

Исследования и разработки резонансных СВЧ-систем для сверхпроводящих и сильноточных ЛУЭ

Э.С.Злуницын, А.И.Зыков

ННЦ ХФТИ, г. Харьков

В 1975-1983 гг., продолжая ранее начатые исследования в области СВЧ-сверхпроводимости, сотрудники отдела ЛУЭ ХФТИ выполнили оригинальные исследования и технические разработки, связанные с применением сверхпроводящих высокочастотных резонансных СВЧ-систем в линейных ускорителях электронов (ЛУЭ) и других электрофизических приборах. В то время эти работы носили во многом первооткрывательский характер, а полученные тогда результаты до сих пор представляются важными. Так, например:

– впервые в резонаторе со сверхпроводящим свинцовым покрытием была получена напряженность СВЧ-поля 200 кВ/см [1];

– впервые был предложен, разработан и успешно реализован новый способ СВЧ-группировки пучка в электронных источниках – низковольтной группировки пучка в прикатодной области [2], позволяющий получать узкие фазовые сгустки частиц с исключительно малым энергетическим разбросом. Так, результирующий энергетический разброс составлял ± 5 эВ при энергии электронов 50 кэВ, а в интервал выходных фаз $0,5^\circ$ группировались частицы из всего интервала входных фаз 22° . На рис. 1 показано “фазовое” электронное кольцо, полученное круговой разверткой с помощью специально разработанного для этой цели СВЧ-сепаратора [5].

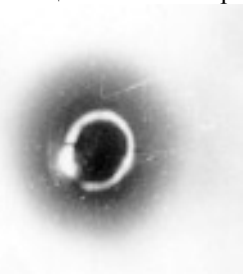


Рис. 1. Фотография электронного “фазового” кольца на сцинтилляционном экране, полученного круговой разверткой с помощью ВЧ-сепаратора с круговой поляризацией отклоняющего мода. “Горошина” соответствует фазовому ядру пучка.

Интересно отметить, что работа по низковольтной группировке на 7–10 лет опередила появление клистронов – приборов, в которых используется близкий, но не идентичный предложенному способ фазовой отсечки СВЧ-сигналом по управляющей сетке. Кроме того, новые и весьма интересные результаты были получены при исследовании свойств автоэмиссионных катодов в сверхпроводящих резонаторах. По существу, все это были первые шаги по пути создания электронных СВЧ-пушек, т.е. по направлению, которое сейчас интенсивно развивается;

– впервые был ускорен электронный пучок в одиночном сверхпроводящем резонаторе (СПР) 10 см диапазона в непрерывном режиме до энергии 0,5 МэВ при вводимой СВЧ-мощности ≈ 70 Вт и полном ускоренном токе 5 – 10 мкА [3]. Стабильность частоты разработанного для этих целей генератора составила 10^{-9} при средней мощности до 100 Вт. Этим экспериментом была показана перспективность СПР применительно к ЛУЭ, и это позволило впервые поставить и успешно выполнить следующий эксперимент по формированию электронно-микроскопического изображения с помощью пучка, прецизионно сгруппированного в пушке с низковольтной группировкой и затем ускоренного в СПР (рис. 2 и рис. 3). Этот уникальный эксперимент показал возможность использования сверхпроводящего СВЧ-ускорителя в качестве осветителя при создании высоковольтных электронных микроскопов [3];

– в 1982 – 1983 гг. было впервые исследовано [4] взаимодействие импульсного релятивистского пучка с периодической сверхпроводящей ускоряющей структурой (СУС), в которой перед этим впервые в СССР был ускорен электронный пучок до энергии $\approx 0,8$ МэВ. СУС длиной 0,7 м имела при $T=4,2^\circ\text{K}$ ненагруженную добротность $Q_0 = 8 \cdot 10^6$, что было близко к расчетному значению Q_0 , определенному по известному геометрическому фактору и поверхностному сопротивлению сверхпроводящего свинцового покрытия при $T=4,2^\circ\text{K}$. СУС состояла из 31-й Т-образной ячейки [6] с закруглениями ($R=5$ мм) углов у основания дисков (для алмазного точения ячеек потребовалось изготовление

специального приспособления – достигнутая чистота поверхности была не ниже 10-го класса). Данная работа показала, что применение специально разработанных контактных соединений позволило обеспечить надежную герметичность СУС во всем интервале температур от комнатной до гелиевой (при многих циклах охлаждения и отепления), а также добротность, близкую к расчетной, несмотря на большое количество контактных соединений.



Рис. 2. Фотография части экспериментальной установки, на которой был выполнен эксперимент по формированию электронно-микроскопического изображения пучком, ускоренным в СПР. Вверху виден криостат с СПР; средняя и нижняя часть фото – оптическая колонна электронного микроскопа ЭМВ-150.

Электронная пушка с низковольтной группировкой пучка размещена над криостатом и на фотографии не видна.



Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение тест-объекта, полученное с помощью оптической колонны ЭМВ-150 и пучка, ускоренного в СПР до 70 кэВ. Фазовая ширина сгустков пучка $\approx 3^\circ$, ток 0,5 мкА в непрерывном режиме. Увеличение 3000 X.

При возбуждении СУС импульсным ($\tau_{\text{имп}}=10$ мкс) электронным пучком ($i_{\text{имп}}=0,8$ А) с энергией 10 МэВ не было обнаружено каких-либо паразитных высших модов типа НЕМ₁₁ или других. На рис. 4а показана дисперсионная характеристика структуры при $T=300^\circ\text{K}$ и $4,2^\circ\text{K}$, а на рис. 4б - осциллограмма спада СВЧ-сигнала, возбужденного в СУС электронным пучком.

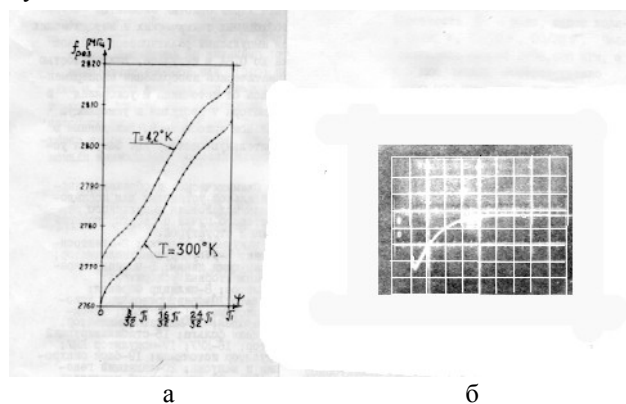


Рис. 4. а- дисперсионные характеристики ускоряющей системы из 31 полного периода при комнатной и гелиевой температурах; б- форма СВЧ-сигнала, возбужденного в сверхпроводящей ускоряющей системе электронным пучком с энергией 10 МэВ при импульсном токе 0,8А (одна клетка - 100 мксек).

Некоторые из перечисленных выше результатов стали, другие вполне могли стать истоками новых научно-технических направлений в развитии ускорительной техники и не только в ХФТИ. Однако с начала 80-х годов становилось все яснее, что состояние народного хозяйства страны,

организационно финансовые и другие трудности не позволяют рассчитывать на успешное продолжение или новую постановку серьезных научно-технических задач по сверхпроводящим ЛУЭ – даже несмотря на криогенную базу, созданную в отделе ЛУЭ за 1975 – 1979 гг. Поэтому перестройка тематики по ЛУЭ началась заблаговременно. Ввиду значительно возросшей к этому времени потребности в ускорителях для радиационных технологий нами в ХФТИ ускоренными темпами была выполнена разработка и создан полупромышленный радиационный комплекс с сильноточным ускорителем ЛУ-10 [7], который имеет надежную биологическую защиту, средства транспортировки объектов в рабочую зону, выходной зал с устройствами для радиационной обработки больших количеств объектов и т.д. Как показали дальнейшие события, эта крупномасштабная акция оказалась весьма плодотворной. В частности, она способствовала финансированию работ отдела ЛУЭ в 1993- 1997 гг. и определенным образом стимулировала создание еще двух прикладных ускорителей. Комплекс ЛУ-10 вступил в действие в 1988 году. При его наладке в диапазоне импульсных токов от 0,7А и выше пришлось столкнуться с ранее не встречавшимся явлением возбуждения в камере сканирующего магнита паразитных колебаний, отклоняющих пучок в поперечном направлении, ограничивающих величину ускоренного тока на выходе и вызывающих перегрев камеры [8]. Исследование этого явления неустойчивости, внешне подобного хорошо известному “укорочению” токового импульса в ЛУЭ [9], показало, что в данном случае камера сканатора служит для пучка резонатором, в котором он возбуждает не гибридный мод HEM_{11} как в диафрагмированном волноводе ЛУЭ, а мод TM_{11n} (частота 8300 МГц). В дальнейшем с этой неустойчивостью столкнулись также на других ЛУЭ, в частности, в НИИЭФА (г. С-Петербург). Проведенные нами расчеты и эксперименты позволили выработать меры преодоления этой неустойчивости. В 1993 году комплекс ЛУ-10 был модернизирован с использованием ранее исследованной нами [6] схемы сложения СВЧ-мощности. Это позволило получать на ЛУ-10 пучки электронов со средней мощностью до 15 кВт при энергии 12 - 15 МэВ и энергетическом разбросе на полувысоте спектра 2,5% в оптимальном режиме при $I_{\text{имп}} \sim 1$ А. С момента создания комплекс ЛУ-10 отработал на прикладные задачи более 30 тысяч часов. Выполнена большая программа работ по стерилизации медицинских изделий (только одноразовых шприцев стерилизовано более 50 млн. штук), по радиационной модификации полупроводниковых материалов и изделий, радиационной обработке минералов, исследованию радиационной стойкости реакторных материалов и оборудования и т.д.

Исследования и разработки резонансных сверхпроводящих СВЧ-систем проводили сотрудники отдела ЛУЭ ХФТИ Э.С.Злуницын, А.И.Зыков, В.А.Кушнир, Б.Р.Князев, В.Н.Плиско, С.В.Блажевич. Работами по созданию ЛУ-10 руководил А.И. Зыков, инженерное и технологическое руководство осуществлял Э.С. Злуницын, разработку технологических систем и оборудования выполнили В.А. Кушнир, В.Л. Уваров, Е.З.Биллер, Г.Д. Крамской, Г.Л. Фурсов, Е.В. Авдеев, М.А.Гладких и другие. Проектирование технологической и строительной части выполнено в СКБ – Г.И. Евсеев, П.Г. Гуртовенко, Б.А. Лищенко, А.А. Шелюбская и другие.

Литература

1. Zlunitsyn E.S., Zykov A.I., Kushnir V.A. CRIOGENICS. v14, N1, p.45-47 (1974).
2. Злуницын Э.С., Зыков А.И. и др. Препринт ХФТИ АН УССР, ХФТИ 78- 19 (1978).
3. Злуницын Э.С., Зыков А.И. и др. Отчет по теме “Исследование возможности применения сверхпроводящего ускорителя в высоковольтном электронном микроскопе”, ХФТИ АН УССР, Харьков (1976).
4. Злуницын Э.С., Зыков А.И. и др. ВАНТ, СЕРИЯ: ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, вып.3(24), 1-87,с.41-44 (1985).
5. Злуницын Э.С., Зыков А.И. и др. ВАНТ, СЕРИЯ: ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, вып.2(28), 1-81, с.37-39,(1986).
6. Злуницын Э.С., Зыков А.И. и др. Отчет по теме “Изучение оптимальных вариантов создания сильноточных ЛУЭ с большим заполнением”. ХФТИ АН УССР, Харьков (1983).
7. V.I.Beloglazov, E.S.Zlunitsyn, A.I.Zykov at al. Proceeding of the FIFTH European Particle Accelerator Conferenct (EPAC-96), v.1,p 798-800 (1996).
8. Злуницын Э.С., Зыков А.И. и др. Тезисы докладов VII Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве, С-Петербург, 16-18 июня 1992 г., Изд-во Москва:ЦНИИатоминформ, с.8 (1992).
9. Вишняков В.А., Гришаев И.А., Зыков А.И. ЖТФ, т.36 №11, с.2091-2093 (1966).

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