

р-823

8/1-702



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

Р8 - 4785

**Н.Б. Рубин, А.А. Сабаев, Ю.И. Смирнов,
И.С. Хухарева, В.Г. Шабратов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТНОГО СВЧ-СОПРОТИВЛЕНИЯ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ II РОДА**

Дубна 1969

Р8 - 4785

Н.Б. Рубин, А.А. Сабаев, Ю.И. Смирнов,
И.С.Хухарева, В.Г. Шабратов

ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТНОГО СВЧ-СОПРОТИВЛЕНИЯ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ II РОДА

8140/2 up

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Использование в ускорительной технике замечательного свойства сверхпроводников - их чрезвычайно малого сопротивления - представляет большой практический интерес. В ряде работ/1-7/ опубликованы результаты исследования высокочастотных свойств сверхпроводников для применения их в резонансных ускоряющих системах. Достаточно полно, в широком диапазоне частот (от сотен МГц до десятков ГГц) исследовано поверхностное сопротивление свинца и ниобия. В настоящее время работает криогенный линейный ускоритель, резонансная система которого выполнена из свинца/5,6/.

К сожалению, низкое значение критического магнитного поля сверхпроводников 1 рода, к которым относится свинец, не позволяет использовать их в резонансных системах, находящихся в значительных магнитных полях, в частности, в коллективном ускорителе ионов-кольцетроне/8,9/. Ускоряющая система кольцетрона сочетается с продольным магнитным полем, необходимым для поддержания вращательного движения электронов в кольце. Величина магнитного поля достигает значений 20-30 кэ. Использование сверхпроводящих материалов для создания СВЧ-элементов коллективного ускорителя существенно снизит потребление высокочастотной мощности и позволит улучшить рабочие характеристики этих элементов и, следовательно, ускорителя. Таким образом, при проектировании СВЧ-системы кольцетрона кажется разумным использовать сверхпроводящие материалы с высокими критическими полями, т.е. сверхпроводники 2 рода.

Имеющихся результатов опытов по изучению высокочастотных свойств сверхпроводников 2 рода/10/ недостаточно для выбора материала резонаторов кольцетрона из-за отсутствия данных о поведении сверхпроводников во внешних магнитных полях. Поэтому авторами были предприняты специальные исследования поверхностного СВЧ-сопротивления различных сверхпроводников 2 рода в сильных магнитных полях. Некоторые первые результаты по измерению поверхностного сопротивления сверхпроводящих сплавов типа ниобий-цирконий, ниобий-титан, помещенных во внешнее магнитное поле, до 40-50 кэ, представлены ниже. Измерения производились при низком уровне ВЧ-мощности.

Методика эксперимента

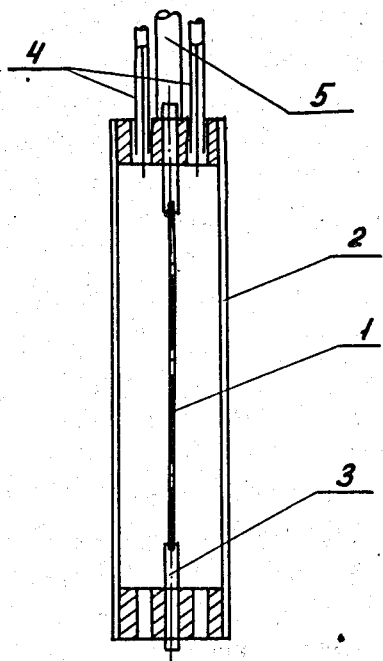


Рис. 1. Экспериментальный резонатор. 1. Образец сверхпроводника. 2. Медная труба. 3. Диэлектрический стержень. 4. Коаксиальные линии. 5. Трубка подвеса.

Для опытов был выбран коаксиальный полуволновой резонатор (рис. 1). Внешним проводником резонатора служила медная трубка с внутренним диаметром 28 мм и длиной 350 мм. Проволочки из сверхпроводящего сплава длиной около 300 мм использовались как внутренний проводник резонатора. Проволочка подвешивалась внутри медной трубы на диэлектрических стержнях (полистирол). Геометрия резонатора позволяла легко и быстро сменить и подготовить к испытаниям образцы. На верхней торцевой крышке резонатора имелось два отверстия для коаксиальных линий, оканчивающихся штырями связи. Одна линия использовалась для возбуждения резонатора, другая присоединялась к измерительной аппаратуре. Наружный проводник коаксиальных линий выполнен из тонкостенных нержавеющей

трубок диаметром 6 мм. В эти трубки вставлялась медная проволочка с полиэтиленовой оболочкой (использовался кабель марки РК-75-7-11, с которого снималась медная оплетка). Резонатор подвешивался к фланцу криостата на тонкой нержавеющей трубке. Коаксиалы через вакуумные уплотнения выводились из криостата. Ожидалось, что величина добротности резонатора при изменении температуры от комнатной до гелиевой возрастает на несколько порядков. Поэтому для того чтобы измерения добротности резонатора было возможно проводить при слабой связи с генератором во всем интервале температур, предусматривалась регулировка величины связи путем изменения глубины погружения штырей связи в резонатор.

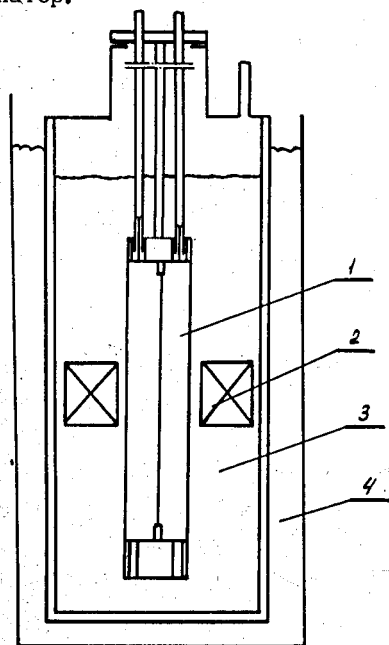


Рис. 2. Схема установки. 1. Резонатор. 2. Соленоид. 3. Жидкий гелий. 4. Жидкий азот.

Резонатор помещался в ванну с жидким гелием. Продольное внешнее магнитное поле создавалось с помощью сверхпроводящего соленоида и было достаточно однородным (10%) на длине 9-10 см. Температура ниже 4,2°K достигалась путем откачки паров гелия. Схема установки приведена на рис. 2.

Расчёт мощностей потерь в элементах резонатора

В режиме вынужденных колебаний резонатор, связанный с питающим генератором и нагрузкой, принято характеризовать "нагруженной" добротностью

$$Q_{н.} = \frac{\omega_0 W_0}{P_{п}}, \quad (1)$$

где W_0 - запасенная энергия в резонаторе.

Учитывая, что потери обычно малы, расчёт W_0 проводят в предположении изолированности системы/11/.

$$W_0 = \frac{1}{2} \int_{V_0} \mu H_m^2 dv. \quad (2)$$

H_m - магнитная компонента поля, dv - элемент объема. Мощность потерь P_{Π} для нашего резонатора можно разделить на следующие части:

$$P_{\Pi} = P_M + P_C + P_D + P_{\Gamma} + P_{\text{и}}, \quad (3)$$

P_M и P_C - потери на внутренней поверхности медной трубы и потери на поверхности проволочки сверхпроводника соответственно,

P_D - потери в диэлектрических подвесках, P_{Γ} - потери в среде жидкого гелия, $P_{\text{и}}$ - потери на излучение, обусловленные элементами связи.

После подстановки уравнения (3) в (1) получаем:

$$\frac{1}{Q_{\text{н}}} = \frac{1}{Q_M} + \frac{1}{Q_C} + \frac{1}{Q_D} + \frac{1}{Q_{\Gamma}} + \frac{1}{Q_{\text{и}}}; \quad Q_M = \frac{\omega_0 W_0}{P_M}, \dots, Q_{\text{и}} = \frac{\omega_0 W_0}{P_{\text{и}}}. \quad (4)$$

В наших экспериментах потерями в диэлектрических подвесках, жидком гелии и элементах связи мы пренебрегаем из-за их малости/10/.

Экспериментальное определение этих видов потерь требует постановки "тонких" опытов, а для аналитического вычисления необходимо решить сравнительно сложные электродинамические задачи.

Поэтому принимаем $Q_{\text{н}} = Q_{\text{пр}}$ и

$$\frac{1}{Q_{\text{пр}}} = \frac{1}{Q_M} + \frac{1}{Q_C}. \quad (5)$$

Таким образом, с учётом вышесказанного, добротность резонатора определяется только потерями, обусловленными токами проводимости на поверхности металла.

Потери в металлических проводниках вычисляются по формуле

$$P_{\text{пр}} = \frac{R_s}{2} \int_s H_m^2 ds, \quad (6)$$

где интегрирование проводится по поверхностям проводников, а R_s - поверхностное сопротивление металла на СВЧ. Для коаксиального резонатора магнитная компонента ТЕМ-поля равна

$$H_m = \frac{I_m}{2\pi r} \sin \frac{2\pi}{\lambda} z, \quad (7)$$

где λ - длина волны в резонаторе $R_1 \leq r \leq R_2$, R_1 - радиус внутренней провололки, R_2 - радиус резонатора, $0 \leq z \leq L$, L - длина резонатора, I_m - амплитуда тока в пучности.

Структура поля полуволнового коаксиального резонатора показана на рис. 3.

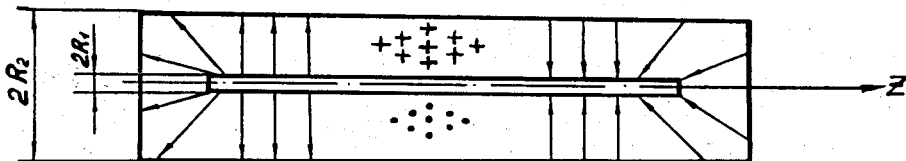


Рис.3. Структура поля в резонаторе. Сплошные линии - электрическая компонента поля, '+' - магнитная компонента поля.

На основании (2), (6) и (7) находим:

$$W_0 = \frac{1}{2} \int_{V_0} \mu H_m^2 dv = \frac{1}{2} \mu \pi L \left(\frac{I_m}{2\pi} \right)^2 \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

$$P_{\text{пр}}^{(1,2)} = \frac{R_s}{2} \int_s H_m^2 ds = \frac{R_s}{2} \frac{\pi L}{R_{1,2}} \left(\frac{I_m}{2\pi} \right)^2,$$

где индексу 1 соответствует мощность потерь на поверхности сверхпроводящей провололки

$$P_c = \frac{R_s^c}{2} \left(\frac{I_m}{2\pi} \right)^2 \frac{\pi L}{R_1}, \quad (9)$$

а индексу 2 соответствует мощность потерь на внутренней поверхности медной трубы резонатора

$$P_M = \frac{R_S^M}{2} \left(\frac{I_m}{2\pi} \right)^2 \frac{\pi L}{R_2} \quad (10)$$

Используя уравнение (1), определяем частичные добротности

$$Q_C = \frac{1}{R_S} \omega_0 \mu R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (11)$$

$$Q_M = \frac{1}{R_S^M} \omega_0 \mu R_2 \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (12)$$

Для вычисления поверхностного сопротивления сверхпроводника используем уравнения (5), (11) и (12):

$$R_S^C = \omega_0 \mu R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{Q_{пр}} - \frac{1}{Q_M} \right) \quad (13)$$

Из формулы (13) видно, что для определения поверхностного сопротивления сверхпроводника нужно измерить поверхностное сопротивление меди R_S^M при данной температуре и добротность составного резонатора $Q_{пр}$. Вообще говоря, R_S^M можно рассчитать по формулам для классического скин-слоя при постоянном токе.

Однако, как было показано в /12/, поверхностное сопротивление металлов, измеренное при низких температурах, в несколько раз больше рассчитанного по классическим формулам. Это явление называется аномальным скин-эффектом и подробно изучено в работе /13/. Следует отметить, что формулы для расчёта поверхностного сопротивления металлов с учётом аномального скин-эффекта отсутствуют, поэтому $R_S(T, \omega)$ при низких температурах можно определить только экспериментально.

Для расчёта поверхностного сопротивления меди R_S^M по экспериментальным данным воспользуемся выражением (13), подставив в него значение Q_M из (12) и заменив $R_S^C \rightarrow R_S^M$.

После преобразования получим,

$$R_S^M = \frac{\omega_0 \mu \ell \pi \frac{R_2}{R_1}}{Q_{\text{пр}}} \left(\frac{R_1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right). \quad (14)$$

Здесь, очевидно, $Q_{\text{пр}}$ — измеряемая добротность составного резонатора, в котором как внешний, так и внутренний проводники выполнены из меди.

По этой формуле можно рассчитать и R_S^C , если коаксиальный резонатор целиком выполнен из сверхпроводящего материала.

Заметим, что при очень малой величине R_S^C значение $\left(\frac{1}{Q_{\text{пр}}} - \frac{1}{Q_M} \right)$ близко к нулю и расчёт по формуле (13) может дать значительную ошибку.

Высокочастотные измерения

Добротность резонатора со сверхпроводящей провололочкой определялась по измерениям декремента затухания колебаний. Если измеряется отрезок времени Δt , в течение которого продетектированная амплитуда изменяется в два раза, то $Q_{\text{пр}}$ находится из следующего соотношения:

$$Q_{\text{пр}} \approx 9 \cdot f \cdot \Delta t. \quad (15)$$

Эта формула пригодна при квадратичной характеристике детектора. Очевидно, что для получения правильных результатов расчёта необходимо, чтобы Δt было больше постоянной детектора.

Функциональная схема измерения декремента представлена на рис. 4. В установке был использован стандартный генератор типа ГЧ-37А в режиме импульсной модуляции. Генератор был подсоединен к резонатору через ослабитель мощности коаксиальном кабелем длиной ≈ 10 м. Высокочастот-

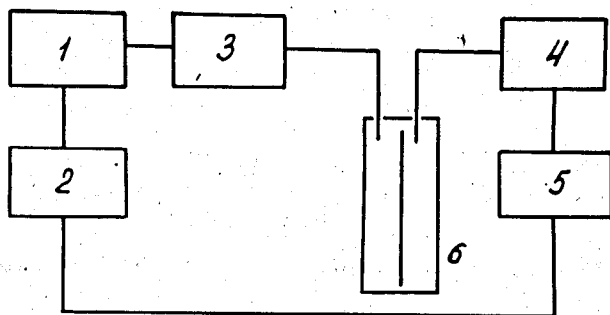


Рис. 4. Блок-схема измерения декремента затухания. 1. Генератор высокочастотных колебаний. 2. Модулятор. 3. Аттенуатор. 4. Детектор. 5. Осциллограф. 6. Резонатор.

ные колебания поля в резонаторе детектировались кристаллическим детектором. Огибающая высокочастотных колебаний наблюдалась при помощи осциллографа, запуск развертки которого синхронизовался задним фронтом импульса модуляции ВЧ-генератора. Величина связи резонатора с генератором и детектором уменьшалась до тех пор, пока не обнаружилось, что дальнейшее ослабление связи не влияет на получаемую форму огибающей колебаний.

Для измерения добротности резонатора, полностью выполненного из меди, при низких температурах использовался метод измерения полосы пропускания $2\Delta f$ на уровне 0,707 резонансной кривой. Эти измерения необходимы для расчёта R_s^M .

Результаты измерений с проволочками

Для определения зависимости поверхностного сопротивления меди от температуры в первых опытах сверхпроводящая проволочка была заме-

нена медной. Величина R_S^M рассчитывалась по формуле (14). Результаты расчётов приведены в таблице 1.

Таблица 1

$T [^{\circ}K]$	300	78	4,2
$R_S^M [\text{ом}]$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$

При температурах ниже гелиевой (до $1,6^{\circ}K$) уменьшения R_S^M не обнаружено. По формуле (12) найдем частичную добротность резонатора, определяемую потерями на поверхности внешнего медного проводника. При $T = 4,2 + 1,8^{\circ}K$ $Q_M = 1,67 \cdot 10^5$. Отсюда следует, что максимальная величина добротности, которую может иметь составной резонатор (внутренний проводник-сверхпроводящая проволочка), равна этой величине.

В опытах со сверхпроводящими материалами ниобий-цирконий, ниобий-титан и ниобий мы исследовали влияние на величину R_S^C магнитного поля, напряженностью до 40-50 кэ, и зависимость поверхностного сопротивления от температуры в интервале $4,7 + 1,8^{\circ}K$. Сверхпроводящий резонатор принято характеризовать коэффициентом увеличения добротности F , равным отношению "полной" добротности любого сверхпроводящего резонатора \bar{Q}_C к добротности аналогичного медного резонатора \bar{Q}_M при комнатной температуре

$$F = \frac{\bar{Q}_C}{\bar{Q}_M} = \frac{R_S^M \text{ при } T = 300^{\circ}K}{R_S^C \text{ при } T \leq T_K^{\circ}K},$$

где $T_K^{\circ}K$ - критическая температура. Результаты экспериментов и расчетов приведены в таблице 2 и 3.

На рис. 5 и 6 показаны экспериментально полученные зависимости фактора увеличения добротности $F(H)$ при $T=4,2^{\circ}K$ и $F(T)$ при $H = 25$ кэв для исследованных сверхпроводников.

Таблица 2.

(T = 4,2°K)

H [кэ]	Nb-Zr (Nb-70%)			Nb-Zr (Nb-50%)			Nb-Ti (Nb-50%)			Nb-(99,8%)		
	Q _{np.} × 10 ⁻⁴	R _S ^c × 10 ⁵ [ом]	F	Q _{np.} × 10 ⁻⁴	R _S ^c × 10 ⁵ [ом]	F	Q _{np.} × 10 ⁻⁴	R _S ^c × 10 ⁵ [ом]	F	Q _{np.} × 10 ⁻⁴	R _S ^c × 10 ⁵ [ом]	F
0	10,5	1,16	612	9,9	1,26	586	9,7	1,26	563	10,7	0,945	750
10	8,7	1,95	365	7,7	2,03	350	6,7	2,5	284	5,0	8,38	85
20	8,23	2,20	320	7,2	2,29	310	5,53	3,5	202			
30	7,80	2,48	286	6,3	2,86	248	5,05	4,0	177			
40	7,10	3,05	233	5,2	3,82	186	4,6	4,57	155			

Таблица 3.

(H = 25 кэ)

T [°K]	Nb-Zr (Nb-70%)			Nb-Zr (Nb-50%)			Nb-Ti (Nb-50%)		
	Q _{np.} × 10 ⁻⁴	R _S ^c × 10 ⁵ [ом]	F	Q _{np.} × 10 ⁻⁴	R _S ^c × 10 ⁵ [ом]	F	Q _{np.} × 10 ⁻⁴	R _S ^c × 10 ⁵ [ом]	F
4,2	8,23	2,2	320	6,8	2,54	280	5,05	4,0	177
3,0	9,6	1,51	470	8,5	1,68	423	7,2	2,31	308
1,8	10,8	1,06	670	9,9	1,26	586	8,8	1,57	450

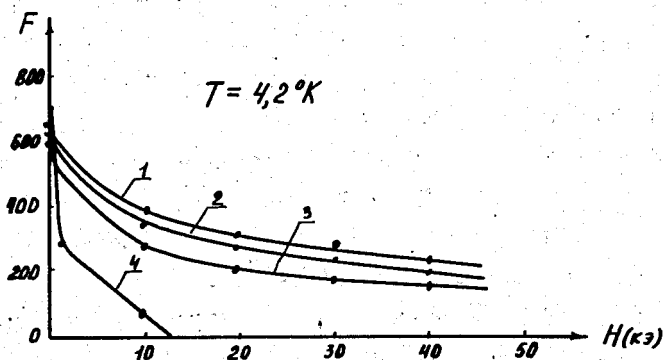


Рис. 5. Зависимость фактора увеличения добротности от внешнего магнитного поля для разных материалов при $T = 4,2^\circ\text{K}$. 1. Nb-Zr (Nb - 70%), 2. Nb-Zr (Nb - 50%), 3. Nb-Ti (Nb - 50%), 4. Nb (99,8%).

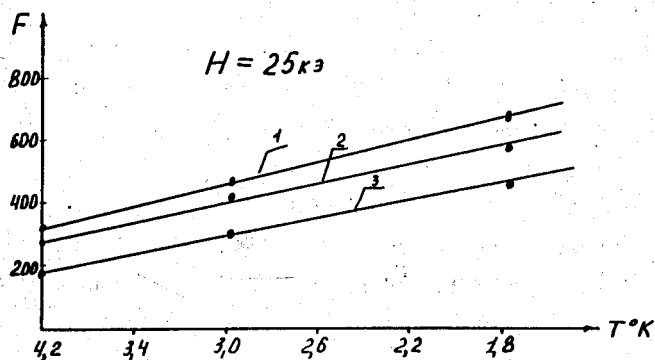


Рис. 6. Фактор увеличения добротности в зависимости от температуры при $H = 25 \text{ кэ}$. 1,2,3 - кривые, соответствующие различным образцам (см. подпись к рис. 5).

Обсуждение результатов эксперимента

Важным, на наш взгляд, результатом экспериментов является то, что при поле $H \approx 20$ кэ и $T = 4,2^\circ\text{K}$ коэффициент увеличения добротности F для исследованных сверхпроводящих сплавов снижается по сравнению со случаем нулевого поля менее, чем в 2 раза; в то же время переход к $T = 1,8^\circ\text{K}$ увеличивает фактор F также примерно в 2 раза. Таким образом, при переходе от $H = 0$ к $H = 20$ кэ и одновременном переходе от $T = 4,2^\circ\text{K}$ к $T = 1,8^\circ\text{K}$ фактор увеличения добротности сохраняет примерно свое значение $F = 600 + 700$.

Добротность измерялась еще для нескольких образцов при напряженности поля до $H = 13$ кэ. Экстраполяция полученных величин для значения $H = 20$ кэ при $T = 1,8^\circ\text{K}$ дала $F = 800 + 900$.

Недостатком описанного метода изучения поверхностного сопротивления сверхпроводников является необходимость применения "составного" резонатора. Из приведенных таблиц видно, что в области магнитных полей до 5 кэ при $4,2^\circ\text{K}$ и $H = 25$ кэ при $T = 1,8^\circ\text{K}$ измеренная добротность близка к значению Q_M , что, как было указано выше, может привести к значительным погрешностям в определении R_S^C . Для снижения ошибки измерения потерь в слабых магнитных полях при температурах в области $4,2^\circ\text{K}$ или в сильных магнитных полях при температурах ниже $T = 1,8^\circ\text{K}$ в дальнейших опытах медная труба будет заменена трубой из сверхпроводника.

Кроме того, при расчётах не учитывались высокочастотные потери в гелии, заполняющем внутренний объем резонатора, в диэлектрических подвесках и элементах связи. Очевидно, что при этом рассчитанные на основе экспериментов значения поверхностного сопротивления завышены по сравнению с истинным.

При обчёте экспериментальных данных по определению R_S^C предполагалось, что электрические характеристики проволоки одинаковы по всей длине. В силу того, что не весь резонатор помещался внутри соленоида, сверхпроводящая проволока находилась в неоднородном магнитном поле и, следовательно, это условие не выполнялось. Однако проведенный расчёт

оправдан, т.к. в центральной части проволоки, где поле однородно, сосредоточено не менее 80% потерь P_c .

В экспериментах использовались образцы, поверхности которых не подвергались термической и химической обработкам. По данным [10,14], электрополировка поверхности коммерческого Nb и отжиг его при высокой температуре и глубоком вакууме уменьшает поверхностное сопротивление более, чем на порядок.

Мы полагаем, что учёт всех видов потерь мощности при расчётах R_s^c и обработка поверхности сверхпроводника позволят получить коэффициент увеличения добротности $\approx 10^4$ при $T = 1,8^\circ\text{K}$ и $H = 25$ кэ.

Авторы благодарят инициатора работ В.П.Саранцева за поддержку и постоянный интерес к данным исследованиям. Авторы благодарны А.Г.Зельдовичу, И.Н.Гончарову и Н.И.Баландикову за организацию криогенных работ и предоставление образцов сверхпроводников, а также В.Чумакову за обслуживание гелиевой системы.

Л и т е р а т у р а

1. H.Nahn and H.O.Halama, IEEE Trans. Nucl.Sci., 14, 356 (1967).
2. Е.Христенко. ЖТФ, 37, 1852 (1967).
3. H.Schwettman et al. Advances in Cryogenic Engineering 10, sec. M-U, 80 (1965).
4. P.Wilson et al. Proc.of 6-th Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge (1967).
5. E.Chambers. Proc. of 6-th Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge (1967).
6. H.Schwettman et al. IEEE Trans. Nucl.Sci., 14, 336 (1967).
7. P.P.Wilson et al. Proc. Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Dubna (1963).

8. В.И.Векслер, В.П.Саранцев, А.Г.Бонч-Осмоловский, Г.В.Долбилов, Г.А.Иванов, И.Н.Иванов, М.Л.Иовнович, И.В.Кожухов, А.Б.Кузнецов, В.Г.Маханьков, Э.А.Перельштейн, В.П.Рашевский, К.А.Решетникова, Н.Б.Рубин, С.Б.Рубин, П.И.Рыльцев, О.И.Ярковой. Доклад на международной конференции по ускорителям, Кембридж, 1967; Препринт ОИЯИ Р9-3440-2, Дубна, 1967.
9. Н.Г.Анищенко, А.С.Алексеев, Н.И.Балалыкин, А.А.Белушкина, В.А.Васильев, И.Н.Гончаров, Ю.С.Дерендяев, А.Г.Зельдович, Н.К.Зельдович, А.Б.Кузнецов, Ю.В.Муратов, Н.Б.Рубин, А.А.Сабаев, В.П.Саранцев, Ю.И.Смирнов, И.С.Хухарева, В.Г.Шабратов, Ю.А.Шишов. Доклад на VII Международной конференции по ускорителям. Ереван, 1969.
10. A. Banford. Proc. Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Dubna, 1963.
11. В.Никольский. Теория электромагнитного поля. Высшая школа, Москва (1964).
12. A. Septier. L'Onde electr., 45, 932 (1965).
13. R. Chambers. Proc. Roy. Soc., A215, 481 (1952).
14. J. Turneurs and I. Weissman, J. Appl. Phys., 39, 4417 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел

10 ноября 1969 года.