

# Комбинированная сверхпроводящая магнитная система с однородным полем до 20 Тл

Н.А. Черняк, П.А. Куценко, М.Б. Лазарева

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины  
Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий  
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина  
E-mail: mlazareva@kipt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 11 марта 2020 г., опубликована онлайн 24 апреля 2020 г.

Разработана комбинированная сверхпроводящая магнитная система с однородным полем до 20 Тл. Система состоит из нескольких соленоидальных секций и концентратора магнитного потока из гидроэкструдированного диспрозия. Секции намотаны из проводов NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn и ленты Nb<sub>3</sub>Sn. Для повышения однородности магнитного поля изготовлен магнитный экран из ленты Nb<sub>3</sub>Sn. Магнитное поле, достигаемое в зазоре между торцами концентратора, обладает высокой пространственной однородностью  $\Delta H/H \sim 5 \cdot 10^{-5}$ .

Ключевые слова: сильные и однородные магнитные поля, комбинированное сверхпроводящее магнитное устройство, концентратор магнитного потока, гидроэкструдированный диспрозий.

*Посвящается памяти академика Б.Г. Лазарева*

## Введение

Использование магнитов со сверхпроводящими обмотками в технике получения сильных магнитных полей стало обычной лабораторной практикой. Важную роль играет вопрос об однородности магнитного поля, создаваемого в измерительном объеме магнитного устройства. Высокая однородность магнитного поля требуется при резонансных и высокочастотных исследованиях, так как неоднородные поля снижают разрешающую способность и чувствительность регистрации данных. Известно, что неоднородности поля приводят к хаотическому изменению фазы волновой функции электронов. В связи с этим исключительно высокая однородность магнитного поля требуется при изучении гальваномагнитных явлений. Убедительным доказательством этого является осцилляторная зависимость магнитосопротивления Mg, которая нарушается, если отклонение ориентации поля относительно выбранной оси симметрии монокристалла не превышает 0,03° [1,2].

Успешное развитие этого направления физики и техники магнитных полей, требующего владения комплексом технологических и инженерных методов, связано с разработкой и созданием лабораторных сверхпроводящих магнитных систем в ННЦ «Харьковский физико-технический институт» и Донецком физико-

техническом институте под руководством академика Б.Г. Лазарева. В предыдущих публикациях отражено последовательное развитие технологии изготовления магнитных устройств для исследовательских целей с полями  $H = 12,2\text{--}17,6$  Тл [3,4]. Предварительное сообщение о параметрах и конструкции комбинированной сверхпроводящей магнитной системы (КСМС) с однородным магнитным полем до  $H = 20,0$  Тл представлено в работе [5]. В [5] использованы результаты дальнейших исследований.

## Результаты и их обсуждение

Принципиальная схема КСМС приведена на рис. 1

Система состоит из нескольких соленоидальных секций и концентратора магнитного потока из гидроэкструдированного Dy (секция 5). Секции 1 и 2 намотаны из промышленного NbTi провода, секция 3 из промышленного провода Nb<sub>3</sub>Sn, секция 4 состоит из восьми пар галет с использованием ленты Nb<sub>3</sub>Sn (производства ХФТИ). Лента Nb<sub>3</sub>Sn на основе НЦ-1,6 (Nb–1,6% Zr) имеет двусторонний слой интерметаллида с оптимальной микрокристаллической структурой, допированной распределенными в объеме окислами циркония, играющими роль эффективных центров пиннинга магнитного потока [6].

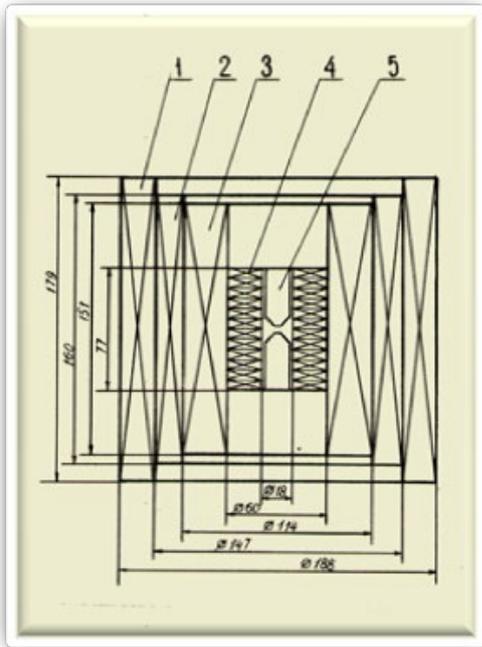


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированной сверхпроводящей магнитной системы.

В результате достигнута высокая конструктивная плотность критического тока в обмотке  $j_k = 1,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$  в поле  $H = 15,0 \text{ Тл}$ .

В полной сборке основные размеры гибридного соленоида следующие: диаметр наружный (по виткам) 190 мм, внутренний — 21 мм, диаметр рабочего отверстия 18 мм, высота 180 мм; полный вес 27 кг. Подробные данные приведены в табл. 1.

Измеренные величины напряженности магнитного поля в центре гибридного соленоида достигают  $H = 15,1 \text{ Тл}$  при  $T = 4,2 \text{ К}$  и  $H = 16,5 \text{ Тл}$  при 2,1 К. Эти значения являются наибольшими для соленоидов таких малых габаритов и веса (0,58 Тл/кг).

Величина поля в трехсекционном варианте при 4,2 и 2,1 К составляла  $H = 11,7$  и  $12,7 \text{ Тл}$  соответственно [5].

Для повышения его однородности использовали магнитный экран из ленты  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , намотанной на цилиндрическую алюминиевую оправку. На рис. 2 в качестве примера приведены значения поля соленоида на протяжении  $\pm 30 \text{ мм}$  от центра при  $H = 5,0 \text{ Тл}$  (нижняя кривая) и в поле до  $H = 10,0 \text{ Тл}$  (верхняя кривая). От-

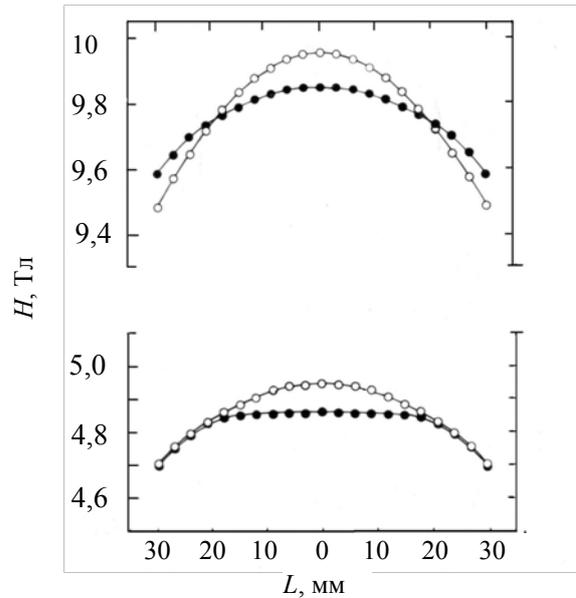


Рис. 2. Однородность магнитного поля соленоида: без экрана (○), с экраном (●).

метим, что применение магнитного экрана позволяет исключить влияние неоднородности поля при измерениях критических токов, например галет из  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ .

В случае необходимости повышения напряженности магнитного поля соленоида с одновременным существенным повышением его однородности в измерительном объеме эффективным является применение концентраторов из гидроэкструдированного Ду [3,4]. В настоящей работе был использован концентратор, состоящий из двух соосных цилиндров длиной  $l = 45 \text{ мм}$  и диаметром  $d = (17,25 \pm 0,02) \text{ мм}$ , имеющих плоский торец на одном конце и конус с углом раствора  $\varphi = 120^\circ$ , усеченным на  $d = 4 \text{ мм}$ , на другом. Массивный гидроэкструдат, обладающий магнитными свойствами, подобными свойствам монокристалла, представляет собой полностью текстурированный субмикроструктурный агрегат с размером областей когерентного рассеяния 20–30 нм [7–9].

Добавочное поле, получаемое в зазоре между плоскими торцами концентратора, составляет при межполюсном расстоянии 1 мм  $\Delta H = 3,38 \text{ Тл}$ , при 0,5 мм —  $\Delta H = 3,53 \text{ Тл}$ , при этом суммарное поле КСМС  $H = 19,88$  и  $20,3 \text{ Тл}$  соответственно.

Таблица 1. Основные параметры КСМС

№ секции	Материал обмотки	Диаметр провода, мм	Наружный диаметр по виткам, мм	Внутренний диаметр по виткам, мм	Высота, мм
1	Nb–Ti	0,7	190,0	147,0	179,2
2	Nb–Ti	1,0–0,7	142,2	114,0	160,0
3	$\text{Nb}_3\text{Sn}$	0,63	107,5	64,5	157,0
4	Лента $\text{Nb}_3\text{Sn}$	Ширина 5 мм	58,0	21,0	103,0

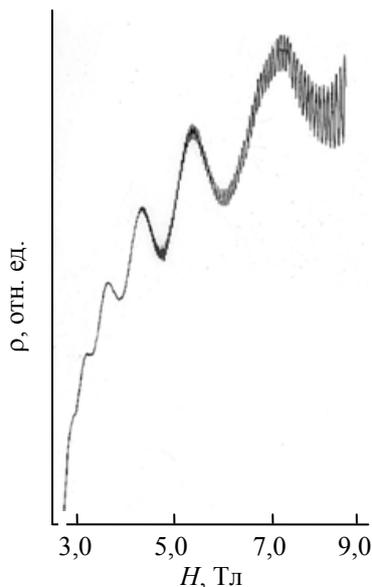


Рис. 3. Зависимость магнитосопротивления  $\rho(H)$  при  $T = 4,2$  К.

Дополнительные исследования показали, что эти значения  $\Delta H$  при  $T = 2,1, 4,2$  и  $20,4$  К совпадают [8].

Отметим, что максимально возможное достигнутое добавочное поле в пространстве 1 мм между коническими полюсами концентратора составляет  $\Delta H = 9,3$  Тл.

В качестве индикатора однородности магнитного поля в зазоре между плоскими торцами гидроэкструдата Ду использовали монокристалл Ве [8,10]. Методика тестирования была основана на чувствительности осцилляций магнитосопротивления Ве к малым пространственным изменениям магнитного поля. На рис. 3 приведена осцилляторная зависимость магнитосопротивления  $\rho(H)$  при  $T = 4,2$  К для ориентации гексагональной оси монокристалла Ве, близкой к направлению оси концентратора. Общий ход зависимости  $\rho(H)$  обусловлен характером магнитного пробоя в Ве [2,11]. Высокочастотные магнитопробойные осцилляции имеют высокую чувствительность к неоднородности магнитного поля.

Известно, что они хорошо разрешаются, если  $\Delta H/H \sim 5 \cdot 10^{-5}$  [12]. Существенно, что это соотношение сохраняется во всей области исследованных полей [8]. Для получения подобной характеристики поля в пределах измерительного объема соленоида обычно используются дополнительные корректирующие катушки [13]. В результате усложняется конструкция, возрастают вес, габариты и стоимость магнитного устройства.

### Заключение

Описанная в настоящей работе КСМС позволяет при сравнительно небольших габаритах и весе полу-

чать магнитные поля достаточно высокой напряженности ( $H = 20$  Тл) и однородности. Эта система использовалась для проведения широкого круга лабораторных исследований. Среди них выделим изучение магнитных свойств гидроэкструдатов Ду и Но [7–9], а также цикл исследований процессов формирования токонесящей структуры большой плотности в сверхпроводниках  $Nb_3Sn$ ,  $NbTi$ ,  $Nb-3\%Ti-22\%Ta$  [6,14,15].

Авторы выражают искреннюю благодарность академику Национальной академии наук Украины Александру Степановичу Бакаю за ценные замечания и полезное обсуждение настоящей статьи.

1. R.W. Stark, and C.B. Friedberg, *J. Low Temp. Phys.* **14**, 111 (1974).
2. D. Shoenberg, F.R.S., Cambridge (1984).
3. Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, В.А. Полтавец, С.И. Горидов, *ФММ* **35**, 443 (1973).
4. Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, В.А. Полтавец, С.И. Горидов, П.А. Куценко, Н.Ал. Черняк, Н.Ан. Черняк, Б.К. Прядкин, *ДАН СССР* **279**, 1376 (1984).
5. Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, П.А. Куценко, Б.К. Прядкин, Н.А. Черняк, А.А. Чупиков, В.И. Курочкин, А.Я. Лаптеенко, И.Г. Гавриш, В.З. Спусканюк, И.М. Коваленко, *Препринт ДонФТИ-90-9*, Донецк (1990).
6. Б.Г. Лазарев, П.А. Куценко, Л.С. Лазарева, Б.К. Прядкин, Н.А. Черняк, *Металлофизика* **12**, 18 (1990).
7. B.G. Lazarev, L.S. Lazareva, N.A. Chernyak, A.A. Chupikov, B.K. Pryadkin, V.S. Spuskanyuk, and I.M. Kovalenko, *Cryogenics, ICMC Supplement* **32**, 217 (1992).
8. B.G. Lazarev, L.S. Lazareva, N.A. Chernyak, A.A. Chupikov, P.A. Kutsenko, B.K. Pryadkin, V.Z. Spuskanyuk, and I.M. Kovalenko, *Phys. Metals. Metallogr.* **86**, 255 (1998).
9. N.A. Chernyak, V.I. Sokolenko, and A.V. Mats, *Func. Mater.* **26**, 233 (2019).
10. B.G. Lazarev, N.A. Chernyak, and L.S. Lazareva, *XVII Всесоюзная конференция по физике магнитных явлений*, Донецк (1960).
11. N.E. Alekseevskii, A.A. Slutskin, and V.S. Egorov, *J. Low Temp. Phys.* **5**, 377 (1971).
12. Н.Е. Алексеевский, В.С. Егоров, *ЖЭТФ* **55**, 1152 (1968).
13. Martin N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Clarendon Press, Oxford (1983).
14. B.G. Lazarev, O.V. Cherny, L.S. Lazareva, N.A. Chernyak, G.E. Storozhilov, P.A. Kutsenko, and B.K. Pryadkin, *Cryogenics, ICMC Supplement* **32**, 593 (1992).
15. B.G. Lazarev, O.V. Chernyi, G.E. Storozhilov, L.G. Udov, N.F. Andrievskaya, L.A. Kornienko, L.S. Lazareva, N.A. Chernyak, P.A. Kutsenko, B.K. Pryadkin, Ya.D. Starodubov, M.B. Lazareva, and V.M. Gorbatenko, *Proceeding of 7th International Workshops on Critical Currents in Superconductors*, Austria (1994), p. 601.

Комбінована надпровідна магнітна система  
з однорідним полем до 20 Тл

Н.О. Черняк, П.О. Куценко, М.Б. Лазарева

Розроблено комбіновану надпровідну магнітну систему з однорідним полем до 20 Тл. Система має декілька секцій та концентратор магнітного потоку з гідроекструдованого діспрозію. Секції намотано з проводів NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn та стрічки Nb<sub>3</sub>Sn. Для підвищення однорідності магнітного поля виготовлено магнітний екран зі стрічки Nb<sub>3</sub>Sn. Магнітне поле, що досягається в зазорі між торцями концентратора, має високу просторову однорідність  $\Delta H/H \sim 5 \cdot 10^{-5}$ .

Ключові слова: сильні та однорідні магнітні поля, комбінований надпровідний магнітний пристрій, концентратор магнітного потоку, гідроекструдований діспрозій.

Combined superconducting magnetic system with  
a homogeneous field up to 20 T

N.A. Chernyak, P.A. Kutsenko, and M.B. Lazareva

A combined superconducting magnetic system with a homogeneous field of up to 20 T was developed. The system consists of the several solenoidal sections and a magnetic flux concentrator from hydroextruded dysprosium. Sections are wound from NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn wires and Nb<sub>3</sub>Sn tape. To increase the uniformity of the magnetic field, a magnetic shield made of Nb<sub>3</sub>Sn tape was made. The magnetic field achieved in the gap between the ends of the concentrator has a high spatial uniformity  $\Delta H/H \sim 5 \cdot 10^{-5}$ .

Keywords: strong and uniform magnetic fields, combined magnetic device, magnetic flux concentrator, hydroextruded dysprosium.