

С3932  
Б-20

9/11-1

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P8 - 686

1335/2-73



ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

Н.И.Балалыкин, Ю.В.Муратов, Н.Б.Рубин,  
Ю.И.Смирнов, В.Г.Шабратов

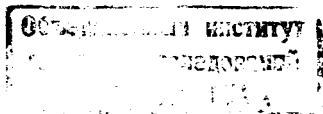
НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
НАПЫЛЕННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ  
ТОНКИХ ПЛЕНОК

1972

P8 - 6863

Н.И.Балалыкин, Ю.В.Муратов, Н.Б.Рубин,  
Ю.И.Смирнов, В.Г.Шабратов

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
НАПЫЛЕННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ  
ТОНКИХ ПЛЕНОК



## 1. Исследование воспроизводимости характеристик тонких пленок

При нанесении сверхпроводящей /СП/ пленки на приемную поверхность необходимо получить:

- 1/ определенную требуемую толщину пленки;
- 2/ равномерное распределение пленки по толщине приемной поверхности;
- 3/ определенное соотношение компонент в нанесенной пленке.

### *Измерение толщины и скорости нанесения пленок*

Толщина - один из важнейших параметров тонких пленок. Поэтому необходимо производить точные измерения толщины пленки в процессе нанесения. Особенно точным должен быть контроль за скоростью нарастания толщины в тех случаях, когда формируется пленка сплава путем одновременного напыления из двух или нескольких испарителей.

Существует несколько способов определения толщины пленки: измерение сопротивления напыленной /металлической/ пленки, измерение степени ионизации потока испаряющихся частиц, измерение прозрачности /оптической/ металлических и диэлектрических пленок, взвешивание полученной пленки, измерение разности фаз двух когерентных лучей /интерференционный метод/ и ряд других. Сравнительно недавно предложен способ определения толщины пленки, основанный на изменении частоты колебаний кристалла кварца при напылении на него тонкой пленки /2/.

Для кристалла кварца, в котором колебания возбуждаются в поперечном направлении, толщина пластинки  $a$  соответствует половине длины волны основной частоты /3/

$$f = \frac{v}{2a} = \frac{N}{a}, \quad /1/$$

где  $f$  - основная частота,  $v$  - скорость упругой поперечной волны в направлении толщины пластинки,  $N$  - частотная постоянная.

Дифференцируя уравнение /1/ по  $a$  и вводя величину

$$da = \frac{l}{\rho_q F} dm,$$

где  $\rho_q$  - плотность кварца,  $F$  - площадь пластинки кварца, получаем

$$df = -\frac{f^2}{N\rho_q} \cdot \frac{dm}{F} \quad /2/$$

Из /2/ видно, что уход частоты пропорционален изменению массы. Можно считать, что тонкая пленка из любого материала, нанесенного на кварцевую пластинку, приводит к тому же уходу частоты, что и идентичное изменение массы самого кварца. Таким образом, в формуле /2/  $dm = F \cdot \delta \cdot \rho_m$ ,

$$\text{т.е. } df = -\frac{f^2}{N\rho_q} \cdot \frac{F \cdot \delta \cdot \rho_m}{F} = -\frac{f^2 \cdot \delta}{N} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_q},$$

$$\text{или } |\delta| = \left| -\frac{N \cdot df}{f^2} \cdot \frac{\rho_q}{\rho_m} \right|, \quad /3/$$

где  $\rho_m$  - плотность материала пленки,  $\delta$  - толщина пленки.

Выбор частоты колебаний кварца зависит от диапазона измеряемых толщин и цели исследования. Для измерения тонких пленок желательна большая чувствительность и более высокая частота /2/. Если исследуемый диапазон толщин велик, важно иметь возможно большую область линейности и, следовательно, брать кварц более толстый, т.е. с низкой частотой /1/. С другой стороны, если измерять уход частоты с большей точностью /это зависит от используемого частотомера/, то можно и на кварце с низкой частотой получать точные результаты.

К сдвигу частоты кварца приводит изменение окружающей среды, например, откачка объема установки, в котором находится кварц. Если все измерения проводятся в вакууме, уход частоты пренебрежимо мал.

Механические сотрясения могут вызвать уход частоты, если положение кристалла в держателе или электрические контакты кварца с выводами изменяются. Эти влияния устраняются путем использования кварцедержателя соответствующей конструкции.

Наиболее трудно устранимой причиной паразитных уходов частоты является нестабильность температуры кристалла кварца. С этой точки зрения наиболее подходящим является исполь-

зование массивного кварца /более низкочастотного/ в течение малого времени замера. Для повышения точности измерения ухода частоты в этом случае следует пользоваться частотомером, позволяющим отсчитывать показания с точностью до герца.

Учитывая изложенное, для определения толщины пленки и скоростей напыления в данной работе использовали кварц с частотой 500 кгц /АТ-срез,  $N = 1670$  кгц  $\times$  мм/. Схема генератора приведена на рис. 1.

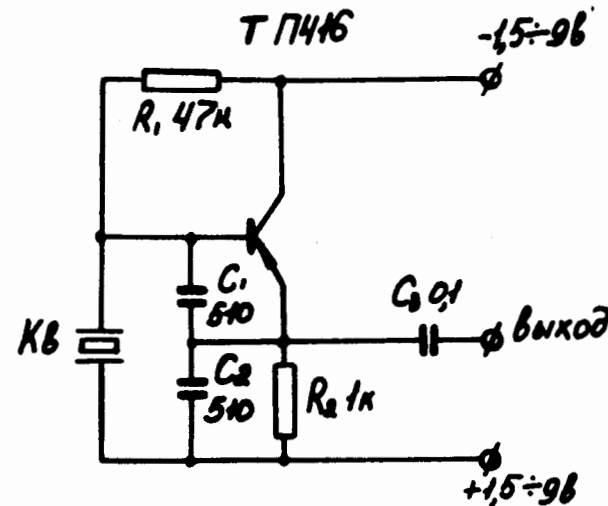


Рис. 1.

Уход частоты регистрировался частотомером марки TR - 5589K /фирма Takeda Riken, Япония/. Указанный прибор позволяет измерять частоту с точностью до 0,1 гц. При изменении времени напыления на кварц от 0,5 до 20 мин паразитный уход частоты от нагрева кварца практически не сказался - расхождение показаний частотомера при замере в вакууме спустя 3 мин после напыления и после развакуумирования камеры находилось в пределах ухода частоты от изменения среды, т.е. 1 гц /что определялось предварительно без напыления/.

Для подтверждения правильности формулы /3/ толщина пленки определялась методом взвешивания. С этой целью временно с кварцем напылялась стеклянная пластинка. Взвешивание пластинки до и после напыления производилось на аналитических весах.

Такое сравнительное определение толщины пленки было проведено для ниобия, циркония и титана. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Материал	Метод определения толщины								
	Кварцевый резонатор				Взвешивание				
	Время напыления, $\tau$ , мин.	$\frac{P_2}{P_1}$	Исходная частота, $f$ , кГц	Уход частоты, $\Delta f$ , кГц	Толщина пленки, $\delta$ , мкм	Вес пластины до напыления, $P_1$ , г	Вес пластины после напыления, $P_2$ , г	Площадь напыления, $F$ , см <sup>2</sup>	Толщина пленки, $\delta$ , мкм
Nb	15	0,314	499,631	0,105	0,221	2,7043	$\frac{2,7056+2,7055}{2} = 2,70555$	6,5	0,224
Zr	15	0,415	499,526	0,074	0,206	2,7056	$\frac{2,7065+2,7064}{2} = 2,70645$	6,5	0,201
Ti	10	0,600	499,741	0,109	0,432	2,6551	$\frac{2,6564+2,6563}{2} = 2,65635$	6,4	0,434

Как следует из таблицы 1, результаты определения толщины напыленной пленки обоими методами близки по величине. При этом необходимо отметить недостаточную для такой цели точность взвешивания на аналитических весах - 0,1 мг.

В дальнейшем определение толщины напыленной пленки и скоростей напыления производилось кварцевым резонатором.

Разработанная в Отделе новых методов ускорения короткофокусная электроннолучевая пушка с кольцевым катодом  $\varphi 10$  позволяет испарять тугоплавкие металлы / Mo, Nb, Zr и др/. Для увеличения интенсивности испарения могут использоваться катоды более сложной формы - как плоские, так и выгнутые по сфере /см. рис. 2/.



Рис. 2. Типы экспериментальных катодов в плане.

Экспериментальная проверка выявила, что наиболее технологичным является катод I типа-выгнутого по сфере радиусом 19 мм. На рис. 3 и 4 приведены кривые зависимости скорости напыления ниобия от тока разряда для трех различных разгоняющих напряжений в пушке. Скорость напыления определялась кварцевым резонатором, расположенным над центром анода пушки на высоте 200 мм от плоскости испарителя.

Сравнивая скорости напыления по рис. 3 и 4, можно сделать выводы:

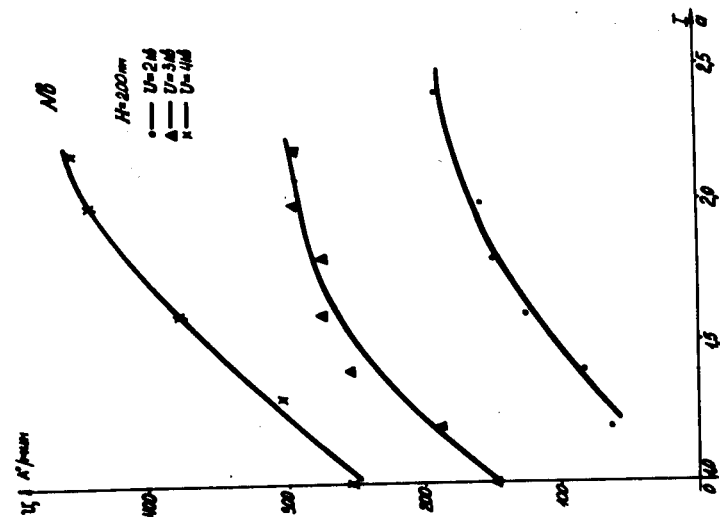


Рис. 4. Зависимость скорости напыления от тока разряда. Катод выгнут по сфере радиусом 19 мм.

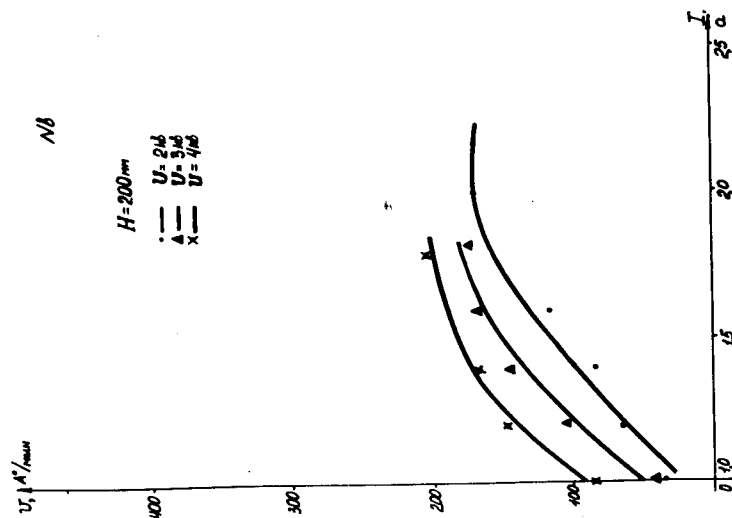


Рис. 3. Зависимость скорости напыления от тока разряда. Катод плоский.

- 1/ об эффективности использования катода, выгнутого по сфере;
- 2/ о зависимости скорости напыления от разгоняющего напряжения пушки.

Катоды сферического типа обеспечивают более высокую плотность энергии по сравнению с плоскими катодами благодаря улучшению сходимости электронного потока. Высокая плотность энергии, в свою очередь, способствует увеличению скорости испарения.

На рисунках 5, 6 и 7 приведены кривые зависимости скорости нанесения пленок ниобия, циркония и титана от режима работы испарителя. Диапазон разгоняющих напряжений для испарения этих металлов был выбран в результате многочисленных экспериментов и соответствует условиям продолжительной стабильной работы испарителей.

#### Исследование распределения наносимого материала на вращающейся подложке

Для получения равномерной по толщине пленки на большой площади /например, поверхность резонатора/ необходимо исследовать характер распределения наносимого материала на приемной поверхности. Характер такого распределения зависит от конструкции испарителя и подложки, а также от расположения испарителя относительно подложки. Теоретически распределение пленки на приемной поверхности рассчитывается в предположении, что испарение происходит в достаточно хорошем вакууме и поток частиц является атомным /молекулярным/. Кроме того принимается, что коэффициент аккомодации равен единице, т.е. каждая частица испаряемого вещества фактически конденсируется на приемной поверхности. С учетом вращения подложки расчет производится аналогично тому, как рассчитывается освещенность элементов поверхности от источника света, геометрически подобного испарителю, но испускающего атомный /молекулярный/ поток. Такой расчет справедлив для веществ с температурой испарения выше  $1000^{\circ}\text{C}$  /при этом интенсивность испарения мала и влиянием столкновений испарившихся молекул между собой вблизи испарителя можно пренебречь/, осажденных на чистую металлическую /либо стеклянную/ поверхность при давлении остаточных газов не более  $10^{-4}$  тор [4], т.е. подходит для нашего случая.

Схема расчета приведена на рис. 8.

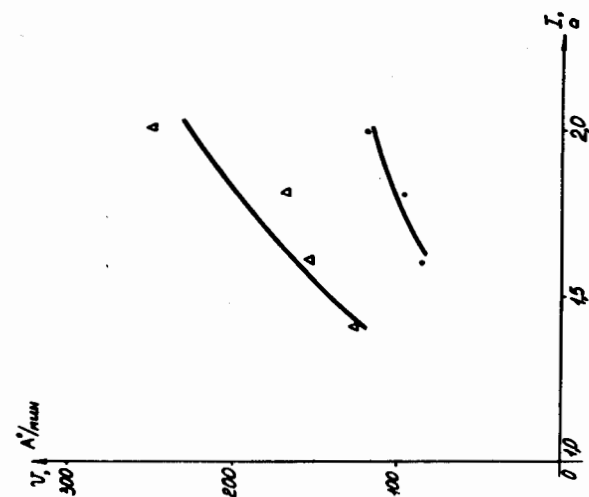


Рис. 6.

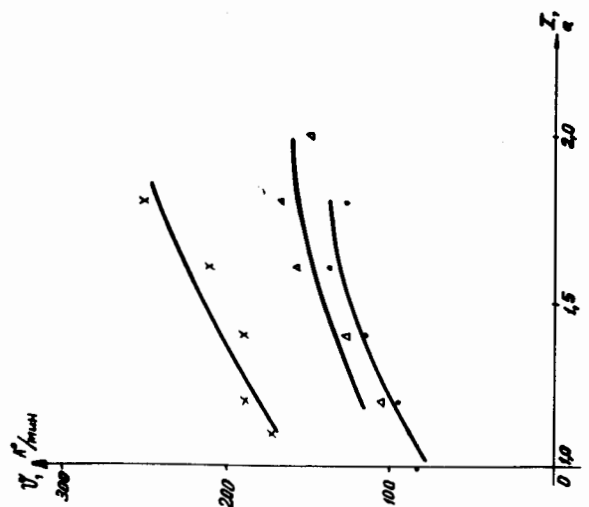


Рис. 5.

$T_i$      $H=250$  мм  
 · — 4,0 МБ  
 ▲ — 4,5 МБ  
 × — 2,0 МБ

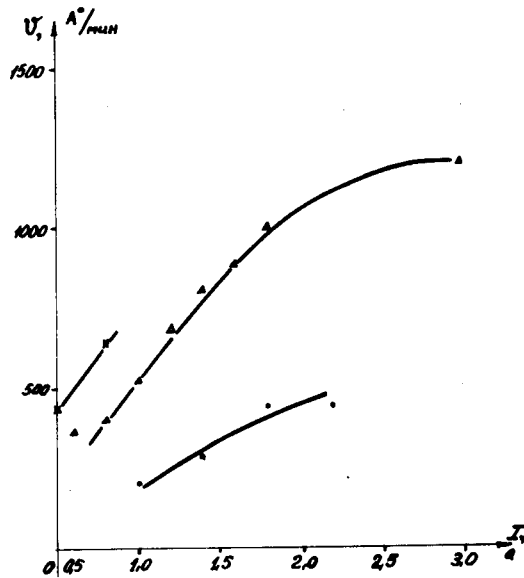


Рис. 7.

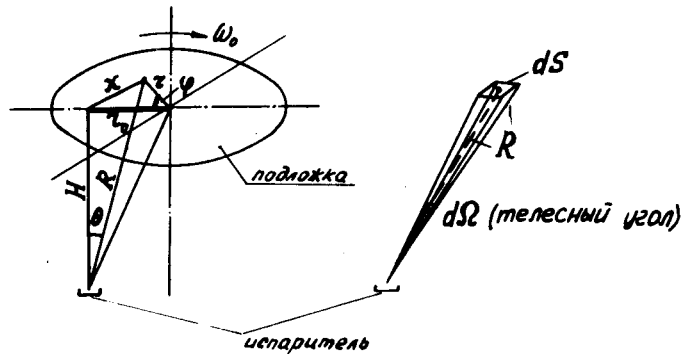


Рис. 8. Схема расчета распределения материала на вращающейся подложке.  $H$  - высота расположения плоскости подложки от плоскости испарителя,  $r_0$  - эксцентриситет подложки и испарителя.

Интенсивность испаряющегося материала в единице телесного угла определяется формулой  $\frac{d\Phi}{d\Omega} = I_0 \cdot \cos \theta$ .

Здесь  $\cos \theta$  учитывает анизотропию потока частиц испаряющегося материала.

$$d\Omega = \frac{dS_{\perp}}{R} = \frac{dS \cos \theta}{R};$$

$$\frac{d\Phi}{dS} = I_0 \cdot \frac{\cos^2 \theta}{R^2} = dE,$$

где  $dE$  - поток интенсивности на единичную площадку в плоскости, где расположено изделие /подложка/. Количество напыленного материала на единичную площадку за время  $dt$

$$dQ = dE \cdot dt.$$

При вращении приемной поверхности /диска/ с частотой  $\omega_0$

$$dt = \frac{d\phi}{\omega_0};$$

$$dQ = dE \frac{d\phi}{\omega_0} = I_0 \frac{\cos^2 \theta}{R^2} \cdot \frac{d\phi}{\omega_0};$$

$$\cos^2 \theta = \frac{H^2}{R^2};$$

$$R^2 = H^2 + x^2 = H^2 + r_0^2 + r^2 - 2r_0 r \cos \phi;$$

$$\theta = \theta(\phi).$$

Количество напыленного материала за период обращения диска  $T$  на единичной площадке равно

$$Q = \int_0^T dQ = \int_0^{2\pi} \frac{I_0 \cos^2 \theta}{R^2 \omega_0} d\phi.$$

При неподвижном диске за время  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$  на единичной площадке над испарителем количество напыленного материала равно

$$Q_0 = \frac{l_0 T}{H^2} = \frac{l_0 2\pi}{H^2 \omega_0};$$

$$\eta = \frac{Q}{Q_0} = \frac{H^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 d\phi}{(H^2 + r_0^2 + r^2 - 2r_0 r \cos \phi)^2} =$$

$$= \frac{l}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\phi}{[1 + (\frac{r_0}{H})^2 + (\frac{r}{H})^2 - \frac{2r_0 r}{H^2} \cos \phi]^2} = \frac{l}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{d\phi}{(a + b \cos \phi)^2};$$

где

$$a = 1 + (\frac{r_0}{H})^2 + (\frac{r}{H})^2;$$

$$b = -\frac{2r_0 r}{H^2}; \quad a^2 > b^2 \quad /всегда легко проверить/.$$

$$\frac{l}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{d\phi}{(a + b \cos \phi)^2} = -\frac{l}{\pi(a^2 - b^2)} \left\{ \frac{b \sin \phi}{a + b \cos \phi} - a \int_0^{\pi} \frac{d\phi}{a + b \cos \phi} \right\} =$$

$$= -\frac{l}{\pi(a^2 - b^2)} \left\{ \frac{b \sin \phi}{a + b \cos \phi} - \frac{2a}{\sqrt{a^2 - b^2}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\sqrt{a^2 - b^2} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2}}{a + b} \right\} \Big|_0^{\pi} =$$

$$= \frac{a}{(a^2 - b^2)^{3/2}};$$

$$\eta = \frac{a}{(a^2 - b^2)^{3/2}}.$$

Варьируя величину  $r_0$ , можно определить положение испарителя, при котором материал будет наноситься равномерно по всей площади диска при вращении последнего.

Согласно расчетным данным, наиболее подходящим является расположение испарителя на расстоянии  $r_0 = 19$  см от оси вращения диска /планшайбы/.

Высота расположения  $H$  плоскости подложки от плоскости испарителя подбиралась экспериментально, т.к. распределение потока испаряющихся частиц определяется конструкцией испарителей.

На рис. 9 приведены кривые распределения скоростей нанесения ниобия в зависимости от расстояния до оси испарителя при неподвижном диске. Указанные кривые снимались на трех высотах расположения плоскости измерений от плоскости испарителей: 150, 200 и 250 мм. Как видно из рис. 9, наиболее подходящим является расположение подложки /резонатора/ на высоте 250 мм от плоскости испарителя. Только при таком расположении практически отсутствует теневая зона для потока частиц испаряющегося материала.

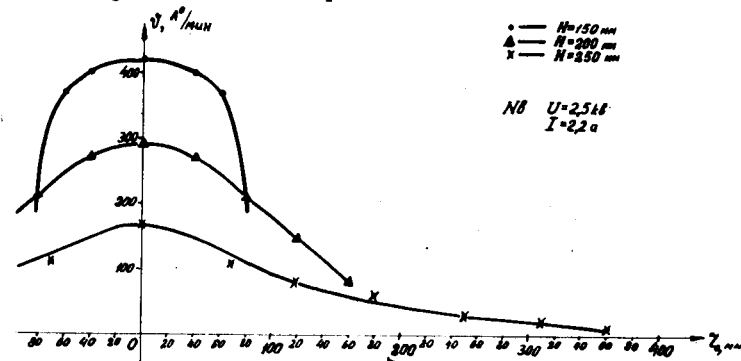


Рис. 9. Зависимость скоростей нанесения материала от расстояния до оси испарителя при неподвижной подложке. Испаритель и подложка соосны.

Расчетные и экспериментальные данные распределения наносимого материала /ниобия/ по площади при вращении подложки на высоте  $H = 250$  мм приведены в таблице 2.

Таблица 2

Расстояние от оси вращения подложки, $z_0$ , мм		60	125	215	235
коэф. распределения $\eta = \frac{Q}{Q_0}$	расчет	0,33	0,34	0,31	0,30
	$\eta_{cp} = 0,32$				
	эксперимент	0,29	0,33	0,28	0,27
	$\eta_{cp} = 0,29$				



Основными условиями получения в процессе напыления пленок с заданным соотношением компонент является знание скоростей нанесения отдельных компонент. В предыдущей главе приводились кривые зависимости нанесения  $Nb$ ,  $Zr$ ,  $Ti$  в зависимости от режимов работы испарителей. Зная эти скорости и плотности металлов, можно заранее рассчитать состав по формуле:

$$v_x = \frac{\frac{a}{100-a} \cdot v_y}{\frac{\rho_x}{\rho_y}};$$

где  $v_x$  и  $v_y$  - скорости нанесения компонент,  $a$  - процент компоненты  $x$  в составе пленки,  $\rho_x$  и  $\rho_y$  - плотность компонент.

Например, требуется определить соотношение скоростей нанесения  $Nb$  и  $Ti$  для получения пленки состава НТ-30 /по весу/

$$v_{Ti} = \frac{\frac{30}{100-30} \cdot v_{Nb}}{\frac{4,5}{8,6}} = \frac{0,43}{0,52} v_{Nb} = 0,82 v_{Nb}$$

при  $v_{Nb} = 200 \text{ A}^\circ/\text{мин}$  на высоте  $H = 250 \text{ мм}$ .  $v_{Nb} = 165 \text{ A}^\circ/\text{мин}$ .

В таблице 3 приведены соотношения скоростей  $Nb$ ,  $Ti$ ,  $Zr$  для получения различных двухкомпонентных составов на основе ниобия по весу.

В таблице 3 скорости нанесения титана и циркония вычислены относительно скорости нанесения ниобия. Это связано с тем, что технологически более широкий диапазон стабильных режимов имеют титан и цирконий, в то время как ниобий стабильно испаряется в узком энергетическом диапазоне.

## II. Сверхпроводящие свойства

В данной части приводятся результаты исследований сверхпроводящих свойств полученных пленок ниобия, ниобий-титана, ниобий-циркония и ниобий-олова толщиной до  $10^5 \text{ A}^\circ$ . В опытах измерялась критическая температура пленок  $T_K$  и определялась зависимость критической плотности тока  $j_K$  /или тока  $I_K$ / от внешнего магнитного поля, перпендикулярного направлению тока в пленке, от содержания  $Ti$  в  $NbTi$  пленках, от толщины  $Nb$  пленок и от материала приемной поверхности /подложки/.

Таблица 3

Состав	Отношение скоростей $v_x/v_y$	Состав	Отношение скоростей $v_x/v_y$
НТ-10	0,21	НЦ-10	0,15
НТ-20	0,48	НЦ-20	0,33
НТ-30	0,82	НЦ-30	0,57
НТ-40	1,27	НЦ-40	0,88
НТ-50	1,91	НЦ-50	1,32
НТ-60	2,87	НЦ-60	1,98
НТ-70	4,46	НЦ-70	3,08
НТ-80	7,64	НЦ-80	5,29
НТ-90	17,20	НЦ-90	11,90

Исходным материалом служили промышленные ниобий, титан, цирконий и олово чистоты 99,8%, которые загружались в медные тигли, охлаждаемые водой. После откачки системы высоковакуумным агрегатом ВА-5-4 до давления порядка  $10^{-6}$  тор в камеру напускали аргон  $P \approx 10^{-2}$  тор/ и производили чистку камеры тлеющим разрядом в течение  $20 \div 30$  минут. Затем камера вновь откачивалась до давления  $10^{-6}$  тор и после переплавки электронным пучком исходных материалов в течение  $20 \div 30$  минут начинался процесс напыления.

В качестве подложек использовались химически очищенная медная, латунная и бронзовая фольги длиной  $160 \div 320$  мм, шириной 4 мм, толщиной  $0,05 \div 0,25$  мм. Непосредственно перед напылением пленки подвергались повторной чистке тлеющим разрядом. Скорость напыления компонент выбиралась в зависимости от желаемого процентного соотношения и регулировалась в пределах  $50 \div 1000 \text{ A}^\circ$  в минуту.

### Критическая температура

Критическая температура пленок определялась методом "перевернутого дюара" /5/. Она определялась по изменению электрического сопротивления образца в зависимости от температуры при пропускании постоянного тока низкой плотности  $/10 \div 50 \text{ а/см}^2 /$ .

Температура измерялась миниатюрным термометром сопротивления на  $1,3 \pm 20^\circ \text{K}$ , разработанным в институте полупроводников АН УССР. Термометр представляет собой монокристаллическую полупроводниковую пленку толщиной  $0,1 \pm 0,3$  мм, вырезанную в виде круга диаметром 0,6 мм. Чувствительность термометра  $\sim 10\%$  изменения сопротивления на  $1\%$  изменения температуры.

В опытах критическая температура была измерена только для  $Nb$  и  $NbTi$  пленок. На рис. 10 даны значения критической температуры исследованных  $Nb$  пленок в зависимости от их толщины. Из рисунка видно, что критическая температура уменьшается постепенно с уменьшением толщины от 5000 до 1000  $\text{Å}$ . При толщине меньше 1000  $\text{Å}$   $T_K$  круто падает, а при толщине выше 5000  $\text{Å}$  практически постоянна и равна  $\approx 9,2^\circ \text{K}$ . Такую же критическую температуру имел промышленный  $Nb$ , используемый для напыления. Для чистого  $Nb$  критическая температура равна  $9,46^\circ \text{K}$  [6].

Измерения критической температуры  $NbTi$  пленок показали, что  $T_K$  сильно зависит от процентного содержания  $Ti$  /рис. 11/. Наиболее высокой критической температурой обладают пленки с содержанием  $Ti$  от 40 до 60% по весу.

Наивысшая критическая температура наблюдалась у  $NbTi$  пленки с 50% содержанием  $Ti$  по весу  $\approx 10^\circ \text{K}$ . У промышленных  $NbTi$  сплавов критическая температура  $\approx 11^\circ \text{K}$ .

#### Критический ток

Критическая плотность тока определялась в постоянном магнитном поле при плавном вводе тока вплоть до разрушения сверхпроводимости. Переход образца в нормальное состояние регистрировался по появлению потенциала на нем порядка  $10^{-5}$  в на длине 2-3 см. Для  $Nb$  пленок измерения проводились в магнитном поле до 10 кэ, для  $NbTi$ ,  $NbZr$  и ниобий-оловянных пленок - до 40 кэ. Направление магнитного поля было всегда перпендикулярно направлению тока.

На рис. 12 приводятся зависимости критической плотности тока  $Nb$  пленок разной толщины от напряженности внешнего магнитного поля. Из рисунка видно, что без внешнего магнитного поля критические токи для всех пленок примерно одинаковы  $2 \div 4 \times 10^6$  а/см<sup>2</sup>.

С увеличением внешнего магнитного поля критические токи падают, причем, чем толще пленка, тем меньше критический ток при данном  $H$ . По ходу кривых видно, что критическое магнитное поле у толстых пленок меньше, чем у тонких. Кроме

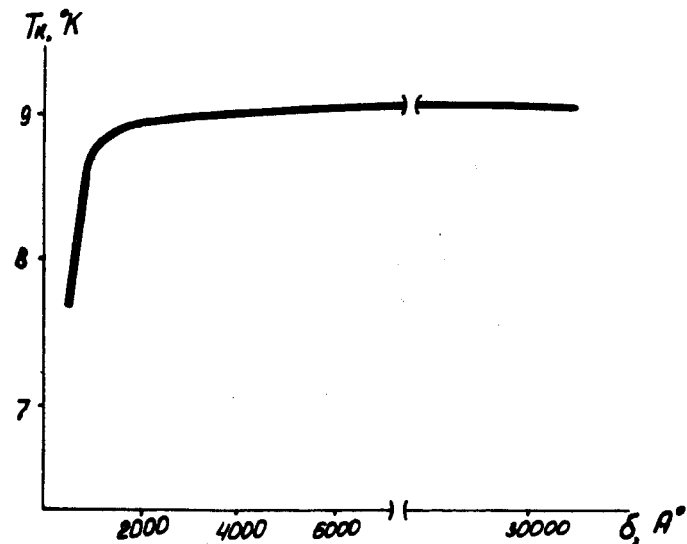


Рис. 10. Зависимость критической температуры  $Nb$  пленок от толщины.

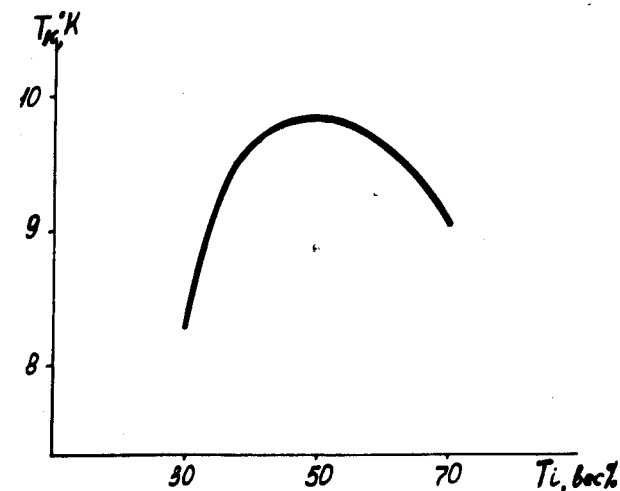


Рис. 11. Зависимость критической температуры  $NbTi$  пленок толщиной 3 мкм от процентного содержания  $Ti$ .

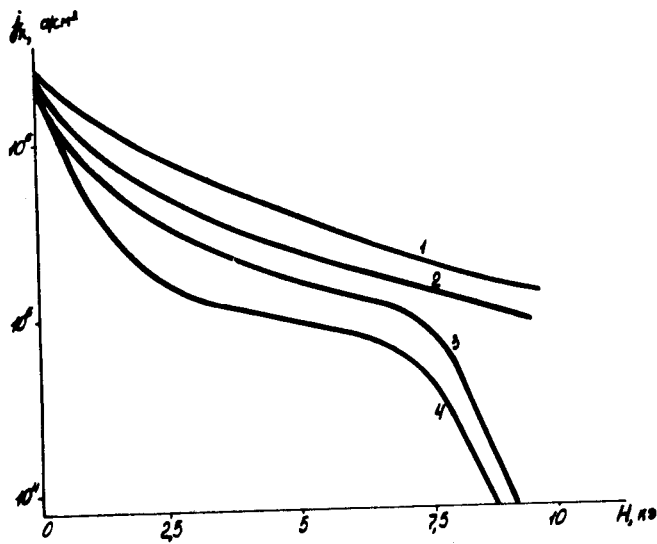


Рис. 12. Зависимость критической плотности тока  $Nb$  пленок разных толщин от внешнего магнитного поля. Толщина пленок: 1 - 600  $\text{A}^\circ$ , 2 - 1000  $\text{A}^\circ$ , 3 - 2000  $\text{A}^\circ$ , 4 - 30000  $\text{A}^\circ$ .

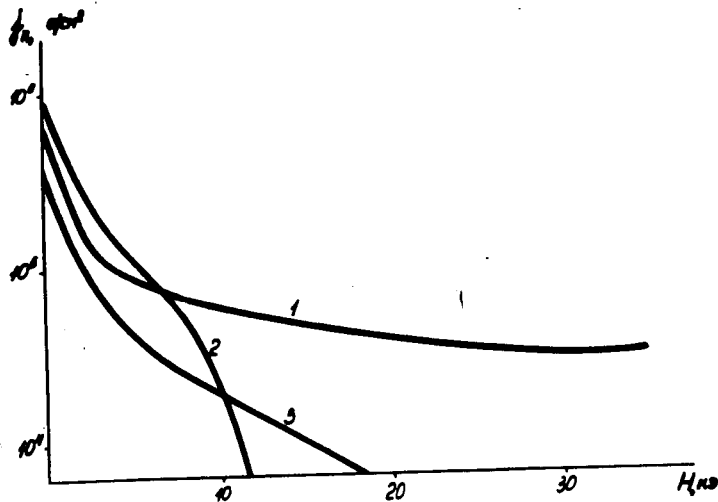


Рис. 13. Зависимость критической плотности тока  $NbTi$  пленок с разным процентным содержанием  $Ti$  от внешнего магнитного поля /толщина пленок 3 мкм/. Содержание  $Ti$  в пленках: 1 - 50%, 2 - 30%, 3 - 70%.

того, верхнее критическое магнитное поле намного больше верхнего критического магнитного поля чистого  $Nb$ .

Характерные кривые зависимости критической плотности тока от напряженности внешнего магнитного поля, перпендикулярного направлению тока, для  $NbTi$  пленок толщиной 3 мкм с разным процентным содержанием  $Nb$  и  $Ti$  приведены на рис. 13. У этих пленок максимальную плотность тока в магнитных полях до 40 кэ имеют пленки с содержанием  $Ti$  50% по весу  $/j_k = 5 \times 10^4 \text{ а/см}^2$ . Это достаточно высокая плотность тока.

Исследовались пробные ниобий-циркониевые и ниобий-оловянные пленки. Толщина этих пленок не измерялась и поэтому на рис. 14 дана зависимость критического тока от напряженности внешнего магнитного поля. Ниобий-оловянные пленки становились сверхпроводящими только после прогрева в вакууме  $10^{-6}$  тор при температуре около  $900^\circ \text{C}$ .

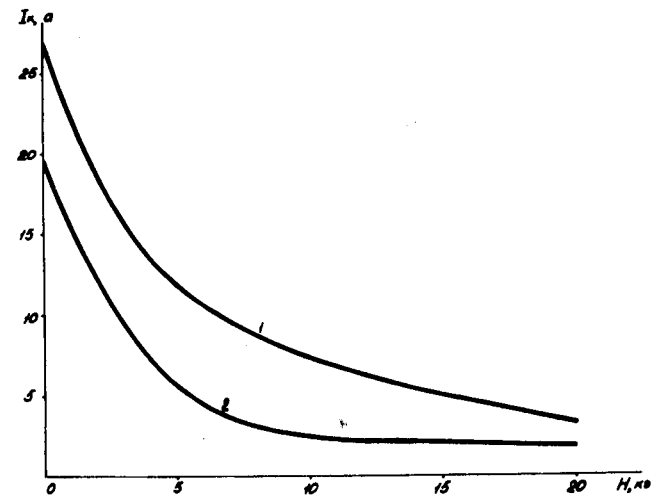


Рис. 14. Зависимость критического тока ниобий-циркониевой и ниобий-оловянной пленок от внешнего магнитного поля. 1 - ниобий-цирконий, 2 - ниобий-олово.

Исследования влияния материала подложки на сверхпроводящие характеристики пленок дали противоречивые результаты. В одних случаях характеристики лучше у пленок, напыленных на латунь, в других - на бронзу.

## Обсуждение результатов

Основные характеристики сверхпроводящих пленок - критическая температура, критический ток и критическое поле очень сильно зависят от содержания примесей, размеров зерен, напряженной структуры /7,8,9/ и т.д.

Так, по данным /7/

$$Nb + 0,23\% N \quad T_K = 9,2^\circ K \quad H_C = 5 \text{ кэ}$$

$$Nb + 0,7\% O \quad T_K = 8,78^\circ K \quad H_C = 7 \text{ кэ}$$

$$Nb + 1,52\% O \quad T_K = 8,04^\circ K \quad H_C = 9,67 \text{ кэ}$$

Отсюда видно, что температура перехода этих образцов ниже  $T_K$  чистого Nb /9,46°K/, и критическое магнитное поле пленок значительно выше критического магнитного поля чистого Nb. Кроме того,  $T_K$  ниобиевых пленок уменьшается с уменьшением толщины.

Другие газы незначительно влияют на  $T_K$ . Если предположить, что в наших пленках уменьшенное  $T_K$  зависит только от растворенного кислорода, то можно приблизительно рассчитать, сколько его будет в пленках. Так как наши пленки напыляются при давлении порядка  $10^{-6}$  тор, то предположив, что парциальное давление кислорода в системе  $10^{-7}$  тор, получаем, что напыленные пленки толщиной 500 Å при скорости напыления 250 Å/мин будут содержать около 1% O, т.е. критическая температура должна быть по расчетам  $\approx 8,5^\circ K$ , измеренная в опытах -  $8^\circ K$ . Различие в температурах говорит о том, что уменьшение  $T_K$  в пленках происходит не только из-за присутствия примесей, но и от других причин - таких, как окисление граничных слоев пленок, наличие больших напряжений, мелкозернистость структуры, эффект близости и т.д.

В случае NbTi пленок  $T_K$  и  $j_K$  сильно зависят от процентного соотношения компонент. Наибольшее значение  $T_K$  и  $j_K$ , измеренное в опытах, получается в пленках с содержанием Ti от 40 до 60% по весу.

Исследования показали, что без внешнего магнитного поля критические токи Nb пленок достаточно высоки  $\approx 5 \times 10^6$  а/см<sup>2</sup>.

## Выводы

Важным результатом проведенных исследований, на наш взгляд, является то, что разработанная методика напыления позволяет получать сверхпроводящие покрытия с характеристи-

ками на уровне промышленных сверхпроводников. Несомненно, что улучшением вакуумных условий при напылении, увеличением скорости напыления, более тщательной подготовкой подложек /обезжириванием и пр./ можно получить покрытия, по своим характеристикам превосходящие промышленные образцы.

Авторы благодарят В.П.Саранцева за поддержку и постоянный интерес к данным исследования, а также В.А.Прейзендорфа и В.В.Катрасева за помощь в работе.

## Литература

1. Н.Г.Анищенко, Н.И. Балалыкин, В.А.Васильев, Ю.С.Дерендяев, А.Г.Зельдович, Н.К.Зельдович, Ю.В.Муратов, Н.Б.Рубин, А.А.Сабаев, В.П.Саранцев, Ю.И.Смирнов, В.Г.Шабратов, Ю.А.Шишов. Препринт ОИЯИ, Р9-5488, Дубна, 1970.
2. G.Suaerbray. Phys.Verhandl., 18, 113, 1957.
3. W.Mason. Piezoelectric Crystals and their application to ultrasonics, New York, 1956.
4. Л.Холлэнд. Нанесение тонких пленок в вакууме. Госэнергоиздат, 1962 г.
5. С.Ш.Ахмедов, Т.Н.Вылегжанина "Металловедение и металлофизика сверхпроводников" стр. 120. Труды совещания по 1964 г.
6. Э.Линтон "Сверхпроводимость" Издательство "Мир", Москва, 1971 г.
7. DeSorbo. Physical Review, v. 132, No. 1, October, 1963.
8. Juji Asada and Hiroshi Nose, J. of Physical Society of Japan, vol. 26, No. 2, February, 1969.
9. H.Thenerer and J.Hauser, J. appl. Phys., 35 (1964), 554.
10. Н.И.Балалыкин и др. Препринт ОИЯИ, Р8-6855, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 декабря 1972 года.