри и меандр различной конфигурации. Во многих работах обсуждаются перспективы создания многосекционных ЛБВ терагерцового диапазона с ленточными или многолучевыми электронными потоками. Для реализации таких конструкций традиционные технологии, используемые для изготовления узлов приборов вакуумной СВЧ электроники сантиметрового и миллиметрового диапазонов, технологически трудно реализуемы вследствие роста высокочастотных потерь, трудностей прохождения электронных пучков через микроразмерные пролетные каналы ЗС и снижения эффективности взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем (КПД $\approx 1-2\%$). В научных подразделениях компаний Northrop Grumman, Teledyne Scientific, Teledyne MEC и Калифорнийского университета Дэвис ведутся разработки в рамках совместной программы по созданию ЛБВ усилителя на 220 GHz и более на термокатодах. Изготовление волноведущих и замедляющих систем выполняется на основе МЭМС технологий с уровнем допусков $3-5 \mu\text{m}$ и шероховатостью поверхности не более 30 nm. Также для этих же целей исследуются возможности применения 3D-печати. По утверждению разработчиков компаний Northrop Grumman, Teledyne, L-3 Communications and Power Industries, Beam-Wave Rescote и др. традиционная электроискровая технология изготовления миниатюрных узлов в диапазоне 220 GHz и выше непригодна, так как не может обеспечить уровень чистоты внутренней поверхности щелей, необходимой для сведения к минимуму омических потерь ЗС.

На проводимой ежегодно международной конференции IEEE по вакуумной электронике (IVEC) подробно

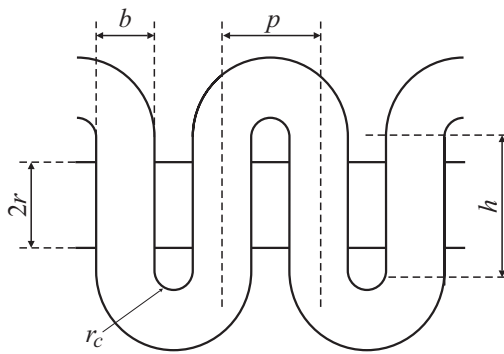


Рис. 1. Схема петляющего волновода. b — продольная толщина стенки, p — период структуры, r_c — внутренний радиус волновода, h — высота прямой части, r — радиус канала.

представлены результаты исследования и разработки в рамках программы HiFIVE макетов вакуумных и узлов СВЧ усилителей терагерцового диапазона ведущими зарубежными фирмами. В работе [1] представлена система типа петляющий волновод (рис. 1), спроектированной для работы в диапазоне 220 GHz компанией Northrop Grumman. Разработаны две основных технологии изготовления: LIGA и DRIE — технология глубокого реактивно-ионного травления. В работе ЗС изготавливается вместе с входным и выходным волноводами в одном монокристаллическом блоке металла. Это позволяет значительно упростить сборку приборов подобного типа и решает проблему теплоотвода от элементов ЗС. Указано, что технология ионного травления позволяет получать допуски изготовления до $\pm 0.5 \mu\text{m}$. Одной из первых экспериментальных работ в этом направлении является разработка вакуумного электронного генератора на 0.65 THz на основе петляющего волновода [2]. Электродинамическая часть в экспериментальных приборах была сделана с помощью глубокого реактивного травления материала ионным лучом (DRIE). Несколько генераторов были сделаны и работают на частотах между 0.605 и 0.675 THz. ВЧ мощность достигала 98 mW с максимумом 50 mW, измеренным за окном энергии. Эти измерения были выполнены в импульсном режиме с коэффициентом заполнения до 3%. Недавно компания продемонстрировала компактный электровакуумный усилитель с выходной мощностью свыше 50 mW в полосе 835–842 GHz и 39.4 mW на частоте 850 GHz [3]. Его коэффициент усиления в режиме малого сигнала составил 26 dB в рабочей полосе 11 GHz. К конструктивным особенностям усилителя относятся: ЗС с петляющим волноводом, термокатод с большой плотностью тока, фокусирующая магнитная система на основе соленоида и одноступенчатый коллектор. Для фокусировки пучка использовали магнитную систему из NdFeB, обеспечившую на участке длиной 2.5 см аксиальную магнитную индукцию 0.9 T. В эксперименте с коэффициентом заполнения импульса напряжения до 1% наблюдалось токооседание пучка на ЗС порядка 60%. Ток катода составил 2.81 mA при уско-

ряющем напряжении 11.45 kV. Необходимо отметить, что в экспериментах наблюдались небольшое падение тока пучка и снижение выходной мощности, когда коэффициент заполнения увеличился от 0.1 до 1%. Сделан вывод о том, что работа усилителя при более высоком коэффициенте заполнения требует еще более точной установки электронной пушки относительно пролетного канала. Следующая запланированная по программе DARPA фаза разработок этой компанией — это разработка усилителя на 0.67 THz с большей долговечностью, разработка усилителя на 1.03 THz на основе петляющего волновода, созданного по технологии DRIE.

Ориентируясь на разработку усилителей мощности mm-диапазона для новых систем связи и РЛС, исследовательская лаборатория NRL исследовала ЛБВ с ЗС на основе петляющего волновода. В настоящее время лаборатория разрабатывает методы изготовления замедляющей системы малых размеров, опираясь на многослойную технологию UV-LIGA для обработки меди. Так, в работе [4] по данной технологии разрабатывается усилитель бегущей волны на 231–233 GHz. Основные цели разработки: более 140 W выходной мощности, 15 GHz ширина полосы. Фокусировка пучка с током 124 mA осуществляется плоскопараллельным магнитным полем 0.66 T длиной 1.3 cm при ускоряющем напряжении 20 kV, причем диаметр пролетного канала составляет $200 \mu\text{m}$. Используется низкоперевансная электронная пушка с нарастающим магнитным полем и с компрессией электронного пучка. Отмечено, что смещение пролетного канала относительно центра поперечной плоскости ЗС является важным и существенно влияющим на параметр затухания S21.

Эффективность работы усилительной ЛБВ терагерцового диапазона связана с применением многосекционных ЗС, а также возможности рекуперации электронного пучка. Так, в работе [5] приведены результаты использования принципа многосекционной ЛБВ, где разработана трехсекционная ЗС типа „петляющий волновод“, в которой происходит последовательное усиление СВЧ сигнала, причем все секции расположены планарно. В каждой секции взаимодействие волны происходит с отдельным электронным потоком, т.е. система сопровождения электронного потока фактически формирует три пучка. При этом ток электронного пучка составляет 100 mA электронного потока при ускоряющем напряжении около 20 kV. Учитывая величину выходной мощности, можно заключить, что электронный КПД рассмотренного в работе прибора может составить примерно 5%. На конференции IVEC 2017 представлен первый, как утверждают авторы, экспериментальный образец усилителя в диапазоне 213–235 GHz на основе ЛБВ с двухсекционным петляющим волноводом [6]. Максимальная выходная мощность усилителя составила 176 W при коэффициенте заполнения 50% и длительности импульса $25 \mu\text{s}$. При использовании в конструкции многоступенчатого коллектора КПД лампы составил 11%. Область применения

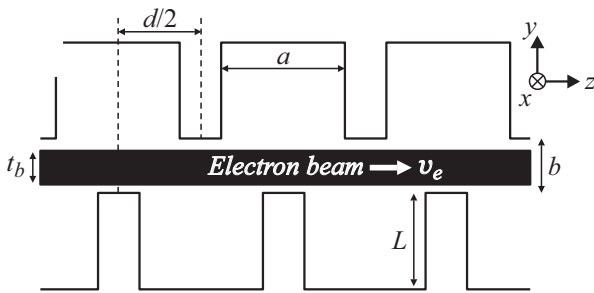


Рис. 2. Схема 3С типа сдвоенная гребенка. t_b — толщина ленточного пучка, L , $d/2$, a , b — геометрические параметры гребенки.

данного усилителя — предположительно новые системы радаров с высоким разрешением.

Для обеспечения эффективного взаимодействия протяженного ленточного электронного пучка с замедленной электромагнитной волной также рассматриваются приборы на основе 3С типа плоских гребенок. Хотя подобные 3С были разработаны достаточно давно, в связи с переходом в более коротковолновый диапазон интерес к ним вырос [7–11]. Также это обусловлено появлением новых технологий, позволяющих изготавливать системы с размерами, необходимыми для работы в указанных диапазонах частот и малыми разбросами, а также разработкой новых методов численного моделирования распространения электромагнитных волн и их взаимодействия с электронными потоками в 3С со сложной геометрией. В Калифорнийском университете разработки были направлены на создание ЛБВ-усилителя 220 GHz выходной мощностью более 50 W с коэффициентом усиления 30 dB. В [9] была предложена 3С в виде двойной гребенки с противофазным расположением штырей, приведенной на рис. 2. В электронно-оптической системе предлагается использовать ленточный пучок с током 250 mA с компрессией 7 при ускоряющем напряжении 20 kV. Последующие исследования [10–11] были направлены на отработку технологий изготовления функциональных узлов макетов прибора, холодных измерений параметров 3С, измерений в малосигнальном режиме, а также на экспериментальные исследования фокусировки и токопрохождения ленточных пучков в пролетном канале.

Основной проблемой при разработке вакуумных приборов терагерцового диапазона является необходимость использовать электронные пучки с высокой плотностью тока ввиду уменьшения поперечных размеров пролетных каналов в 3С. В большинстве случаев в пространстве взаимодействия требуется высокая плотность тока, достигающая значений 500 A/cm², что является трудно осуществимым для современных катодов. Поэтому привлекли внимание те конструкции, в которых используются компрессионные электронно-оптические системы (ЭОС) с ленточным или цилиндрическим пучком. Известно из [12], что плотность тока в электронном пучке

связана с частотой бегущей и стоячей волн выражением

$$P_{tw} = 24N(1/f)^{8/3}U_0^{13/6}j^{4/3}, \quad (1)$$

где P_{tw} — пиковая мощность, W , N — аспектное соотношение ленточного пучка или количество парциальных цилиндрических пучков, f — частота, GHz, U_0 — напряжение пучка, kV, j — плотность тока в A/cm². Это означает, что для получения умеренных значений выходной мощности прибора требуется создание ЭОС с магнитным сопровождением и с высокой плотностью тока в поперечном сечении пучка, достигающей значений более 100 A/cm². Естественно, что в (1) не учитываются сложности формирования и фокусировки протяженного пучка электронов с ростом его плотности тока при соответствующем уменьшении пролетного канала. За последние 10 лет появилось множество работ, посвященных разработкам и исследованию эффективных скандатных термокатодов с высокой плотностью тока. Можно выделить одну из таких разработок, опубликованную в ряде работ [13,14], представленных коллективом из Калифорнийского университета. Так, работе [13] исследуется катод из нанокompозита вольфрама с добавками Sc₂O₃ для 220 GHz ЛБВ. Электронная пушка рассчитана на плотность постоянного тока 10 A/cm² при температуре 1120°C с наработкой более 2000 h. Для другой пушки с уменьшенным зазором катод–фокусирующий электрод до 30 μm получена плотность постоянного тока 45 A/cm². Импульсный ток с плотностью от 56 A/cm² при 960°C и до 104 A/cm² при 1040°C получен на следующем макете пушки с зазором в 70 μm и напряжением 4 kV. Для долговременной работы терагерцового прибора также могут использоваться металлосплавные термокатоды из сплава Ir–Ce [15].

ЭОС с компрессией электронного потока и соответственно с магнито-экранированным катодом позволяют получить достаточно большие плотности тока в пучке при меньшей токовой нагрузке на катод и с меньшим значением рассчитанного магнитного поля. Для создания электронной пушки, формирующей сходящийся ленточный пучок, существует конструкция, включающая цилиндрический катод и две пары фокусирующих электродов [16]. Для придания пучку необходимого угла сходимости применяется пара основных фокусирующих электродов, а также боковые электроды, ограничивающих расширение пучка по ширине. Эти боковые электроды должны создавать вдоль несходящихся краев потока такое же распределение потенциала, что и основные электроды. Принцип компрессии эллиптического пучка и получение за анодным отверстием в кроссовере ленточного пучка применен для разработки ЛБВ с выходной мощностью 50 W, работающей на частоте 220 GHz, где рассчитан вариант пушки с ленточным пучком с током 257 mA при ускоряющем напряжении 20 kV, формируемом с эллиптического катода за счет фокусирующего электрода сложной формы [17]. Линейная компрессия пучка порядка 7 осуществляется с катода при средней

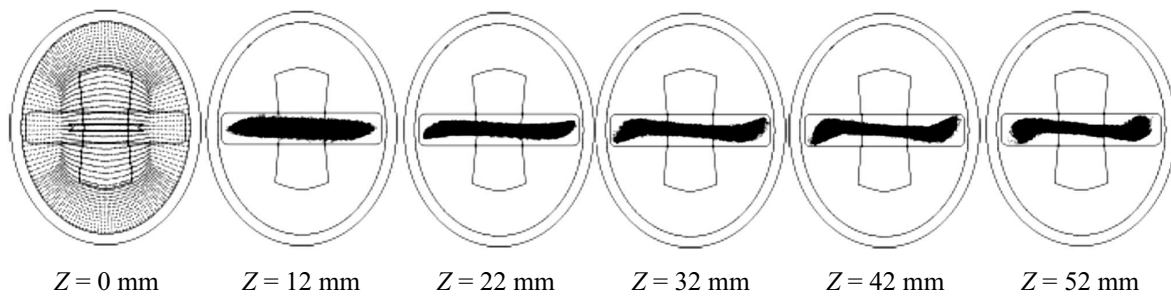


Рис. 3. Расчет фокусировки в программе MICHELLE компрессионного ленточного пучка в пушке с эллиптическим катодом на длину взаимодействия 52 mm [17].

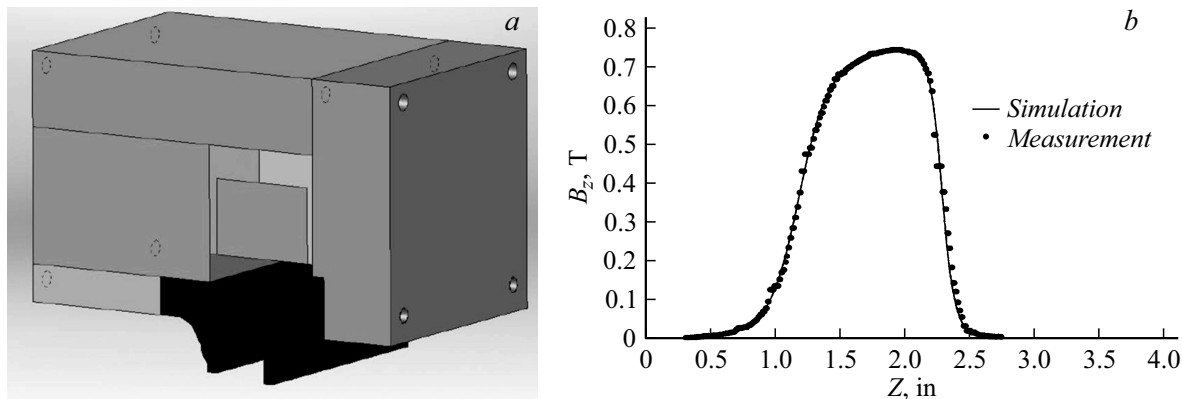


Рис. 4. Магнитная система для ленточного со сходимостью пучка с рабочей длиной 2.5 cm с индукцией 0.75 T [20].

плотности тока на катоде 40 A/cm^2 (рис. 3). В работе [18] проведен расчет электронной пушки для ЛБВ 220 GHz, в которой формируется ленточный электронный пучок с током 80 mA и напряжением 25 kV. Пучок формируется с поверхности цилиндрического катода радиусом 0.35 mm, т.е. плотность тока на катоде составляет 20 A/cm^2 . В пушке применена компрессия электронного пучка в соотношении 7:4 и 7:1 по осям x и y соответственно, и в результате формируется пучок сечением $0.4 \times 0.1 \text{ mm}$. Для более коротковолновых приборов в работе [19] приведены результаты моделирования высококомпрессионной ЭОС с плотностью тока 750 A/cm^2 ленточного пучка в пролетном канале высотой $150 \mu\text{m}$ и общим током 400 mA. Линейная компрессия пучка составила 25. Экспериментальные исследования подобных пушек, но с током 250 mA подтвердили результаты моделирования и получено стопроцентное токопрохождение через анодное отверстие. Из рис. 3 видно, что для систем с протяженным ленточным потоком сопутствует проблема его деформации в магнитном поле по мере увеличения длины пролетного канала, что может привести к токооседанию в микроразмерном канале. Особенно это актуально для пушек термокатодами. Одним из ограничений использования термокатодов является влияние фазового объема и начальных тепловых скоростей электронов на фокусировку электронных потоков в зависимости от температуры катода. Например, для ме-

таллопористых термокатодов средняя тепловая скорость соответствует ускоряющему напряжению порядка 0.7 V. Это приводит к существенному расширению пучка в канале и перераспределению плотности тока в нем.

Эффективная магнитная фокусировка электронных пучков с большой плотностью тока существенна для успешной разработки вакуумных приборов терагерцового диапазона. К основным проблемам можно отнести создание систем с повышенной однородностью магнитного поля и материалами, обеспечивающими относительно высокие значения полей (0.6–1.0 T). Макеты с ленточным пучком, где длина взаимодействия порядка 2–3 cm имели магнитные системы с большими габаритами (рис. 4). Для компактности магнитных систем могут применяться магнитные периодические или реверсные системы. Приближенно распределение магнитного поля в них записывается следующими уравнениями [21]:

$$B_{y,m}(y, z) \approx -B_0 \sinh(k_m y) \cos(k_m z),$$

$$B_{z,m}(y, z) \approx B_0 \cosh(k_m y) \sin(k_m z),$$

где B_0 — амплитуда магнитного поля, $k_m = 2\pi/\lambda_m$ и λ_m — период магнитной системы. Так, в работах сотрудников Калифорнийского университета Дэвис [22,23] для обеспечения пропускания электронного пучка с высокой плотностью тока предлагается периодическая магнитная система (рис. 5). Такая система проектируется в сочетании с квадрупольным магнитом для улучшения коэф-

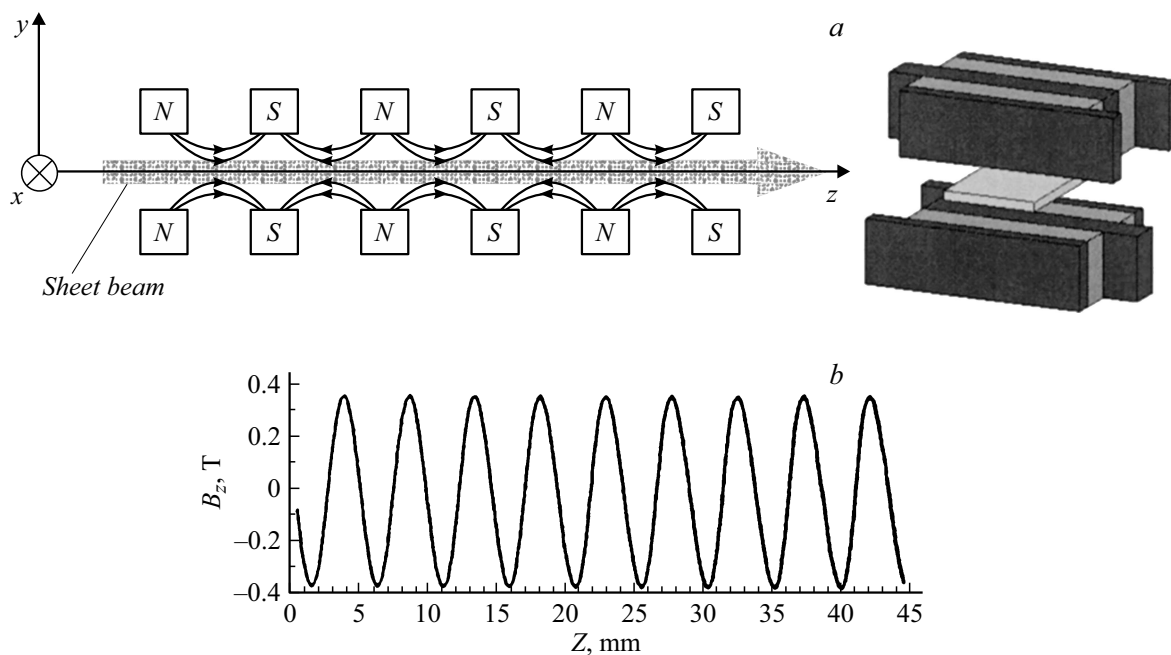


Рис. 5. Схематическое изображение плоскопараллельной магнитной периодической системы для фокусировки ленточного пучка и график распределения поля B_z на длину 45 mm, представленной в работе [23].

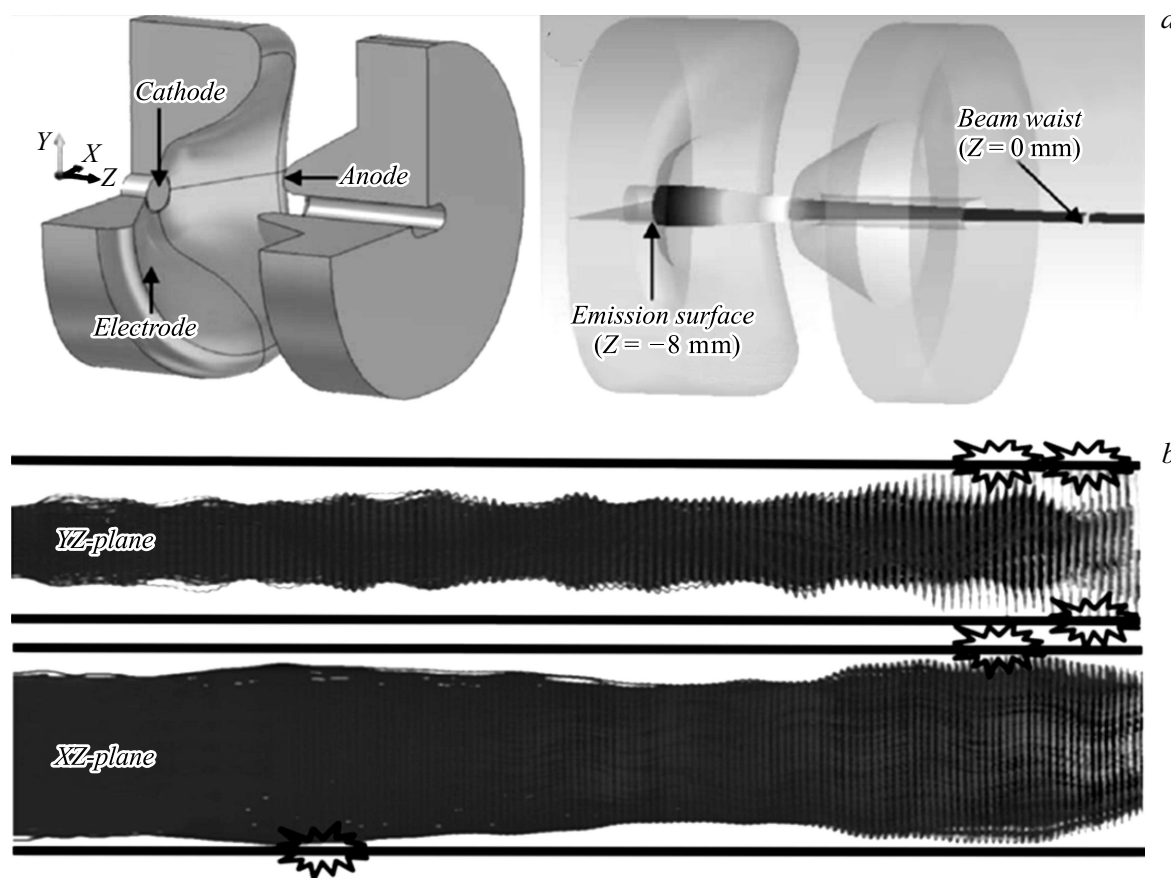


Рис. 6. Электронная пушка с компрессией ленточного пучка (a) и группировка его в ЭОС в YZ и XZ плоскостях (b).

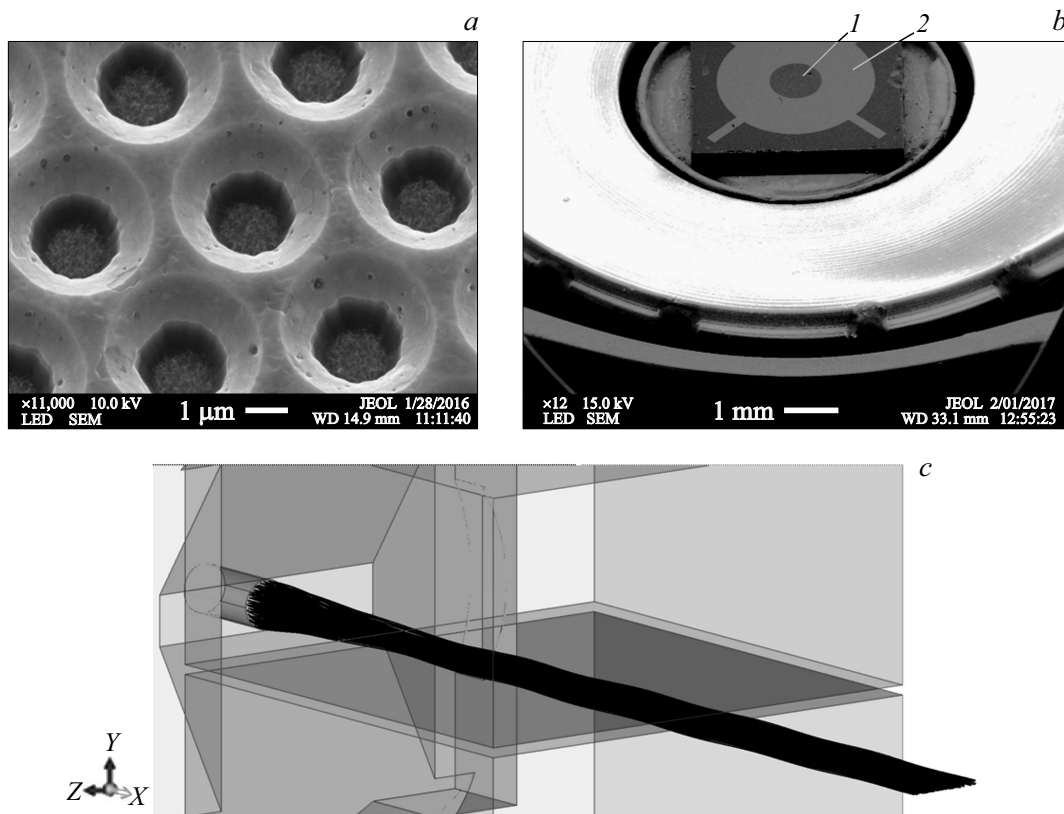


Рис. 7. СЭМ изображение АЭК с УНТ вид сверху (*a*) и электронной пушки (*1* — эмиттер, *2* — проводящий слой для подключения тянущей сетки) [36] (*b*), фокусировка ленточного пучка с плоской автоэмиссионной катодно-сеточной структуры из УНТ (*c*).

фициента пропускания и уменьшения угла деформации ленточного пучка. Магнитная периодическая система обеспечивает фокусировку пучка вдоль оси *Z*, а квадрупольная ее часть осуществляет удержание пучка в поперечном направлении. Показано с помощью анализа, что магнитная система обеспечивает фокусировку с учетом начального поперечного разброса тепловых скоростей и увеличения плотности тока, вызванного группировкой пучка (рис. 6). Эта фокусирующая система используется для транспортировки ленточного пучка с параметрами: 19 kV, 0.15 A, компрессией 8.5, с поперечным сечением эллиптической формы пучка 0.60×0.07 mm. Плотность тока в пучке превышает 400 A/cm^2 , в пролетном канале двухсекционного петляющего волновода длиной 45 mm (для 263 GHz), размер которого составляет 0.7×0.12 mm. С применением такой магнитной системы коэффициент токопрохождения прогнозируется на уровне 95%.

Заменой термокатодов в терагерцовых ЭОС могут стать катоды на основе автоэмиссии. Процесс внедрения автоэмиссионных катодов (АЭК) в мощные СВЧ приборы обусловлен технологическими особенностями применяемых материалов и сложностями получения геометрически воспроизводимых многоострых катодных и катодно-сеточных структур с наноразмерными вершинами острий. Сложности возрастают при про-

ектировании автоэмиссионных электронных пушек с компрессией по плотности тока в поперечном сечении формируемого электронного пучка. Интенсивные исследования за последние 20 лет по совершенствованию технологий изготовления катодных матриц Спиндта [24], эмиттеров на основе углеродных нанотрубок (УНТ), алмазоподобных пленок [25–29] привели к созданию экспериментальных образцов электронных пушек для вакуумных усилителей О-типа. В 2009 г. фирмой L-3 Communication исследованы выходные характеристики ЛБВО С-диапазона [30]. С катода диаметром 1 mm получен ток 121 mA, что соответствует плотности тока 15.4 A/cm^2 . При напряжении замедляющей структуры 3500 V на частоте 5 GHz выходная мощность составила ≈ 100 W. В 2013 г. была представлена ЛБВО X/Ku диапазона с катодом Спиндта [31]. При токе катода 50 mA на частоте 10.6 GHz при усилении 13.5 dB выходная мощность не превышала 10 W. Одной из первых попыток создать электронную оптику для терагерцового прибора на основе матричного АЭК представлена в работе [32]. Катодно-сеточная структура представляла островки из массива многостенных УНТ, выращенных на кремниевой подложке и окруженных тонкопленочной сеткой. Пушка погружена в постоянное магнитное поле 0.9 T, ток до 4 mA, напряжение анода 10 kV, микропервеанс — $0.0014 \text{ A/V}^{3/2}$. Максимальная плотность тока с такого

катода в постоянном режиме составила 2 A/cm^2 . В работе [33] предложена и разработана триодная конструкция электронной пушки с УНТ с микровакуумным зазором для создания СВЧ усилителя, полностью интегрированной на одной подложке с помощью МЭМС технологий. Такая электронная пушка по результатам исследований с матрицей 3×3 из УНТ с размером $9 \mu\text{m}$ работала в непрерывном режиме с плотностью автоэмиссионного тока более 1 A/cm^2 . Из-за ограниченной эмиссии автокатодов сформировать пучки для ЭОС терагерцовых приборов оказывается возможным путем использования компрессионной электронной оптики. Автоэмиссионные свойства и высокоаспектная структура УНТ определяют потенциальные возможности для использования их в качестве АЭК применительно к приборам вакуумной СВЧ электроники. Преимущество процессов CVD в сочетании с последовательными технологическими процессами микроэлектроники позволяют сформировать триодную автоэмиссионную катодно-сеточную структуру с вертикальным расположением нанотрубок (рис. 7, а), обеспечивая при этом требуемое расчетное расстояние катод-сетка, для создания на поверхности УНТ номинальных значений напряженности поля. Для исследования ВАХ катодно-сеточная структура из УНТ на кремниевой подложке устанавливалась с помощью пайки в блоке электродов (рис. 7, б) для подачи импульсного напряжения на тянущую сетку. Относительно малое напряжение управления током катода (несколько вольт и десятков вольт) в отличие от высоковольтных острийных автокатодов [34] приводит к снижению процессов ионизации в узле и электротермического распыления острия, что способствует более долговечной и стабильной работе СВЧ приборов [35]. На рис. 7, с представлено моделирование ленточного пучка в Lorentz-ЗЕМ при ускоряющем напряжении 20 kV и током пучка 10 mA , сфокусированного с плоской автоэмиссионной катодно-сеточной структуры из УНТ диаметром 1 mm . Линейная компрессия обеспечивается применением фокусирующего электрода, имеющего в одной плоскости необходимый угол для сходимости пучка и боковую часть, ограничивающую расширение пучка по ширине. Размеры ленточного пучка за анодным отверстием составили $0.1 \times 1 \text{ mm}$. Ленточный пучок удерживается в ЭОС плоскопараллельным магнитным полем с индукцией 0.6 T . Основным допущением в модели ЭОС является использование катода с гладкой поверхностью. Вычисленный градиент потенциала вблизи его поверхности составил $0.4 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ при ускоряющем потенциале 20 kV , который в катоде за счет коэффициента усиления электрического поля в УНТ достигает величины, необходимой для автоэмиссии. Тянущая сетка находится под естественным потенциалом и занимает то же положение, что и эквипотенциальная поверхность в диодной пушке.

Таким образом, обобщая результаты работ, можно заключить, что применение пространственно развитых многосекционных ЗС и ЭОС с высокой компрессией

пучка дает возможность создавать приборы-усилители типа ЛБВ, работающие в терагерцовом диапазоне. Основные научные направления в области исследования эффективного усилителя терагерцового диапазона (от 200 GHz и выше) должны быть нацелены на: усовершенствование высокоточных МЭМС технологий, в том числе 3D-печати, использование трехмерных программ компьютерного моделирования и создание методик расчета электродинамических и электронно-оптических систем терагерцового диапазона; создание микроразмерных многосекционных ЗС; создание компактных ЭОС, в том числе на основе автоэлектронной эмиссии с магнитным формированием электронных потоков, с высокой компрессией ленточного пучка $10\text{--}15$, с токопрохождением $99.5\text{--}99.9\%$ на коллектор; создание эффективных ЛБВ терагерцового диапазона $200\text{--}220 \text{ GHz}$ с рекуперацией и КПД более 20% .

Список литературы

- [1] Tucek J.C., Basten M.A., Gallagher D.A., Kreischer K.E. // IEEE Intern. Vacuum Electron. Conf. IVEC. 2010. P. 19–20.
- [2] Kreischer K.E. et al. // Intern. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. IRMMW-THz. 2008. P. 1–2.
- [3] Tucek J.C., Basten M.A., Gallagher D.A., Kreischer K.E. // IVEC. 2014. P. 153–154.
- [4] Joye C.D. et al. // IVEC. 2014. P. 219.
- [5] Nguyen K., Wright E., Pershing D., Ludeking L. // IVEC. 2010. P. 23–24.
- [6] Armstrong C.M. et al. // IVEC. 2017.
- [7] Shin Y.M., Baig A., Gamzina D., Luhmann N.C. // IVEC. 2010. P. 185–186.
- [8] Karetnikova T.A., Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Shalaev P.D., Burtsev A.A. // The 42nd IEEE Int. Conf. on Plasma Sciences. 2015. DOI: 10.1109/PLASMA.2015.7179925.
- [9] Shin Y.-M., Barnett L.R., Luhmann N.C. // IEEE Trans. El. Dev. 2009. Vol. 56. N 5. P. 706–712.
- [10] Baig A., Gamzina D., Barchfeld R., Domier C., Barnett L.R., Luhmann N.C. // Phys. Plasm. 2012. Vol. 19. N 9. P. 093110.
- [11] Field M. et al. // IVEC. 2014. P. 225–226.
- [12] Levush B. et al. // Intern. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IRMMW-THz 2009. P. 1–2.
- [13] Jinfeng Zhao et al. // IVEC. 2011. P. 41–42.
- [14] Jinfeng Zhao, Gamzina D., Baig A., Barnett L., Luhmann N.C., Na Li, Ji Li. // IVEC. 2012. P. 47–48.
- [15] Дюбуа Б.Ч., Поливникова О.В. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Вып. 4 (519). С. 187–190.
- [16] Тренева С.Н. АС № 105480 от 09.11.1955.
- [17] Kimura T., Atkinson J., Forrest S., Grant T., Hunter T., Field M., Borwick R., Brar B. // IVEC. 2012. P. 195–196.
- [18] Shi X., Wang Z., Tang X., Tang T., Gong H., Zhou Q., Bo W., Zhang Y., Duan Z., Wei Y., Gong Y., Feng J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42. N 12. P. 3996–4003.
- [19] Atkinson J.E. et al. // IVEC. 2010. P. 97–98.
- [20] Stockwell B.C. et al. // IVEC. 2010. P. 451–452.
- [21] Basten M.A., Booske J.H. // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85. N 9. P. 6313–6322.
- [22] Zheng Yuan, Gamzina D., Popovic B., Luhmann N.C. // IEEE Trans. El. Dev. 2016. Vol. 63. N 11. P. 4466–4472.

- [23] Zheng Yuan, Gamzina D., Luhmann N.C., Moran M. // IVEC. 2017.
- [24] Spindt G.A. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. N 6. P. 3504–3505.
- [25] Ulisse G., Ciceroni C., Brunetti F., Di Carlo A. // IEEE Trans. El. Dev. 2014. Vol. 61. N 7. P. 2558–2563.
- [26] Гуляев Ю.В., Синицын Н.И., Торгаиов Г.В. и др. // Радиотехн. и электрон. 2003. Т. 48. № 11. С. 1399–1406.
- [27] Galperin V.A., Zhukov A.A., Pavlov A.A., Skorik S.N., Shaman Yu.P., Shatanaev A.A. // Nanotechnology Semiconductors. 2014. Vol. 48. N 13. P. 1742–1746.
- [28] Рахимов А.Т. // УФН. 2000. С. 996–999.
- [29] Яфаров Р.К., Шалаев П.Д., Яфаров А.Р. // Радиотехника. 2016. № 7. С. 41–46.
- [30] Whaley D.R. et al. // IEEE Trans. El. Dev. 2009. Vol. 56. N 5. P. 896–905.
- [31] Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C. et al. // IVEC-2013. DOI: 10.1109/IVEC.2013.6571009.
- [32] Ulisse G., Brunetti F., Carlo A. // IVEC. 2010. P. 449–450.
- [33] Gilchrist K.H., Piascik J.R., Stoner B.R., Radauscher E.J., Amsden J.J., Parker C.B., Glass J.T. // IVEC. 2014. P. 155–156.
- [34] Martin E.E., Trolan J.K., Dyke W.P. // J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. N 5. P. 782.
- [35] Мелешкевич П.М. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2016. Вып. 4 (531). С. 6–14.
- [36] Бурцев А.А., Павлов А.А., Кищок Е.П., Григорьев Ю.А., Данилушкин А.В., Шумихин К.В. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 11. С. 89–94.