

УДК 621.039.633

КОМБИНИРОВАННЫЙ ЛЕВИТИРУЮЩИЙ НОСИТЕЛЬ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО УСКОРЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ МИШЕНЕЙ

И. В. Александрова, А. А. Акунец, Е. Р. Корешева

Анализируется возможность комбинированного применения сверхпроводников II рода (как низко-, так и высокотемпературных) для бесконтактного ускорения криогенной топливной мишени (КТМ), расположенной внутри левитирующего носителя, ускоряемого до требуемых скоростей инжекции (200–400 м/с) при доставке КТМ в фокус лазерной установки ИТС. Рассматриваются КТМ, содержащие внутри слой топлива (изотопы водорода) в различном структурном состоянии – от монокристалла до высокодисперсных твердых фаз.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенная топливная мишень (КТМ), низкотемпературные сверхпроводники (НТСП), высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), бесконтактная доставка КТМ.

Введение. В современных исследованиях по ИТС крайне остро стоит проблема получения КТМ с заданной структурой топливного слоя, позволяющей реализовать жёсткие требования на качество слоя, а также сохранить это качество вплоть до момента облучения КТМ мощным лазером [1] с целью достичь в процессе сжатия КТМ требуемые плотности и температуры для осуществления реакций синтеза [2, 3]. Система обеспечения зоны термоядерного горения КТМ с частотой 1–10 Гц (“Фабрики Мишеней”) является неотъемлемой частью реактора ИТС. Поэтому еще одной проблемой является переход от традиционного однократного режима облучения КТМ к высокочастотной подаче топлива в реактор ИТС. Для эффективной работы реактора даже при средней частоте ~ 5 Гц необходимо производство массива бесподвесных КТМ в количестве ~ 500000 в день и их подача в камеру реактора со скоростями $V_{inj} = 200\text{--}400$ м/с [4]. Температура КТМ в момент облучения лазером должна составлять $T = 18.3$ К. Это позволяет

достичь в полости КТМ требуемую плотность насыщенных паров (0.3 мг/см^3) для реализации эффективного сжатия КТМ и получения максимального выхода энергии из реакций термоядерного синтеза. Допустимые вариации температуры КТМ составляют $\sim 100 \text{ мК}$. При этом отклонения от сферичности и концентричности должны составлять не более 1%, а локальные неоднородности на поверхности топливного слоя быть менее 1 мкм . Механические перегрузки в процессе ускорения КТМ лежат в диапазоне $500\text{--}1000g$ (где g – ускорение свободного падения). Поэтому транспорт КТМ осуществляется в специальном носителе.

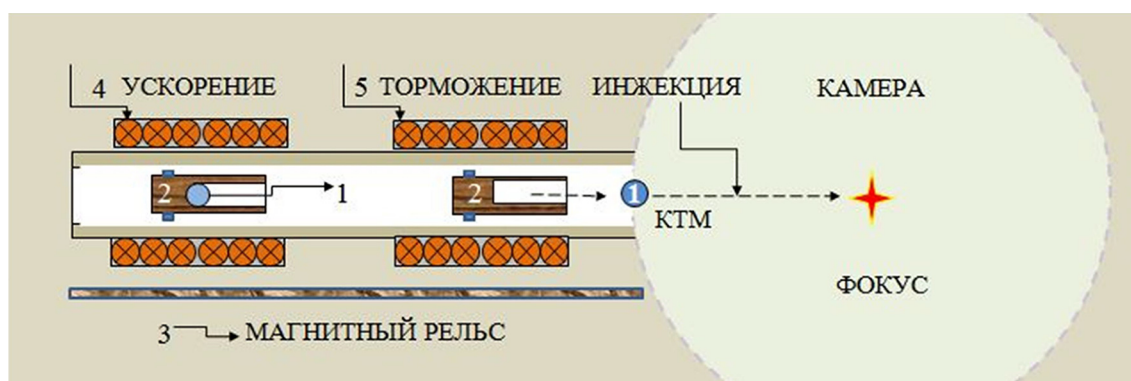


Рис. 1: Схема доставки КТМ с помощью левитации: 1 – КТМ, 2 – ВТСП-носитель, 3 – магнитный рельс, 4 – блок ускоряющих катушек с током, 5 – блок торможения.

В ФИАН большое внимание уделяется системам с использованием явления квантовой левитации сверхпроводников II рода, что открывает большие перспективы при создании системы частотной доставки КТМ, основанной на бесконтактном ускорении левитирующего сверхпроводящего носителя вдоль магнитного рельса [5, 6] (рис. 1). Это позволяет избежать теплопритоков из-за механического трения носителя о ствол стенки инжектора, а значит перегрева КТМ и роста локальных возмущений на поверхности слоя сверх допустимых значений. Ранее исследования [5, 6] проводились только с использованием ВТСП материалов (рис. 2) из-за их высокой температуры сверхпроводящего перехода $T_C > 90 \text{ К}$. Полагалось, что НТСП материалы (напр., NbTi, Nb₃Sn, NbN и др.) с температурами перехода $T_C \approx 8\text{--}17 \text{ К}$ не подходят для решения поставленной задачи, поскольку температура самой КТМ должна составлять $T \sim 18 \text{ К}$ [4].

В данной работе изучается вопрос комбинированного применения сверхпроводников II рода (как ВТСП, так и НТСП) для выбора оптимальной конструкции сверхпроводящего носителя для бесконтактного ускорения КТМ с различной структурой топливного слоя.

Сверхпроводящий носитель. На рис. 2 показаны схема классической КТМ, схема конструкции носителя, а также элементы экспериментальной системы ускорения [6].

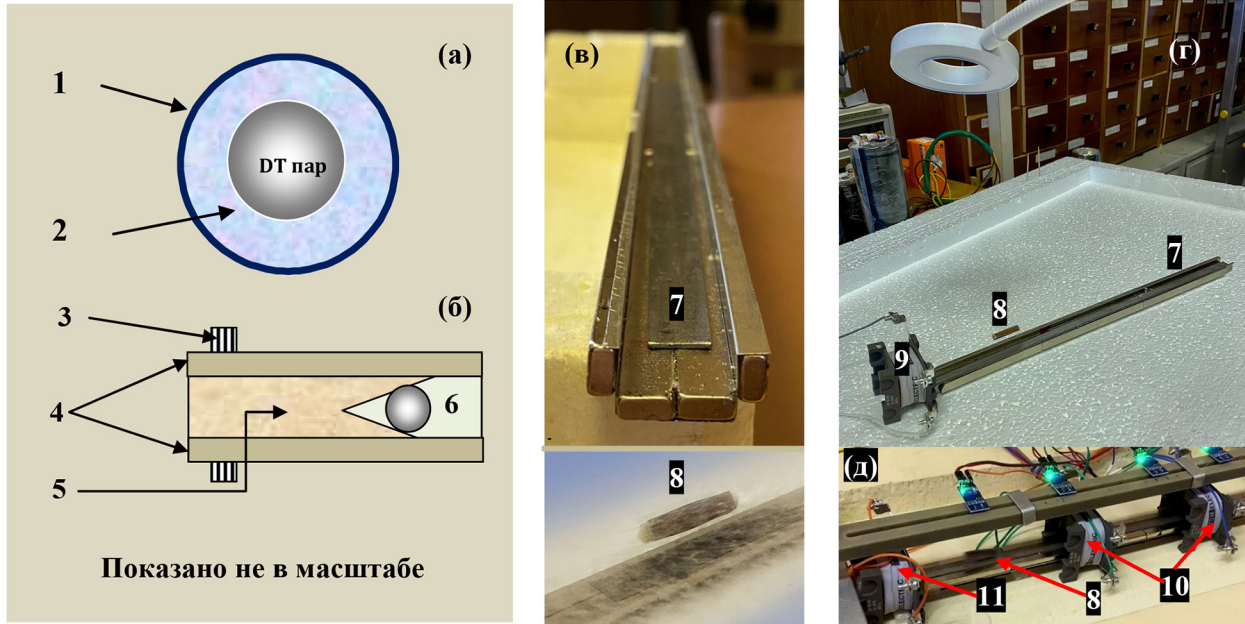


Рис. 2: ВТСП-носитель для транспорта КТМ без трения: (а) схема КТМ (1 – оболочка КТМ, максимальный $\varnothing \sim 4$ мм, 2 – криогенный ДТ-слой); (б) схема ВТСП-носителя (4 – сверхпроводящий корпус, 3 – дополнительный УЭ, 5 – пассивный элемент, 6 – КТМ); (в) левитация ВТСП-носителя (7 – магнитный рельс, 8 – левитирующий ВТСП – носитель); (г) ускорение ВТСП-носителя одной катушкой (9); (д) элементарный блок ускорения ВТСП-носителя в системе согласованно работающих катушек (10 – ускоряющие катушки, 11 – катушка торможения).

Собственно носитель включает три основных составляющих:

– Первый – это сверхпроводящий корпус, предназначенный для обеспечения левитации и стабилизации носителя и который изготавливался из ВТСП-лент второго поколения или ВТСП-керамики (поз. 4 на рис. 2(б)).

– Второй – это дополнительный ускоряющий элемент (УЭ) в виде сверхпроводящих витков с наведенным током (поз. 3 на рис. 2(б)), индуцируемых под действием внешнего магнитного поля B_0 (поз. 4 на рис. 1) с целью создания дополнительного импульса ускорения. Такой элемент не является обязательным, но при надлежащем выборе типа сверхпроводника может существенно повлиять на параметры процесса ускорения.

Ранее для дополнительного УЭ был выбран диборид магния (MgB_2) с $T_C = 39 > 18$ К. Было показано [4], что в этом случае линейный ускоритель может быть построен для всего диапазона скоростей инжекции, причем для максимальной скорости $V_{\text{inj}} = 400$ м/с длина ускорения составит $L_a = 20$ м при перегрузках $a < 500g$. Интересующий нас вопрос заключается в следующем: возможно ли использовать НТСП материалы для дополнительного УЭ, чтобы существенно снизить длину ускорения при механических перегрузках в диапазоне 500–1000g.

– Третий – это пассивный элемент конструкции или несверхпроводящий корпус, например, полимерная матрица, которая является основой для сборки других элементов сверхпроводящего носителя и которая имеет мишенное гнездо для фиксации КТМ. Это может быть полиимид, полистирол или GDP-полимер, т. е. полимеры, которые используются в качестве внешней оболочки КТМ.

Прежде чем перейти к оценкам, отметим, что явление сверхпроводимости уже давно используется для получения сильных магнитных полей (напр., в циклотронах, при строительстве реактора в проекте Международный Термоядерный Экспериментальный Реактор (ИТЭР) и др.), поскольку при прохождении по сверхпроводнику сильных токов, создающих сильные магнитные поля, отсутствуют тепловые потери. В технике применяются, в основном, следующие НТСП материалы: NbTi, Nb₃Sn, NbN.

Будем использовать NbTi в качестве реперной точки, имея в виду, что производство данного сверхпроводящего материала хорошо развито в России. С 2010 года начато промышленное изготовление НТСП материалов диаметром 0.7–0.8 мм, длиной не менее 1000 м на основе ниобий-титановых сплавов (Nb-Ti). Согласно [7, 8] высокие электрофизические характеристики таких сплавов обеспечиваются особенностями формирующейся в них наноструктуры. Доля титана в NbTi должна составлять от 46.5 до 50 масс. %, поскольку при меньшем его содержании в структуре сплава уменьшается количество наночастиц α -Ti, которые обеспечивают высокую токонесущую способность сверхпроводника. Кроме этого, количество и морфология наночастиц α -Ti определяется термомеханической обработкой материала.

Чтобы определить длину ускорения L_a , воспользуемся формулой из работы [5]

$$L_a = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r}{r_s} \frac{M_{\text{sab}} V_{\text{inj}}^2}{F_{\text{pin}} V_s}, \quad F_{\text{pin}} = j_c(B_0, T_s) \cdot B_0, \quad a = \frac{V_{\text{inj}}^2}{2L_a}, \quad (1)$$

где r – радиус витка катушки ускорения, r_s – радиус сверхпроводящего витка с током ($r/r_s = 5$), M_{sab} – полная масса ансамбля “Носитель + КТМ”, V_{inj} – скорость, которую необходимо достичь при ускорении КТМ, V_s – объем сверхпроводника, F_{pin} – плотность

силы пиннинга, j_c – плотность критического тока, величина которого зависит от индукции внешнего магнитного поля B_0 и температуры сверхпроводника T_s , a – ускорение ансамбля “Носитель + КТМ”.

Т а б л и ц а 1

Расчетное значение силы пиннинга при $T_s = 4.2$ К [10]

B_0 , Тл	2	4	6	8	10
F_{pin} , Н/мм ³	2.5	4.0	4.2	4.0	2.5

Примечание: критическое поле Nb-Ti при $T = 4.2$ К равно $B_C = 12$ Тл.

Для проведения расчетов надо знать величины параметров, входящих в формулу (1). Значения плотности силы пиннинга, которые зависят от индукции внешнего магнитного поля и температуры сверхпроводника, для Nb-Ti известны (см. табл. 1). Объем сверхпроводника ускоряющего Nb-Ti-витка 12 мм³, полная масса носителя 0.5 г. При этом, поскольку диаметр реакторной КТМ не более 4 мм, а её масса не превосходит 4.5 мг [9], то при расчетах массой КТМ можно пренебречь.

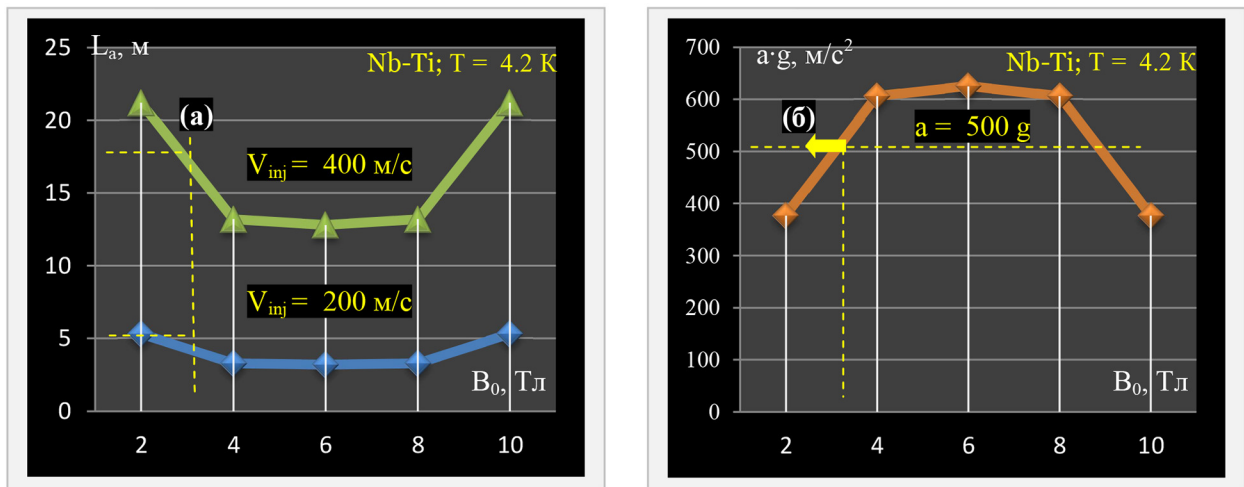


Рис. 3: Расчётные параметры ускорения КТМ для сверхпроводящего витка с током из Nb-Ti при $T = 4.2$ К: (a) длина ускорения КТМ в зависимости от индукции внешнего магнитного поля B_0 ; (b) величина ускорения КТМ, измеряемая в единицах g , где g – ускорение свободного падения.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Нас будут интересовать кривые для $B_0 \leq 6$ Тл, так как они соответствуют меньшим магнитным полям ускоряющей катушки. Хорошо видно, что значение минимальной длины ускорения равно (рис. 3(a))

$L_a = 3.3$ м для $V_{inj} = 200$ м/с и $L_a = 12.8$ м для $V_{inj} = 400$ м/с при $a = 625g$ (рис. 3(b)). Другими словами, можно значительно снизить величину L_a , причём при ускорении, существенно меньшем $1000g$. Однако, если всё же требуется, чтобы на длине L_a (с целью снижения механических напряжений в криогенном слое КТМ) ускорение a было $\leq 500g$ (рис. 3(b)), то тогда минимальное значение L_a будет соответственно равно $L_a = 4.5$ м (для $V_{inj} = 200$ м/с) и $L_a = 17$ м (для $V_{inj} = 400$ м/с) (рис. 3(a)). Отметим, что в этом случае сам процесс ускорения реализуется при меньших значениях индукции ускоряющего магнитного поля, а её максимальное значение составит $B_0 = 3$ Тл (рис. 3(b)).

Структура слоя и особенности доставки КТМ. В настоящее время существуют два принципиально различных подхода к формированию криогенного слоя внутри КТМ, что определяется свойствами водородного топлива. В равновесном состоянии твёрдые изотопы водорода представляют собой анизотропную кристаллическую среду, крайне неустойчивую к тепловым и механическим нагрузкам.

Традиционный подход, развиваемый в зарубежных лабораториях (методы β -layering и IR -redistribution) основан на очень медленном охлаждении топлива $q \sim 3 \cdot 10^{-5}$ К/с с целью формирования внутри замкнутой оболочки монокристалла вблизи температуры тройной точки топлива (D_2 : $T_{tr} = 18.71$ К; DT : $T_{tr} = 19.7$ К) [4, 11]. Область температурного существования получаемой структуры весьма ограничена. Так, например, слой из D_2 сохраняет свою прозрачность и однородность только до температуры 17.1 К. Еще более ограничена область существования монокристалла из D – слой растрескивается при охлаждении до 19.4 К, т. е. при температуре всего на 0.3 К ниже T_{tr} , и становится непригодным для КТМ [11]. В связи с этим инжекция таких КТМ в камеру реактора должна осуществляться вблизи температуры формирования слоя, во всяком случае, не ниже $T_{inj} \sim 17$ К. Это означает, что Nb-Ti с величиной $T_C = 8.0$ – 10.0 К [8] не может применяться для ускорения КТМ с монокристаллическим слоем, сформированных при достаточно медленном охлаждении топлива.

В ФИАН предложен альтернативный подход, а именно: быстрый структурно-чувствительный метод, т. н. метод FST (от Free-Standing Targets – бесподвесные мишени), для формирования криогенных слоев с заданной структурой топлива [2, 3, 12]. На основании проведенных исследований впервые было показано, что изотопы водорода и их смеси можно получить в виде ультрадисперсных модификаций (или наносистем) при высоких скоростях охлаждения (1 – 50 К/с) с использованием легирующих добавок к топливу. Такие криогенные слои относятся к классу слоев, обладающих повышенной механической и тепловой устойчивостью в интервале температур $\Delta T = 4.2$ К – T_{tr} .

Это позволяет заключить, что применение комбинированного сверхпроводящего носителя (ВТСП + НТСП) может рассматриваться как перспективное направление для КТМ, сформированных методом FST.

Важно подчеркнуть, что в данной работе предложен лишь один из возможных вариантов комбинированного сверхпроводящего носителя на основе сплава Nb-Ti. В работах [7, 8] отмечается, что, создавая регулярную гетерогенную наноструктуру с различными расстояниями между сверхпроводящими и несверхпроводящими областями, можно совершенствовать Nb-Ti сверхпроводники для получения максимальных критических плотностей тока в различных полях, или использовать другие НТСП материалы.

Заключение. Одним из ключевых моментов при построении “Фабрики Мишеней” является выбор эффективного метода частотного формирования КТМ и построение соответствующих устройств для их производства и бесконтактной доставки в лазерный фокус. Перспективным путем решения поставленных задач является реализация метода FST, предложенного и разработанного в ФИАН. Сочетание метода FST (а именно: формирование изотропных ультрадисперсных слоев при высоких скоростях охлаждения 1–50 К/с), комбинированного сверхпроводящего носителя, а также многоуровневой система защиты КТМ [12] позволяет оптимально выбирать температуру инъекции, так что ускорение КТМ может осуществляться, начиная с $T_{inj} = 4.2$ К.

Работа выполнена в рамках Государственного Задания ФИАН АААА-А19-119083090043-0, а также при финансовой поддержке МАГАТЭ в рамках научного проекта № 24154.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Pathways to energy from inertial fusion: an integrated approach. Report of Coordinated Research Project 2006-2010. IAEA TECDOC No. 1704, International Atomic Energy Agency, Vienna (2013); https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1704_web.pdf.
- [2] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, High Power Laser Sci. Engin. **7**, e38 (2019), <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.23>.
- [3] И. В. Александрова, Е. Р. Корешева, Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(7), 26 (2019). <https://doi.org/10.3103/S1068335619070054>.
- [4] National Research Council of the National Academies. Inertial Fusion Energy Technologies. In An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy; The

- National Academies Press: Washington, DC, USA, 2013; Chapter 3; pp. 89–105. ISBN 978-0-309-27081-6.
- [5] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev, High Power Laser Sci. Engin. **10**, e11 (2022). <https://doi.org/10.1017/hpl.2022.1>
- [6] И. В. Александрова, М. Н. Агапов, А. А. Акунец, Е. Р. Корешева, Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(8), 16 (2023).
- [7] И. Л. Дерягина, Е. Н. Попова, Е. П. Романов, Вестн. Ом. ун-та, № 2, 57 (2013).
- [8] И. Абдюханов, М. Потапенко, М. Алексеев и др., Nano Industry, № 7, 61 (2015).
- [9] S. E. Bodner, D. G. Colombant, A. J. Schmitt, et al., Phys. Plasmas **7**, 2298 (2000).
- [10] D. Gajda, A. J. Zaleski, V. P. Dyakonov, et al., Acta Physica Polonica A **118**(2), 333 (2010).
- [11] E. Mapoles, Production of hydrogen ice layers for NIF targets. 7th International conference on Inertial Fusion Science and Applications (September 12-16, 2011, Bordeaux, France)
- [12] I. V. Aleksandrova, A. A. Akunets, E. R. Koresheva, et al., Nuclear Fusion, IntecOpen **1** (2018).

Поступила в редакцию 29 января 2024 г.

После доработки 1 февраля 2024 г.

Принята к публикации 2 февраля 2024 г.