

Разработка и исследование в НИЦ ХФТИ высокочастотных источников электронов для линейных резонансных ускорителей

В.А.Кушнир

НИК “УСКОРИТЕЛЬ” НИЦ ХФТИ, г. Харьков

Развитие физики и техники линейных резонансных ускорителей электронов (ЛУЭ) последних десятилетий ознаменуется повышенными требованиями к качеству пучка и, в первую очередь к его яркости, т.е. к его интенсивности и эмиттансу. В значительной мере эта тенденция была инициирована разработкой двух типов установок, использующих линейные ускорители электронов: линейных электрон-позитронных коллайдеров и лазеров на свободных электронах (ЛСЭ).

Известно, что яркость пучка на выходе ЛУЭ в основном определяется инжекционной системой ускорителя. В настоящее время доминируют две схемы построения инжекционных систем, удовлетворяющих высоким требованиям к интенсивности и эмиттансу пучка. В традиционных инжекционных системах формирование плотных электронных сгустков осуществляется на субгармониках рабочей частоты основного ускорителя с использованием субгармонических группирователей. Такая схема позволяет получать большой заряд в сгустках (см., например, [1]), однако является весьма сложной. Альтернативным решением построения инжекторов с большой яркостью пучка являются системы, основанные на использовании высокочастотных источников электронов - ВЧ-пушек [2]. ВЧ-пушка в общем случае представляет собой объемный СВЧ-резонатор с электрическим типом колебаний (например, E_{010}), настроенный на частоту ускорителя либо ее субгармонику. Эмиттирующая поверхность катода находится непосредственно в полости резонатора, где напряженность электрического поля, как правило, составляет $\sim(10^5 - 10^6)$ В/см. Это создает необходимые условия для формирования высокоэнергетичных ($10^5 - 10^6$ эВ) электронных сгустков и получения малого эмиттанса пучка. В зависимости от типа использованного катода длительность импульса тока на выходе пушки может изменяться в значительных пределах. Так в пушках с термоэмиссионным катодом [3-5,14] типичная длительность импульса - 1.5-8.0 мкс. При использовании фотоэмиссионного катода [6] длительность импульса определяется длительностью импульса лазерного излучения и может составлять несколько пикосекунд и даже сотни фемтосекунд [7]. Таким образом, применение ВЧ-пушки в качестве

основного элемента инжекционной системы позволяет создавать ускорители с высокой яркостью пучка. Подтверждением этого являются сведения, приведенные в [8], из известных в мире 111 ЛУЭ, работающих на исследовательские программы, 18 используют в качестве источников электронов ВЧ-пушки.

В 1988 году в НИК “Ускоритель” НИЦ ХФТИ были начаты работы по исследованию и созданию электронных ВЧ-пушек для ЛУЭ различного назначения. Первые разработанные нами ВЧ-пушки с термоэмиссионными катодами (ТЭК) были предназначены для работы в составе ускорителя ЛУ-60 [9, 10]. В ЛУЭ ВЧ-пушки с ТЭК нашли широкое применение начиная с середины восьмидесятых годов, когда их достоинства были ярко продемонстрированы J. M. Madey при создании ЛСЭ на ускорителе Mark III [11, 12]. Вместе с тем необходимо отметить, что объемные резонаторы с установленным в нем ТЭК в качестве источника электронов задолго до этого начали успешно использоваться в микротронах [13]. ВЧ-пушки с ТЭК являются весьма сложными объектами с точки зрения происходящих в них физических процессов. Рассмотрим качественно основные из них.

1. В ВЧ-пушке с ТЭК эмиссия происходит на протяжении всего ускоряющего полупериода высокочастотного поля. При этом часть электронов не успевают покинуть резонатор за время ускоряющего полупериода и, ускоряясь в обратном направлении, бомбардируют катод. Это явление, получившее в мировой литературе название обратной бомбардировки (backbombarding effect), вносит существенное ограничение области применения ВЧ-пушек в ЛУЭ [14-16]. Поскольку бомбардировка катода приводит к разогреву его поверхности за время СВЧ – импульса и к увеличению средней температуры, для большинства разработанных пушек длительность и частота повторения импульсов не превышает 2-4 мкс и 25 Гц соответственно.

2. Как уже отмечалось выше, эмиссия электронов с поверхности катода происходит в полях значительной напряженности $\sim(10^5 - 10^6)$ В/см. В этих условиях плотность тока эмиссии в соответствии с эффектом Шоттки [17] изменяется в течение всего полупериода,

что играет важную роль в формировании пучка в резонаторной системе пушки.

3. При значительных токах эмиссии, когда осязаемая часть электромагнитной энергии, запасенной в резонаторе передается частицам пучка, на динамику электронов оказывает существенное влияние уменьшение напряженности и изменение фазы поля в резонаторе в течение импульса - “ эффект токовой подгрузки”.

Совокупность перечисленных факторов в общем случае приводит к неоднородности характеристик пучка на выходе пушки в течение импульса. Поэтому для использования однорезонаторных ВЧ-пушек с ТЭК в прецизионных ускорителях используют специальные магнитные системы, осуществляющие селекцию частиц по энергии и продольную компрессию электронных сгустков [3,18]. Альтернативным решением является разработка более сложных специально оптимизированных резонансных систем, состоящих, в частности, из нескольких резонаторов [19,20], либо резонаторов с более высоким, чем E_{010} , типом колебаний [21].

Наиболее часто в ВЧ-пушках используют катоды из гексобарида лантана, импрегнированные и прессованные Ва-Ni термоэмиссионные катоды. Нами в основном использовались Ва-Ni – катоды [22], обладающие при температуре $\approx 800^\circ\text{C}$ низкой работой выхода ≈ 1.8 эВ, и позволяющие проводить неоднократные напуски воздуха без существенного ухудшения эмиссионных свойств. С 1989 года в НИК “Ускоритель” ННЦ ХФТИ были разработаны несколько ВЧ-пушек с ТЭК.

1. Однорезонаторная ВЧ-пушка [23] была разработана в 1989-1990гг для ускорителя ЛУЭ-60 [9,10], который предназначался для использования в качестве инжектора в компактный источник синхротронного излучения СКН-600. Пушка представляет собой резонатор с E_{010} – типом колебаний (рабочая частота ≈ 2797 МГц) с установленным в нем Ва-Ni катодом диаметром 4.5 мм. Для компрессии электронного сгустка использовалась магнитная система с углом поворота пучка 270° (α - магнит) [18]. Это позволяло формировать на входе в ускоряющую секцию с $\beta_\phi = 1$ сгустки с фазовой протяженностью около 5° при энергии частиц 0.5 МэВ и током пучка 100 мА.

2. Двухрезонаторная универсальная ВЧ-пушка [5,24], предназначенная для использования в линейных резонансных ускорителях с повышенными требованиями к яркости пучка. Основной особенностью конструкции ВЧ-пушки является возможность перестраивать частоту каждого из резонаторов и, тем самым, изменять распределение ускоряющего поля вдоль оси пушки, а также использовать различные типы катодов с диаметром ≤ 8 мм. Эта пушка и в настоящее время эксплуатируется в составе ускорительной установки ЛИК (Лазерный Инжекторный Комплекс) [25,26].

При использовании Ва-Ni – катода диаметром 5 мм, работающего в режиме термоэмиссии, ВЧ-пушка обеспечивает инжекцию в ускоряющую секцию пучка со следующими характеристиками: энергия частиц -0.7-0.9 МэВ, импульсный ток -1.5 А, фазовая протяженность сгустка - $\leq 50^\circ$, длительность импульса тока - 0.7-1.5 мкс.

3. Многорезонаторная ВЧ-пушка [27], предназначенная для работы в режиме высокой средней интенсивности пучка. Резонансная система пушки оптимизировалась для получения минимальной мощности потока электронов, бомбардирующей поверхность катода. Так, при импульсном токе пучка на выходе пушки ≈ 0.5 А и энергии частиц ≈ 0.8 МэВ импульсная мощность потока обратных электронов составляет 21 кВт, что в пять раз меньше, чем для обычной однорезонаторной пушки.

В ходе создания ВЧ-пушек с ТЭК были разработаны методы настройки и измерения характеристик резонансных систем пушек [28-30], детально проработана технология их изготовления и методы экспериментального исследования.

Исследованию эффекта обратной бомбардировки нами уделялось особое внимание, поскольку, как указывалось выше, это явление существенно влияет на характеристики пучка на выходе пушки. В частности, были изучены нестационарные температурные процессы на поверхности катодов различных типов под воздействием потока обратных электронов [31]. Показано, что на величину внутриимпульсного разогрева поверхности катода оказывает влияние не только теплофизические свойства материала катода и мощность пучка бомбардирующих электронов, но и их распределение по энергиям. Последнее определяет глубину проникновения частиц в материал катода и время релаксации температурного поля на поверхности. Поэтому при разработке высокочастотных электронных пушек с ТЭК для уменьшения внутриимпульсного разогрева катода следует не только минимизировать мощность потока обратных электронов, но и создавать условия, при которых в спектре обратных электронов количество низкоэнергетичных частиц будет минимальным.

В 1992 г. на ускорителе ЛУЭ-60 была показана возможность устойчивой работы однорезонаторной ВЧ-пушки с Ва-Ni-катодом при выключенном источнике подогрева катода. Рабочая температура поверхности поддерживалась только за счет обратной электронной бомбардировки. В эксперименте частота следования импульсов составляла 50 Гц, длительность импульса ≈ 2 мкс, импульсный ток ≈ 0.8 А. Результаты этого эксперимента имеют принципиальное значение, поскольку позволяют исследовать вопрос о создании ВЧ-пушек, где бомбардировка катода будет сознательно использоваться для нагрева поверхности

катода, что имеет место, например, в некоторых магнетронных СВЧ-генераторах.

В 1993-1995 гг. сотрудниками ННЦ ХФТИ совместно с лабораторией лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) Пекинского института физики высоких энергий (BFEL, ИНЕР, Beijing, China) на ускорителе-инжекторе BFEL был реализован один из методов уменьшения влияния воздействия обратной бомбардировки на режим работы ВЧ-пушки [14,16]. В результате проведенной работы длительность импульса тока на выходе ВЧ-пушки была увеличена с 4 до 5 нс, что позволило в декабре 1993 г получить режим генерации ЛСЭ. В ходе совместных исследований в ИНЕР был создан экспериментальный стенд для исследования ВЧ-пушек, выполнен ряд интересных экспериментов. Так, было проведено прямое измерение увеличения температуры поверхности катода в течение импульса. Полученные результаты согласуются с расчетными данными, приведенными в [30].

При разработке ВЧ-пушек с ТЭК для осуществления целенаправленного поиска геометрии резонаторной системы важно знать поведение характеристик пучка при изменении распределения электрического поля. В [32] предложена методика оптимизации геометрии резонаторов ВЧ-пушки с точки зрения получения минимального эмиттанса, однако эта методика не учитывает эффект Шоттки. Кроме того, необходимо знать поведение других характеристик пучка, например, мощности обратных электронов, при изменении геометрии резонатора. С этой целью нами методом численного моделирования с использованием программ SUPERFISH и PARMELA были проведены исследования влияния распределения осевого электрического поля ВЧ-пушки с ТЭК на динамику электронов [32-34].

Использование ТЭК в ВЧ-пушках не дает возможности без применения специальных устройств получать пучки с длительностью импульса тока меньше времени установления колебаний в резонансной системе пушки (например, 10^{-9} - 10^{-7} сек). Генерацию таких пучков можно реализовать используя фотоэмиссионный катод, облучаемый лазером. Длительность импульса тока в этом случае определяется длительностью импульса лазерного излучения. В 1991 году в ННЦ ХФТИ были начаты работы в этом направлении [5,25,35]. В качестве фотокатода нами использовался Ва-Ni-катод, температура которого не достигала значений, при которых имела место термоэмиссия. При облучении такого катода излучением с длиной волны ≈ 350 нм при напряженности поля на катоде 30 МВ/м был получен квантовый выход $\sim 10^{-3}$. Экспериментально изучены зависимости фотоэмиссионного тока на выходе пушки от напряженности электрического поля и температуры катода. Показана возможность получения плотности тока фотоэмиссии до 300 А/см² без разрушения поверхности катода.

На базе проведенных предварительных исследований были разработаны и созданы сильноточная ВЧ-пушка и мощная специализированная лазерная система. Используемая в экспериментах лазерная установка представляла собой Nd:YAG задающий генератор с модулированной добротностью и двухпроходный усилитель с набором преобразователей частоты, обеспечивающих возможность работы на 2, 3 и 4 гармониках частоты основного излучения ($\lambda = 1064$ нм). Максимальная энергия в импульсе длительностью 7 нс соответственно равна 60, 10 и 6 мДж, частота повторения импульсов ≤ 25 Гц. Лазер снабжен фокусирующей системой и системой дистанционного управления. Сильноточная ВЧ-пушка [35], состоящая из одиночного E_{010} -резонатора, была разработана для инжектора пучка наносекундной длительности импульса тока. При облучении катода излучением с $\lambda = 355$ нм, (энергия в импульсе 7 нс составляла 5 мДж) был получен импульсный ток на выходе пушки 11 А при длительности импульса 7 нс и энергии частиц 250 - 300 кэВ.

Созданная в 1995-1996 гг. универсальная двухрезонаторная ВЧ-пушка [5] предназначалась для работы как с термо- так и с фотоэмиссионными катодами. При облучении Ва-Ni катода излучением с длиной волны 355 нм на выходе пушки при длительности импульса 7 нс и энергии излучения < 1.5 мДж получен импульсный ток 2.5 А. Энергия электронов превышала 300 кэВ. Расчетная квантовая эффективность катода, используемого в этих экспериментах, составляла $\sim 10^{-4}$. При увеличении энергии лазерного излучения до 4 мДж мы наблюдали появление тока, вызванного импульсным разогревом поверхности катода. Длительность импульса тока на выходе пушки в этом случае достигала 150 нс, амплитуда - 5 - 6 А.

Таким образом, получение на выходе ВЧ-пушек электронных пучков наносекундной длительности может быть решено путем использования фотокатодов и лазерных систем. В тоже время изучение возможности использования в ВЧ-пушках альтернативных типов катодов для получения интенсивных пучков с длительностью импульса 10^{-8} - 10^{-7} сек представляет несомненный интерес. Одним из возможных типов катодов для решения этой задачи является металлодиэлектрический катод (см, например, [36]), исследование которого в СВЧ-полях значительной напряженности было проведено нами в 1997-1998 гг. [37]. В ходе проведенных экспериментов на выходе пушки с металлодиэлектрическим катодом был получен пучок с энергией частиц более 300 кэВ, с длительностью импульса тока 40-50 нс и импульсным током 3.5-4.5 А.

Несмотря на то, что ВЧ-пушки обладают целым рядом достоинств, их область применения до сих пор ограничивается прецизионными

специализированными ЛУЭ. По нашему мнению значительный практический интерес создание таких устройств представляет для ускорителей технологического назначения. При этом использование ВЧ-пушек может не только привести к улучшению характеристик пучка, что само по себе весьма полезно, но и исключить из состава ЛУЭ ряд элементов с низкой надежностью. Кроме того мы планируем продолжить работы по созданию ВЧ-источников интенсивного электронного пучка с наносекундной длительностью импульса тока. Эти задачи могут быть решены, очевидно, только при углубленном изучении происходящих ВЧ-пушках процессов эмиссии электронов и формирования электронных сгустков.

Разработка и исследование ВЧ-пушек, являясь сложной комплексной задачей, выполнялась в НИК "Ускоритель" коллективом специалистов, среди которых основной вклад внесли: Н.И. Айзацкий, Е.З. Биллер, В.А. Вишняков, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, Л.К. Мякушко, С.А. Пережогин, Л.В. Репринцев, В.В. Селезнев, Д.Л. Степин, Б.А. Терехов, Ю.Д. Тур, И.В. Ходак.

Литература

1. Takeda S., Tsumori K., Kimura N. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, V. NS-32, № 5, p 3219-3221.
2. Travier C. RF-guns: review, SERA/90-219/RFG, RFG Note 07. LAL, 1990.
3. G.A. Westenskow, J.M. Madey. Laser and Parttile Beams, 1984, Vol. 2, Part 2, p. 223-225.
4. G.A. Westenskow, J.M. Madey. NEPL Thechnical Note, TN-86-1, 1986.
5. Айзацкий Н.И., Биллер Е.З., Довбня А.Н., и др. ПТЭ, 1997г., №1, с.34-38.
6. C. Travier. Proc. of the EPAC'94. Vol. 1, p. 317-321.
7. A. Endo, T. Nori, K. Kobayashi et al. Proc. of the EPAC'96, Vol. 2, p 1562-1564.
8. Compendium of Scientific Linacs. CERN/ps 96-32(D1).
9. Акчурин Ю.И., Белоглазов В.И., Биллер Е.З. и др. ВАНТ, сер. "Ядерно-физические иссл." М., 1989, Вып.5(5), с.3-10.
10. Dovbnya A.N., Mitrochenko V.V. et al. Proc. of Workshop on JNR c-tay factory, Dubna, 1992.
11. Benson S.V., Madey J.M.J., Schultz J. et al. NIM, A250, (1986), №12, p 39-43.
12. Benson S.V., Fann W.S., Hooper B.A. et al. NIM, A296, (1990), №1-3, p 110-114.
13. Капица С.П., Мелехин В.Н. Микротрон.- М. Наука, 1969.
14. C.V. McKee and John M. J. Madey. NIM, A304, (1991), p 386-391.
15. Gao, J.L. Xie. NIM. 1991, A304, p.357-363.
16. Kushnir V.A., Mitrochenko V.V., Wang Gang. Сборник докладов 14 Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, ИФВЭ, 1994г. Том 3, с. 97-102.
17. Бродский А.М., Гуревич Ю.Я. Теория электронной эмиссии из металлов- М.: Наука, 1973.
18. Довбня А.Н., А.М. Косой, А.Е. Толстой и др. ВАНТ, 1992, вып.4(25), с. 7-11.
19. В.В. Митроченко. ВАНТ, 1997, вып.2,3(29,30)
20. Jalin Xie. Proc. PAC'95, Vol.1, p 162-166
21. R. Bossart, M. Dehler. Proc. EPAC'96, Vol.2, p 1544-1546.
22. Алексеев Ю.В., Каничева Н.Р., и др. Препринт НИИЭФА П-6-0753, 1987.
23. Демидов Н.В., Демин В.С., Довбня А.Н. и др. ВАНТ, 1992, вып. 4(25), с. 80-83.
24. Ayzatsky M.I., Biller E.Z., Dovbnya A.N. Proc. of the EPAC'96, Vol. 2, p.1553-1555
25. Айзацкий Н.И., Кушнир В.А. и др. Физика плазмы, 1994, том 20, N7,8, с. 671-673.
26. Ayzatsky M.I., Biller E.Z., Dovbnya A.N. Proc. of the EPAC'96, Vol.1, p.795-797.
27. Mitrochenko V.V. Bulletin of the American Physical Society, Vol. 42, No. 3 (1997), p. 1235.
28. Айзацкий Н.И., Митроченко В.В., Кушнир В.А. ВАНТ, 1997, вып.1(28), с.48-52.
29. Кушнир В.А., Митроченко В.В. ПТЭ, 1998, (в печати).
30. Айзацкий Н.И., Ганн В.В., Довбня А.Н. и др. Радиотехника и электроника, 1998, Т.43, №1, с.112-117.
31. Gao J. NIM. A304, (1991), p. 348-352.
32. Кушнир В.А., Митроченко В.В. ВАНТ, 1997, вып. 1(28), с. 36-42.
33. Kushnir V.A., Mitrochenko V.V. Proc. of the EPAC'96, Vol.2, p.1414-1416.
34. Кушнир В.А., Митроченко В.В. ВАНТ, 1997, вып. 2,3(29,30), с. 96-98.
35. Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Кушнир В.А. Труды XIII совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1993, Т. 2, с.111-114
36. Балагура В.С., Сафронов Б.Г., Черенщиков С.А. ВАНТ. 1992, вып. 4(25), с.48-51.
37. Биллер Е.З. Кушнир В.А. Митроченко В.В. и др. ВАНТ. 1997, вып. 2,3 (29,30), с. 35-37.

Статья поступила в редакцию 25 мая 1998г.,
в издательство 1 июня 1998г.