

УДК 621.384.6

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ (обзор)

© 2021 г. С. В. Куцаев\*

*RadiaBeam Technologies LLC, 1717 Stewart st., Santa Monica, CA, 90404, USA*

*\*e-mail: kutsaev@radiabeam.com*

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 14.04.2021 г.

Принята к публикации 16.04.2021 г.

Приводится обзор новых технологий, позволяющих реализовать такие современные принципы разработки и создания прикладных линейных ускорителей электронов, как модульность, миниатюризация и снижение их стоимости. Развитие ускорителей в данном направлении стало возможным благодаря появлению таких технологий, как компактные источники высокочастотного (в.ч.) питания, эффективные подходы к изготовлению ускоряющих структур, а также повышение ускоряющих градиентов и снижение мощности в.ч.-потерь в структурах. Обзор основан на опыте работы автора по разработке малогабаритных ускорителей.

DOI: 10.31857/S0032816221050086

### ВВЕДЕНИЕ

Ускорители заряженных частиц являются важнейшими инструментами для исследований в ядерной физике, физике высоких энергий, материаловедении и радиохимии, а также используются для создания микросхем, радиотерапии, в сферах безопасности и промышленности. Развитие ускорителей стало возможно благодаря разработкам в области физики пучков заряженных частиц, с.в.ч.-технологиям, применению новых материалов и методов их обработки и др. [1]. Хотя большие ускорители “мегасаенс”-класса, используемые в научных целях, такие как Большой адронный коллайдер [2], наиболее известны широкому кругу специалистов и обывателей, этот класс составляет только ~1% всех ускорителей в мире [3]. Остальные 95% ускорителей используются для прикладных целей, из них 62% применяются для промышленных и медицинских целей [4]. Большинство ускорителей прикладного класса составляют линейные ускорители электронов (л.у.э.) с энергиями от единиц до нескольких десятков мегаэлектронвольт.

Одной из важнейших задач в данной сфере является уменьшение габаритов и веса ускорителей для таких областей их применения, как инспекция грузов [5–7]. Например, в случае патрулирования границ ускоритель вместе с системой питания, защитой, системой контроля и детекторной станцией должен помещаться на автомобиль для быстрой смены дислокации [8, 9]. Ускорители

для медицинского применения должны также помещаться на мобильную роботизированную платформу, чтобы обеспечить доступ пучка со всех сторон опухоли [10, 11]. Промышленное применение переносных ускорителей включает в себя облучение крови [12], выездную радиографию [13], каротаж нефтяных скважин [14], а также системы безопасности, в которых в настоящее время используются радиоизотопы [15]. Более подробно тенденции миниатюризации промышленных ускорителей описаны в работе [1].

Значительным препятствием для распространения ускорителей в некоторых областях промышленности также является их высокая стоимость. В настоящее время основную часть массового коммерческого применения ускорителей электронов в промышленности составляют стерилизация медицинского оборудования, обеззараживание продуктов питания, производство полимеров и дефектоскопия. В совокупности эти области образуют рынок, объемом более 500 млн долларов США в год [16]. В то же время использование ускорителей как источников излучения, в основном, сосредоточено в развитых странах. В странах с низким и средним доходом [17], население которых составляет более 80% населения Земли [18], в качестве источников промышленного облучения до сих пор преобладают радиоизотопы, в основном  $^{60}\text{Co}$ .

Одной из главных причин недостаточного распространения ускорительных технологий в промышленности в этих странах является высокая

капитальная цена установок и необходимость квалифицированного, обученного обслуживающего персонала. Стоимость ускорителей промышленного класса варьируется от 2 млн долларов США за систему на основе л.у.э. с энергией 10 МэВ и средней мощностью 20 кВт до более 5 млн долларов США за ускоритель типа родотрон [19]. Кроме того, эти ускорители требуют наличия, как минимум, одного техника или оператора одновременно в течение всего времени работы установки (обычно 24 часа в сутки, 7 дней в неделю) и группу инженеров, готовых для устранения неполадок [20]. Последние обычно являются сотрудниками производителя ускорителей, однако их услуги оплачиваются эксплуататором. Наконец, сроки поставок запасных компонентов для ускорителей могут составлять до нескольких месяцев, так как они не производятся в больших количествах.

Здесь очевиден контраст с успешным коммерческим использованием медицинских ускорителей для радиотерапии по всему миру. И хотя их количество все еще недостаточно, их распространение в развивающихся странах стремительно увеличивается [21]. Благодаря объему производства таких ускорителей (до 1000 в год [22]) существует развитая и эффективная сеть поставок необходимых компонентов по всему миру и имеются значительные запасы этих компонентов. Производители медицинских ускорителей имеют штат инженеров и техников обслуживания, находящихся в разных частях мира и готовых оперативно прибыть на место и устранить поломку. Кроме того, существует рынок использованных ускорителей, которые успешно продаются во многие страны. Таким образом, одним из путей развития промышленных ускорителей может являться унификация их конструкции с медицинскими ускорителями, а именно, использование тех же источников в.ч.-питания (магнетронов и клистронов), источников импульсного напряжения (модуляторов), источников электронов (пушек) и других.

## 1. КОРОТКОВОЛНОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Большую часть размеров и веса традиционного ускорителя определяют источник питания и элементы радиационной защиты. Габариты слоя защиты напрямую зависят от размера ускоряющей секции. Одним из путей уменьшения размеров данных компонентов является повышение частоты колебаний электромагнитного поля в ускорителях. Более высокочастотные структуры и источники питания имеют меньшие размеры, а также они более энергетически эффективны. Однако уменьшение габаритов и стоимости ускорителей для прикладного применения невозможно без применения новых технологий. Например,

для работы в более коротковолновых диапазонах частот необходимы источники с в.ч.-мощности, способные обеспечивать достаточный уровень мощности для эффективного ускорения частиц.

Традиционные промышленные ускорители работают в S-частотном диапазоне<sup>1</sup> (3 ГГц) и используют клистрон в качестве источника питания [23]. Клистрон, как усилитель в.ч.-мощности, обладает такими преимуществами, как доступность большой пиковой и средней мощности и фазовая стабильность, однако требует для работы источник задающего сигнала и фокусирующий соленоид, что значительно увеличивает размеры и вес системы в.ч.-питания [24].

В современных ускорителях имеет место тенденция использования более компактных источников в.ч.-энергии — магнетронов. Магнетроны являются более дешевыми, чем клистроны (см. рис. 1), однако их мощность ограничивается несколькими мегаваттами в течение импульса и несколькими киловаттами в среднем [25]. Мощность клистронов может быть в десятки раз больше мощности магнетронов. Большинство коммерческих медицинских ускорителей используют магнетроны в качестве источника питания, поэтому их распространенность, доступность и надежность очень высока. В то же время их мощность является недостаточной для промышленных ускорителей, используемых для обеззараживания воды, продуктов питания, стерилизации инструментов и производства полимеров.

Интересно сравнить зависимость стоимости ускорителей от выбора источника питания. Например, модулятор для магнетрона S-частотного диапазона e2v MG5349 [26] с пиковой мощностью 3.1 МВт и средней 3.1 кВт, широко используемого в медицинских ускорителях, будет стоить около 45000 долларов США. Вместе с самим магнетроном и другими компонентами стоимость в.ч.-мощности составляет приблизительно \$45 за 1 Вт мощности пучка (см. табл. 1). С другой стороны, стоимость модулятора того же производителя (Scandinova Systems [27]), предназначенного для клистрона CPI VKS-8262F [28] с пиковой мощностью 5 МВт и средней 36 кВт, используемого в промышленных ускорителях, стоит более 500000 долларов США, которая вместе со стоимостью самого клистрона и других компонентов определяет стоимость 1 Вт пучка в \$39 (здесь и далее доллары США). Таким образом, удельная стоимость системы в.ч.-питания примерно одинаково-

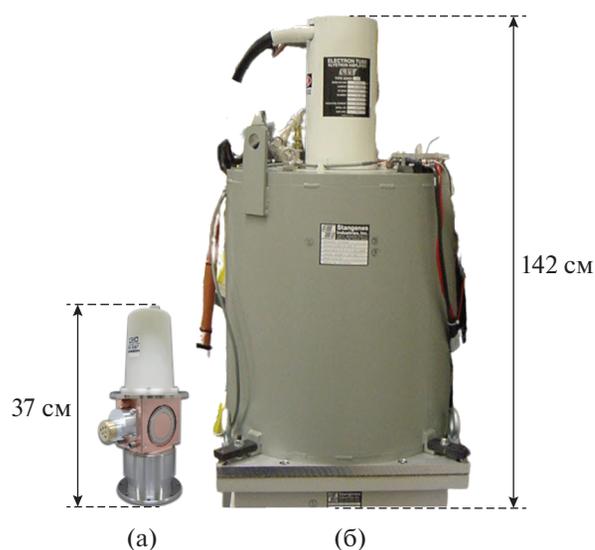
<sup>1</sup> Диапазоны радиочастот имеют различные обозначения (по ГОСТ, IEEE и др.) в различных сферах их использования, поэтому приводим используемые нами обозначения и соответствующие полосы частот: S — 2–4 ГГц, C — 4–8 ГГц, X — 8–12 ГГц, Ku — 12–18 ГГц, K — 18–27 ГГц, Ka — 27–40 ГГц.

ва для систем как с малой, так и с большой средней мощностью.

Данный факт позволяет реализовать парадигму модульного построения систем с высокой мощностью пучка, когда ускоритель с большой средней мощностью заменяется несколькими ускорителями меньшей мощности (модулями). Преимущества такого подхода заключаются в значительном снижении стоимости одного модуля. Во-первых, это позволяет уменьшить объем необходимых стартовых затрат на приобретение ускорителя для промышленного использования, что в настоящее время является серьезным препятствием к распространению ускорительных технологий во многих странах [15]. А во-вторых, позволяет добавлять технологические мощности для промышленных установок по мере увеличения пропускной способности предприятия (см. рис. 2).

Другим преимуществом является более высокая надежность модульных систем. Например, в случае выхода из строя ускорителя с мощностью 18 кВт останавливается все производство, в то время как при выходе из строя одного из 12 ускорителей с мощностью 1.55 кВт каждое предприятие может продолжать функционировать с пониженной производительностью (на 8%). Наконец, снижение мощности одного модуля позволяет использовать магнетроны для медицинских ускорителей, производящиеся в большом количестве и широкодоступные от многих поставщиков. Унификация технологий промышленных ускорителей с медицинскими также упрощает процесс подготовки и привлечения обслуживающего персонала, так как задача поиска или обучения специалистов, способных работать со сложными высокомошными ускорителями, является более тяжелой, чем поиск специалистов, знакомых с медицинскими ускорителями, благодаря тому, что последних в настоящее время насчитывается около 12000 по всему миру [22, 29].

Другой тенденцией в развитии прикладных ускорителей является повышение рабочей частоты  $f$  [30]. Это не только позволяет снизить размеры ускоряющей структуры (примерно, как  $f^{-5/2}$ ), ис-



**Рис. 1.** Сравнение размеров источников в.ч.-питания частотного S-диапазона: **а** – магнетрон NJR M1466T с импульсной мощностью 3.1 МВт и средней мощностью 3.1 кВт, **б** – клистрон CPI VKS-8262F с импульсной мощностью 5 МВт и средней мощностью 36 кВт, находящийся внутри соленоида.

точника питания и радиационной защиты, но и повысить эффективность использования в.ч.-энергии. Например, такой важнейший критерий эффективности преобразования энергии в.ч.-поля в энергию пучка, как шунтовое сопротивление, определяемый как отношение квадрата прироста энергии частицы к рассеянной в структуре мощности ( $R_{sh} = V^2/P$ ), увеличивается с частотой как  $f^{1/2}$  для традиционных структур [31]. В случае же структур на стоячей волне запасенная энергия, определяемая добротностью резонатора  $Q$ , уменьшается пропорционально  $f^{-1/2}$ , что уменьшает интервал заполнения в.ч.-структуры, работающей в режиме стоячей волны, во время которого мощность не используется для ускорения пучка –  $\tau = \frac{Q_L}{\pi f} \sim f^{-3/2}$  [32], что также приводит к повышению эффективности.

**Таблица 1.** Сравнение стоимости в.ч.-систем для медицинских и промышленных ускорителей (в предположении 50%-ной эффективности передачи энергии пучку от в.ч.-поля)

Тип ускорителя	Медицинский	Промышленный
Импульсная мощность, МВт	3.1	5
Средняя мощность, кВт	3.1	36
Мощность пучка (средняя), кВт	1.55	18
Стоимость в.ч.-системы, \$	70000	700000
Стоимость в.ч.-мощности за 1 Вт пучка, \$	45	39

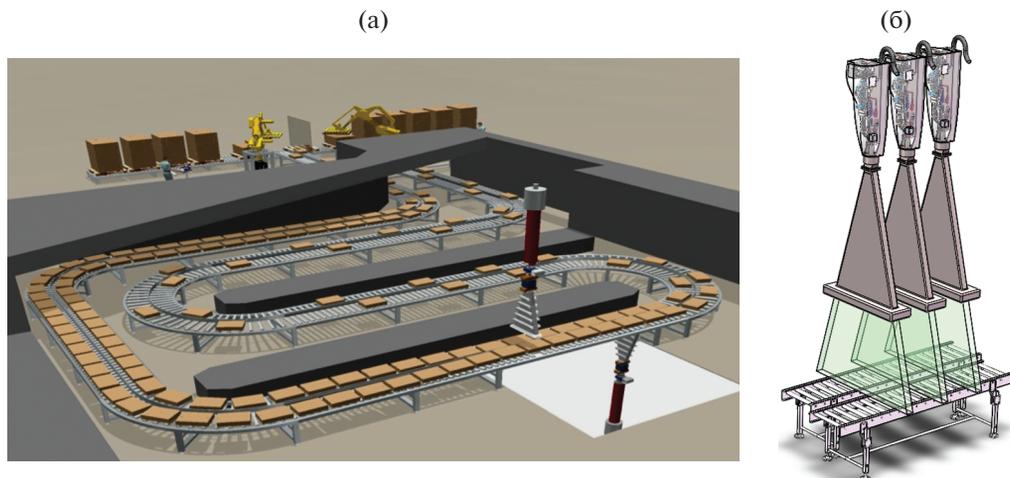


Рис. 2. Примеры реализации промышленного конвейера для облучения объектов, построенные по классическому (а) и модульному (б) принципу.

Важной проблемой является ограниченное наличие компактных источников в.ч.-мощности, работающих в более коротковолновых диапазонах (чем S-диапазон) с достаточным уровнем мощности. Например, наиболее распространенным источником питания медицинских ускорителей является магнетрон X-частотного диапазона. Такие магнетроны обычно имеют коэффициент заполнения импульсной последовательности (так называемый дьюти-фактор) от  $10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  и значения импульсной мощности от 1 до 2 МВт. С точки зрения эффективности использования в.ч.-мощности высокая импульсная мощность является более предпочтительной, чем скважность, так как для заданной дозы излучения среднее потребление мощности растет линейно с дьюти-фактором, но сама доза облучения растет с энергией как  $Y = k(E^n)$ , где  $Y$ , Гр/мин – доза тормозного излучения;  $E$ , МэВ – энергия пучка электронов;  $n = 2.7-3.0$ ;  $k$  – коэффициент конвексии, зависящий от дизайна мишени [33]. Наиболее мощным коммерчески доступным магнетроном частотного X-диапазона, используемым в медицинских ускорителях, является магнетрон L-6170, поставляемый фирмой L-3 (США), с мощностью 2 МВт [34].

Еще одной перспективной альтернативой традиционным клистронам является российская разработка многоручевых клистронов S-диапазона с реверсной фокусировкой постоянными магнитами [35], сопоставимых по размерам и характеристикам питания с магнетронами, но имеющих большую среднюю и импульсную мощность и сохраняющих все преимущества клистронов. В последние годы в России был разработан аналогичный клистрон С-диапазона с импульсной мощностью 3.5 МВт. Такие клистроны используются в

современных компактных ускорителях электронов [36].

Если говорить о более высокочастотных магнетронах, то максимальная мощность коммерчески доступных магнетронов снижается с частотой. Это обусловлено тем, что технологически более сложно охлаждать компактные источники питания. В табл. 2 приведено сравнение параметров магнетронов различных частот, с воздушным охлаждением (наименее габаритных в своем классе). Видно, что габариты таких источников уменьшаются незначительно, начиная с частотного X-диапазона, а источники мощности Ка-диапазона с мощностью более 100 кВт не доступны на рынке, поэтому повышение рабочей частоты для прикладных ускорителей, питающихся от магнетрона, выше 15–17 ГГц в настоящее время является нецелесообразным.

Для работы на более высоких частотах необходимо использовать клистроны [39], гироклистроны [40] или гиротроны [41, 42], размеры которых становятся в несколько раз больше размеров ускоряющей структуры, что фактически нивелирует преимущества коротковолновых систем. Например, размеры мощных источников импульсной мощности частотного Ка-диапазона можно увидеть на рис. 3. Проблема наличия в.ч.-источника значительно усугубляется при разработке ускорителей, работающих в миллиметровом диапазоне, так как единственным источником с мощностью в сотни киловатт и выше в настоящее время является гиротрон [43], еще более сложный и крупногабаритный, чем клистрон, к тому же не позволяющий прямое подключение к ускоряющей структуре [44]. Применение таких источников имеет смысл для создания малогабаритных ускорителей на высокие энергии (более несколь-

**Таблица 2.** Сравнение характеристик и габаритов компактных магнетронов с воздушным охлаждением для разных частотных диапазонов [28]

Диапазон	Модель*	Частота, ГГц	Импульсная мощность, кВт	Масса, кг	Размер, см
S	VMS1610	2.7–2.9	1000	34	39 × 40 × 33
C	SFD349	5.4–5.9	1000	26	37 × 24 × 13
X	SFD375	9.0–10.0	325	10.0	24 × 12.7 × 9.5
Ku	VMU1724	14.6–15.2	250	9.1	25 × 16 × 9.6
Ka	SFD332	32.9–33.5	60	~3.5	~12 × 11 × 7

Примечание: \* – производитель CPI, США.

ких сотен мегаэлектронвольт) с использованием эффективных высокоградиентных технологий.

В последнее время также рассматривается вопрос разработки твердотельных генераторов с.в.ч., работающих в сантиметровом диапазоне и выше. Такие источники имеют высокий к.п.д. (60–80%) [45–47], а также привлекают своей надежностью и модульностью [48, 49]. Однако их стоимость значительно растет с рабочей частотой, что обусловлено технологической стоимостью высокочастотных галлий-нитридных транзисторов (или диодов Ганна в случае миллиметрового диапазона), а габариты таких источников питания значительно превышают размеры магнетронов со сравнимыми значениями мощности. Например, самый массовый и дешевый источник на частоту 2.45 ГГц имеет мощность 500 Вт и стоимость

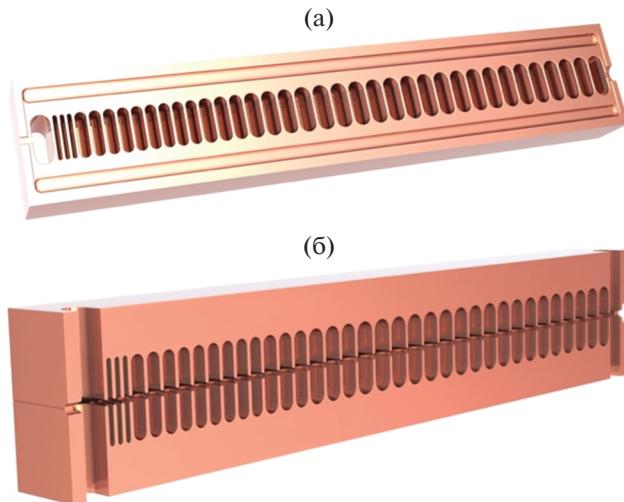
\$2000 [50], в то время как стоимость 1 кВт источников от CPI и AriTech на частоту 9.3 ГГц достигает уже \$60000. Поэтому в настоящее время эти технологии нецелесообразно использовать в прикладных ускорителях.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ РАЗДЕЛЕННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Другой проблемой при переходе на более высокие частоты является прогрессирующая сложность точного изготовления, так как размер элементов и деталей конструкции высокочастотных структур уменьшается пропорционально длине волны в то время как чувствительность их параметров растет с частотой. Для решения этой проблемы была предложена технология “разделен-



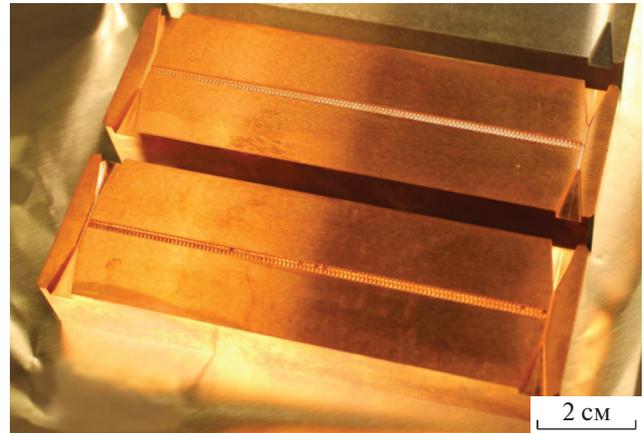
**Рис. 3.** Источники высокой импульсной мощности частотного Ка-диапазона: **а** – 34 ГГц-гироклистрон с мощностью 500 кВт, длительностью импульса 100 мкс и частотой повторения 1000 Гц, аналогичный разработанному НПО ГИКОМ [37], **б** – 34 ГГц-магникон с мощностью 17 МВт, длительностью импульса 0.25 мкс и частотой повторения 1–2 Гц, разработанный в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН [38].



**Рис. 4.** Сечения разделенной ускоряющей структуры, состоящей из двух идентичных половинок (а), соединенных друг с другом для образования диафрагмированного волновода (б).

ной структуры” [51, 52], принцип которой заключается в том, что вместо традиционного изготовления множества индивидуальных ускоряющих ячеек, которые затем должны быть спаяны и настроены, структура изготавливается лишь из двух половинок, в каждой из которой выточен профиль всех ячеек и которые затем соединяются (спаиваются, свариваются или подвергаются диффузионному склеиванию [53]), как показано на рис. 4. Такой метод изготовления не только позволяет уменьшить количество элементов и соединений, но и существенно упростить доступ инструментов для выточки деталей структуры [54, 55]. К преимуществам данного метода изготовления можно также отнести большую точность изготовления и юстировки за счет отсутствия проблем, связанных с изменением размеров структуры во время пайки [56], а также высокую вакуумную проводимость внутри структуры и отсутствие вакуумно-водяных сочленений, нежелательных в конструкции ускорителей [57].

Концепция разделенной структуры получила развитие и популярность в контексте разработок линейного электрон-позитронного коллайдера с энергиями порядка тераэлектронвольт для экспериментов в области физики высоких энергий [58, 59]. Установки такого класса, например Компактный линейный коллайдер CLIC [60] (ЦЕРН, Швейцария), требуют разработки высокоградиентных структур небольшой стоимости. Структура, изображенная на рис. 5 [61, 62], была разработана в качестве научного эксперимента для определения предельных значений напряженности с.в.ч.-полей в нормально проводящих медных структурах. Тем не менее, эти наработки проде-



**Рис. 5.** Фотография 110 ГГц разделенной ускоряющей структуры, разработанной в SLAC, США (фотография В.А. Долгашева).

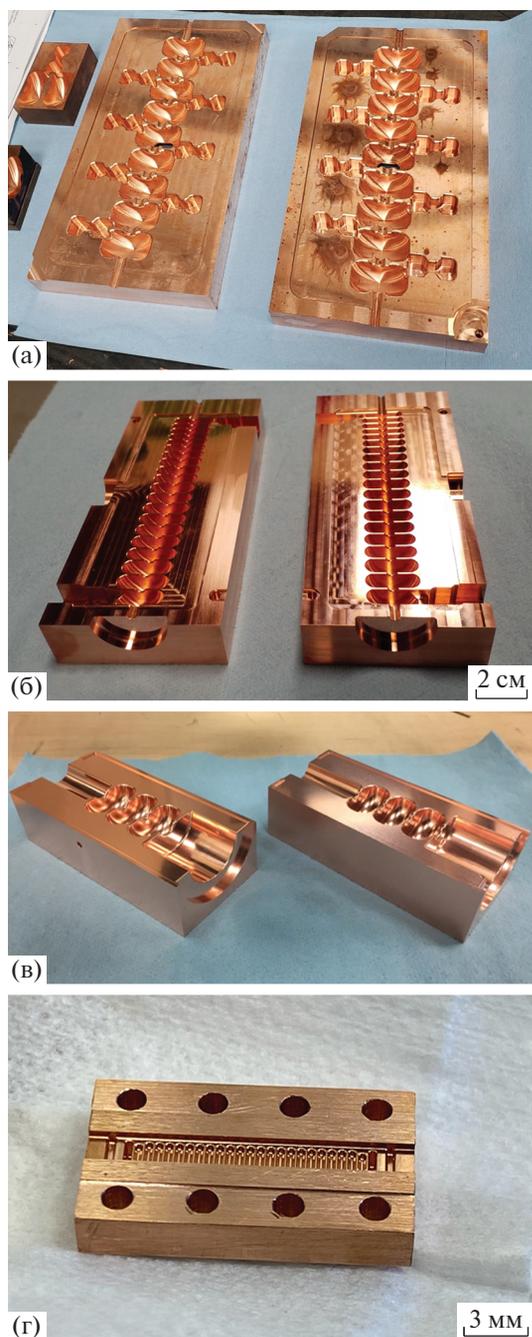
монстрировали перспективность таких структур и для прикладных ускорителей. Структура на рис. 5 имеет рабочую частоту 110 ГГц, что, как минимум, в 10 раз выше частот, используемых в коммерческих ускорителях, и была изготовлена путем микрообработки с элементами электроэрозионной обработки [63, 64], что позволило достичь точности изготовления 1 мкм и шероховатости поверхности 200 нм. При этом стоимость изготовления одной половинки не превышала \$10000.

Результаты, полученные во время работы с разделенными структурами миллиметрового диапазона, побудили автора и его коллег из Radia-Beam Technologies к адаптации данной технологии для прикладных ускорителей сантиметрового диапазона с целью снижения их стоимости. Примеры таких структур приведены на рис. 6 и включают в себя следующие проекты:

- бипериодическая ускоряющая структура (б.у.с.) с внешней связью между ячейками (так называемый side-coupled linac или SCL) частотного С-диапазона для компактного разрезного микротрона [65], предназначенного для инспекции грузов методом непрерывного облучения, например системы инспекции на быстрых нейтронах [66]; здесь впервые была продемонстрирована технологическая возможность изготовления разделенных структур со сложными элементами (трубки дрейфа, ячейки и щели связи);

- высокоградиентная структура типа круглого диафрагмированного волновода (к.д.в.) частотного Х-диапазона, в которой впервые была применена технология электролучевой сварки для разделенных структур;

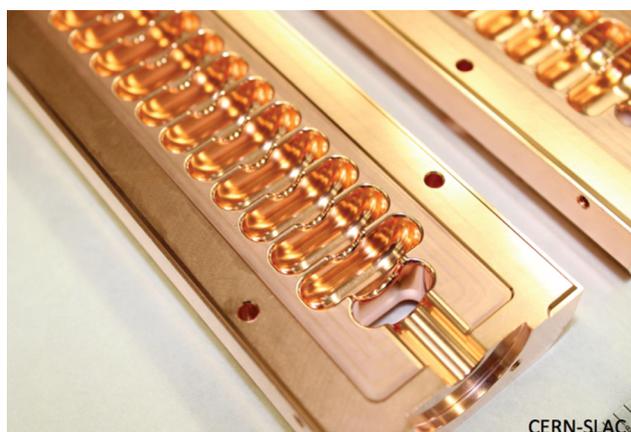
- к.д.в. частотного Ку-диапазона, полностью состоящий из ячеек с фазовой скоростью менее скорости света (0.3–1.0) [56]; на примере этой структуры впервые была продемонстрирована возможность



**Рис. 6.** Ускоряющие структуры разделенного типа, разработанные и созданные в RadiaBeam Technologies: **а** – б.у.с. частотного С-диапазона для использования в компактном микротроне; **б** – к.д.в. с группировочной секцией для Ки-диапазона для переносного ускорителя; **в** – к.д.в. X-диапазона для линейного коллайдера, **г** – к.д.в. на частоту 182 ГГц для кильватерного ускорителя.

изготовления группирователей с переменными параметрами с помощью технологии разделенных структур.

Хотя попытки разработки ускоряющих структур на частоты выше X-диапазона предпринима-



**Рис. 7.** Разделенная ускоряющая структура частотного X-диапазона для коллайдера CLIC (фотография ЦЕРН, Швейцария).

лись и ранее [67], они сталкивались с проблемой сложности изготовления таких структур. Внедрение технологии разделенной структуры изменяет парадигму изготовления ускоряющих структур и открывает возможности применения методов микрообработки для точного изготовления высокочастотных структур при низкой стоимости. Важно отметить, что такой подход позволяет реализовать массовое производство ускорителей благодаря тому, что идентичную деталь (половинку структуры) можно вытачивать многократно из одного куска меди, существенно сокращая время участия механика в процессе изготовления. Кроме того, структура, изготовленная по данной технологии, не требует участия инженера для подстройки частот ячеек, а также внедрения механизмов такой подстройки [56], что также снижает ее стоимость. По нашим оценкам, при массовом производстве разделенных ускоряющих структур, стоимость их изготовления можно снизить в 10 раз: с ~\$10000 до \$1000.

Одной из первых структур, состоящей из двух половинок, была высокоградиентная структура к.д.в. частотного X-диапазона (11.424 ГГц), разработанная и изготовленная совместными усилиями лабораторий SLAC (США) и CERN (Швейцария) в рамках исследовательской программы коллайдера CLIC [68, 69]. Данная структура, показанная на рис. 7, была изготовлена путем традиционной фрезерной обработки. Однако более компактные структуры можно также изготавливать и с помощью электроэрозионной обработки (э.э.о.). В этом случае синкер (патрон, используемый в качестве электрода) может многократно использоваться для изготовления идентичных структур.

Принцип технологии э.э.о. проиллюстрирован на рис. 8 и заключается в следующем. Между патроном, изготовленным в форме детали (негатив), и обрабатываемым материалом подается высокое на-

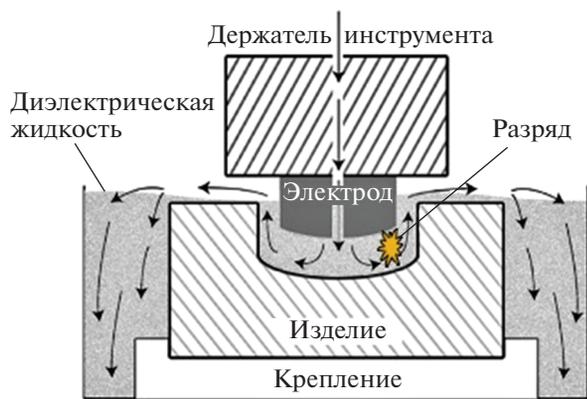


Рис. 8. Иллюстрация принципа техники электроэрозионной обработки.

пряжение, которое создает электрический разряд, выжигающий металл детали. Таким образом, обрабатываемый материал получает форму патрона (позитив). Точность изготовления образца таким методом составляет 2 мкм, однако точность некоторых особенностей геометрии может быть хуже — до 40 мкм [70].

Несмотря на описанные преимущества, износ патрона со временем приведет к необходимости его восстановления до изначальной формы. Скорость изнашивания электрода сильно зависит от количества материала, который необходимо убрать. В связи с этим данный метод больше подходит для структур частотного Ку-диапазона и выше, так как такие волноводы имеют более мелкие детали геометрии, чем структуры частотного Х-диапазона. Износ преимущественно происходит на локальных участках поверхности электрода, и поэтому это необходимо учитывать при разработке геометрии ячеек и, возможно, применять э.э.о. после грубой фрезерной обработки детали, чтобы максимально продлить срок службы электрода. Наконец, поскольку процесс электроэрозионной обработки может оставлять следы электродного материала размером  $< 1$  мкм, пригоревшие на верхних поверхностях детали, то для сглаживания поверхности требуется электрохимическая очистка детали. К счастью, этот процесс хорошо масштабируем и после первоначальных инвестиций в оборудование и инструменты не приводит к большим затратам в расчете на одну структуру.

Альтернативой э.э.о. является технология микрофрезерования, которая использует инструменты малого диаметра, работающие с очень высокой частотой вращения шпинделя и сконфигурированные в высокоточные станки для производства мелких деталей с высокой точностью (рис. 9). Существует ряд исследований, сосредоточенных на сравнении э.э.о. и микрофрезерова-

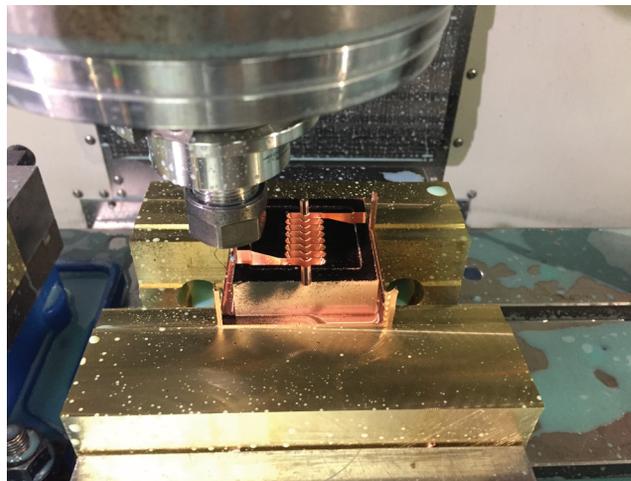
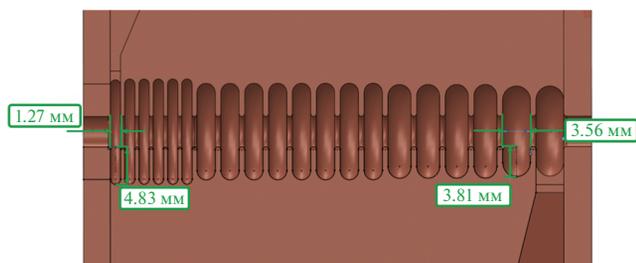


Рис. 9. Процесс изготовления разделенной секции к.д.в. Ку-частотного диапазона методом фрезеровки.

ния [71, 72], общим выводом которых является то, что микрофрезерование обеспечивает большую точность размеров при более высокой стоимости производства. Кроме того, эта технология является более воспроизводимой, чем э.э.о., из-за отсутствия неопределенности в отношении износа электродов. В то же время он требует большей степени вмешательства со стороны квалифицированного слесаря-механика и, следовательно, приводит к более высоким производственным затратам.

Тем не менее, в случае традиционного подхода к фрезеровке деталей с небольшими размерами существует возможность обрабатывать большое количество изделий за один проход, благодаря чему можно достичь значительной экономии трудозатрат и соответственно снизить стоимость изготовления. Фактически, этот метод заключается в том, что возможно прикрепить одну медную болванку к станине станка, запустить основной цикл обработки и вернуться через 1–2 дня, чтобы удалить детали и очистить геометрию тыльной стороны структуры. Данный подход к массовому производству позволяет одновременно изготовить до 100 структур.

Одной из сложностей технологии микрофрезерования ускоряющих структур является изготовление группирующих ячеек с малой фазовой скоростью. На рис. 10 показан пример такой секции частотного Ку-диапазона [56]. На этом рисунке хорошо видно, что отношение глубины ячеек к их ширине составляет около 1:1 в случае фазовой скорости 0.7 и более 3:1 для скорости 0.3 (здесь и далее подразумевается приведенная фазовая скорость: отношение абсолютной фазовой скорости к скорости света). Такое значительное соотношение сторон требует применения более длинных инструментов фрезы, что увеличивает



**Рис. 10.** Группирующая секция к.д.в. частотного К-диапазона, иллюстрирующая разницу в отношении длины ячеек к их радиусу в зависимости от величины фазовой скорости.

их подверженность деформации и вибрации и может повлиять на достижимые допуски и шероховатость поверхности.

Независимо от выбранного способа изготовления, разделенная структура должна быть спаяна для обеспечения вакуумной герметичности и наличия фланцев. В отличие от традиционного (поячеечного) способа изготовления структур, для пайки разделенных структур требуются 2 цикла. Пайка осуществляется с помощью сплавов золота и меди, причем содержание золота увеличивается на последующих этапах пайки для того, чтобы гарантировать, что ранее спаянные соединения не расплавятся. В данном случае первый этап пайки нужен для соединения двух половинок, а второй — для прикрепления вакуумных и волноводных фланцев. Пайка в печи также располагает к экономии в случае массового производства, поскольку можно паять десятки структур такого размера за один цикл печи.

В завершение темы технологии изготовления разделенных структур укажем, что изготовление структуры б.у.с. частотного С-диапазона [65], состоящей из 9 регулярных ячеек и 8 ячеек связи (см. рис. 6б), потребовала всего 70 ч автоматической обработки для создания двух половинок. Это значительно меньше времени, которое потребовалось бы при традиционной технологии изготовления индивидуальных ячеек (см. рис. 11), которая в настоящее время является стандартом для промышленных линейных ускорителей.

### 3. ПОВЫШЕНИЕ УСКОРЯЮЩИХ ГРАДИЕНТОВ

Кроме повышения рабочей частоты другим способом уменьшения габаритов ускорителей является повышение ускоряющего градиента. Действительно, длина структуры уменьшается обратно пропорционально ускоряющему градиенту. Однако одновременно с этим величина в.ч.-мощности  $P$ , необходимой для питания таких структур, также растет (изначально как квадрат уско-



**Рис. 11.** Ячейки ускоряющей структуры типа к.д.в. частотного X-диапазона, изготовленные традиционным “поячеечным” способом, и вспомогательные компоненты для их соединения и пайки.

ряющего напряжения  $E_{acc}$ , но становится линейным, если учесть уменьшение длины структуры):

$$P = \frac{W^2}{R_{sh}L} = \frac{WE_{acc}}{R_{sh}}. \quad (1)$$

Повышение требований к значениям мощности в свою очередь приводит к необходимости использования более громоздких источников питания. В итоге выгода от работы на высоких градиентах в случае ускорителей электронов на низкие и средние энергии (<10 МэВ) может быть незначительной или отсутствовать вовсе. Однако при разработке ускорителей на энергии от нескольких десятков мегаэлектронвольт (например, л.у.э. для производства радиоизотопов [73] или вторичного потока нейтронов [74]) до сотен мегаэлектронвольт (например, для источников излучения, на основе обратного комптон-эффекта [75]) выгода от работы на более высоких градиентах становится значительной.

Основным физическим фактором, ограничивающим достижение высоких градиентов в нормальнопроводящих ускоряющих структурах, является высокочастотный пробой (см. рис. 12 [76]). И хотя физика этого явления в контексте увеличения градиентов в в.ч.-структурах изучается уже более двух десятилетий [77, 78], на сегодняшний день данные о в.ч.-пробое остаются в основном эмпирическими с очень ограниченным аналитическим пониманием механизма, условий и динамики пробоя. Однако в настоящее время существуют четкая корреляция вероятности возникновения в.ч.-пробоя с амплитудами электрического и магнитного полей, а также



Рис. 12. Характерная картина повреждения поверхности ускоряющей структуры вследствие в.ч.-пробоя (фотография В.А. Долгашева).

длительностью импульса. В частности, используются следующие критерии для разработки высокоградиентных структур [79]:

- Максимальное значение напряженности электрического поля на поверхности многоячеичных структур не должно превышать 160 МВ/м в частотном S-диапазоне, 250 МВ/м в X-диапазоне и 500 МВ/м в миллиметровом диапазоне [80–83] для достижения средней частоты пробоя порядка  $10^{-6}$  (импульсов  $\cdot$  м) $^{-1}$ . При этом критерий Килпатрика [84, 85], часто используемый для оценки предельных значений в.ч.-полей в резонаторах метрового диапазона, плохо применим для частот сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

- Значение напряженности поверхностного магнитного поля не должно приводить к импульсному нагреву с пиковой температурой более 50°C, который может повредить структуру [86]:

$$\Delta T = \frac{|H_{\parallel}|^2 \sqrt{t}}{\sigma \delta \sqrt{\pi \rho c_e k}}, \quad (2)$$

где  $H_{\parallel}$  – значение поверхностной напряженности магнитного поля,  $t$  – длительность в.ч.-импульса,  $\sigma$  – проводимость материала структуры,  $\delta$  – глубина скин-слоя,  $\rho$  – плотность материала,  $c_e$  – удельная теплоемкость материала,  $k$  – теплопроводность материала.

- Согласно исследованиям, проведенным в ЦЕРН (Швейцария) [87, 88], также имеет смысл держать значения модифицированного вектора Пойнтинга  $S_c$  ниже значений 5 МВт/мм $^2$  для длительности импульсов 200 нс:

$$S_c = \operatorname{Re}\{S\} + \frac{\operatorname{Im}\{S\}}{6}, \quad (3)$$

где  $S$  – вектор Пойнтинга.

- Наконец, максимальные значения полей масштабируются с требуемой частотой в.ч.-пробоя ( $BDR$ ) и длительностью импульса как [89]:

$$\frac{E^{30} t^{0.5}}{BDR} = \text{const}. \quad (4)$$

Для достижения высоких градиентов необходим глубокий пересмотр подхода к созданию ускорителей, а именно: использование новых материалов (твердые медные сплавы, наноструктура и т.д.), методов изготовления (структуры с разделенными ячейками, электронно-лучевая сварка, зажимные конструкции) и рабочих условий (например, криоохлаждение). Во всех случаях понимание механизма в.ч.-пробоя имеет решающее значение для разработки надежных высокоградиентных структур.

Известно, что выбор материалов, технологии изготовления и геометрии ускоряющих структур существенно влияет на характеристики в.ч.-пробоя [83]. Недавние исследования в области высоких градиентов, проводимые в SLAC, показывают, что использование твердых (неотожженных) медных сплавов дает значительные преимущества по сравнению с отожженной медью [90]. В этих исследованиях особое внимание уделялось циклическим механическим напряжениям, создаваемым локальным тепловым расширением материала вследствие импульсного в.ч.-нагрева [91]. Природу данного эффекта можно описать следующим образом. Поверхностные магнитные поля вызывают нагрев материала ускоряющей структуры, что приводит к быстрому (в течение длительности в.ч.-импульса) повышению температуры поверхности. Возникающий градиент температуры между горячей поверхностью и холодным объемом приводит к градиенту плотности материала из-за теплового расширения, что в свою очередь вызывает переходный градиент механического напряжения в материале, поскольку горячая расширяющаяся поверхность физически ограничена объемным материалом под ней. Характер этого напряжения изменяется от сжатия к растяжению по мере того, как материал нагревается и охлаждается, а величина напряжения зависит от длительности импульса, пиковой мощности и рабочего цикла в.ч.-импульса [92].

Результаты тестирования купонов из различных материалов, помещенных в цилиндрические резонаторы [90], показали значительное увеличение значений пороговой температуры импульсного нагрева, при котором наблюдалось повреждение поверхности в результате в.ч.-пробоя (см. табл. 3). Этот эффект наиболее ярко проявляется в неотожженных твердых медных сплавах: в большей степени CuAg и в меньшей степени CuCr и CuZr. В этих образцах повреждения начинали наблюдаться при импульсном нагреве до 110°C, что более чем в 2 раза выше, чем у отожженной бескислородной меди с высокой проводимостью (OFHC).

**Таблица 3.** Сравнение пороговой температуры повреждения структуры для разных материалов и способов их обработки

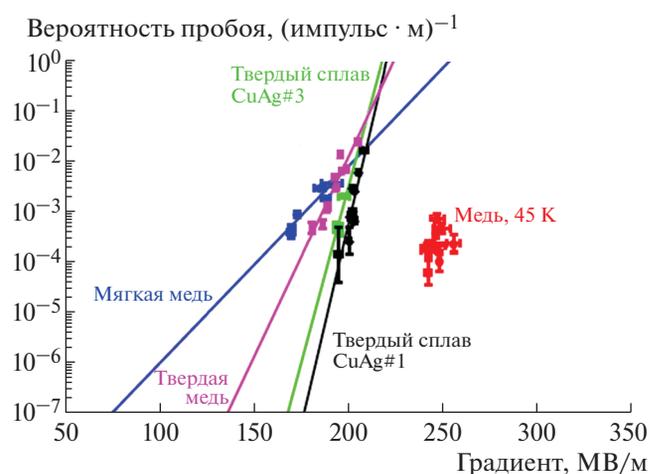
Материал	Обработка	Температура повреждения, °С
Cu	Отожженная	66
Cu	Отожженная, бескислородная	50
Cu	Выточка одноточечным алмазным резцом	100
Cu	Горячее изостатическое прессование	57
Cu	Монокристаллическая	97
Cu	Гальваническое покрытие	80
Cu	Серебряное покрытие	60
CuZr	Холодная обработка	>114
CuZr	Отожженная	58
CuCr	Отожженная	52
CuCr	Неотожженная	121
CuAg	Без обработки	107

После испытаний плоских образцов в цилиндрическом резонаторе группа ученых SLAC под руководством S. Tantawi и В.А. Долгашева провела испытания в.ч.-пробоя в многоячеечных ускоряющих структурах, изготовленных из различных материалов [76]. Главный вывод этого эксперимента заключался в том, что структуры, сделанные из твердых медных сплавов (например, CuAg), превосходят медные, подвергнутые мягкой термообработке, с точки зрения максимальных ускоряющих градиентов и вероятностей в.ч.-пробоя, как показано на рис. 13. Очевидно, что твердые медь и сплав меди и серебра имеют лучшие характеристики при высоких градиентах по сравнению с мягкой отоженной медью. Кроме того, в структурах, изготовленных из медно-серебряного сплава, удалось достичь больший ускоряющий градиент – около 210 МВ/м.

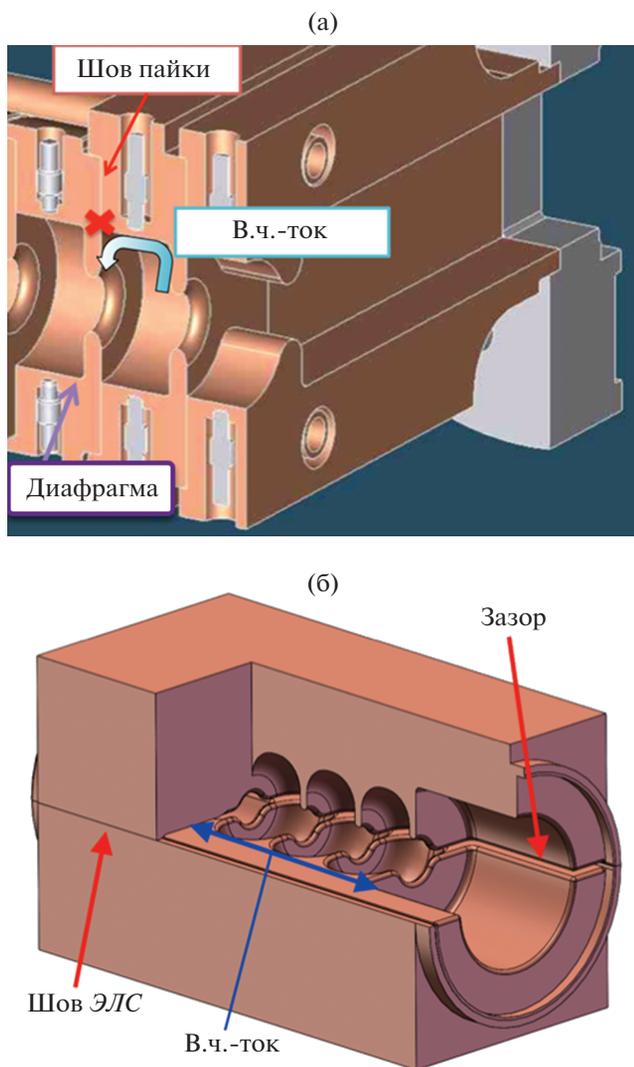
Кроме материала и технологии изготовления ячеек (или разделенных половинок) ускоряющих структур, важную роль играет качество их соединения, которое должно сохранять твердость, качество и чистоту поверхности структуры, важные для работы при высоких градиентах. Две наиболее часто используемые технологии соединения – высокотемпературная пайка и диффузионная сварка – хорошо зарекомендовали себя в производстве нормальнопроводящих ускорителей и имеют отличные характеристики высокочастотных, механических и вакуумных соединений. Хотя технология высокотемпературной пайки медных ускорителей достигла своей зрелости [93–95], соответствующий ей термический цикл отжигает холодный слой внутри материала, оставляя чрезвычайно мягкую поверхность. Этот критический недостаток побудил исследовать альтернативные методы низкотемпературного соединения, дающие надежные

герметичные вакуумные уплотнения [96], такие, например, как электронно-лучевая сварка [97, 98].

Наиболее перспективной представляется комбинация технологии разделенной структуры и электронно-лучевой сварки. Такой подход позволяет значительно уменьшить электрические и магнитные поля на стыке двух половинок (в месте, где протекают в.ч.-токи) и упростить процесс сборки [69]. Если сравнивать разделенную структуру с классической, то в последней в.ч.-соединение двух ячеек представляет собой неоднородность поверхности в месте с наиболее сильным



**Рис. 13.** Зависимость вероятности в.ч.-пробоя в ускоряющих структурах частотного X-диапазона от ускоряющего градиента, измеренная в результате экспериментов ученых SLAC, США под руководством В.А. Долгашева (его рисунок). Эксперименты проводились для твердой и мягкой меди, медно-серебряного сплава и меди, охлажденной до температуры 45 К. Длительность в.ч.-импульса составляла 150 нс.



**Рис. 14.** Технологии соединений ускоряющей структуры типа к.д.в.: **а** – классический пояечечный способ, **б** – разделенная структура, сваренная по краям методом электронно-лучевой сварки (ЭЛС). На рисунке показаны области контакта и пути в.ч.-токов.

магнитным полем [99] и является наиболее уязвимым местом для в.ч.-пробоя (см. рис. 14а). В разделенной структуре две половинки не примыкают друг к другу, а отделены запредельным промежутком, который не позволяет в.ч.-мощности распространяться в направлении соединительного шва на рабочей частоте, ослабляя ее до значений менее 50 мВт (рис. 14б). Таким образом, влияние неоднородности соединительного шва на характеристики ускоряющей структуры значительно снижается.

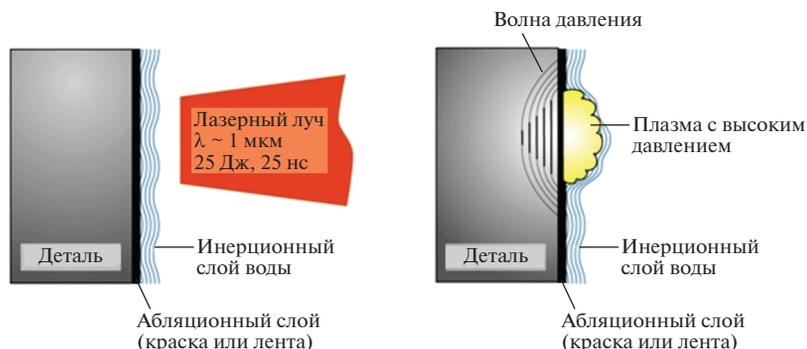
Поскольку основным механизмом возникновения в.ч.-пробоев является движение дефектов кристалла, вызванное циклическим механическим напряжением [100], то методы уменьшения этого напряжения также могут способствовать

снижению вероятности пробоя. Одним из способов уменьшения усталости является упрочнение ударным способом, например струей металлической или керамической дроби. При ударе поверхность детали сжимается и пластически деформируется, в результате чего образуется тонкий, упрочненный слой с повышенной плотностью дефектов и остаточным напряжением сжатия [101]. Эта твердая поверхность улучшает усталостные свойства, поскольку она противодействует циклическому растягивающему напряжению, которое вызывает образование и рост трещин. К сожалению, механическая дробеструйная обработка оставляет на поверхности углубления, что приводит к увеличению шероховатости поверхности и требует дополнительной полировки. Кроме того, механическое упрочнение трудно контролировать, поскольку скорость удара и покрытие поверхности выстрела случайны, а ударная среда может потенциально загрязнить поверхность устройства.

Для решения этих проблем предлагается адаптировать новую технологию лазерной ударной обработки (л.у.о.) [102], широко применяемую в автомобильной промышленности, производстве электроэнергии, утилизации ядерных отходов и аэрокосмической промышленности. Как показано на рис. 15 [103], л.у.о. использует мощный наносекундный импульсный лазер с размером пятна 3–5 мм для создания локализованного плазменного шлейфа на поверхности материала. Плазменный слой механически сдерживается оптически прозрачным конформным инерционным слоем утрамбовки, например водой. Сдерживаемая плазма обладает достаточной энергией для создания ударной волны внутри материала, при этом абляционный слой пластика деформирует поверхность и создает более глубокий, более контролируемый профиль остаточных напряжений, чем при традиционной дробеструйной обработке.

Кроме того, л.у.о. может быть установлен на роботизированной платформе для выборочного и точного упрочнения больших сложных поверхностей, таких как ускоряющие структуры [104]. Поскольку для поглощения падающей лазерной энергии используется абляционный слой, л.у.о. можно применять на медных поверхностях с высокой отражающей способностью. После ударной обработки этот слой химически удаляется с последующей полировкой и травлением поверхности структуры.

Еще одним многообещающим подходом к повышению градиента при работе в полосах частот, с доступными источниками в.ч.-мощности и умеренными длинами волн (1–10 см), является работа ускоряющих структур при криогенных (<77 К) температурах. На этих температурах медь становится более прочной и имеет более низкий коэффици-



**Рис. 15.** Схема лазерной ударной обработки. Заготовка покрывается защитным абляционным слоем и инерционным трамбовочным слоем. Лазерный импульс формирует плазму под высоким давлением на поверхности детали, заставляя ударную волну проходить через глубину и пластически деформируя материал на своем пути (рисунок Curtiss-Wright).

ент теплового расширения, что позволяет уменьшить механические напряжения и деформации вследствие импульсного нагрева в.ч.-полем [105]. По сравнению с комнатной температурой медные ускоряющие структуры, охлаждаемые жидким азотом, имеют более низкое поверхностное сопротивление и более высокое (в 2.5–2.7 раза [106]) шунтовое сопротивление [107]. Охлаждение структуры до более низких температур, например, жидким неонем позволяет еще больше снизить поверхностное сопротивление меди (см. рис. 16 [105]). Недавние исследования, проведенные учеными UCLA и SLAC [108, 109], показали, что электрические поля с напряженностью до 500 МВ/м могут быть достигнуты на поверхности ускоряющих структур частотного X-диапазона при охлаждении до температур ниже 45 К (см. рис. 13).

Благодаря высоким значениям собственной добротности криогенные нормально проводящие структуры имеют хорошую перспективу использования и в прикладных ускорителях, где требуются высокие пиковые токи пучков. В традиционном подходе к конструкции сильноточного линейного ускорителя баланс мощности определяется для стационарного режима работы, так что в.ч.-мощность, передаваемая электронному пучку, равна в.ч.-мощности, передаваемой от источника в структуру, за вычетом резистивных потерь в стены линейного ускорителя и отражений мощности от структуры. Чтобы преодолеть ограничения по пиковому току, можно ускорять короткие сильноточные пучки в переходном режиме. В этом случае резонатор без нагрузки пучком заполняется в.ч.-мощностью, а затем короткий сильноточный пучок ускоряется, поглощая энергию, запасенную в резонаторе (см. рис. 17). Если длительность пучка значительно меньше времени заполнения структуры, то эффект нагрузки током не успеет развиваться, и пучок получит максимальную энергию даже при высоких токах [74]. Формула для расчета макси-

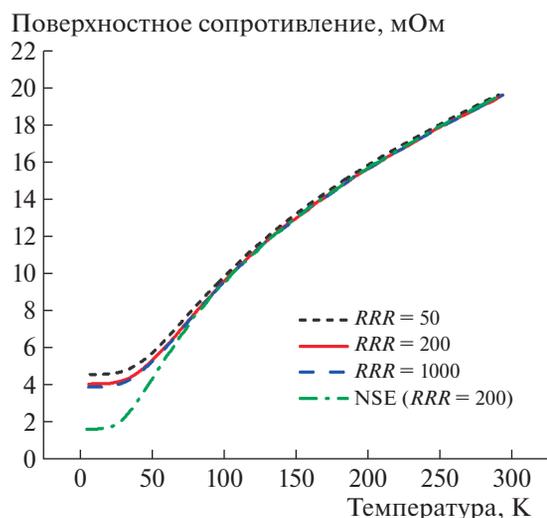
мального тока, который может быть ускорен в режиме коротких импульсов, такова [110]:

$$I_{\max} = \frac{P_{RF}}{W_{\max}} \frac{\tau_{\text{fill}}}{\tau_{\text{bunch}}}, \quad (5)$$

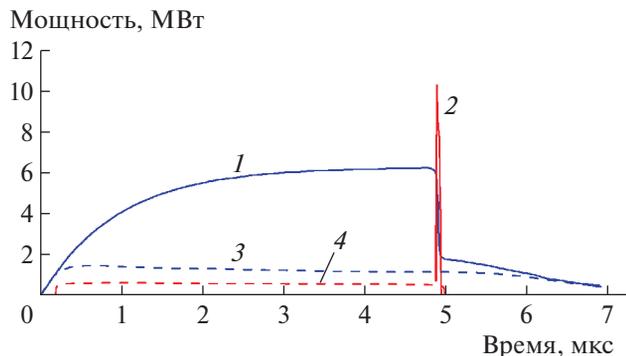
где  $W_{\max}$  – максимальный прирост энергии, которую может получить частица в ускоряющем резонаторе без нагрузки током,  $\tau_{\text{bunch}}$  – длительность пучка,  $P_{RF}$  – доступная в.ч.-мощность, а  $\tau_{\text{fill}}$  – время заполнения резонатора, определяемое как [111]

$$\tau_{\text{fill}} = \frac{Q_L}{\pi f_{RF}}, \quad (6)$$

где  $Q_L$  – нагруженная добротность резонатора,  $f_{RF}$  – резонансная частота. Более подробно о раз-



**Рис. 16.** Зависимость поверхностного сопротивления меди, включая аномальный скин-эффект, от температуры для различных классов коэффициента остаточного сопротивления меди ( $RRR$  – Residual-resistance ratio), измеренного на частоте 5.712 ГГц (рисунок на основе данных SLAC, США).



**Рис. 17.** Сравнение эффектов нагрузки током в стационарном (штриховые линии) и переходном (сплошные) режимах: 1, 3 — в.ч.-мощность в короткоимпульсном (1) и длинноимпульсном (3) режиме; 2, 4 — мощность пучка в короткоимпульсном (2) и длинноимпульсном (4) режиме. За счет конечного времени переходного процесса нагрузки пучком можно ускорять намного более сильный пиковый ток при использовании той же мощности источника.

личных методиках разработки ускорителей и режимах работы можно ознакомиться в работе [112].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка малогабаритных и экономически эффективных ускорителей является важной задачей, без решения которой невозможна практическая реализация многих современных и перспективных систем различного прикладного применения. В обзоре описаны современные и перспективные технологии и инструменты, разработанные при участии автора и использованные им для создания малогабаритных прикладных ускорителей. Рассмотрены основные факторы, определяющие размеры ускорителя (включая подсистемы), и методы их уменьшения. К таким методам относятся повышение рабочей частоты ускорителей с помощью компактных источников с.в.ч. (магнетронов) или миллиметровых волн (гиротронов), повышение ускоряющего градиента с помощью применения новых материалов, технологий изготовления и особого дизайна ускоряющей структуры, а также способы повышения их энергетической эффективности для снижения требований к источнику питания.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Материал данного обзора основан на информации, опубликованной в открытых источниках, и отображает персональный взгляд автора на современные тенденции развития ускорителей. Здесь использованы некоторые заимствованные рисунки и фотографии, взятые из открытых источников. Рисунки, источники которых не приведены в тексте, принадлежат автору и RadiaBeam Technologies (<https://radiabeam.com>).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность своим коллегам из RadiaBeam Technologies за помощь в подготовке материала: S. Boucher, R. Agustsson, P. Carriere, A. Муроку и А.Ю. Смирнову. Автор также благодарит В.А. Долгашева из Стэнфордской ускорительной лаборатории SLAC, США за многочисленные советы и консультации по тематике данного обзора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куцаев С.В. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 2. С. 173. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.02.50352.201-20>
2. Evans L., Bryant P. // J. Instrum. 2008. V. 3. № 8. P. 8001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08001>
3. Feder T. // Phys. Today. 2010. V. 63. № 2. P. 20. <https://doi.org/10.1063/1.3326981>
4. Hamm R.W., Hamm M.E. // Phys. Today. 2011. V. 64. № 6. P. 46. <https://doi.org/10.1063/1.3603918>
5. Завадцев А.А., Завадцев Д.А., Краснов А.А., Собенин Н.П., Куцаев С.В., Чуранов Д.В., Урбант М.О. // ПТЭ. 2011. № 2. С. 101.
6. Kutsaev S.V., Agustsson R., Arodzero A., Berry R., Boucher S., Diego A., Gavryushkin D., Hartzell J.J., Lanza R.C., Smirnov A. Yu., Verma A., Ziskin V. // Radiat. Phys. Chem. 2021. V. 183. P. 109398. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109398>
7. Arodzero A., Boucher S., Kutsaev S.V., Ziskin V. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2017. V. 64. № 7. P. 1629. <https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2638967>
8. Kutsaev S.V., Agustsson R., Arodzero A., Boucher S., Burstein P., Smirnov A. Yu. // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2160. P. 050014. <https://doi.org/10.1063/1.5127706>
9. Kutsaev S.V., Agustsson R., Arodzero A., Boucher S., Hartzell J.J., Murokh A., O'Shea F., Smirnov A. Yu. // Phys. Procedia. 2017. V. 90. P. 115. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.036>
10. Yu V.Y., Landers A., Woods K., Nguyen D., Cao M., Du D., Chin R.K., Sheng K., Kaprealian T.B. // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 2018. V. 101. № 1. P. 144. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.01.048>
11. Kutsaev S.V., Agustsson R., Arodzero A., Berry R., Bezhanov A., Boucher S., Chimalpopoca O., Diego A., Fallace L., Gavryushkin D., Harrison M., Hartzell J.J., McNevin J., Ruelas M., Smirnov A. Yu. et al. // Radiat. Phys. Chem. 2021. V. 184. P. 109494. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109494>
12. Olivo R.A., Da Silva M.V., Garcia F.B., Soares S., Rodrigues V., Morales-Souza H. // Rev. Bras. Hematol. Hemoter. 2015. V. 37. № 3. P. 153. <https://doi.org/10.1016/j.bjhh.2015.03.001>
13. Bendahan J. // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2020. V. 954. P. 161120. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.079>
14. Fanchi J.R. Integrated Reservoir Asset Management. Houston: Gulf Professional Publishing, 2010.
15. Cameron J.F., Clayton C.G. Radioisotope Instruments. Oxford: Pergamon, 1971.

16. BCC Publishing. Global Markets for Sterilization Technologies. 2017.
17. Low- and Middle-income Countries. <https://wellcome.org/grant-funding/guidance/low-and-middle-income-countries>.
18. World Population by Income | Pew Research Center. <https://www.pewresearch.org/global/interactives/global-population-by-income/>
19. Bassaler J.M., Capdevila J.M., Gal O., Lainé F., Nguyen A., Nicolai J.P., Umiastowski K. // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. B. 1992. V. 68. № 1–4. P. 92. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(92\)96056-5](https://doi.org/10.1016/0168-583X(92)96056-5)
20. Быстров П.А., Гордеев А.В., Колоколова А.Ю., Завьялов М.А., Илюхина Н.В., Молин А.А., Павлов Ю.С., Полякова С.П., Прокопенко А.В., Филиппович В.П. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 2. С. 211.
21. Massat M.B. // Appl. Radiation Oncology. 2019. V. 8. № 2. P. 44.
22. Черняев А.П., Варзарь С.М. // Ядерная физика. 2014. Т. 77. № 10. С. 1266.
23. Brady L.W., Yaeger T.E. Encyclopedia of Radiation Oncology. Berlin: Springer, 2013.
24. Hanna S. RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications. Boston: Artech House, 2012.
25. Khan F.M. The physics of radiation therapy. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2009.
26. e2v Magnetrons. <https://www.teledyne-e2v.com/products/rf-power/medical-magnetrons/>
27. Scandinova Systems. <https://scandinaviasystems.com/>
28. CPI Power Tubes. <https://www.cpii.com/product.cfm/8/2>
29. Белоусов А.В., Близнюк У.А., Варзарь С.М., Загоруйко М.В., Осипов А.С., Черняев А.П. // Медицинская физика. 2014. Т. 61. № 1. С. 113.
30. Собенин Н.П., Каминский В.И., Лалаян М.В. Ускоряющие структуры. М.: НИЯУ МИФИ, 2005.
31. Andrés S.V. Ph.D. Thesis. High-gradient accelerating structure studies and their application in hadrontherapy. Valencia: Universidad de Valencia, 2013. 198 p.
32. Wangler T.P. RF Linear Accelerators. New Jersey: Wiley, 2008.
33. Handbook of Medical Imaging, V.1. Physics and Psychophysics / Eds. Van Metter R.L., Beutel J., Kundel H.L. SPIE, 2000.
34. L-3 Magnetrons. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/magnetrons>
35. Frejdovich I.A., Nevsky P.V., Sakharov V.P., Vorob'ev M.Yu., Knapp E.A., Trower W.P., Yamada H., Kleev A., Alimov A.S., Shvedunov V.I., Chernousov Yu.D., Shebolaev I.V., Gavrish Yu.N., Nikolaev V.M. // Proc. 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC/IVESC. 2006. P. 307. <https://doi.org/10.1109/IVELEC.2006.1666306>
36. Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N., Kamanin A.N., Khankin V.V., Kurilik A.S., Ovchinnikova L.Yu., Pakhotov N.I., Shvedunov N.V., Yurov D.S., Shvedunov I.V., Simonov A.S. // Radiat. Phys. Chem. 2019. V. 159. P. 95. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.02.044>
37. НПО ГИКОМ. <http://www.gycom.ru/products/pr1.html>
38. Nezhevenko O.A., Yakovlev V.P., LaPointe M.A., Kozyrev E.V., Shchelkunov S.V., Hirshfield J.L. // Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference. 2005. V. 2005. P. 1922. <https://doi.org/10.1109/PAC.2005.1590958>
39. Faillace L., Behtouei M., Dolgashev V.A., Spataro B., Torrissi G., Variola A. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1596. № 1. P. 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1596/1/012022>
40. Tolkachev A.A., Levitan B.A., Solovjev G.K., Veysel V.V., Farber V.E. // IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 2000. V. 15. № 7. P. 25. <https://doi.org/10.1109/62.854021>
41. Kumar N., Singh U., Singh T.P., Sinha A.K. // J. Fusion Energy. 2011. V. 30. № 4. P. 257. <https://doi.org/10.1007/s10894-010-9373-0>
42. Thumm M. // Fusion Eng. Des. 2003. V. 66–68. P. 69. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(03\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(03)00132-7)
43. Choi E.M., Marchewka C., Mastovsky I., Shapiro M.A., Sirigiri J.R., Temkin R.J. // J. Phys. Conf. Ser. 2005. V. 25. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/25/1/001>
44. Kutsaev S.V., Jacobson B., Smirnov A.Yu., Campese T., Dolgashev V.A., Goncharik V., Harrison M., Murokh A., Nanni E., Picard J., Ruelas M., Schaub S.C. // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 11. № 3. P. 034052. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.034052>
45. Jacob J. CERN Yellow Report CERN-2015-003. 2015. P. 197–216. <https://doi.org/10.5170/CERN-2015-003.197>
46. Formicone G., Custer J. // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2160. № 1. P. 040010.
47. Marchand P. Review and Prospects of RF Solid State Amplifiers for Particle Accelerators // Proc. of IP-AC'17 Conference. 2017. <https://doi.org/10.1063/1.5127690>
48. Heid O., Hughes T. // Proc. of 25th International Linear Accelerator Conference, LINAC2010. 2011. P. 905
49. Smirnov A.Y., Krasnov A., Nikolskiy K., Tikhomirova N., Ivanov E., Heid O., Hughes T. // Proc. of LINAC2012. 2012. P. 672.
50. 2.45 GHz Solid State Module. <https://www.ec21.com/product-details/Solid-state-Microwave-Generator-2450mhz-11198977.html>
51. Agustsson R., Boucher S., Kutsaev S. Split structure particle accelerators. U.S. Patent WO2018222839A1 USA. 2018.
52. Agustsson R., Boucher S., Kutsaev S. Modified split structure particle accelerators. Pat. WO2020061204A1 USA. WIPO (PCT), 2019.
53. Derby B., Wallach E.R. // J. Mater. Sci. 1984. T. 19. № 10. C. 3140–3148. <https://doi.org/10.1007/BF00549797>
54. Grudiev A., Wuensch W. // Proc. 22nd International Conference, Linac 2004. 2004. P. 779.
55. Syratchev I., Schulte D., Adli E., Taborrelli M. // Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference PAC'07. 2007. P. 2194. <https://doi.org/10.1109/PAC.2007.4441194>

56. *Kutsaev S.V., Agustsson R., Arodzero A., Boucher S., Murokh A., Smirnov A.Yu.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2019. V. 459. P. 179.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.08.029>
57. *Pearce R., Liam W.* ITER Vacuum Handbook. ITER Organization, 2019.
58. *Hinchliffe I., Battaglia M.* // Phys. Today. 2004. V. 57. № 9. P. 49.  
<https://doi.org/10.1063/1.1809092>
59. *Murayama H., Peskin M.E.* // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1996. V. 46. № 1. P. 533.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.46.1.533>
60. *Wilson I.* // Phys. Rep. 2004. V. 403–404. № 1–6. P. 365.  
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.028>
61. *Dal Forno M., Dolgashev V., Bowden G., Clarke C., Hogan M., McCormick D., Novokhatski A., Spataro B., Weathersby S., Tantawi S.G.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2016. V. 19. № 1. P. 011301.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.011301>
62. *Chou P.J., Bowden G.B., Copeland M.R., Henke H., Menegat A., Siemann R.H.* // Proc. IEEE Part. Accel. Conf. PAC'97. 1998. V. 1. P. 464.  
<https://doi.org/10.1109/PAC.1997.749688>
63. *Chou P.J., Bowden G.B., Copeland M.R., Farvid A., Kirby R.E., Menegat A., Pearson C., Shere L., Siemann R.H., Spencer J.E., and Whittum D.H.* // AIP Conf. Proc. 2009. V. 398. № 1. P. 501.  
<https://doi.org/10.1063/1.53064>
64. *Whitehouse D.J.* // Meas. Sci. Technol. 1997. V. 8. № 9. P. 955.  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/9/002>
65. *Smirnov A.V., Agustsson R., Berry R., Boucher S., Chen Y., Kutsaev S., O'Shea F.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2020. V. 953. P. 163160.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163160>
66. *Langeveld W.G.J., Gozani T., Ryge P., Sinha S., Shaw T., Strellis D.* // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1525. P. 690.  
<https://doi.org/10.1063/1.4802416>
67. *Kluchevskaia Y.D., Polozov S.M.* // Proc. of 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization, BDO'14. 2014. P. 86.  
<https://doi.org/10.1109/BDO.2014.6890033>
68. *Zha H., Grudiev A.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2017. V. 20. P. 042001.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.042001>
69. *Zha H., Dolgashev V., Grudiev A.* // Proc. of 6th International Particle Accelerator Conference IPAC'15. 2015. P. 2147.  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-TUP-TY054>
70. EDM Intelligent Solutions. <https://www.edmd-ept.com/manufacturing-services/>
71. *Vanderawera W., Garzon M., Aerts T., Klocke F., Lauwers B.* // Proc. of the 8th international conference on Multi-Material Micro Manufacture. 2010. P. 285.  
[https://doi.org/10.3850/978-981-07-0319-6\\_242](https://doi.org/10.3850/978-981-07-0319-6_242)
72. *Shanahan J.* Trends in Micro Machining Technologies // <https://www.makino.com/resources/content-library/article/archive/trends-in-micro-machining-technologies/315>. 2004.
73. *Howard S., Starovoitova V.N.* // Appl. Radiat. Isot. 2015. V. 96. P. 162.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.12.003>
74. *Whitham K., Anamkath H., Evans K., Lyons S., Palmer D., Miller R., Trea, P. Zante T.* // Proc. of the 1992 linear accelerator conference. 1992. P. 618.
75. *Bacci A., Alesini D., Antici P., Bellaveglia M., Boni R., Chiadroni E., Cianchi A., Curatolo C., Di Pirro G., Esposito A., Ferrario M., Gallo A., Gatti G., Ghigo A., Migliorati M. u др.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. № 19. P. 194508.  
<https://doi.org/10.1063/1.4805071>
76. *Dolgashev V.A.* // Presented at the 2nd European Advanced Accelerator Concepts Workshop (EAAC 2015). 2015. [https://agenda.infn.it/event/8146/contributions/71603/attachments/51963/61378/Dolgashev\\_EAAC2012\\_High\\_gradient\\_metallic\\_structures\\_final\\_14Sep2015.pdf](https://agenda.infn.it/event/8146/contributions/71603/attachments/51963/61378/Dolgashev_EAAC2012_High_gradient_metallic_structures_final_14Sep2015.pdf)
77. *Dolgashev V.A., Faillace L., Higashi Y., Marcelli A., Spataro B., Bonifazi R.* // J. Instrum. 2020. V 15. № 1. P. P01029.  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/01/P01029>
78. *Döbert S.* // Conference Record of the International Power Modulator Symposium and High Voltage Workshop. 2004. P. 60.  
<https://doi.org/10.1109/MODSYM.2004.1433506>
79. *Kovermann J.W.* Ph.D. Thesis. Comparative Studies of High-Gradient Rf and Dc Breakdowns. Aachen Tech. Hochsch., 2010. 147 p.
80. *Kutsaev S.V., Agustsson R., Boucher S., Fischer R., Murokh A., Mustapha B., Nassiri A., Ostroumov P.N., Plastun A., Savin E., Smirnov A.Yu.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2017. V. 20. № 12. P. 120401.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.120401>
81. *Kutsaev S.V., Agustsson R., Berry R., Borland M., Chao D., Chimalpopoca O., Gavryushkin D., Gusarova M., Hartzell J., Meyer D., Nassiri A., Smirnov A.Yu., Smith T., Sun Y., Verma A. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. № 4. P. 044701  
<https://doi.org/10.1063/5.0002765>
82. *Othman M.A.K., Picard J., Schaub S., Dolgashev V.A., Lewis S.M., Neilson J., Haase A., Jawla S., Spataro B., Temkin R.J., Tantawi S., Nanni E.A.* // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117. № 7. P. 073502.  
<https://doi.org/10.1063/5.0011397>
83. *Dolgashev V., Tantawi S., Higashi Y., Spataro B.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. № 17. P. 171501.  
<https://doi.org/10.1063/1.3505339>
84. *Kilpatrick W.D.* // Rev. Sci. Instrum. 1957. V. 28. № 10. P. 824.  
<https://doi.org/10.1063/1.1715731>
85. *Peter W., Faehl R.J., Kadish A., Thode L.E.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. V. 30. № 4. P. 3454.  
<https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4336689>
86. *Dolgashev V.A.* // Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference PAC'03. 2003. V. 2. P. 1267.  
<https://doi.org/10.1109/PAC.2003.1289674>

87. *Kubiak T.* // Br. J. Radiol. 2016. V. 89. № 1066. P. 20150275.  
<https://doi.org/10.1259/bjr.20150275>
88. *Grudiev A., Wuensch W.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2009. V. 12. P. 102001.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.12.102001>
89. *Degiovanni A., Bonomi R., Garlasché M., Verdú-Andrés S., Wegner R., Amaldi U.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2018. V. 890. P. 1.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.079>
90. *Laurent L., Tantawi S., Dolgashev V., Nantista C., Higashi Y., Aicheler M., Heikkinen S., Wuensch W.* // Phys. Rev. Spec. Top. – Accel. Beams. 2011. V. 14. № 4. P. 041001.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.14.041001>
91. *Pritzkau D.P.* RF Pulsed Heating. Stanford University, 2001.
92. *Gamzina D., Kozina M., Mehta A., Nanni E.A., Tantawi S., Welander P.B., Horn T., Ledford C.* // Proc. of 2019 International Vacuum Electronics Conference, IVEC 2019. 2019. P. 1.  
<https://doi.org/10.1109/IVEC.2019.87447501>
93. *Turner R.B., Ungrin J.* // Proc. of the 1981 Linear Accelerator Conference. 1981. P. 77.
94. *Hansborough L.D., Clark W.L., DePaula R.A., Martinez F.A., Roybal P.L., Wilkerson L.C., Young L.M.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. B. 1987. V. 24–25. Part 2. P. 863.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(87\)80266-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(87)80266-5)
95. *Singh R., Pant K.K., Lal S., Yadav D.P., Garg S.R., Raghuvanshi V.K., Mundra G.* // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 390. № 1. P. 012025.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/390/1/012025>
96. *Simakov E.I., Dolgashev V.A., Tantawi S.G.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2018. V. 907. P. 221.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.085>
97. *Węglowski M.S., Błacha S., Phillips A.* // Vacuum. 2016. V. 130. P. 72.  
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004>
98. *Polyakov V.A., Shchedrin I.S.* // Proc. of EPAC'94. 1994. P. 1489.
99. *Gusarova M.A., Kaminsky V.I., Kravchuk L.V., Kutsaev S.V., Lalayan M.V., Sobenin N.P., Tarasov S.G.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2009. V. 599. № 1. P. 100.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.09.047>
100. *Engelberg E.Z., Yashar A.B., Ashkenazy Y., Assaf M., Popov I.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. № 8. P. 083501.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.083501>
101. *Calister W.D., Rethwisch D.G.* Materials Science and Engineering: An Introduction. New York: Wiley, 2018.
102. *Guo Y.B.* // Numerical Simulations – Applications, Examples and Theory. InTech, 2011.
103. Curtiss-Wright Laser Peening. <https://cwst.com/laser-peening/>
104. *Bohm M., Kaufman J., Brajer J., Rostohar D.* // MM Science Journal. 2019. V. 2019. December. P. 3643.  
[https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019\\_12\\_2019115](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_12_2019115)
105. *Nasr M., Nanni E., Breidenbach M., Weathersby S., Oriunno M., Tantawi S.* arXiv:2011.00391. 2020.
106. *Saversky A.J., Shchedrin I.S.* // Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference PAC'93. 1993. V. 2. P. 1030.
107. *Benard J., Helmy El Minyawi N., Nguyen T.V.* // Rev. Phys. Appliquée. 1978. V. 13. № 10. P. 483. doi ff. ffjpa-00244478f  
<https://doi.org/10.1051/rphys-ap:019780013010048300ff>
108. *Rosenzweig J.B., Cahill A., Dolgashev V., Emma C., Fukasawa A., Li R., Limborg C., Maxson J., Musumeci P., Nause A., Pakter R., Pompili R., Roussel R., Spataro B., Tantawi S.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. № 2. P. 023403.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.023403>
109. *Cahill A.D., Rosenzweig J.B., Dolgashev V.A., Tantawi S.G., Weathersby S.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2018. V. 21. № 10. P. 102002.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.102002>
110. *Kelliher M.G., Nygard J.C., Ghle A.J.* // IRE Trans. Nucl. Sci. 1956. V. 3. № 3. P. 1.  
<https://doi.org/10.1109/TNS2.1956.4315527>
111. *Милованов О.С., Собенин Н.П.* Техника сверхвысоких частот. М.: Атомиздат, 1980.
112. *Kutsaev S.V.* // Eur. Phys. J. Plus. 2021. V. 136. № 4. P. 446  
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01312-3>