

05.4;09;12

# ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РС ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ И ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

© В.А.Крупенин, А.Б.Паволоцкий,  
И.Г.Прохорова, О.В.Снигирев

## 1. Введение

В последнее время при создании новых приборов сверхпроводниковой микроэлектроники появилась необходимость размещения непосредственно на чипе тонкопленочных резистивно-емкостных фильтрующих элементов.

Так, в датчиках сквид-магнитометров нового поколения, использующих в качестве предусилителя дополнительный квантовый интерферометр [1], фильтрующие элементы необходимы для оптимизации режимов работы. В устройствах одноэлектроники, таких, например, как одноэлектронные ловушки [2], тонкопленочные фильтрующие элементы на чипе проектируются для снижения уровня внешних наводок.

С целью минимизации числа технологических операций естественно изготавливать элементы фильтров из тех же материалов, что и основные элементы электрической схемы, размещенной на чипе. Так, резисторы и обкладки конденсаторов разумно изготавливать из хрома или титана, используемых в технологическом процессе получения джозефсоновских переходов. Из тех же соображений в качестве диэлектрика в емкостях целесообразно использовать пленки окислов ниобия, кремния или алюминия.

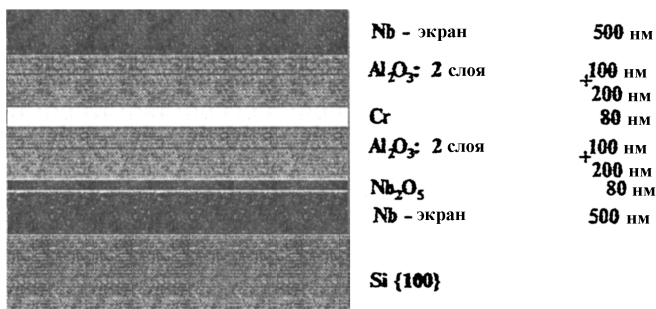
Электрические характеристики тонких пленок металлов и диэлектриков могут зависеть от процесса напыления и последующей обработки, отличаясь от табличных величин. Для нахождения значений диэлектрической проницаемости изолирующих пленок и их проводимости при низких температурах, необходимых для проектирования сверхпроводниковых микросхем, а также их электрической прочности нами были изготовлены и исследованы несколько вариантов тонкопленочных РС фильтров.

## 2. Технологический маршрут и режимы изготовления тонкопленочных РС фильтров

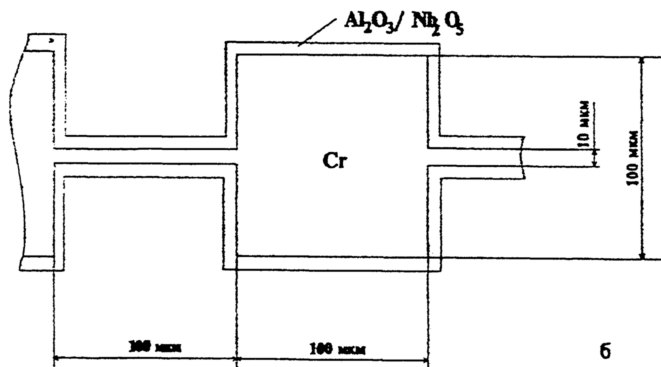
В качестве подложек для изготовления пленочных РС фильтров использовали пластины монокристаллического неокисленного кремния марки КДБ-12 ориентации  $\{100\}$ .

Схематически структура фильтра представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что он представляет собой экранированную микрополосковую линию. При электрическом контакте верхнего и нижнего экранных слоев центральный электрод оказывается герметически заключенным как бы в сплюснутую трубу-экран.

В качестве нижнего экрана наносили слой Nb толщиной 500 нм. Напыление Nb производили с помощью DC магнетронного напыления при давлении Ar  $1 \cdot 10^{-2}$  мбар и токе



а



б

Рис. 1. Разрез структуры (а) и вид в плане элемента фильтра (б). Каждый фильтр включает в себя 25 таких последовательно соединенных элементов, заканчивающихся с обеих сторон контактными площадками. Каждый чип содержит 16 фильтров.

разряда 2.5 А. Скорость напыления составляла 140 нм в минуту. Напыление производили на установке L-560 фирмы "Leybold AG". При откачке перед напылением Nb применяли охлаждение жидким азотом ловушки Мейснера. В результате остаточное давление в камере составляло порядка  $2 \cdot 10^{-7}$  мбар. Подложки закрепляли на водоохлаждаемый держатель, причем для улучшения термического контакта они наклеивались на вакуумную смазку.

После напыления Nb на подложке методом фотолитографии формировалась обратная фоторезистивная маска с рисунком нижнего диэлектрика. Далее эту маску использовали для жидкостного анодирования. Анодирование производили до напряжения 90 В со скоростью нарастания последнего 0.5 В/с. Затем, используя ту же обратную фоторезистивную маску, напыляли сам диэлектрик. В качестве диэлектрика использовался рентгеноаморфный  $Al_2O_3$ . Напыление окиси алюминия производили на установке Z-400 фирмы "Leybold AG".  $Al_2O_3$  наносили ВЧ магнетронным распылением в смеси Ar и  $O_2$ . Давление Ar при этом составляло 1 Па, а кислорода 0.25 Па. Толщина напыленного диэлектрика составляла 200 нм.

Далее с помощью фотолитографии формировали рисунок резистора и контактные площадки (линейные размеры резистора указаны на рис. 1, б). Для того чтобы избежать закороток между ним и нижним экраном, связанных с дефектами фотолитографии, под резистор, используя ту же литографическую маску, напыляли слой диэлектрика толщиной 100 нм. После этого пленку Si толщиной 80 нм наносили методом термического испарения в вакууме со скоростью 1–1.5 ангстрема в секунду.

После вскрытия резистора (методом lift-off) формировалась обратная фотолитографическая маска под второй изолятор. Напыление второго изолятора, так же как и первого, производилось в два этапа. На первом этапе наносилось 200 нм  $Al_2O_3$  с использованием маски под второй изолятор, затем формировался фотолитографический рисунок верхнего экрана и напылялось еще 100 нм  $Al_2O_3$ . При напылении верхнего электрода использовались те же режимы, что и при напылении нижнего.

### 3. Измерения характеристик RC фильтров

Изготовленная структура может быть описана как хорошо известный почечный фильтр [3], эквивалентная схема которого приведена на рис. 2, а.

При исследовании частотных свойств диэлектрика мы подсоединяли измерительный прибор к зажимам 1–2, и таким образом, структуру можно рассматривать либо как

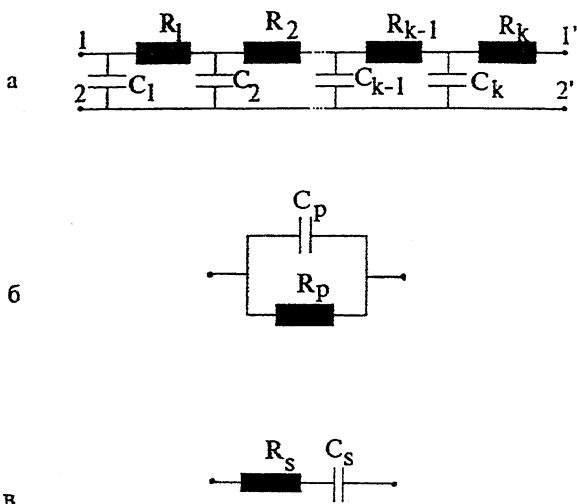


Рис. 2. Эквивалентная схема (а) и схемы замещения при измерении  $\epsilon(\omega)$  (б, в).

плоский конденсатор  $C_p$ , соединенный с сопротивлением утечки  $R_p$  (рис. 2, б), либо, в случае последовательной схемы, как цепочку  $C_s$  и  $R_s$  (рис. 2, в).

Для измерения этих параметров на разных частотах использовался измерительный мост НР-4284А. Сопротивление изоляции соединительных проводов даже на максимальной частоте измерений было на порядок больше значения  $R_p$  на данной частоте. Емкость же соединительных проводов была близка к 40 пФ, что много меньше измеряемых значений  $C_p$ .

Измерения проводились в диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц при различных температурах.

Как отмечено в разд. 2, изолятор был выполнен в виде многослойной пленки, состоящей из слоя  $Nb_2O_5$  толщиной около 80 нм и двух слоев  $Al_2O_3$  толщиной 200 и 100 нм. В рамках наших измерений мы не можем измерить значения диэлектрической проницаемости для каждого из диэлектрических слоев в отдельности, поэтому далее под  $\epsilon$  мы будем понимать комплексную эффективную диэлектрическую проницаемость для суммарного диэлектрического слоя

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''.$$

Составляющие комплексной диэлектрической проницаемости связаны с измеряемыми в эксперименте параметрами  $c_p$  и  $R_p$  и расчетными эквивалентными параметрами  $c_s$  и  $R_s$  формулами (без учета краевых эффектов, так как толщина диэлектрического слоя мала по сравнению с остальными

размерами):

$$\varepsilon' = \frac{c_p}{c_0} = \frac{c_s}{c_0} \frac{1}{1 + \omega^2 c_s^2 R_s^2},$$

$$\varepsilon'' = \frac{1}{\omega c_0} R_p = \frac{c_s}{c_0} \frac{\omega R_s c_s}{1 + \omega^2 c_s^2 R_s^2},$$

где  $c_0 = \frac{\varepsilon_p S}{d}$ ,  $S$  — площадь обкладок,  $d$  — расстояние между обкладками.

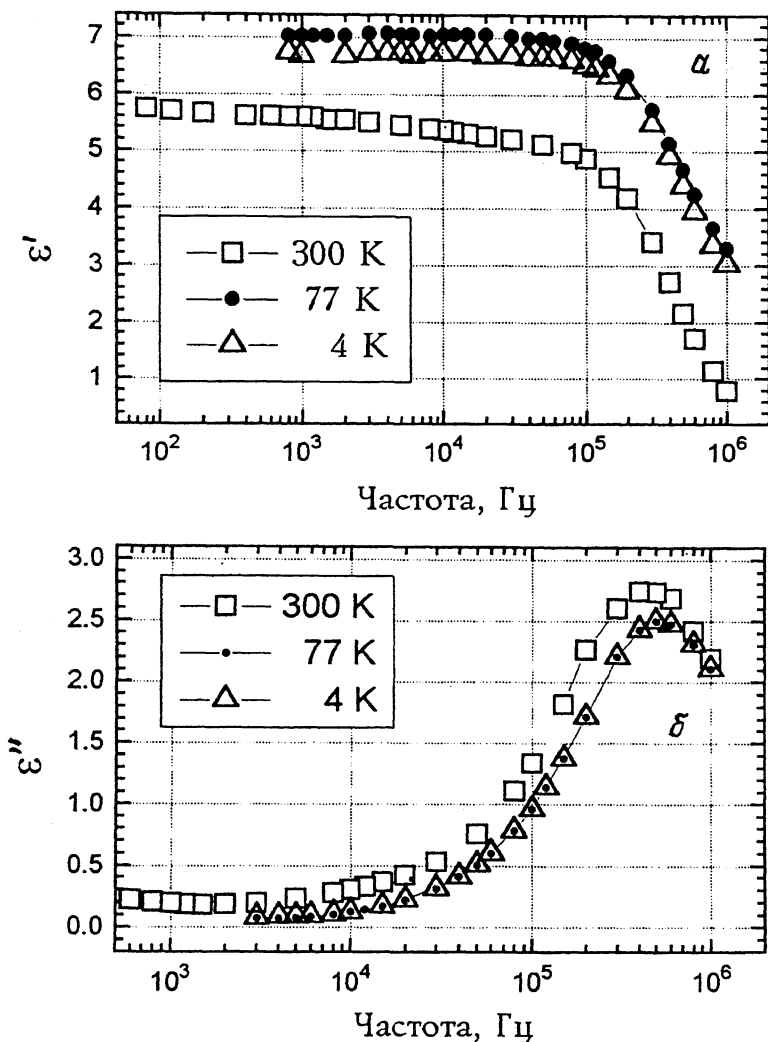


Рис. 3. Компоненты диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  (а) и  $\varepsilon''$  (б) межслойной изоляции при различных температурах.

Рассчитанные частотные зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  для различных температур показаны на рис. 3. Видно, что значение  $\epsilon'$  практически не изменяется для частот до 0.1 МГц. Спад  $\epsilon'$  с частотой и экстремум в зависимости  $\epsilon''$  от частоты хорошо объясняются приведенными формулами в случае, когда  $\tau = c_s R_s = 0.25$  мкс.

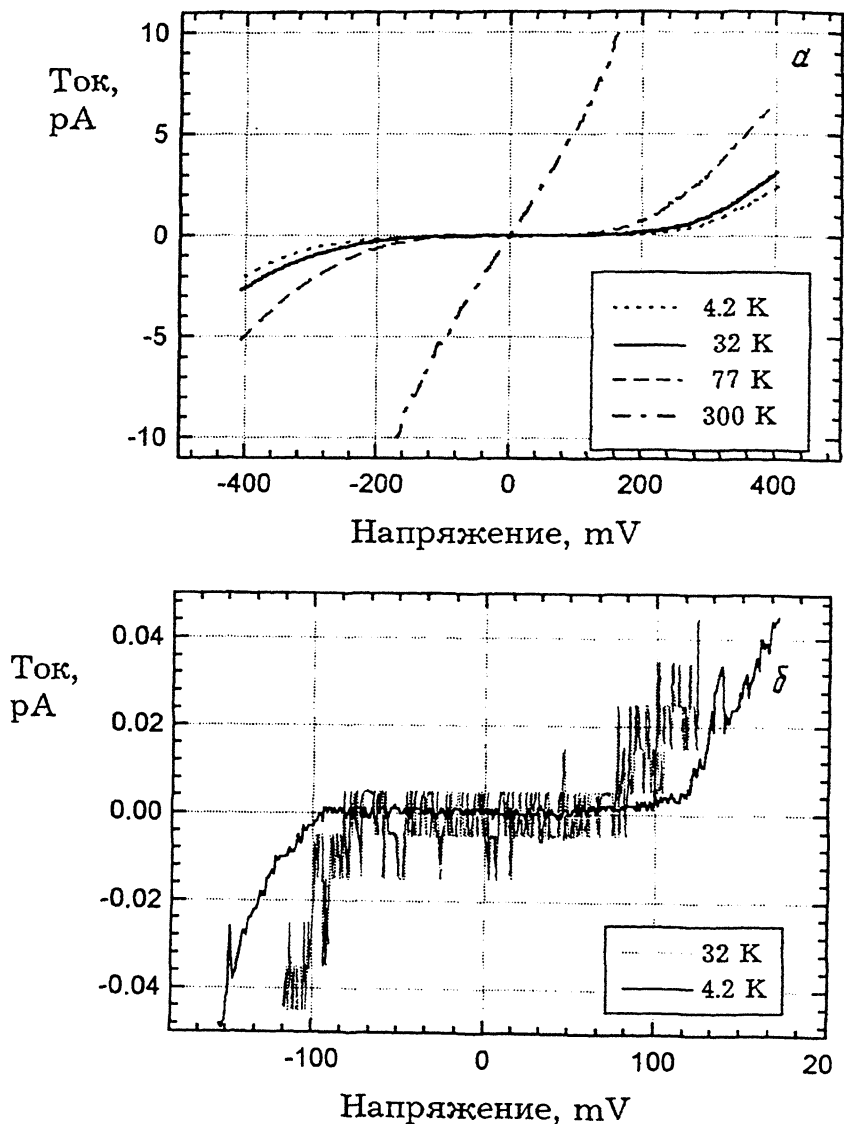


Рис. 4. ВАХ системы экран-диэлектрик-резистор (центральный электрод)-экрaн при различных температурах.

Для исследования качества диэлектрического слоя были сняты его вольт-амперные характеристики (ВАХ) на постоянном токе при разных температурах. Результаты измерений показаны на рис. 4. Видно, что с ростом температуры сопротивление падает и ток увеличивается. На рис. 4, б показаны результаты измерений вольт-амперной характеристики при 4.2 К с высоким разрешением. Видно, что в диапазоне  $-100, +100$  мВ ток через диэлектрик чрезвычайно мал и соответствующее удельное сопротивление составляет около  $7 \cdot 10^{13}$  Ом·м.

Нелинейный характер вольт-амперных характеристик может быть обусловлен тремя возможными причинами: 1) ток ограничен пространственным зарядом в диэлектрике

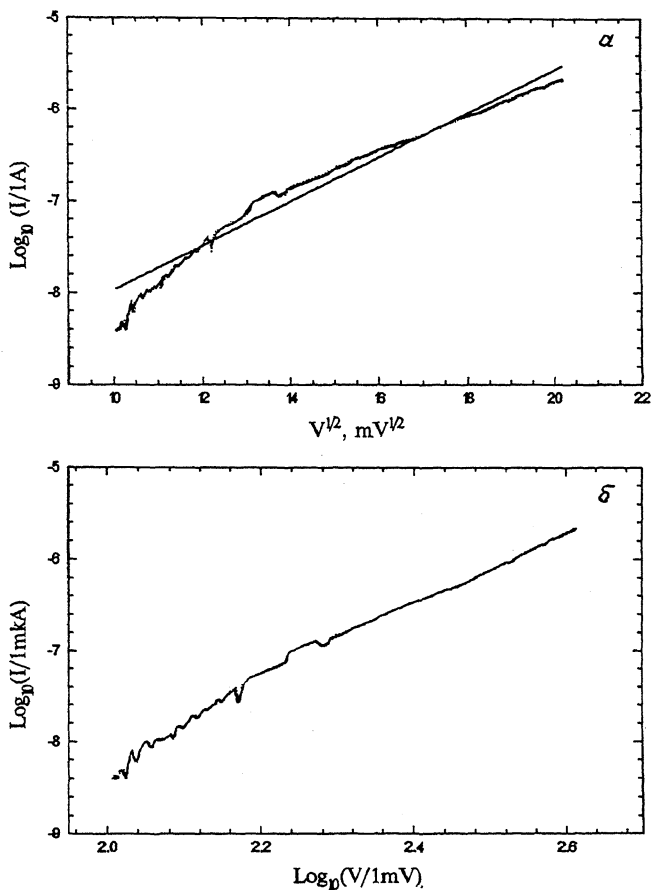


Рис. 5. Зависимость тока через диэлектрический слой (а, б) и проводимости слоя (в) от приложенного напряжения при 4 К. Экспериментальные результаты показаны точками, теоретические зависимости даны сплошными кривыми.

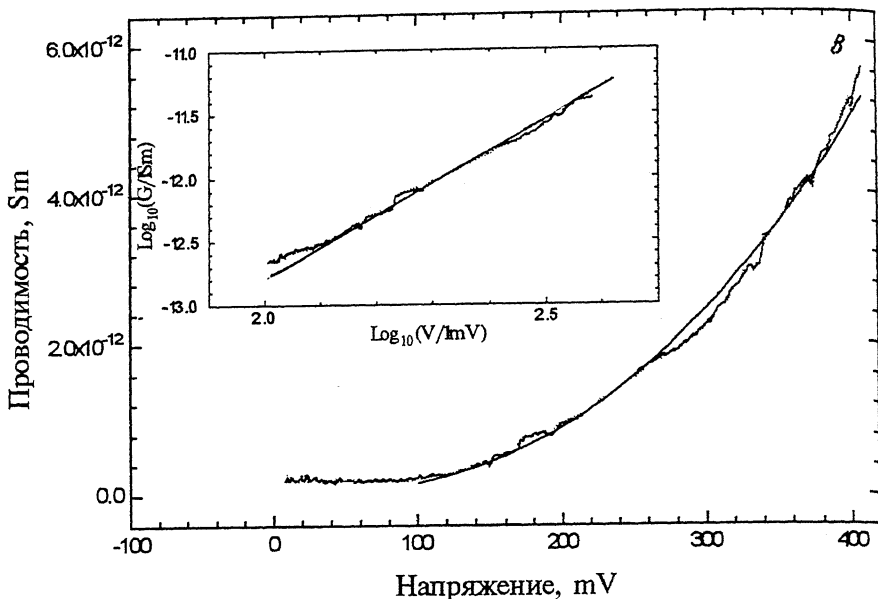


Рис. 5 (продолжение).

[4]; 2) имеет место классическое туннелирование [4]; 3) имеет место туннелирование через локализованные состояния [5].

Как видно из рис. 5, наилучшее соответствие теории достигается в последнем случае. Видно, что классическая теория туннелирования через барьер прямоугольной формы  $I \cong e\sqrt{V}$  неудовлетворительно описывает результаты эксперимента (а). Также не наблюдается характерных участков с возрастающим наклоном (б), присущих случаю тока, ограниченного пространственным зарядом. Закон  $G = a \cdot V^{10/4}$  (при  $e \cdot V \gg k_B T$ , где  $G \equiv I/V$ ), соответствующий туннелированию через три локализованных состояния, удовлетворительно описывает данные (в).

Электрическая прочность диэлектрических слоев обычно превышала 1 В, т. е. составляла более  $3 \cdot 10^7$  В/м.

### Закключение

В данной работе описана технология изготовления многослойных фильтровых RC структур для криогенной микроэлектроники и приведены результаты исследований диэлектрических свойств изолирующих слоев структуры.



Измеренные значения емкости  $C_p$  структуры на низких частотах с точностью около 10% оказались соответствующими рассчитанным с использованием табличных значений  $[\epsilon']$  для слоев  $Nb_2O_5$  и  $Al_2O_3$ .

Как видно из рис. 4, ток уменьшается с понижением температуры, что говорит об отсутствии металлических закороток в многослойной структуре с большой площадью перекрытия металлических слоев.

Сложность системы не позволяет дать однозначного заключения о механизме проводимости, однако можно отметить неплохое соответствие полученных результатов теории туннелирования через три локализованных состояния, которые, возможно, соответствуют трем поверхностям раздела между диэлектрическими слоями (рис. 1, а).

Рабочие характеристики тонкопленочных РС фильтров будут приведены в дальнейших публикациях.

Работа поддержана проектами "Интерсквид" и "Редукция" Министерства науки РФ, а также проектом NCU 000 Международного научного фонда.

#### Список литературы

- [1] *Maslennikov Yu.I., Belyaev A.V., Snigirev O.V. et al.* IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1995. V. 5. N 2. P. 3241-3243.
- [2] *Lukens J.E., Dresselhaus P.D., Likharev K.K.* // Physica B. 1994. V. 203. P. 354-360.
- [3] *Лаурентьев М.А., Шабат Б.В.* // Методы теории функции комплексного переменного. М.: Наука, 1973.
- [4] *Симмонс Дж.Г.* // Технология тонких пленок (справочник) / Под ред. Л. Майсселла, Р. Глэнга. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. Т. 2. М.: Сов. радио, 1977.
- [5] *Глазма Л.И., Матвеев К.М.* // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. С. 332.
- [6] *Херрон П.Дж., Кемпбелл Д.С.* // Технология тонких пленок (справочник) / Под ред. Л. Майсселла, Р. Глэнга. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. Т. 2. М.: Сов. радио, 1977.

Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова  
Физический факультет

Поступило в Редакцию  
27 сентября 1995 г.