

**Московский Физико-Технический Институт
(Государственный Университет)
Факультет Физической и Квантовой Электроники
Кафедра технологии нанoeлектроники**

“Лабораторные технологии изготовления мезоскопических структур”

**Выпускная квалификационная
работа на степень бакалавра
студента 054 гр.
Осипова Н.Н.**

**Научный руководитель
Доктор физ.-мат. наук, профессор
Тулин В.А.**

**Работа выполнена в ИПТМ РАН,
г. Черноголовка,
2004 г.**

Оглавление

Введение		3
Глава I. Нелинейные эффекты в наноструктурах		
Эффект Литтла-Паркса		7
Глава II. Технологические процессы		
II.1. Фотолитография.		10
II.2. Электронно-лучевая литография		12
II.3. Технологический маршрут.		12
II.4. Эффект близости.		14
II.5. Ионное травление.		16
II.6. Нанесение тонких металлических пленок		16
Измерения		18
Вывод		19
Литература		20

Актуальность темы

Изучение электронных транспортных свойств наноразмерных систем является одним из перспективных направлений развития физики твердого тела. Существуют по меньшей мере, две важные причины обуславливающие интерес к таким системам. Во-первых, в них возникают новые физические явления, представляющие самостоятельный научный интерес. Например мезоскопические флуктуации проводимости, кулоновская блокада. Второй причиной, стимулирующей исследования, является возможность создания на основе наноразмерных систем нового поколения быстродействующих электронных приборов.

Последнее время металлы вызывают все больший интерес как перспективные материалы для изготовления структур нанометрового масштаба. Связано это с тем, что существующая тенденция постепенного уменьшения размеров полупроводниковых приборов (которой следует промышленность) подходит к своему физическому пределу.

Одним из факторов, ограничивающих развитие полупроводниковой технологии, является нарушение надежности работы связанное с малыми размерами. Так в полупроводниковом приборе со степенью легирования, дающей концентрации носителей тока порядка 10^{18} см^{-3} , с характерным размером 0.1 мкм содержится менее 1000 носителей тока и флуктуации различного типа начинают существенно влиять на электронные свойства материала. В металлах же концентрации носителей тока на 4 - 5 порядков выше, что позволяет при тех же параметрах снижать размеры возможных устройств до нанометров. Кроме того, для металлов характерные длины, важные для возможных приложений, такие как длина свободного пробега при комнатной температуре, радиус экранирования, длина волны электронов проводимости, глубина проникновения электромагнитного поля в оптическом диапазоне составляют порядка 1-10 нм. Среди металлов можно найти такие, которые обладают различными электронными, магнитными и оптическими свойствами. Более 80% элементов периодической системы Д.И. Менделеева являются металлами. Таким образом, технология изготовления, исследование металлических наноструктур и поиск новых физических явлений, которые могли бы стать основой для создания элементной базы металлической наноэлектроники, является актуальной задачей.

В настоящее время особый интерес представляет исследование электрических транспортных характеристик металлических систем. Объемная проводимость металлов зависит от плотности состояний на уровне Ферми и длины свободного пробега электронов проводимости. В силу особенности электронного спектра нормальных металлов, плотность состояний определяется энергией Ферми, которая составляет величину порядка 10000 К. Это много больше всех характерных энергий, реализуемых в эксперименте. Кроме того, из-за высокой концентрации носителей тока

дрейфовые скорости обычно очень малы по сравнению не только со скоростью Ферми, но и со скоростью звука в металле. Длина свободного пробега определяется рассеянием электронов на несовершенствах кристаллической решетки, примесях, фононах и т. п.. Нелинейные эффекты в проводимости имеют не только научное, но и практическое значение, поскольку в основе работы многих электронных приборов лежат нелинейные вольт-амперные характеристики.

Прогресс нанотехнологии в последнем десятилетии позволил создавать металлические структуры с размерами, не превышающими длину сбоя фазы $L_j = (Dt_j)^{1/2}$ ($t_j^{-1} = t_{so}^{-1} + t_{ph}^{-1} + \dots$ - суммарная частота всех процессов рассеяния электронов, приводящих к потере электроном фазовой памяти, D - коэффициент диффузии электронов проводимости) при гелиевых температурах. Существует два вида эффектов которые определяют отклонение транспортных свойств от классических: эффекты квантовой интерференции и эффекты, связанные с пространственным квантованием энергетического спектра носителей заряда. Поправки к проводимости, связанные с квантовой интерференцией, можно подразделить на слаболокализационные, мезоскопические и связанные с электрон-электронным взаимодействием. Все они являются результатом того, что электронная волна сохраняет фазовую память при упругом рассеянии, а теряет ее лишь при неупругом рассеянии или рассеянии с переворотом спина. Две величины, длина сбоя фазы, и длина когерентности нормального металла, $L_T = (\hbar D / kT)^{1/2}$, определяют масштаб длин и величину интерференционных эффектов. В реальных структурах амплитуда интерференционных поправок относительно мала и не превышает кванта проводимости e^2/h

В мезоскопических структурах существенна квантовая интерференция электронов. Она позволяет управлять проводимостью структур, влияя на фазу волновой функции, а не на ее модуль. Так в эффекте Ааронова-Бома проводимость структуры зависит от фазовых соотношений интерферирующих электронных волн, в свою очередь зависящих от приложенного магнитного поля. Другой пример - андреевское отражение, возникающее на границах раздела нормального металла со сверхпроводником. При андреевском отражении происходит передача макроскопической фазы сверхпроводящего конденсата нормальным электронам. Возникает возможность управления проводимостью нормальной части за счет изменения разности фаз в сверхпроводниках, которая может быть задана бездиссипативным сверхпроводящим током.

Большое внимание к квантовым вычислениям (идея которых впервые была высказанна в 1980 году Ю.И. Маниным [1]) привлек в 1982 выход статьи лауреата Нобелевской премии по физике Р. Фейнмана [2]. В ней он обратил внимание на то, что эффективное моделирование квантовых систем,

практически недоступно классическим компьютерам, но может эффективно осуществляться на основе использования соответствующих квантовых логических операций.

Перспективы квантовых вычислений обычно связывают с ожидаемым экспоненциальным ускорением решения таких задач, для которых очень трудно решение найти, но очень просто его проверить. Такие задачи относятся к классу невычислимых задач в том смысле, что они не могут быть решены на классических компьютерах за время, экспоненциально зависящее от числа битов, представляющих задачу.

Существует несколько вопросов, которые необходимо решить для выбора конкретной схемы построения квантового компьютера.

Выбор элементной базы, которая позволит иметь в компьютере достаточное число управляемых кубитов. Наиболее широко в настоящее время обсуждаются следующие направления:

- а) использование низколежащих энергетических уровней ионов, захваченных ионными ловушками, созданных в вакууме с помощью электрических и магнитных полей определенной конфигурации, при лазерном охлаждении ионов до микрокельвиновых температур;
- б) использование ядерных спинов с $I = 1/2$ и методов ядерного магнитного резонанса (ЯМР);
- в) использование макроскопических квантовых состояний сверхпроводящих устройств;
- г) использование двух спиновых или двух орбитальных электронных состояний в квантовых точках;
- д) использование квантовых электродинамических резонаторов и фотонных кристаллов.

Так же важно определить физический механизм, определяющий взаимодействие между кубитами.

Наконец необходимо определить способ селективного управления кубитами и измерения их состояния на выходе, для чего можно использовать электрические импульсы, подаваемые через микроэлектроды к кубитам.

Поскольку в микроэлектронике для управления классическими логическими элементами давно и широко применяются электрические методы, их использование представляется наиболее перспективным и для создания масштабируемых квантовых компьютеров.

Квантовые методы выполнения вычислительных операций уже начинают воплощаться в реально функционирующих экспериментальных устройствах. Хотя они состоят из небольших регистров, насчитывающих всего несколько квантовых битов, и еще не способны обеспечить надежные вычисления, так как они либо недостаточно управляемы, либо подвержены влиянию шумов, тем не менее физических запретов на построение эффективного квантового компьютера нет, необходимо лишь преодолеть технологические трудности.

В работе отрабатывались технологические аспекты создания мезоскопических приборов первого поколения. В приборах первого поколения используются достижения однослойной электронной литографии. Они представляют собой планарные однородные мезоскопические структуры. Второе поколение - приборы, включающие элементы из разных материалов.

Пространственные масштабы, о которых идет речь, составляют 10^{-10} нанометров. Возможность проведения экспериментальных исследований систем с такими размерами определяется уровнем развития технологической базы микроструктурирования. Ключевыми технологиями являются электронно-лучевая литография, низкоэнергетическое ионное травление, термическое нанесение пленок различных материалов, локальный, вплоть до 0.5 мкм, контроль состава и качества поверхности.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в отработке конкретных лабораторных методик изготовления мезоскопических структур на основе нормальных металлов и сверхпроводников для дальнейшего экспериментального исследования их транспортных электрических свойств.

Проведены первичные исследования зависимости сопротивления наноструктур, состоящих из нормальных металлов, граничащих со сверхпроводниками, от магнитного и электрического поля.

Цель работы.

Целью настоящей работы было совершенствование технологических процессов, позволяющих в лабораторных условиях создавать экспериментальные наноструктуры с размерами 200-1000 нм, с контролируемой геометрией и качеством границ между различными элементами.

Практическая значимость работы заключается в развитии лабораторных методов разработки и изготовления металлических наноструктур с целью возможного обнаружения новых физических эффектов, которые могут быть положены в основу работы новых приборов микроэлектроники.

Нелинейные эффекты в наноструктурах

Эффект Литтла-Паркса

Эффект Литтла-Паркса [3], [4] заключается в том, что зависимость температуры сверхпроводящего перехода T_c от приложенного магнитного поля H имеет осциллирующий характер.

Описанный ниже метод расчета основан на уравнениях Гинзбурга — Ландау и принадлежит Тинкхаму [5], [6].

Будем считать, что $d \ll \chi(T)$ и $d \ll l(T)$ (где d - толщина пленки), а амплитуда волновой функции $|y|$ постоянна внутри пленки. Тогда $y = |y| e^{iq(r)}$ и свободная энергия будет задаваться выражением (1)

$$F = F_n + |y|^2 \left(a + \frac{1}{2} b |y|^2 + \frac{1}{2} m u^2 \right) + \frac{h^2}{8p} \quad (1)$$

Выражение для плотности сверхпроводящего тока запишется в виде

$$j = \frac{2e}{m} |y|^2 \left(\hbar \nabla q - \frac{2e}{c} \mathbf{A} \right) = 2e |y|^2 v$$

где

$$v = \frac{1}{m} \left(\hbar \nabla q - \frac{2e}{c} \mathbf{A} \right) = \frac{j}{2e |y|^2}$$

- скорость “частиц” в состоянии с волновой функцией y ; $\mathbf{A}$ - векторный потенциал.

Найдем связь между H и v , для этого рассмотрим циркуляцию $\oint v \cdot dl$, где интегрирование ведется по окружности радиуса R . Имеем

$$\oint v \cdot dl = 2pRv = \frac{\hbar}{m} [q] - \frac{2e}{mc} \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (2)$$

где $[q]$ - изменение фазы при полном обходе вокруг окружности.

Теория ГЛ требует существование однозначного комплексного сверхпроводящего параметра порядка $y(r)$, т.е. фаза должна изменяться на целое число, умноженное на $2p$ при полном обходе по замкнутому контуру, так что $[q] = 2p \cdot n$, где n — любое целое число. Второй член в выражении (2) пропорционален интегралу

$$\oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \int H \cdot d\mathbf{s} = f = pR^2 H \quad (3)$$

Следовательно

$$v = \frac{\hbar}{mR} \left(n - \frac{f}{f_0} \right) \quad (4)$$

где $f_0 = \frac{hc}{2e}$ - квант магнитного потока. Для потока, фиксированного полем H , энергия токов в цилиндре будет наименьшей при таком целом n , при котором v минимальна; соответственно этот выбор и позволяет системе оставаться

сверхпроводящей при наиболее высокой температуре. С выбранным таким образом n скорость v будет периодической функцией отношения f/f_0 , как показано на рис. 1.1.

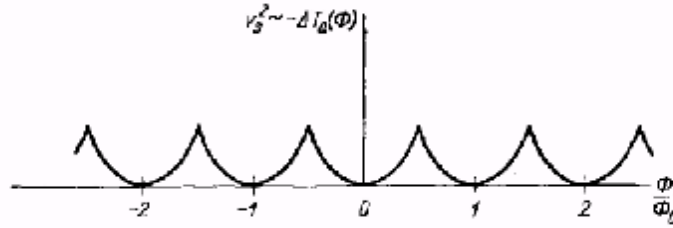


Рис. 1.1.

Если скорость v найдена, то из (1) можно найти минимум свободной энергии относительно $|y|$. Это дает

$$|y|^2 = b^{-1} \left(-a - \frac{mv^2}{2} \right) \quad (5)$$

Температуру перехода T_H можно определить из условия $-a(T_H) = mv^2/2$ т. е. T_H — периодическая функция поля H и ее теоретическая кривая состоит из ряда параболических дуг, т. к. $a \propto (T - T_C)$. Смещение температуры перехода

$$\begin{aligned} \text{максимально при } v &= \frac{\hbar}{2mR}, \\ -a(T_H) &= \frac{\hbar^2}{2m\chi^2(T_H)} = \frac{m}{2} \left(\frac{\hbar}{2mR} \right)^2, \quad \chi(T_H) = 2R. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя известную зависимость для грязного ($d < \chi_0$) сверхпроводника $\chi(T) = 0.85\sqrt{\chi_0 l}(1 - T/T_C)^{-1/2}$ получаем

$$(T_C - T_H)_{\text{макс}} = 0,73T_C \frac{\chi_0 d}{(2R)^2} \quad (7)$$

Для получения измеримой величины смещения $T_C - T_H$ радиус R должен быть по возможности малым.

Мы несколько идеализировали задачу, считая, что измеряется зависимость $T_C(H)$. В реальном эксперименте измеряется периодическое изменение сопротивления пленки при изменении поля H . Величину $\Delta R(H)$ можно пересчитать в $\Delta T_C(H)$, используя измеренное значение производной dR/dT в области перехода и считая ширину перехода по сопротивлению конечной. Поэтому полученная зависимость $\Delta T_C(H)$ до некоторой степени будет зависеть от выбора уровня сопротивления внутри области перехода.

Интерес представляет исследование взаимного влияния двух близко расположенных сверхпроводящих колец. Так например в работе [16] для алюминиевого кольца изучалось изменение зависимости $T_c(\Phi)$ вызываемое наличием второго кольца меньшего радиуса, расположенного концентрически с исходным. Анализ экспериментальных данных показал, что это изменение было вызвано магнитным взаимодействием между двумя кольцами.

Применение определенных технологических методик для создания наноструктур определяется очень малыми размерами самих структур, а также высокими требованиями к качеству пленок. Необходимые размеры достигаются применением электронно-лучевой литографии, с учетом эффектов близости (т. е. взаимного влияния близких друг к другу точек при экспонировании). Это позволяет создавать объекты размерами порядка диаметра электронного луча. Качество пленок обеспечивается использованием исходных материалов высокой чистоты, а качество контактов, дополнительным ионно-плазменным травлением либо применением особой техники, при которой гибридная структура формируется без разрыва вакуума (техника нависающих мостов).

II.1. Фотолитография.

На рис. 1. показана фотография образца с разводкой, приготовленной с использованием фотолитографии. Большие контактные площадки располагались вдоль краев образца. Подводящие дорожки, варьировавшиеся по ширине от 1 мм на краях образца до 5-10 мк в центре. Фотошаблоны были приготовлены при помощи электронно-лучевой литографии. Подложкой являлись легированные кремниевые пластины ориентации (100), покрытые естественным окислом. Диаметр пластин был 50см, толщина 2,5мм. При комнатной температуре подложка имеет удельное сопротивление порядка 1-10 Ом см, что предохраняет рабочую структуру от возможного в процессе приготовления разрушения статическим электричеством. При низких температурах подложка становится изолятором и не влияет на измерения характеристик изготовленных мезоструктур.

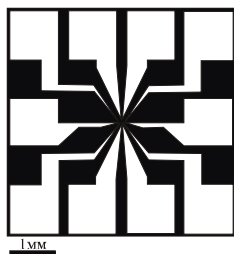


Рис.1. Фотография образца с золотыми контактными площадками и подводящими дорожками (белые области), приготовленными при помощи фотолитографии.

На подложку напылялось 100-150 нм золота причем напыление проводилось под разными углами для получения тонкого края контактной площадки. Рис. 2.а) поясняет напыление под разными углами. Т.к. толщина напыляемой пленки обычно много меньше высоты контактной площадки, то на краю контактной площадки пленка становится тоньше, как показано на рис. 2.б) Это особенно критично для пленок из материалов подверженных окислению, т.к. в тонком месте пленка может прокиснуть полностью и стать диэлектриком. По этой причине и приходится создавать контактные площадки с тонким краем.

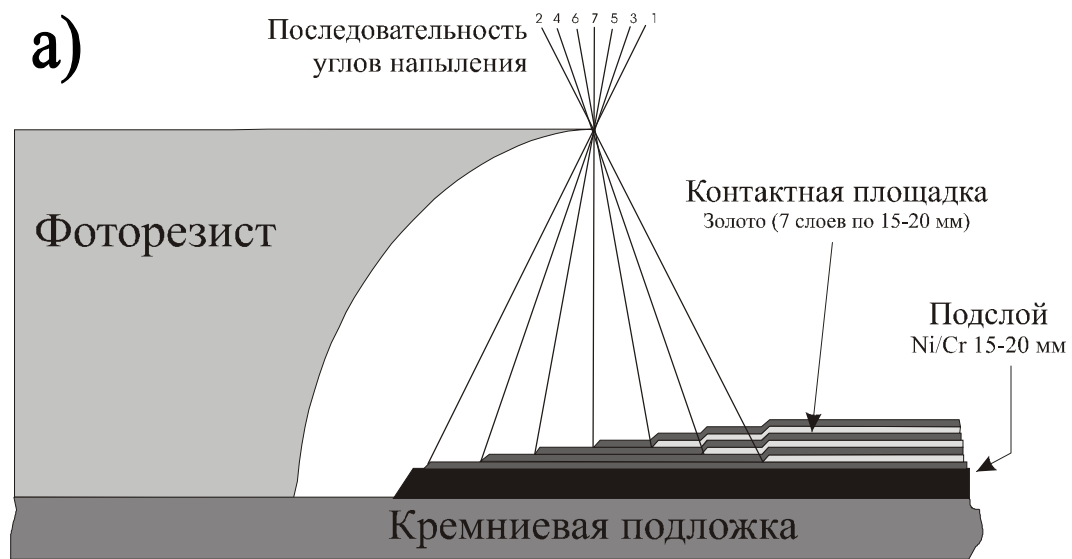
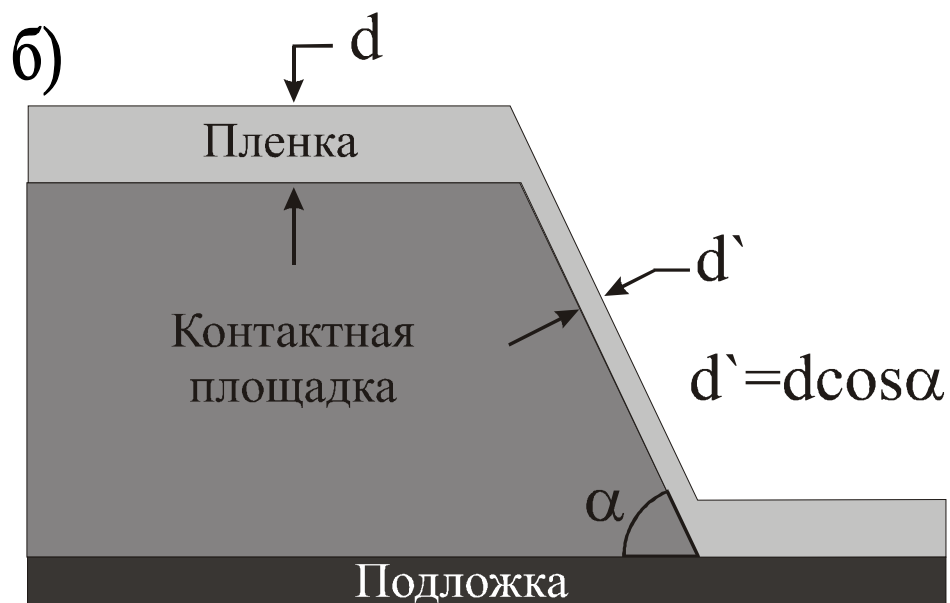


Рис. 2.

(а) Формирование контактных площадок;

(б) необходимость тонкого края



II.2. Электронно-лучевая литография

Для электронной литографии использовался сканирующий электронный микроскоп JSM 840A фирмы JEOL (Япония). При этом внутренняя развертка электронного луча отключалась, а управление движением луча осуществлялось с IBM PC через два 16-разрядных цифро-аналоговых преобразователя. Применялось программное обеспечение для электронной литографии NANOMAKER®, разработанное в ИПТМ РАН.

Исследуемые структуры изготавливались на основе метода *“позитивной”* электронно-лучевой литографии.

Процесс основан на различной растворимости в проявителях, экспонированного и неэкспонированного электронным лучом резиста. В качестве резиста использовались как однослойные системы на основе полиметилметакрилата ПММА, так и двухслойные - на основе ПММА и сополимера ПММА/ММА. Резисты представляют собой полимеры, растворенные либо в хлорбензоле, либо в анизоле, либо в ксилоле или в этил лактате. Молекула ПММА состоит из цепочки связанных мономеров с общим атомным весом в несколько сотен тысяч атомных единиц. Каждый мономер содержит порядка 100 атомов и представляет собой клубок диаметром ~4нм [10]. При экспонировании электронным лучом молекула распадается на отдельные фрагменты с меньшим молекулярным весом.

II.3. Технологический маршрут.

1. На предварительно очищенный чип (с помощью спирта) с золотыми контактными площадками, с помощью центрифуги наносится резист, который затем отжигается для перевода его в стеклообразное состояние.
2. После этого происходит экспонирование резиста электронным лучом в соответствии с топологией образца (рис.3.а).
3. Затем пластину помещают в проявитель, который растворяет экспонированные участки, в резисте появляются "окна" (рис.3.б). Параметры проявления приведены в табл. 1. Также необходима очистка "окон" от остатков резиста при помощи ионного травления (рис.3.б).
4. Металл напыляется на всю площадь чипа и в "окнах" оказывается непосредственно на поверхности пластины (рис.3.с).
5. Завершает процесс изготовления "взрыв" (lift-off) (рис.3.д). Пластина помещается в сильный растворитель, который полностью растворяет резист, и смывает металлическую пленку, оставшуюся на неэкспонированной части.

В результате, металлическая пленка остается на пластине только в "окнах" (рис.3.е). Важным условием является "подтрав" (undercut) резиста. Он препятствует образованию перемычек, соединяющих материал в "окнах" и на резисте, тем самым облегчая растворение резиста. Для обеспечения "подтрав" обычно используются двухслойные резисты, у которых чувствительность нижнего слоя выше, чем у верхнего (например для сополимера и 950К различие составляет 4-5 раз).

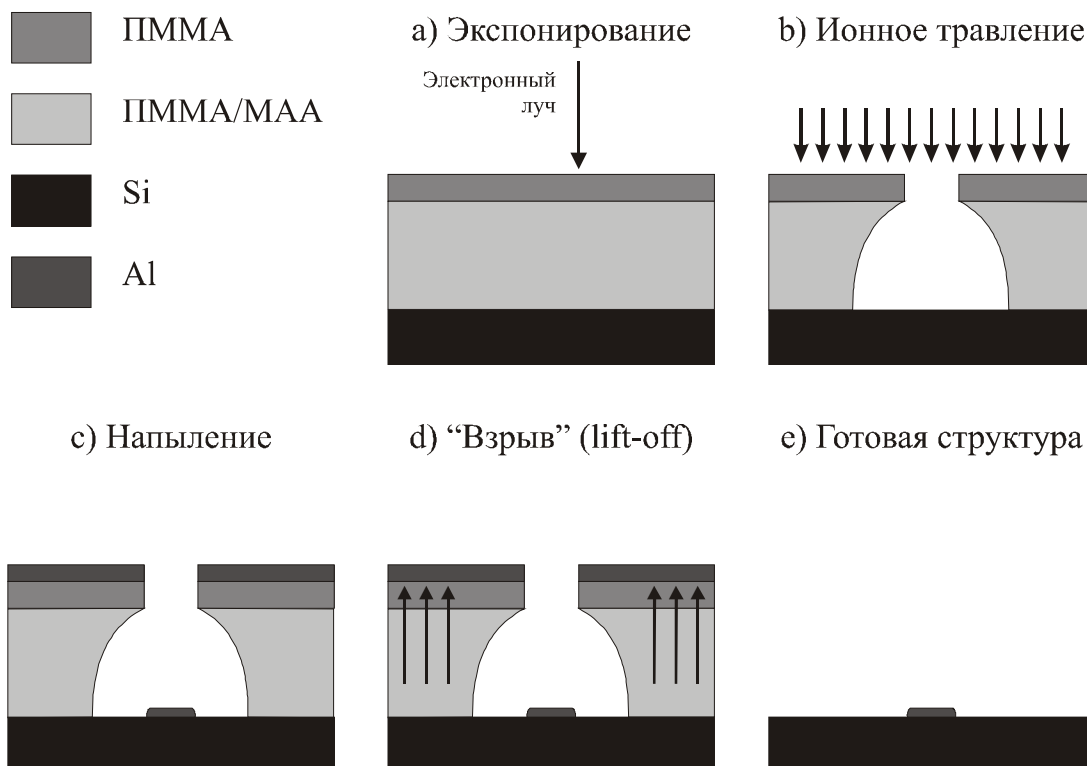


Рис. 3. Схематическое изображение процесса позитивной электроннолучевой литографии

Табл. 1. Параметры электронного резиста

	"Стандартный" резист		"Высокий" резист	
Растворитель	ПММА 2% Хлорбензол	ПММА/ММА 6% Ксилол	ПММА 2% Хлорбензол	ПММА/ММА 14% Ксилол
Центрифуга	3000 об/м	3000 об/м	3000 об/м	3000 об/м
Отжиг	160°C 10 мин	170°C 10 мин	160°C 10 мин	170°C 10 мин
Толщина	80 нм	220 нм	80 нм	720 нм
Доза	150 мкКл/см ²		180 мкКл/см ²	
Проявитель	Толуол: Изопропанол 1:3	ЕСА:Этанол 1:5	Толуол: Изопропанол 1:3	ЕСА: Этанол 1:5
Проявление	20°C			
	5 сек	15 сек	5 сек	45 сек

II.4. Эффект близости.

Разрешение электронно-лучевой литографии зависит от свойств подложки. При облучении резиста электронным лучом размером a первичные электроны высокой энергии претерпевают малоугловое рассеяние в резисте, при этом вклад первичных электронов в поглощенную дозу хорошо описывается распределением $(1/a^2)\exp(-r^2/a^2)$, где r - расстояние до центра луча. Первичные электроны рассеиваются в подложке, при этом возникают вторичные электроны, часть которых рассеивается в резисте и вносит вклад в поглощенную дозу, описываемый распределением $(h/b^2)\exp(-r^2/b^2)$, где b - размер области возбуждения вторичных электронов, а h - относительный вклад обратно рассеянных электронов в поглощенную дозу. Если параметр a зависит только от диаметра первичного электронного пучка, то параметры h и b зависят от ускоряющего напряжения и материала подложки. Таким образом, обратно рассеянные и вторичные электроны облучают область резиста, превышающую размеры электронного пучка (эффект близости). Размеры этой области зависят от свойств подложки и ускоряющего напряжения.

В результате доза облучения близко расположенных элементов структуры оказывается выше, чем предполагается без учета эффекта. Области резиста с повышенной дозой облучения растворяются легче и быстрее при проявлении, что приводит к уширению линий и исчезновению резиста между близко расположенными элементами структуры.

Для расчета дозы с учетом соседних экспонированных областей используется функция $D(x,y)$ - доза поглощенной энергии [8]:

$$D(x,y) = \iint I(x-x',y-y')T(x',y')dx'dy'$$

где $T(x',y')$ - доза облучения, $I(x-x',y-y')$ - функция близости, характеризующая распределение плотности поглощенной энергии в плоскости подложки относительно центра пучка. При этом считается, что поглощенная энергия равномерно распределена по глубине резиста. Функция близости может быть представлена в виде суммы двух гауссианов [8]

$$I(r) = \frac{1}{p(1+h)} \left[\frac{1}{a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) + \frac{h}{b^2} \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) \right], \quad r = x^2 + y^2$$

Доза нормализована на "I"- дозу необходимую для полного проявления резиста.

В работе [9] предложен новый эффективный метод коррекции эффекта близости, который впервые стал учитывать влияние процесса проявления на результат экспонирования путем решения обратной задачи, а также предложена методика оценки погрешности различных методов коррекции. Этот метод и реализован в программе NANOMAKER, которая разработана в ИПТМ РАН совместно с Raith GmbH, и позволяет провести коррекцию эффекта близости, получив одинаковую дозу экспонирования по всей площади рисунка, численное моделирование процесса проявления для отработки параметров экспонирования, а также полуавтоматическое совмещение изображений с высокой точностью. Для решения задачи важно определить параметры функции близости a , b , h для конкретных подложек и свойств электронного пучка.

Оригинальные тесты, предложенные для экспериментального определения a , b , h в работе [12], позволили легко определить величины этих параметров для нашей установки и подложек (см таб.2). Как и следует ожидать, параметр α слабо чувствителен к материалу подложки и, в пределах точности экспериментальных тестов, к величине ускоряющего напряжения. Имея данные о параметрах a , b и h можно корректировать дозы экспозиции отдельных элементов.

В работе [10] предложена принципиально новая методика определения параметров a , b , h , характеризующаяся тем, что все расчеты проводятся на стадии формирования тестовой структуры, а результаты тестирования определяются по внешнему виду структуры с известной точностью. Многочисленные эксперименты показали, что возможно полное решение задачи коррекции эффекта близости и оптимизации параметров экспонирования структуры произвольной геометрии с известной точностью.

Табл. 2. Экспериментально определенные параметры a , b , h для подложек из Si и GaAs при различных ускоряющих напряжениях [11].

	α (нм)	b (мкм)	h	E (кВ)
Si	75	0.9	0.75	11
	75	1.4	0.75	15
	75	2.2	0.75	20
	75	2.85	0.75	25
	75	4.0	0.75	30
	75	5.8	0.75	35
GaAs	75	0.7	1.4	15
	75	1.0	1.4	20
	75	1.3	1.4	25
	75	1.8	1.4	30
	75	2.2	1.4	30
	75	2.6	1.4	35

α , β определены с точностью 10%, η с точностью 20%

II.5. Ионное травление.

Применялось для очистки поверхностей перед напылением пленок. Травление проводилось на установке: ВУП-4, снабженной специальными приставками.

Газ	Давление	Ускоряющее напряжение	Ток	Время
O ₂	2*10 ⁻² мбар	0,5кВ	5-10мА	20с
Ar	2*10 ⁻² мбар	0,5 кВ	5-10мА	30с

II.6. Нанесение тонких металлических пленок

Нанесение пленок осуществлялось путем термического распыления материала в вакууме на установке ВУП-4. Базовый вакуум составлял 10⁻⁵ мм.рт.ст. Применялись вольфрамовые испарители. Чип помещался на расстоянии 15 - 20 см от испарителя и закрывался заслонкой. Напыление проводилось через диафрагму диаметром 0.5 см для устранения размытия линий из-за неточности источника. Типичная скорость напыления составляла 1,5-3 нм/сек. Контроль толщины пленки осуществлялся по калиброванному кварцевому толщиномеру с точностью не хуже 1 нм. Исходными материалами являлись сверхчистые металлы, полученные в ИПТМ РАН путем специальной обработки.

Материалы.

Алюминий Al использовался в качестве сверхпроводника. Алюминий характеризуется рядом технологических и физических свойств, которые определяют его широкое использование в экспериментах. Среди технологических свойств можно отметить хорошую адгезию к кремнию, способность к пассивации на воздухе (На поверхности образуется оксид Al_2O_3 толщиной 1-2 нм, который защищает пленку от дальнейшего окисления). Способность образовывать тонкий однородный слой оксида широко используется для создания туннельных контактов. Среди физических свойств следует отметить рекордную длину когерентности $\xi_0=1600$ нм

Диагностика качества и состава структур.

Диагностика структур проводилась на РЭМ JEOL-840A. JEOL-840A позволял анализировать структуры с минимальными размерами ~20 нм. Возможность использования низкого ускоряющего напряжения, вплоть до 3 КВ, позволяла исследовать тонкие пленки металлов с малой атомной массой (в нашем случае алюминиевые).

Измерения

Для исследования изготовленного в ходе данной работы образца (Рис. 4.) он был помещен в гелиевый криостат. Проведение первичных измерений показало, что образец переходит в сверхпроводящее состояние. Так же наблюдались осцилляции сопротивления от магнитного поля.

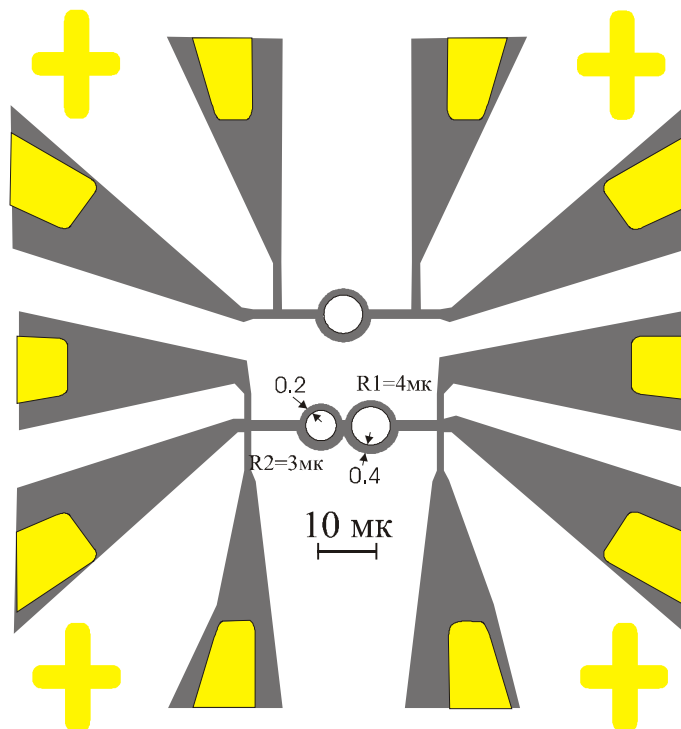


Рис. 4. Исследуемый образец

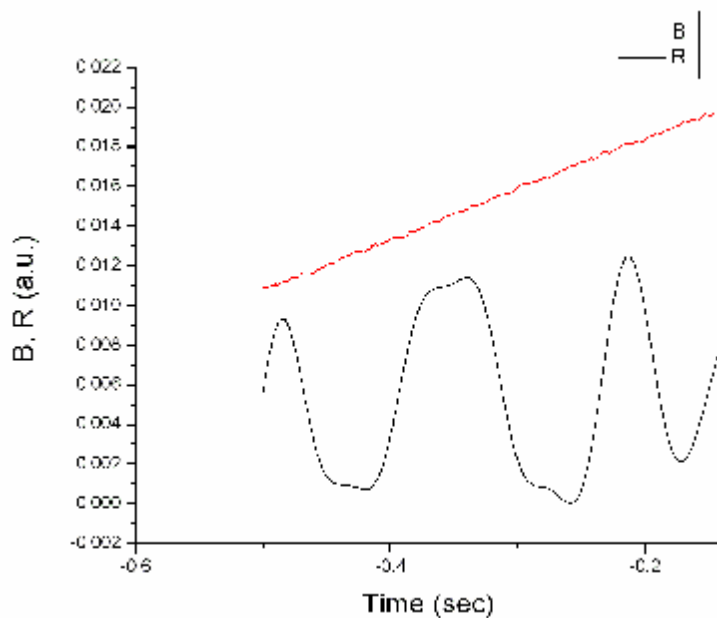


Рис. 5. Первичные экспериментальные данные

Заключение

- В ходе работы была отработана технологическая цепочка, позволяющая в лабораторных условиях создавать мезоскопические структуры
- Было создано несколько наноструктур требуемой геометрии.
- Проведена в два этапа проверка качества изготовления структур. Сначала визуальная оценка с помощью электронного микроскопа. Затем была сделана попытка качественного измерения ВАХ в гелиевом криостате.
- Полученная осциллирующая зависимость сопротивления структуры от периодически изменяющегося внешнего поля позволяет утверждать, что изготовленные наноструктуры скорее всего являются работоспособными.

1. Манин Ю. И. **Вычислимое и невычислимое.** — М.: Сов. Радио. 1980, с. 128.
2. Feynman R. **Simulating Physics with Computers** // Inter. Jour. Theor. Phys. 1982, v. 21, №6/7, pp. 467-488. / Фейнман Р. **Моделирование физики на компьютерах.** Перевод с англ, под ред. В. А. Садовниченко: Сборн. «Квантовый компьютер & квантовые вычисления» II. — Ижевск: Ред. журн. «Регуляр. и хаотич. динам.», 1999, с. 96-124.
3. Little W. A., Parks R, D., **Observation of Quantum Periodicity in the Transition Temperature of a Superconducting Cylinder**, Phys. Rev. Lett., 9, 9 (1962).
4. Parks R. D., Little W. A., Phys. Rev., **A133**, 97 (1964).
5. Tinkham M., Phys. Rev., **129**, 2413 (1963).
6. Tinkham M., Rev. Mod. Phys., **36**, 268 (1964).
7. A.N.Broers, **Resolution limit for electron-beam lithography**, IBM J Res.Develop., 32, 502 (1988)
8. M.Parich, **Correction to proximity effects in electron beam lithography**, J.Appl.Phys. , 50, 4371 (1979)
9. V.V.Aristov, B.N.Gaifullin, A.A.Svintsov, S.I.Zaitsev, H.F.Raith and R.Jede, **Accuracy of proximity correction in electron lithography after development**, J.Vac.Sci.Technol. BIO, 2459,(1992)
10. S.V.Dubonos, B.N.Gaifullin, H.F.Raith, A.A.Svintsov, S.I.Zaitsev, **Evaluation, Verification and Error Determination of Proximity Parameters a , b and h in Electron Beam Lithography**, Microelectronics Engineering, 21, 293, (1993)
11. Петрашов Б.Т., Абраменко Ю.Т., Зарубин В.А. **Органический вакуумный негативный резист для электронной литографии (ВЭНР-Х)**, Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1990.
12. Aristov V.V., Gaifullin B.N., Raith H.F., Svintsov A.A., Zaitsev S.I. and Jede R. **Proximity correction in electron lithography with guaranteed accuracy after development**, J.Vac.Sci.& Technol.B, 1992, 10(6), p.2459.
13. М. Тинкхам, **Введение в сверхпроводимость**, М.: Атомиздат, 1980. (M. Tinkham, Introduction to Superconductivity, McGraw-Hill Book Company, 1975).
14. П. Де Жен, **Сверхпроводимость металлов и сплавов**, “МИР”, Москва 1968 (P. G. De Gennes Superconductivity of Metals and Alloys, W. A. Benjamin Inc., New York-Amsterdam 1966)
15. И. А. СОСНИН, **Нелинейные Эффекты в Электронном Транспорте Гибридных Металлических Наноструктур**, Диссертационная работа, Черноголовка, 1997
16. М. Morelle, V. Bruyndoncx, R. Jonckheere and V.V. Moshchalkov **Critical temperature oscillations in magnetically coupled superconducting mesoscopic loops**, 2001