

О перспективности создания в сверхпроводящих резонаторах типа Nb/Cu рабочего слоя в виде двухслойных Nb/NbN и трёхслойных NbN/Nb/NbN плёнок

Н.И. Балалыкин, А.Б. Кузнецов

Объединный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Ш. Гажи, Ш. Бенячка

Электротехнический институт Словацкой Академии наук, Братислава, Словакия

Введение

В большинстве случаев в ускорительной технике при создании ниобиевых сверхпроводящих резонаторов (СПР) для преодоления термомагнитного пробоя используют дорогой сверхчистый ниобий в виде листа. На таких СПР получены ускоряющие поля 25 МВ/м (в опытных СПР — 40 МВ/м) [1]. СПР из меди, в которых рабочая поверхность создаётся путём напыления плёнки Nb (СПР типа Nb/Cu) [2, 3], не подвержены явлению термомагнитного пробоя. Однако в таких СПР с плёнкой Nb, созданной путём магнетронного напыления [3], встретились с неквадратичными потерями, ведущими к существенному падению добротности резонаторов Q при $E_a > 1 \div 2$ МВ/м [4].

Начало падения Q коррелирует с превышением амплитудой магнитного ВЧ-поля V_a первого критического поля V_{c1} плёнки Nb [5]. У плёнок, полученных магнетронным способом, величина V_{c1} значительно (более чем на порядок) меньше, чем у массивного ниобия. Несмотря на это, создание СПР типа Nb/Cu считается актуальным [1]. Существенное снижение потерь в таких СПР связано с повышением V_{c1} рабочего слоя. С этой целью нами были изучены сверхпроводящие характеристики плёнок Nb и NbN, а также двухслойных NbN/Nb и трёхслойных NbN/Nb/NbN тонкоплёночных структур. Такие плёнки и структуры были приготовлены в едином технологическом цикле на вакуумной установке ALCATEL с использованием магнетрона планарного типа, работающего на постоянном токе.

1. Приготовление и исследование образцов

Предварительно вакуумная камера откачивалась до давления $6,5 \cdot 10^{-5}$ Па с помощью турбомолекулярного насоса производительностью 380 л/с с азотной ловушкой. Мониторинг спектра остаточного газа осуществлялся масс-спектрометром QUADRUVAC-200. В качестве мишени (\varnothing 100 мм) использовался ниобий чистотой 99,96%. Расстояние между мишенью и держателем подложек было установлено 95 мм. Специальный подогрев подложек не применялся. В процессе напыления температура подложек (Si/SiO₂) не поднималась выше 90° С. Рабочий вакуум 2,2 Па. Предварительно перед напылением производилась чистка мишени в разряде аргона, а подложки подвергались трёхкратной (по две минуты) ВЧ-чистке в разряде аргона при том же давлении. В качестве рабочего газа при напылении Nb использовался Ag, а напыление NbN производилось в рабочей смеси (78%Ag+22%N₂). Чистота обоих газов 99,997%. Указанная смесь газов была приготовлена в отдельном баллоне и напускалась в рабочий объём с помощью прецизионного натекателя.

Температура сверхпроводящего перехода T_c , удельное сопротивление ρ_n перед переходом в СП-состояние и остаточное сопротивление $RRR = \rho_{300} / \rho_n$, где ρ_{300} — удельное сопротивление при комнатной температуре, измерялись с использованием стандартной четырёхпроводной методики. Первое критическое магнитное поле V_{c1} образцов определялось при температуре 4,2 К по методике, основанной на применении датчика Холла. Датчик помещался в центре образца, а его линейные размеры были в 10 раз меньше линейных размеров образца.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице, где также приведены характеристики однослойных плёнок Nb и NbN на тех же подложках.

Таблица 1: d — толщина плёнки, B_{c1} — первое критическое поле, T_c — температура сверхпроводящего перехода, ΔT_c — ширина сверхпроводящего перехода, v — скорость напыления, I_{mag} — ток магнетрона в режиме напыления плёнки

Образец	2G	1G	7.27	4G	9G	10G
Состав	Nb	Nb	NbN	NbN/Nb	Nb/NbN	NbN/Nb/NbN
$d, \text{нм}$	300	300	300	300/200	200/300	300/200/50
$B_{c1}, \text{мТ}$	12	5	6	20	25	23
$T_c, \text{К}$	8,3	9,9	14,2	13	13,8	13
$\Delta T_c, \text{К}$	0,42	0,08	0,4	0,27	0,28	0,14
$\rho_{300}/\rho_{4,2}$	1,8	2,7	0,93	3,1	3,1	3,3
$v, \text{А/с}$	16	50	43	43/50	50/50	50/50/50
$I_{mag}, \text{А}$	2	5	4,2	4,2/5	5/4,4	4,4/5/4,4

Как следует из таблицы, у двухслойных и трёхслойных плёночных структур B_{c1} приблизительно в четыре раза выше, чем у отдельно взятых плёнок Nb и NbN, напылённых при том же режиме магнетрона.

На рис. 1 приведены зависимости проникающего в плёнки магнитного поля от внешнего поля. Проникновение поля в плёнки Nb и NbN имеет ступенчатый характер, а в плёночные структуры — плавный. Это ещё одна характерная особенность двух- и трёхслойных плёнок (практическое отсутствие пиннинга). Ступенчатый характер кривых у образцов 1G, 2G, 7.27 можно объяснить сильным пиннингом в этих плёнках, что мешало проникновению поля в область датчика. Имея это в виду, кривые аппроксимировались касательными, как показано на рис. 1, и B_{c1} определялось по точкам пересечения этих касательных с осью абсцисс.

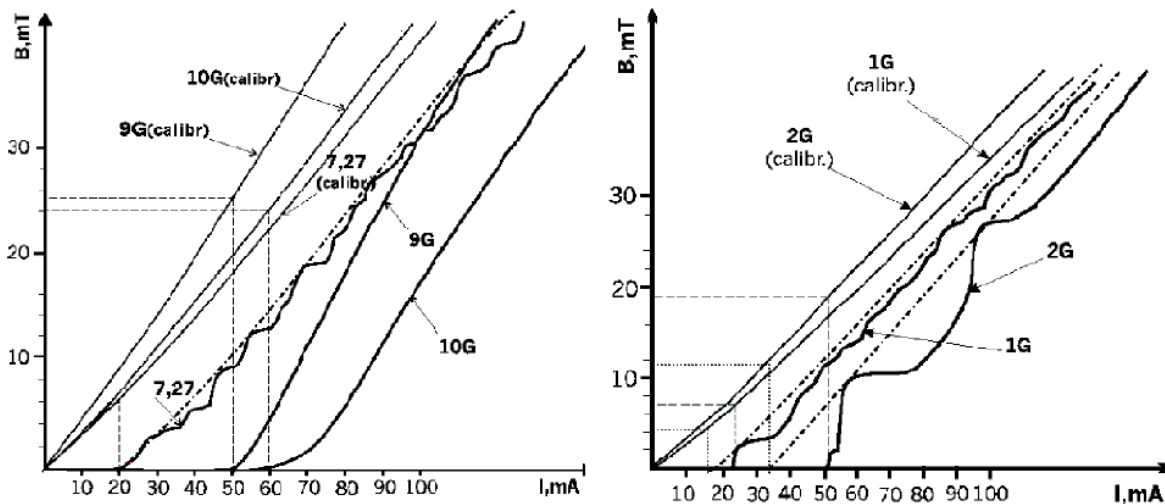


Рис. 1: Характер проникновения внешнего магнитного поля (I_{mag}) в плёнки Nb и NbN (образцы 1G, 2G, 7.27) и в плёночные структуры (образцы 9G, 10G).

Причины обнаруженного увеличения B_{c1} нам пока не ясны. Возможно, эти плёночные структуры являются новыми сверхпроводниками со своими характеристиками. По технологии получения эти структуры являются анизотропными. Не ясно, анизотропны ли их сверхпроводящие свойства. Нами B_{c1} измерялось в поле, нормальном к поверхности плёнок; необходимо его измерить также в тангенциальном поле. Если эффект увеличения подтвердится и в тангенциальном поле, то это может позволить улучшить характеристики Nb/Cu резонаторов.

Имея это в виду, эти структуры заслуживают дальнейшего исследования как при использовании планарных, так и аксиальных магнетронов, с учётом измерения B_{c1} в тангенциальном поле. Также необходимо исследовать зависимость увеличения B_{c1} от качества ниобиевого слоя и от соотношения толщин слоёв NbN и Nb в структурах.

При любой технологии изготовления СПР последней стадией является создание **защитной** плёнки на рабочей поверхности сверхпроводника. Как показано в [6], хорошей защитой может быть плёнка нитрида ниобия, который сам является сверхпроводником. При тонкоплёночной технологии изготовления СПР применение плёнки NbN в качестве защитной представляется наиболее целесообразным, так как процесс можно проводить в едином технологическом цикле.

2. О повышении производительности аксиального магнетрона

Как можно заключить из сравнения характеристик плёнок Nb, напылённых с помощью аксиального [4] и планарного [7] магнетронов, последний обеспечивает лучшие характеристики плёнок. Это можно объяснить недостаточной производительностью применённого аксиального магнетрона [4]. С целью повышения производительности аксиального магнетрона предлагается магнетрон с усовершенствованной магнитной системой [8] (рис. 2), приближающийся по производительности процесса напыления к магнетрону планарного типа.

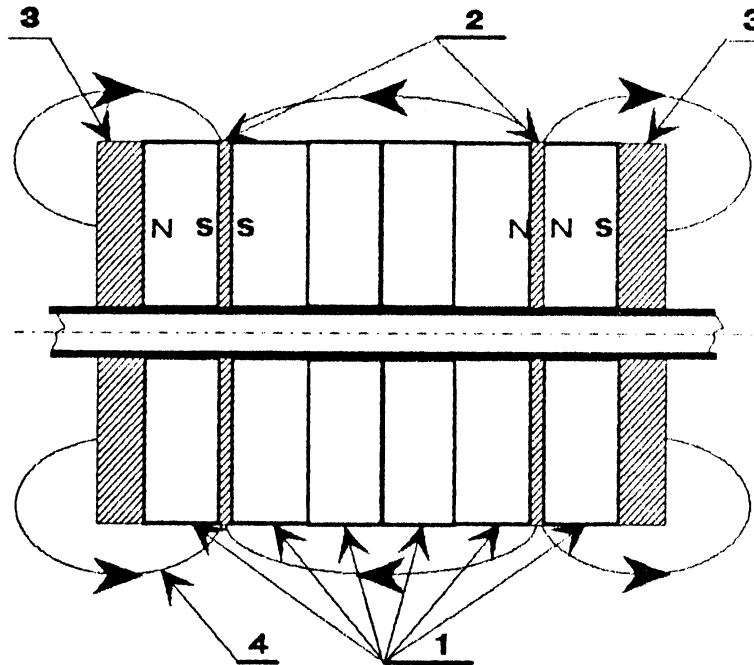


Рис. 2: Магнитная система усовершенствованного аксиального магнетрона: 1 — самарий-кобальтовые кольцевые магниты, 2 — каспы из мягкого железа, 3 — экраны из мягкого железа, 4 — линии магнитного поля.

Этот магнетрон позволит в Nb/Cu резонаторах в едином технологическом цикле создавать при комнатной температуре подложки трёхслойные NbN/Nb/NbN рабочие плёнки с более высокими B_{c1} как из-за повышения производительности процесса напыления, так и в результате обнаруженного эффекта увеличения B_{c1} в двухслойных и трёхслойных плёнках. Кроме того, можно ожидать, что при большей скорости напыления плёнки уменьшится остаточное сопротивление и, следовательно, повысится Q .

3. Обсуждение

Применение усовершенствованного аксиального магнетрона, обеспечивающего бóльшую скорость напыления, и создание двухслойных NbN/Nb или трёхслойных NbN/Nb/NbN структур рабочего слоя может позволить увеличить B_{c1} и, следовательно, отодвинуть границу появления неквадратичных потерь и уменьшить их рост.

Кроме того, имея в виду влияние *гладкости* рабочей поверхности резонаторов [9, 10] (*гладкая* поверхность препятствует проникновению флюксоидов — отодвигает границу их рождения приблизительно в два раза), можно полировкой поверхности медной подложки ещё больше улучшить качество Nb/Cu резонаторов.

Заключение

Для уменьшения неквадратичных потерь в NbCu резонаторах предлагается следующее:

- использование усовершенствованного аксиального магнетрона, обеспечивающего бóльшую скорость напыления плёнки Nb;
- создание в едином технологическом цикле двухслойных (NbN/Nb) и трёхслойных (NbN/Nb/NbN) рабочих плёнок;
- уменьшение шероховатости медной подложки для повышения *гладкости* поверхности рабочего слоя.

Выражаем глубокую благодарность Э.А.Перельштейну и В.Б. Приезжеву за полезные обсуждения и А.М. Старикову за помощь в оформлении статьи.

Литература

- [1] J. Tückmantel. CERN Courier, **40**, N2, 25 (2000).
- [2] Н.Г. Анищенко, А.С. Алексеев, Н.И. Балалыкин и др. Препринт ОИЯИ 39-4722, Дубна (1969).
- [3] C. Benvenuti, D. Bloess et al. – Proceed. 4th Workshop RF Superconductivity, 14-18 august 1989, Tshkuba, Japan.
- [4] C. Durand et al. – I.E.E.E. Trans. Appl. Super., **5**, 1107 (1995).
- [5] N.I. Balalykin, A.B. Kuznetsov. – Proceed. 8th Workshop RF Superconductivity, Abano Terme (PD), Italy, Oct. 6-10, 1997, ed. V. Palmieri, A. Lombardi, Vol. II 366 (1998).
- [6] M.A. Allen, Z.D. Farkas, H.A. Hogg et al. – IEEE Trans. Nucl. Sci., **18**, N3 168 (1971).
- [7] D.H. Kim, K.E. Gray, J.H. Kang. // Phys.Rev.B, **45**, 7563 (1992).
- [8] Н.И. Валалыкин. Магнетрон. Патент N 2074575, Бюллетень изобретений, N 6 (1997).
- [9] А.Б. Кузнецов. – Труды III Научного семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, 1999. — Дубна: ОИЯИ, 173 (2000) (ОИЯИ, Д9-2000-69).
- [10] А.Б. Кузнецов. О возможности улучшения качества сверхпроводящих резонаторов типа Nb/Cu созданием гладкости их рабочего слоя (данное совещание).