

УДК 621.039.633

О ПРИМЕНЕНИИ ВТСП-ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ КРИОГЕННОГО ТРАНСПОРТА МИШЕНЕЙ ДЛЯ ИТС

И. В. Александрова¹, А. А. Акунец¹, П. И. Безотосный¹, И. С. Блохин¹,
С. Ю. Гаврилкин¹, О. М. Иваненко¹, Е. Р. Корешева^{1,2},
Е. Л. Кошелев¹, К. В. Мицен¹, Л. В. Панина³

Представлены результаты экспериментальных исследований с использованием ленточных сверхпроводников типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu при разработке капсул-носителей для криогенных систем бесконтактной доставки мишеней для ИТС.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенная топливная мишень (КТМ), высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), permanent magnet guideway (PMG)-система.

Введение. Чтобы обеспечить надежную доставку криогенной топливной мишени (КТМ) в фокус мощной лазерной установки или реактора ИТС, необходимо корректировать либо траекторию летящей КТМ, либо направление распространения лазерных пучков (в соответствии с данными *on-line* диагностики траектории КТМ). В последнем случае необходимо синхронно управлять положением входных зеркал камеры, количество которых может достигать 150–200 штук. При разработке систем доставки наиболее перспективным является первый вариант – коррекция траектории движущейся КТМ в режиме реального времени – как с точки зрения надежности процесса контроля, так и с точки зрения стоимости его реализации.

Один из подходов, предложенный в США, заключается в управлении траекторией мишени с помощью лазерного луча [1]. Для этого мишень должна быть покрыта снаружи абляционным слоем из отвержденного газа. Направленное испарение внешнего

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ivaaleks@gmail.com.

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 31; e-mail: elena.koresheva@gmail.com.

³ Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4; e-mail: L.Panina@plymouth.ac.uk.

криогенного слоя позволит скомпенсировать воздействие “ветра” из остаточных газов. В рамках этого сценария пучки лазера, приходящие в центр камеры, должны быть подстроены под траекторию движения мишени. Для получения соответствующего абляционного слоя можно воспользоваться оригинальным методом, развитым в ФИАН, для нанесения отвержденных газов на внешнюю поверхность движущейся КТМ [2].

Другой способ коррекции траектории движущейся КТМ основан на использовании магнитных линз. При этом полагается, что КТМ должна иметь внешнее покрытие из сверхпроводящего материала. Известны работы, в которых предложено в качестве покрытия применять сверхпроводящий свинец [3]. Однако свинец обладает низким значением температуры сверхпроводящего перехода ($T_c = 7.2$ К) и малой величиной критического магнитного поля ($B_c = 0.08$ Тл при 0 К, $B_c = 0$ при $T_c = 7.2$ К). Учитывая то обстоятельство, что КТМ должна иметь температуру в момент облучения $T \sim 18.5$ К, применение свинцового покрытия бесперспективно, так как свинец при этой температуре не является сверхпроводником.

Еще одной проблемой в процессе доставки является сохранение параметров топливного слоя до момента облучения КТМ импульсом мощного лазерного излучения. Поэтому движение КТМ осуществляется в защитной капсуле – саботе, который передает импульс движения на КТМ при ее ускорении до требуемых скоростей инъекции (200–400 м/с). Однако при этом выделяется тепло вследствие трения сабота о стенку направляющей трубки инжектора. Чтобы исключить этот источник разрушения топливного слоя, было предложено использовать систему коррекции траектории сабота из ВТСП, исключаящую его касание со стенкой направляющей трубки инжектора (см. модельные эксперименты на рис. 1–3) [4].

Таким образом, создание системы бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ представляет собой одну из важнейших задач в общей проблеме ИТС. Предварительные эксперименты, проведенные в ФИАН с использованием левитации ВТСП в магнитном поле, подтвердили плодотворность этого подхода. При этом применялись таблетки и порошки из ВТСП на основе сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (сверхпроводящее стекло), которые были изготовлены в Лаборатории сверхпроводимости ФИАН [5].

В настоящей работе в качестве ВТСП предложено использовать ВТСП-ленты типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu, выполненные на основе сверхпроводящей эпитаксиальной пленки $GaBa_2Cu_3O_{7-x}$ (или Ga123), нанесенной на подложку из сплава хастеллой C-276 (немагнитный). Ширина ленты составляет 12 мм, толщина 0.08 мм, при этом толщина

собственно сверхпроводящей пленки составляет ~ 1 мкм. Температура сверхпроводящего перехода $T_c \sim 92$ К.

Цель проводимых исследований – генерировать различные режимы левитации ВТСП-образцов для тестирования условий, которые могут быть использованы для развития систем позиционирования, транспорта и коррекции траектории КТМ на основе эффекта квантовой левитации ВТСП в магнитном поле. В экспериментах были испытаны ВТСП-ленты (рис. 2 (в), (г)), типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu (производство ЗАО “СуперОкс”, Москва) и ВТСП-саботы (рис. 3), изготовленные из этих лент.

Для создания ВТСП-сабота на основе Ga123-ленты, из исходной ленты вырезали четыре прямоугольных кусочка с размерами 20×5 мм толщиной 0.08 мм. Затем они укреплялись на оправке из алюминиевой фольги (толщиной 0.2 мм), выполненной в виде параллелепипеда длиной 20 мм, высотой и шириной 5 мм.

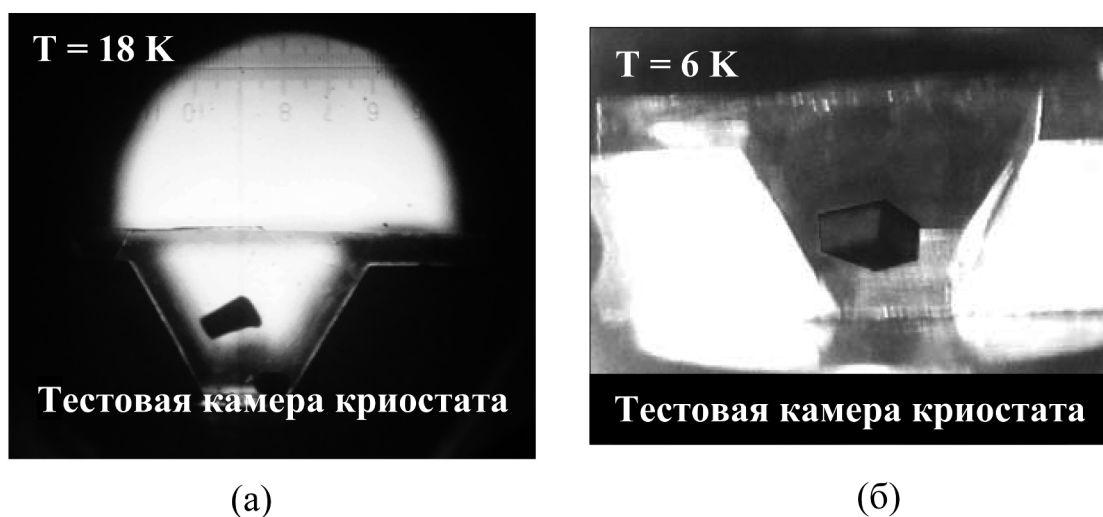


Рис. 1: Поведение системы “ВТСП –РМГ” при $T < 18.5$ К. Использовались ВТСП-образцы на основе керамики Y123 (производство ФИАН) и постоянные неодимовые магниты (фирма Мидора): (а) левитация ВТСП-образца над магнитом ($T = 18$ К–6 К), (б) левитация магнита над ВТСП-образцом ($T = 18$ К–6 К).

Создание и диагностика РМГ-систем. В ФИАН предварительно (в специальной серии экспериментов) в широком диапазоне температур ($T = 5 - 80$ К) был детально изучен отклик образцов из сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и Ga123-образцов различной геометрии в магнитных полях различной конфигурации, формируемых с помощью постоянных магнитов (РМГ-системы) (рис. 1 и 2). Такие системы в зарубежной

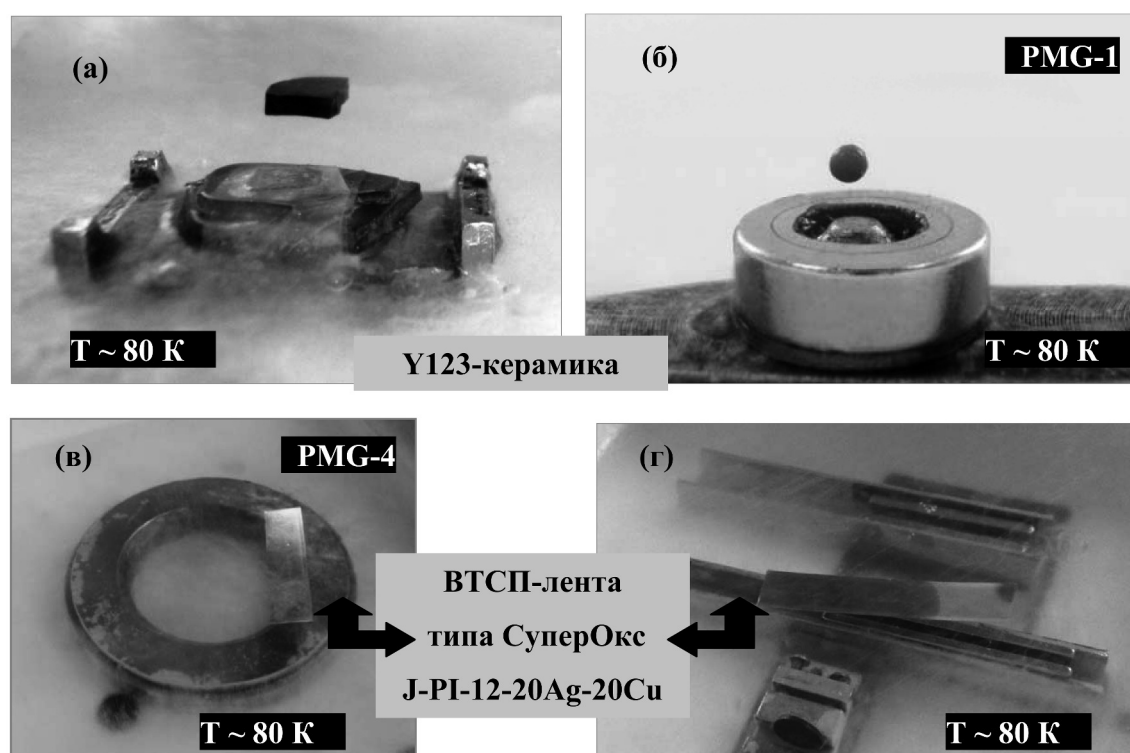


Рис. 2: В экспериментах по левитации использовались различные PMG-системы и различные ВТСП-образцы. Пояснения в тексте.

литературе называются “permanent magnet guideway” или PMG-системы. Отметим, что конфигурация PMG-системы (рис. 2) крайне важна для оптимизации процесса транспорта ВТСП-образцов с точки зрения возникающей силы левитации, стабильности позиционирования и скорости движения образцов.

Эксперименты, проведенные при температурах 18.5–6 К (рис. 1) и вблизи 80 К (рис. 2), продемонстрировали эффективность взаимодействия пары “ВТСП–PMG” в широком диапазоне температур, что дает возможность проведения исследований по движению сабота вблизи 80 К (рис. 3), т.е. в условиях азотной (температура кипения жидкого азота $T_N = 77$ К), а не гелиевой ($T_{He} = 4.2$ К) криогеники, что значительно дешевле.

В экспериментах для создания PMG-систем использовались неодимовые магниты без покрытия с аксиальным намагничиванием (производства ООО МИДОРА, Москва), а также различные вставки из ферромагнитного материала (электротехническая сталь марки Э41). Измерения профиля магнитного поля PMG-систем проводились с помощью магнитометра, изготовленного в ФИАН на основе датчика Холла типа ДХК-0.5А

с чувствительностью 280 мВ/Тл. Диапазон измеряемого поля ± 1 Тл, погрешность измерений ± 0.005 Тл, точность положения чувствительного элемента 0.1 мм.

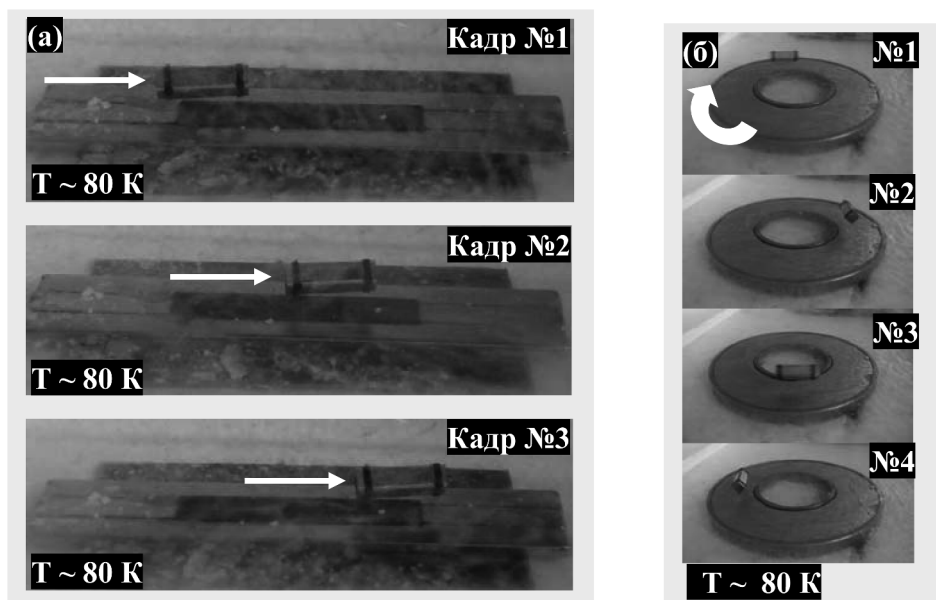


Рис. 3: ВТСП-сабот на основе Ga_{123} -ленты для тестовых экспериментов по реализации двух основных видов движения: линейного (а) и циклического (б).

Система типа PMG-3, показанная на рис. 3(а) состоит из трех прямоугольных магнитов размером $120 \times 8 \times 5$ мм, причем средний магнит частично покрыт ферромагнитной пластиной размером $57 \times 8 \times 1$ мм. Максимальное значение магнитного поля PMG-3 составляет 0.42 Тл, минимальное – 0.003 Тл.

Система типа PMG-4, показанная на рис. 2(в) и 3(б) состоит из одного магнита в форме диска толщиной 5 мм, внешним и внутренним диаметром 76 и 56 мм, соответственно. Диск укреплен в оправке из ферромагнитного материала. Максимальное значение магнитного поля PMG-4 составляет 0.36 Тл, минимальное – 0.02 Тл.

Выводы. В ФИАН впервые предложено использовать эффект квантовой левитации ВТСП для позиционирования реакторной КТМ в модуле формирования мишени, а также управления ее движением при ускорении в криогенном инжекторе. Успешно продемонстрирована возможность реализации данного предложения при $T = 80$ К и $T = 5.5\text{--}18$ К для образцов ВТСП на основе сверхпроводящей керамики $YBaCuO$, изготовленных в ФИАН. На данном этапе исследований использовался уже другой материал сверхпроводника – ВТСП-ленты типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu с температурой сверхпроводящего перехода $T_c \sim 92$ К. В работе продемонстрирована возможность

осуществить стабильную левитацию куска ВТСП-ленты (рис. 2) или сборного ВТСП-сабота (рис. 3) при реализации как линейного, так и циклического движения. Полученные результаты будут использованы в программе ФИАН при построении устройства доставки типа “КТМ–МАГЛЕВ” для непрерывного обеспечения криогенным топливом экспериментов по программе ИТС.

Финансовая поддержка работы осуществлялась в рамках контракта РФФИ № 15-02-02497, а также в рамках Государственного контракта № 27 по организации научной деятельности.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. T. Goodin et al., Nuclear Fusion **44**, S254 (2004).
- [2] E. R. Koresheva et al., Laser and Particle Beams **23**, 563 (2005).
- [3] R. Tsuji, Fusion Engineering and Design **81**, 2877 (2006).
- [4] I. V. Aleksandrova et al., J. Russian Laser Research **35**(2), 15 (2014).
- [5] Н. В. Аншукова и др., Письма в ЖЭТФ **47**(8), 381 (1988).

Поступила в редакцию 22 сентября 2015 г.