

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ  
ИМ. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА  
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

**МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ**

Москва  
2007

## **Оглавление:**

1. Назначение и описание методики	3
2. Используемое оборудование	3
3. Технологический маршрут	3
4. Контроль качества	11
5. Требования безопасности	11

## 1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Инструкция устанавливает порядок технологических операций, необходимых для изготовления многослойных интегральных микросхем на основе сверхпроводящих пленок №.

Для формирования структур используются методы оптической (УФ) фотолитографии, магнетронного напыления, «взрывной» (lift-off) литографии, ионного и плазменного травления.

## 2 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения исследования используется следующее оборудование:

1. Установка магнетронного напыления Leybold L-560UV.
2. Установка ионного травления (RIE) March Jupiter II.
3. Установка плазменного травления (PE) Secon XPE2.
4. Установка совмещения Carl Suss MA150.
5. Напылительная установка Leybold Z400.

Этапы	Описание	Длит., мин
Резка пластин	Разрезать кремниевую пластину диаметром 100 мм на 12 пластин размером 15x24 мм	30
Чистка подложек	Пластины, находящиеся в баночке с ацетоном, поместить в ультразвуковую ванну на 5 минут. Затем промыть пластины в дистиллированной воде и высушить, обдав струей воздуха.	25
Напыление $Al_2O_3$	Разместить на подложкодержателе пластины по 6 штук на каждом, загрузить подложкодержатели в камеру установки напыления «Leibold L-560 UV». Откачать камеру до давления $P = 1 \cdot 10^{-7}$ мбар = $1 \cdot 10^{-5}$ Па Очистить поверхность подложек (стравить верхний слой примесей, окисла) толщиной $10 \text{ \AA}$ за 2 минуты. Чистка проходит в атмосфере Ar, $P_{Ar} = 1 \cdot 10^{-1}$ Па. Предраспылить мишень $Al_2O_3$ в течение 2 минут для удаления поверхностных загрязнений. Подложки при этом закрыты заслонкой из нержавеющей стали. Напылить $Al_2O_3$ на подложки в течение 11 минут (слой $1000 \text{ \AA}$ ). Вынуть подложкодержатель из камеры и снять с него подложки.	180
Нанесение фоторезиста	Позитивный фоторезист марки S 1813, нанесение методом центрифугирования. Подложку пинцетом разместить на центрифуге. Из капельницы равномерно нанести фоторезист на всю поверхность подложки и включить установку. Параметры установки: скорость вращения 4000 об/мин, время раскрутки 30 сек. Толщина получаемого слоя 1,3 мкм. Проводится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.	1 x N
Сушка подложек в термостате	Подложки разместить в чашке Петри, поместить в термостат, нагретый до температуры $90^\circ\text{C}$ . Время сушки 30 мин.	30
Экспонирование	Обратная сторона подложек аккуратно очищается ацетоном от подтеков фоторезиста. Фотошаблон моется ацетоном и дистиллированной водой, сушится струей воздуха. Проводится совмещение знаков границы рисунка фотошаблона и краев подложки. Засвечивание – 25 сек при расстоянии между фотошаблоном и подложкой 27 мкм. Мощность лампы - 150 Вт, интенсивность $4 \text{ мВт/см}^2$ .	10 x N
Проявление	Подложка погружается в раствор гидроокиси калия с помощью пинцета на 20-30 сек. Затем споласкивается дистиллированной водой и сушится струей сжатого воздуха. Производится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.	2 x N
Контроль	Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.	5 x N
Напыление трехслойки $Nb/Al_2O_3/Nb$	Разместить на подложкодержателе пластины по 6 штук на каждом, загрузить подложкодержатели в камеру установки напыления «Leibold L-560 UV». Откачать камеру до давления $P = 1 \cdot 10^{-7}$ мбар = $1 \cdot 10^{-5}$ Па. Очистить поверхность подложек (стравить верхний слой примесей, окисла) толщиной $10 \text{ \AA}$ за 2 минуты. Чистка проходит в атмосфере Ar, $P_{Ar} = 1 \cdot 10^{-1}$ Па. Предраспылить мишень Nb в течение 2 минут для удаления поверхностных загрязнений.	360

	Подложки при этом закрыты заслонкой из нержавеющей стали. Напылить Nb на подложки в течение 1 мин 40 сек (слой 2000 Å). Предраспылить мишень Al в течение 2 минут. Напылить Al на подложки в течение 45 сек (слой 80 Å). Выдержать паузу 5 мин для охлаждения подложек, $P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па. Отключить насосы и напустить в камеру кислород до достижения давления $P = 3 \cdot 10^1$ Па. 15 мин Al окисляется. Затем откачать камеру до $P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па. Предраспылить мишень Nb в течение 1 мин. Напылить Nb на подложки в течение 45 сек (слой 800 Å). Вынуть подложкодержатель из камеры и снять с него подложки.	
Процесс «взрыва»	Подложки поместить в растворитель (диметилформамид или ацетон). Через 30 мин баночку с подложками поставить в ультразвуковую ванну на 15 мин. Затем промыть подложки водой и высушить струей воздуха.	50
Контроль	Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.	5 x N
Нанесение фоторезиста	Позитивный фоторезист марки S 1813, нанесение методом центрифугирования. Подложку пинцетом разместить на центрифуге. Из капельницы равномерно нанести фоторезист на всю поверхность подложки и включить установку. Параметры установки: скорость вращения 5000 об/мин, время раскрутки 50 сек. Проводится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.	2 x N
Сушка подложек в термостате	Температура сушки-90°C. Подложки разместить в чашке Петри, поместить в термостат, нагретый до температуры 90°C. Время сушки 30 мин	30
Экспонирование	Обратная сторона подложек аккуратно очищается ацетоном от подтеков фоторезиста. Фотошаблон моется ацетоном и дистиллированной водой, сушится струей воздуха. Проводится совмещение знаков границы рисунка фотошаблона и краев подложки. Засвечивание – 12 сек при расстоянии между фотошаблоном и подложкой 27 мкм. Мощность лампы - 150 Вт, интенсивность 4 мВт/см <sup>2</sup> .	10 x N
Проявление	Подложка погружается в раствор гидроокиси калия на 20-30 секунд. Затем споласкивается дистиллированной водой и сушится струей воздуха. Производится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.	2 x N
Контроль	Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.	5 x N
Травление	Прогреть камеру установки «March Jupiter II» перед открытием в течение 5 мин при температуре 50-60°C. Загрузить подложку в камеру. Откачать камеру до давления $P = 1 \cdot 10^{-2}$ Па. Установить температуру воды, охлаждающей подложку 19 - 20°C. Напустить газ, зажечь плазму, травить при $P = 8-30$ Па. Выгрузить подложку.	90 x N
Анодирование	С общего электрода схемы ацетоном смыть резист. Кусочек индия прикрепить к этому электроду. Опустить подложку в раствор электролита. Анодировать до 10-12 В. При приложении 1 В напряжения из 8 Å Nb образуется 23 Å Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .	7 x N
Контроль	Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.	5 x N
Напыление	Разместить на подложкодержателе пластины по 6 штук на	180

SiO <sub>2</sub>	<p>каждом, загрузить подложкодержатели в камеру установки напыления «Leybold L-560 UV».</p> <p>Откачать камеру до давления <math>P = 5 \cdot 10^{-6}</math> мбар = <math>5 \cdot 10^{-4}</math> Па</p> <p>Очистить поверхность подложек (сравить верхний слой примесей, окисла) толщиной 10 Å за 2 минуты. Чистка проходит в атмосфере Ar, <math>P_{Ar} = 1 \cdot 10^{-1}</math> Па. Предраспылить мишень SiO<sub>2</sub> в течение 2 минут для удаления поверхностных загрязнений. Подложки при этом закрыты заслонкой из нержавеющей стали. Напылить SiO<sub>2</sub> на подложки в течение 17 мин (слой 2700 Å). Вынуть подложкодержатель из камеры, снять с него подложки.</p>	
Процесс «взрыва»	<p>Подложки поместить в диметилформамид. Через 2 часа баночку с подложками в диметилформалиде поставить в ультразвуковую ванну на 15 мин. Затем промыть подложки водой и высушить струей воздуха.</p>	140
Контроль	<p>Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.</p>	5 x N
Нанесение фоторезиста	<p>Позитивный фоторезист марки S 1813, нанесение методом центрифугирования. Подложку пинцетом разместить на центрифуге. Из капельницы равномерно нанести фоторезист на всю поверхность подложки и включить установку. Параметры установки: скорость вращения 4000 об/мин, время раскрутки 30 сек. Проводится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.</p>	2 x N
Сушка подложек в термостате	<p>Температура сушки-90°C. Подложки разместить в чашке Петри, поместить в термостат, нагретый до температуры 90°C. Время сушки 30 мин.</p>	30
Экспонирование	<p>Обратная сторона подложек аккуратно очищается ацетоном от подтеков фоторезиста. Фотошаблон моется ацетоном и дистиллированной водой, сушится струей воздуха. Проводится совмещение знаков границы рисунка фотошаблона и краев подложки. Засвечивание – 25 сек при расстоянии между фотошаблоном и подложкой 27 мкм. Мощность лампы - 150 Вт, интенсивность 4 мВт/см<sup>2</sup>.</p>	10 x N
Проявление	<p>Подложка погружается в раствор гидроксида калия на 20-30 сек. Затем споласкивается дистиллированной водой, и сушится струей воздуха. Производится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.</p>	2 x N
Контроль	<p>Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.</p>	5 x N
Напыление Nb	<p>Разместить на подложкодержателе пластины по 6 штук на каждом, загрузить подложкодержатели в камеру установки напыления «Leybold L-560 UV».</p> <p>Откачать камеру до давления <math>P = 1 \cdot 10^{-7}</math> мбар = <math>1 \cdot 10^{-5}</math> Па</p> <p>Очистить поверхность подложек (сравить верхний слой примесей, окисла) толщиной 10 Å за 2 минуты. Чистка проходит в атмосфере Ar, <math>P_{Ar} = 1 \cdot 10^{-1}</math> Па. Предраспылить мишень Nb в течение 2 минут для удаления поверхностных загрязнений. Подложки при этом закрыты заслонкой из нержавеющей стали. Напылить Nb на подложки в течение 5 мин (слой 6000 Å). Вынуть подложкодержатель из камеры и снять с него подложки.</p>	180
Процесс	<p>Подложки поместить в диметилформалид. Через 30 мин</p>	50

«взрыва»	баночку с подложками в диметилформалиде поставить в ультразвуковую ванну на 15 мин. Затем промыть подложки водой и высушить струей воздуха.	
Контроль	Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.	5 x N
Нанесение фоторезиста	Позитивный фоторезист марки S 1813, нанесение методом центрифугирования. Подложку пинцетом разместить на центрифуге. Из капельницы равномерно нанести фоторезист на всю поверхность подложки и включить. Параметры установки: скорость вращения – 4000 об/мин, время раскрутки – 30 сек. Проводится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.	2 x N
Сушка подложек в термостате	Температура сушки-90°C. Подложки разместить в чашке Петри, поместить в термостат, нагретый до температуры 90°C. Время сушки 30 мин	30
Экспонирование	Обратная сторона подложек аккуратно очищается ацетоном от подтеков фоторезиста. Фотошаблон моется ацетоном и дистиллированной водой, сушится струей воздуха. Проводится совмещение знаков границы рисунка фотошаблона и краев подложки. Засвечивание – 25 сек при расстоянии между фотошаблоном и подложкой 27 мкм. Мощность лампы - 150 Вт.	10 x N
Проявление	Подложка погружается в раствор гидроксида калия на 20-30 секунд. Затем споласкивается дистиллированной водой, и сушится струей воздуха. Производится визуальный контроль, отбраковка испорченных подложек.	2 x N
Контроль	Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.	5 x N
Напыление Al, Au	Разместить на подложкодержателе пластины по 6 штук на каждом, загрузить подложкодержатели в камеру установки напыления «Leuybold Z-400». Откачать камеру до давления $P = 1 \cdot 10^{-7}$ мбар = $1 \cdot 10^{-5}$ Па Очистить поверхность подложек (сравить верхний слой примесей, окисла) толщиной 15 Å за 3 минуты. Чистка проходит в атмосфере Ag, $P_{Ag} = 1 \cdot 10^{-1}$ Па. Предраспылить мишень Al в течение 2 минут для удаления поверхностных загрязнений. Подложки при этом закрыты заслонкой из нержавеющей стали. Напылить Al на подложки в течение 10 сек (слой 100 Å). Предраспылить мишень Au в течение 40 сек для удаления поверхностных загрязнений. Подложки при этом закрыты заслонкой из нержавеющей стали. Напылить Au на подложки в течение 60 сек (слой 1000 Å). Вынуть подложкодержатель из камеры, и снять с него подложки.	180
Процесс «взрыва»	Подложки поместить в диметилформалид. Через 30 мин баночку с подложками в диметилформалиде поставить в ультразвуковую ванну на 5 мин. Затем промыть подложки водой и высушить струей воздуха.	40
Контроль	Изучение под микроскопом полученных образцов, выявление дефектов, отбраковка.	5 x N
Измерения	Снять вольтамперные характеристики полученных схем.	60 x N
<p>Общее время на проведение процесса:  <math>T = 1565 + 227 \times N</math> (мин), где N – количество подложек.  При N=6, T= 2927 мин = 48 часов 47 мин</p>		

В технологическом процессе применялся фоторезист марки S 1813: Microposit S1813 Photo Resist. Производитель: Micro resist Technology GMBH; Koenicker Strasse 325, Berlin, 12555 Germany.

Степень чистоты всех используемых газов равна 0,999.

Графически технологическую карту изготовления тестовой интегральной схемы иллюстрируют рис. 4.1 – 4.5. Заключительный этап нанесения фоторезиста, напыления золота и процесса «взрыва» не показан на рисунках, поскольку эти операции проводятся на общем электроде, который соединяет верхние электроды всех туннельных переходов интегральной схемы.

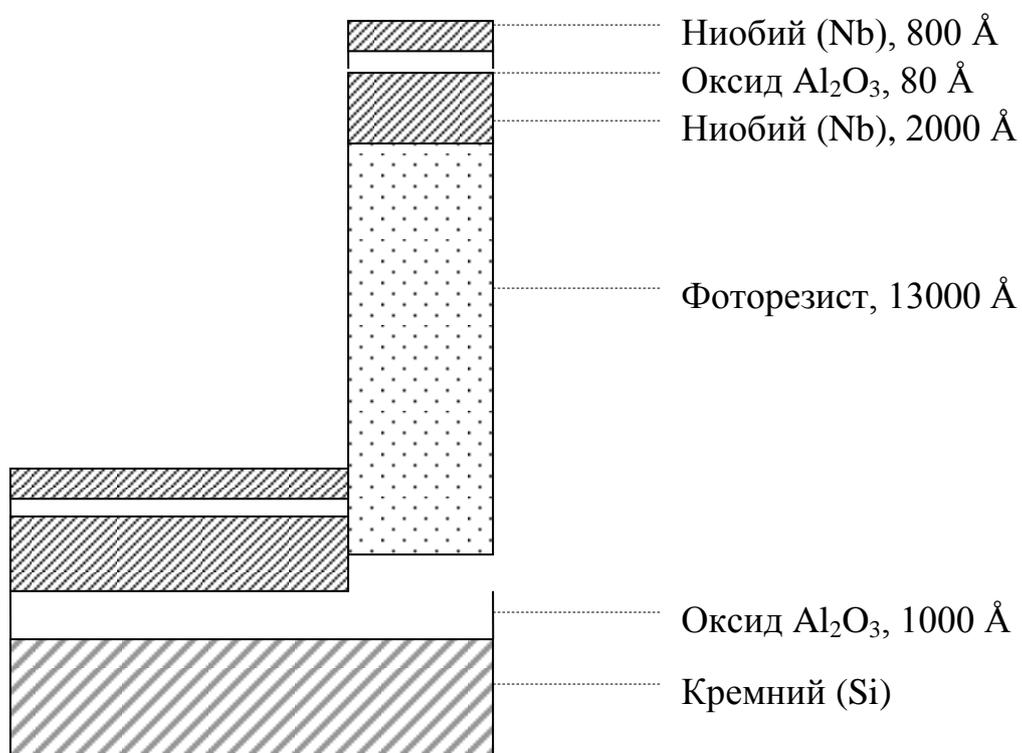


Рис. 1. Первый этап процесса изготовления тестовой интегральной схемы: нанесение на очищенную подложку изолятора  $Al_2O_3$ , фоторезиста, трехслойки Nb/ $Al_2O_3$ /Nb

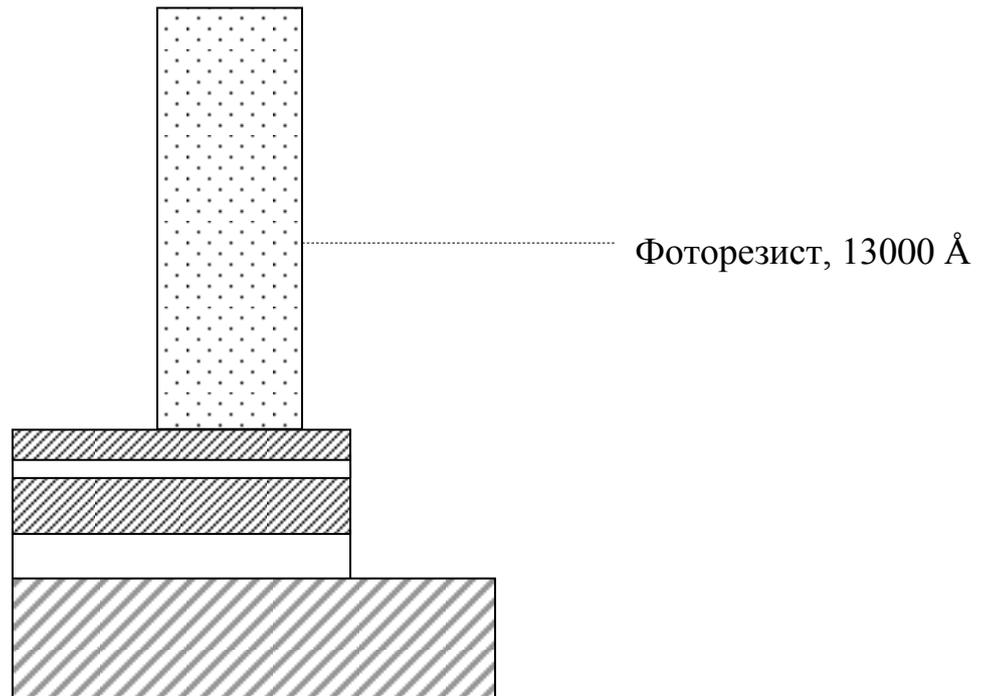


Рис. 2. Второй этап процесса изготовления тестовой интегральной схемы: процесс «взрыва», нанесение фоторезиста

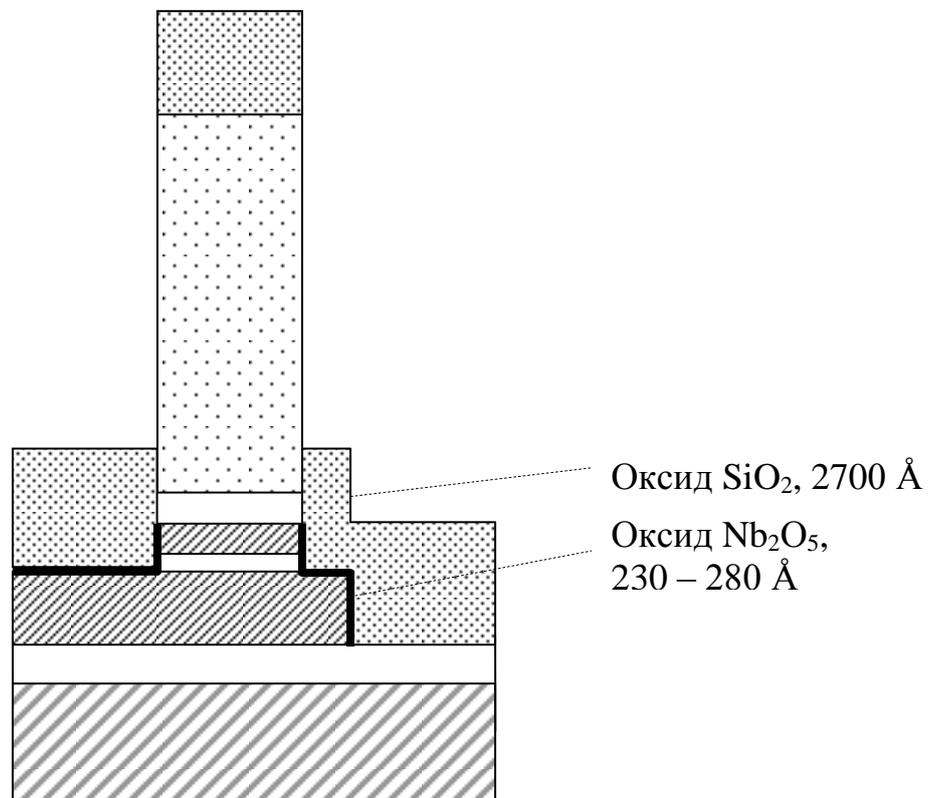


Рис. 3. Третий этап процесса изготовления тестовой интегральной схемы: травление верхнего слоя Nb, анодизация Nb, напыление  $\text{SiO}_2$



#### 4 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Контроль качества изготовленных структур осуществляется визуально (повреждения электродов при травлении) и путем измерения электрофизических параметров изготовленных микросхем с помощью погружного зонда в жидком гелии. Контролируемые параметры зависят от конкретной топологии интегральной схемы.

#### 5 ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Изготовление выполняется лаборантом, прошедшим проверку знаний по технике безопасности, в т.ч. по правилам безопасности при работе в физической лаборатории, включая общие правила работы с химическими реактивами и электроустановками с напряжением до 1000 В, пожарной безопасности и промышленной санитарии и сдавшим экзамен на право допуска к самостоятельной работе.

Электробезопасность при работе с электроустановками соблюдается по ГОСТ 12.1.019-79.

Помещение лаборатории должно соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83.

Исполнители должны быть проинструктированы о мерах безопасности при работе с технологическим оборудованием и техникой безопасности при работе в чистом помещении.