

12;13

Особенности режима сверхвысокочастотных пробоев в ускоряющей структуре с параллельной связью

© Ю.Д. Черноусов, И.В. Шеболаев

Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
Новосибирск
E-mail: chern@catalysis.ru

Поступило в Редакцию 27 октября 2016 г.

Приведены результаты изучения режима сверхвысокочастотных пробоев в ускоряющей структуре с параллельной связью. Показано, что пробой происходит, как правило, в отдельном резонаторе структуры. На остальные резонаторы и структуру в целом пробой не влияет. Это объясняется тем, что соседние ускоряющие резонаторы практически не связаны друг с другом. Данное свойство повышает устойчивость структуры к разрушению от пробоев и может быть использовано для повышения амплитуды ускоряющего поля при создании ускорителей с большим количеством ускоряющих структур.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.07.44462.16547

Современные линейные ускорители электронов средней и высокой энергии имеют модульную конструкцию, содержат набор одинаковых последовательно расположенных ускоряющих секций [1–3]. Как правило, в таких ускорителях применяются ускоряющие структуры бегущей

волны. Обсуждается вопрос об использовании структур стоячей волны для создания ускорителей и исследуются их свойства [4]. Однако как структуры бегущей волны, так и структуры стоячей волны являются структурами с последовательной связью. В таких стандартных структурах СВЧ-энергия вводится в один из резонаторов и затем последовательно во все остальные. Задача данной статьи — показать особенности работы ускоряющей структуры с параллельной связью в режиме пробоев и выявить ее преимущества при создании многосекционных ускоряющих систем.

Предельный темп ускорения ограничен возникновением СВЧ-пробоев в структуре при высокой напряженности ускоряющего электрического поля. При каждом пробое в одном из ускоряющих зазоров (резонаторов) стандартной структуры происходит поглощение всей запасенной СВЧ-энергии, по-видимому, в основном вблизи места пробоя, что приводит к существенному изменению параметров пучка, уменьшению его энергии, нагреву элементов поверхности структуры, выбросу адсорбированных газов, плавлению и испарению материала поверхности, ухудшению вакуума. Импульс тока ускоренных частиц при пробое в одной из секций ускорителя является потерянным. Для современных проектов приемлемым считается один пробой в одной структуре за 10 h работы (при частоте повторения импульсов 60 Hz и общем количестве ускоряющих структур около 18 000 [3]). Это означает, что максимальное число (темп) пробоев в таком ускорителе α в пересчете на один импульс составляет: для одной стандартной структуры $\alpha_S \approx 4.6 \cdot 10^{-7}/\text{pulse}$, для одного резонатора (при 100 резонаторах в структуре, т. е. $1.8 \cdot 10^6$ резонаторов в ускорителе) $\alpha_R \approx 4.6 \cdot 10^{-9}/\text{pulse}$ и для всего ускорителя в целом $\alpha_{ACC} \approx 8.3 \cdot 10^{-3}/\text{pulse} \approx 10^{-2}/\text{pulse}$.

В структуре с параллельной связью (СПС) нового типа СВЧ-энергия сначала вводится в промежуточный возбуждающий резонатор и из него параллельно в ускоряющие резонаторы [5–8]. В такой структуре пробой в отдельном резонаторе не приводит к потере всей запасенной в структуре СВЧ-энергии, и только пробой в нескольких резонаторах одновременно может приводить к потере импульса ускоряемого тока пучка. Характер СВЧ-пробоев изучался в 5-резонаторном макете СПС (рис. 1) в режиме тренировки при высоком уровне мощности. Ускоряющие резонаторы имеют цилиндрическую форму, с центральным отверстием диаметром 10 mm для пролета пучка (рис. 2). Макет выполнен разборным, для вакуумных уплотнений применена индиевая проволока.

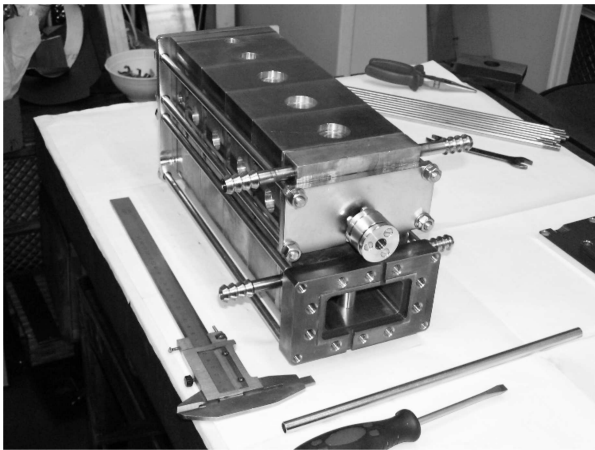


Рис. 1. Внешний вид 5-резонаторной СПС, на которой проводилось изучение СВЧ-пробоев. Изготовлено на опытном производстве ИЯФ СО РАН.

В структуру от клистрона подавалась СВЧ-мощность с импульсным значением около 1.6 MW длительностью $5\text{ }\mu\text{s}$. При этом максимальная расчетная напряженность поля на поверхности цилиндрических резонаторов структуры, в области отверстия для пролета пучка, составляла около 70 MV/m . Регистрировались (рис. 3, *a-d*) огибающие импульсов падающей СВЧ-мощности 1, отраженной от ускоряющей структуры СВЧ-мощности 2, и сигнал 3 с емкостного зонда из 5-го резонатора, пропорциональный величине запасенной СВЧ-энергии в нем.

Режим без пробоев отражен на рис. 3, *a*. При пробое в 5-м резонаторе структуры (рис. 3, *b*) вся запасенная в нем СВЧ-энергия рассеивается за время порядка 50 ns (кривая 3) и затем до конца импульса уже не восстанавливается. Во время пробоя резонатор нагружается продуктами разряда, его добротность уменьшается, частота, по-видимому, сильно смещается, и СВЧ-энергия в этот резонатор из подводящего возбуждающего резонатора уже не поступает. Резонатор с пробоем отключается от возбуждающего резонатора. Во время пробоя часть запасенной СВЧ-энергии из ускоряющего резонатора излучается в возбуждающий резонатор и далее из него в подводящий волновод (короткий, порядка 100 ns выброс на отраженном сигнале 2). СПС

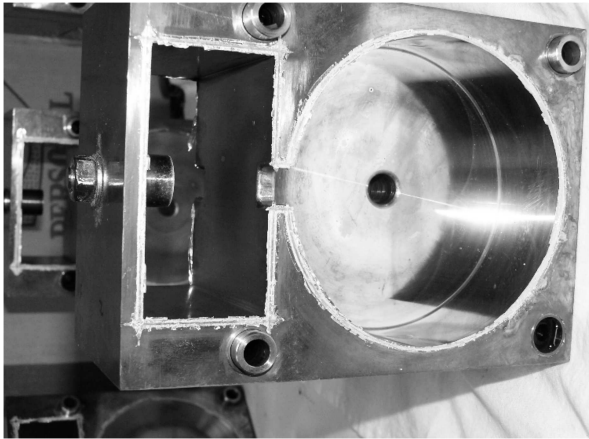


Рис. 2. Вид внутренней полости одного из резонаторов СПС после работы в режиме пробоев.

теперь уже содержит только 4 ускоряющих резонатора, коэффициент связи по входу меняется, поэтому амплитуда отраженного сигнала несколько возрастает.

Если пробой происходит не в 5-м резонаторе, а в одном из первых, то происходят процессы, подобные описанным выше, однако на 5-м резонаторе это практически не отражается, что видно по кривой 3 (рис. 3, с). Амплитуда импульса 3 слегка возрастает, что связано с тем, что из-за пробоя отключился один из резонаторов структуры и он больше не поглощает СВЧ-мощность генератора. Эта мощность перераспределяется на остальные резонаторы структуры.

На рис. 3, d приведен редкий случай пробоя в течение одного импульса в двух резонаторах, причем вначале произошел пробой в одном из первых резонаторов и только потом в 5-м. Пробой в одном из первых резонаторов не отразился на величине запасенной энергии в 5-м, а при пробое в 5-м резонаторе вся запасенная в нем энергия за время порядка 50 ns рассеялась.

Вид внутренней полости одного из резонаторов 5-резонаторной СПС после продолжительной работы приведен на рис. 2. Видны следы пробоев, участки напыления индия на поверхности резонатора.

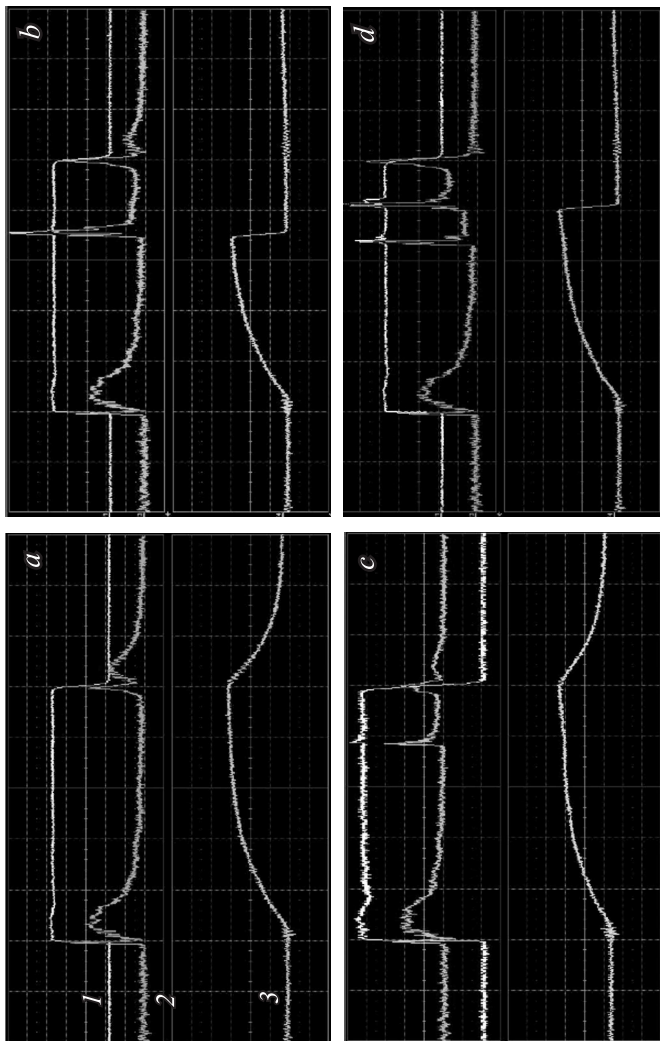


Рис. 3. Осциллограммы, характеризующие переходные процессы в СПС в режиме пробоев.

Значения β при разных n

n	1	2	5	9
β	$5.5 \cdot 10^{-9}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	0.12

Приведенные экспериментальные результаты показывают, что ускоряющие резонаторы СПС практически не влияют друг на друга, поэтому можно считать, что пробой в каждом из них носит вероятностный характер. Если β — вероятность пробоя в течение импульса в одном отдельно взятом резонаторе СПС, то для ускорителя, состоящего из N резонаторов, вероятность α пробоя в течение того же импульса в n резонаторах определяется из соотношения

$$\alpha = N\beta^n. \quad (1)$$

Оценим по данным [3] требование к свойствам отдельного резонатора ускоряющей структуры, если весь ускоритель [2], состоящий из 18 000 структур, выполнен из СПС, каждая из которых содержит 100 резонаторов. Положим, что при пробое в течение одного импульса в n резонаторах такой импульс считается потерянным, и пусть α_n — вероятность этого события. Отметим, что α_n также равна максимальному темпу пробоев в ускорителе в целом α_{ACC} . Тогда, полагая $\alpha_n = 10^{-2}/\text{pulse}$, $N = 1.8 \cdot 10^6$, из соотношения $\beta = (\alpha/N)^{1/n}$ находим значения β для разных n .

Из таблицы видно, что значения параметра β резонаторов быстро растут с увеличением n . Например, если положить $n = 2$, т.е. пробой происходит в течение одного импульса ускорения пучка одновременно в двух резонаторах ускорителя в целом (напомним, это $N = 1.8 \cdot 10^6$ резонаторов), тогда вероятность пробоя в отдельном резонаторе $\beta = 7.4 \cdot 10^{-4}/\text{pulse}$. Для всего ускорителя такие события будут не так уж редки. При $N = 1.8 \cdot 10^6$, $n = 2$, $\beta = 7.4 \cdot 10^{-4}/\text{pulse}$ из (1) получаем исходное значение $\alpha \approx 10^{-2}$, т.е. каждый сотый импульс будет потерян. Если из режима ускорения исключаются одновременно два резонатора, при наборе энергии в каждом резонаторе СПС порядка 1 MeV, полный недобор энергии в потерянном импульсе будет около 2 MeV. Сопоставляя значение $\beta = 7.4 \cdot 10^{-4}/\text{pulse}$ для СПС с приведенным ранее значением $\beta = 4.6 \cdot 10^{-9}/\text{pulse}$ для стандартной структуры, видим, что

они при одинаковых требованиях к ускорителю в целом отличаются примерно на 5 порядков.

Зависимость числа пробоев в структуре от напряженности поля (темп пробоев) тщательно изучалась для структур, предназначенных для будущих ускорителей. Зависимость носит экспоненциальный характер, и в соответствии с графиками работы [3] темп пробоев возрастает на порядок при повышении напряженности ускоряющего поля на 10% в рабочей области напряженности ускоряющего поля 50–70 MV/m. В соответствии с этими данными и оценками [3], а также экспериментальными данными и оценками, приведенными в настоящей работе, если считать импульс рабочим при пробое в одном резонаторе, а при пробое в течение импульса в двух резонаторах такой импульс считать потерянным, в СПС, по сравнению со стандартными структурами, можно на 40–50% повышать напряженность ускоряющего поля.

Авторы благодарны сотрудникам ИЯФ СО РАН, ИХКГ СО РАН за плодотворное сотрудничество, помощь в изготовлении элементов ускорителя.

Список литературы

- [1] *Wangler Th.P.* RF Linear Accelerators. WILEY-VCH, 2008.
- [2] International Linear Collider. Technical Review Committee. Second Report 2003. SLAC-R-606.
- [3] *Döbert S.* // Proc. LINAC. 2004. P. 513–517.
- [4] *Dolgashev V.A., Adolphsen C., Burke D.L.* et al. // Proc. PAC. 2003. P. 1264–1266.
- [5] *Черноусов Ю.Д.* Способ возбуждения ускоряющей структуры: Пат. № 2427112. Б.И. 20.08.2011. № 23.
- [6] *Черноусов Ю.Д., Иванников В.И., Шеболаев И.В., Левичев А.Е., Павлов В.М.* Ускоряющая структура с параллельной связью: Пат. № 2472244. Б.И.10.01.2013. № 1.
- [7] *Барняков А.М., Левичев А.Е., Никифоров Д.А.* и др. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 1. С. 142–146.
- [8] *Chernousov Yu., Ivannikov V., Shebolaev I.* et al. // Proc. RUPAC. 2012. P. 164–166.