

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра нанометрологии и наноматериалов

УДК 620.3

ОТЧЕТ ПО ПРАКТИКУМУ
ПО СОЗДАНИЮ И ИССЛЕДОВАНИЮ
МИКРО- И НАНОСИСТЕМ

Руководитель темы: м.н.с., аспирант _____ Р. Киртаев

Исполнители темы: студент 854 гр. _____ А. Буздаков
студент 854 гр. _____ Д. Корнюшин
студентка 854 гр. _____ А. Мазаленко
студент 854 гр. _____ А. Пахомов

Оглавление

<i>1. Цель работы</i>	3
<i>2. Используемое оборудование</i>	3
2.1 ICPE Corial 200I	3
2.2 Вакуумная напылительная установка TORR MagSput-DC-RF.....	3
2.3 Установка безмаскового совмещения и литографии Heidelberg Instruments MLA100.....	4
2.4 Установка электронно-лучевого напыления MEB 550S Plassys.....	4
2.5 Секция для электрофизических измерений на базе Cascade Microtech Summit 11000M.....	4
<i>3. Ход выполнения работы.</i>	5
3.1. Краткая маршрутная карта всего тех. процесса.	5
3.2. Промежуточные результаты шагов тех. процесса.	6
3.3. Электрофизические измерения готовых образцов.....	9
<i>4. Выводы</i>	10

1. Цель работы

Целью данного практикума являлось создание и исследование наносистемы, в данном случае представляющей собой подложку с полевыми транзисторами с различной шириной и длиной канала (см. Рис. 3).

Создание и исследование системы предполагало работу на следующих установках:

- установка по проведению процессов травления
- вакуумная напылительная установка
- установка безмасковой оптической литографии
- установка электронно-лучевого напыления
- зондовая станция для электрофизических измерений

2. Используемое оборудование

2.1 ICP-RIE Corial 200I

Установка Corial 200I предназначена для проведения ICP и RIE процессов травления кремния, оксида кремния, металлов и оксидов металлов на пластинах диаметром до 200 мм (в камере возможно



размещение до семи пластин диаметром до 50 мм).

Установка оснащена двухсот двадцати миллиметровым катодом с держателем образцов для загрузки и выгрузки образцов, при этом держатель образцов может меняться в зависимости от размеров образца или используемого процесса.

Технические характеристики:

- 7 газовых линий с контроллерами потока газа (CHF_3 , SF_6 , O_2 , C_2H_4 , Ar);
- радиочастотный генератор 13,56 МГц, 300 Вт;
- радиочастотный генератор с воздушным охлаждением (2 МГц, 1 кВт).

2.2 Вакуумная напылительная установка TORR MagSput-DC-RF

Вакуумная установка напыления MagSput-DC-RF предназначена для нанесения тонких слоёв металлов, полупроводников, диэлектриков, композиций материалов с возможностью использования в технологическом процессе трёх различных газов и их смесей. В вакуумной камере установлены пять источников напыления: один высокочастотный магнетрон и четыре магнетрона на постоянном токе мощностью до 1,5 кВт. В камере установлена аргонная ионная пушка с энергией ионов до 200 эВ, позволяющая прецизионно стравливать поверхностные слои различных материалов.



Основные характеристики MagSput-DC-RF:

- Рабочее давление в камере до 10^{-8} Торр;
- Прогрев подложки: до 400 °C;
- Мишени: алюминий, вольфрам, медь, титан, тантал, оксид тантала, оксид гафния, оксид вольфрама, нитрид титана, оксид ванадия, золото, платина;
- Технологические газы: аргон, азот, кислород.

2.3 Установка безмаскового совмещения и литографии Heidelberg Instruments MLA100

MLA100 очень простой в использовании и экономичный прибор безмасковой оптической литографии. MLA100 может применяться в таких сферах, как MEMS, BioMEMS, интегральная оптика, микро гидросистемы, ReRAM, FeRAM и других прикладных сферах микроэлектроники, где требуется высокая точность и высокое разрешение литографии.



Технические характеристики:

- Размер образца до 6" x 6"
- Разрешение литографии не хуже 0.6 мкм
- Длина волны источника 375 нм
- Скорость литографии до 90 мм²/мин
- Автоматическое позиционирование при помощи встроенной камеры

2.4 Установка электронно-лучевого напыления MEB 550S Plassys

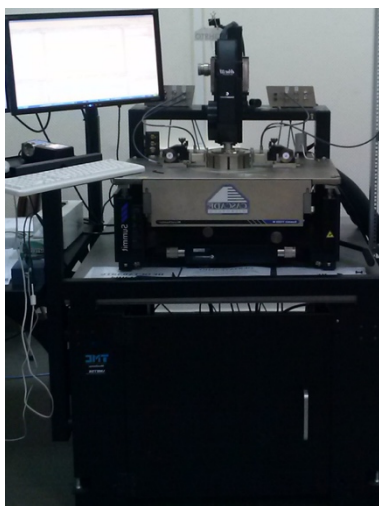
Установка электронно-лучевого напыления MEB 550S Plassys предназначена для вакуумного напыления металлических тонких пленок с возможностью подачи кислорода в камеру для получения окислов металлов с заданной стехиометрией состава. Также возможен нагрев подложки до 600 градусов и чистка (травление) поверхности подложки в аргоновой плазме.



Установка оснащена держателем образцов с возможностью крепления пластин до 4" и 3 степенями свободы. Процесс напыления осуществляется автоматически с помощью ПК по заранее подготовленному рецепту. Одновременно в барабане может находиться 4 различных материала для напыления.

2.5 Секция для электрофизических измерений на базе Cascade Microtech Summit 11000M

Зондовая станция позволяет получить доступ к полному диапазону возможностей измерительных приборов.



Характеристики зондовой станции:

- размер держателя пластин – 8"/200 мм
- перемещения по осям X и Y: 203 x 230 мм с разрешением 0,1 мкм
- перемещения по оси Z: 5 мм с разрешением 1 мкм
- возможность вращения рабочего стола с точностью 1°
- цифровой оптический микроскоп eVue III с разрешением менее 0,5 мкм
- температурный диапазон измерений от - 60°C до + 200°C
- виброизолированный держатель образцов

Стенд для проведения электрофизических измерений имеет следующую приборную базу:

- характериограф Agilent B1500A
- анализатор цепей Agilent N5242 PNA-X
- осциллограф Keysight Infiniium DSO90604A
- генератор сигналов произвольной формы Agilent 81150A

3. Ход выполнения работы.

3.1. Краткая маршрутная карта всего тех. процесса.

№	Операция	Параметры	Оборудование
1	Очистка пластины от загрязнения	<ul style="list-style-type: none">• NMP, 150°C, 5 мин.• Ультразвук, 4 мин.• Серная кислота + перекись водорода(6:2), 120°C, 5 мин.• (Вода, перекись водорода, аммиак; 5:1:1), 85°C, 5 мин.	Хим. стол
2	Травление оксида полностью на вспомогательном образце (вспомогательный шаг)	Травление 350 нм оксида с подложки методом сухого травления "ICP_RIE_CHF3", 230 сек.	Corial 200I
3	Утонение оксида до необходимой толщины на	Травление до 100 нм-ой толщины оксида методом сухого травления "ICP_RIE_CHF3", 164 сек.	Corial 200I
4	Нанесение защитного металла	W, 100 нм	TORR MagSput
5	Нанесение резиста	<ul style="list-style-type: none">• Резист az1505, 4000 rpm, 1 мин.• 100°C, 1 мин.	Центрифуга; hotplate
6	Фотолитография #1	Окна для допирования, доза: 65 мДж/см ²	MLA100
7	Проявка #1	<ul style="list-style-type: none">• az726, 30 сек.• "Clean_O2", 30 сек.	Хим. стол; Corial 200I
8	Травление W	"ICP Tungsten", 70 сек.	Corial 200I
9	Травление SiO ₂	Плавиковая кислота(HF 5%), 2 мин.	Хим. стол
10	Удаление резиста	<ul style="list-style-type: none">• NMP, 135°C, 6 мин.• Ультразвук, 1 мин.	Хим. стол
11	Травление SiO ₂	Плавиковая кислота(HF 5%), 1 мин.	Хим. стол
12	Нанесение допанта	<ul style="list-style-type: none">• AS353, 3000 rpm, 15 сек.• 150°C, 15 мин.	Центрифуга; hotplate
13	Отжиг допанта	<ul style="list-style-type: none">• Образец 0135 – 500°, 1 час• Образец 0129 – без отжига	Реактор
14	Удаление допанта	<ul style="list-style-type: none">• Плавиковая кислота(HF 5%), 30 сек.• "Clean_O2", 30 сек.	Хим. стол; Corial 200I
15	Нанесение металла	Al, 300 нм	MEB 550S Plassys
16	Нанесение резиста	<ul style="list-style-type: none">• Резист az1505, 3000 rpm, 1 мин.• 100°C, 1 мин.	Центрифуга; hotplate
17	Фотолитография #2	Контактные площадки, доза: 60 мДж/см ²	MLA100
18	Проявка #2	<ul style="list-style-type: none">• az726, 30 сек.• "Clean_O2", 60 сек.	Хим. стол; Corial 200I
19	Травление Al	<ul style="list-style-type: none">• Кислоты(80% ортофосфорная, 5% азотная, 5% уксусная) + дист. вода(10%), 80 сек.• Горячая ванна, 40°C, 80 сек.	Хим. стол
20	Травление вольфрама	"ICP Tungsten", 70 сек.	Corial 200I
21	Удаление резиста	"Clean_O2", 6 мин.	Corial 200I

3.2. Промежуточные результаты шагов тех. процесса.

В данном разделе приведены промежуточные результаты и небольшие пояснения к некоторым шагам технологического процесса.

Шаг №2 был проделан для того, чтобы определить время, которое понадобится для утонения оксида кремния до толщины 100 нм(исходя из того, что исходная толщина оксида кремния равнялась примерно 350 нм).

После утонения оксида кремния(предположительно до 100 нм), был использован растровый электронный микроскоп, чтобы оценить получившуюся толщину(см. Рис. 1). Исходя из полученных картинок(см. Рис. 1), толщина оксида кремния оказалась равной желаемой толщине.

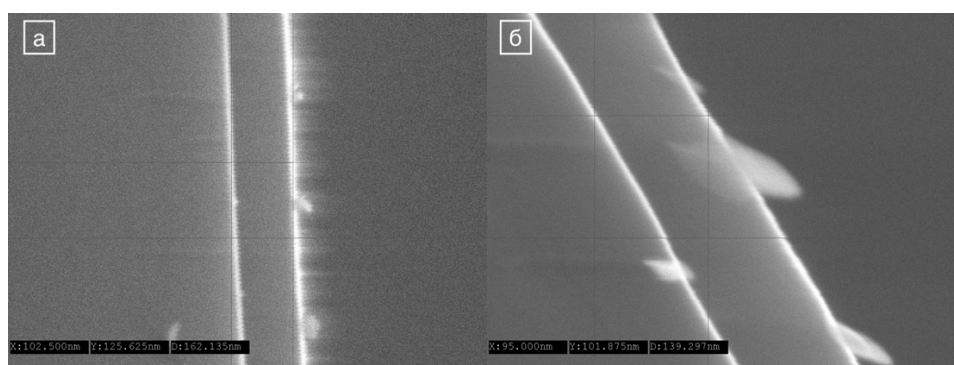


Рис. 1 Изображения, полученные с помощью РЭМ, используемые для оценки толщины оксида кремния.

В процессах фотолитографии использовался показанный на Рис.2 фотошаблон.

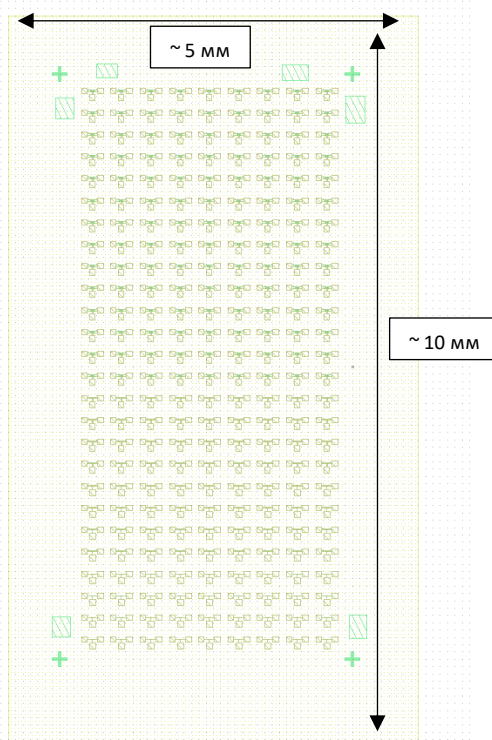


Рис. 2 Фотошаблон, используемый в процессах фотолитографии.

На фотошаблоне присутствуют 4 вида транзисторов, отличающиеся длиной(L) и шириной(W) канала(см. Рис.3(a)). На рисунке 3(б) приведен пример шаблона для транзистора с шириной канала равной 16 мкм и длиной канала равно 20 мкм.

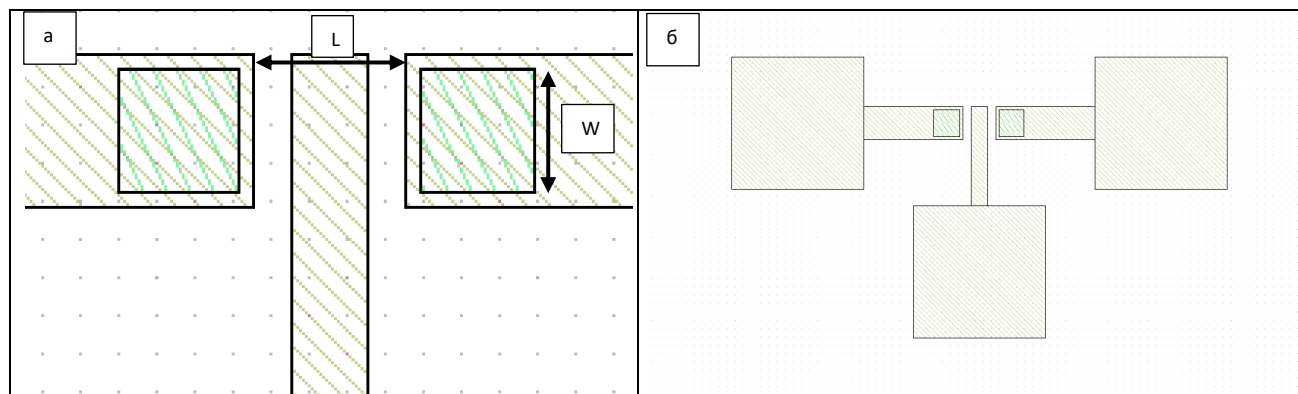


Рис. 3 а-увеличенное изображение шаблона, поясняющее определенные нами ширину (W) и длину (L) канала полевого транзистора; б-пример шаблона для транзистора W=16 мкм и L=20 мкм.

На фотошаблоне(см. Рис.2) присутствуют 4 вида транзисторов, а именно: **“большие”** – W=16 мкм, L=20 мкм; **“средние_1”** – W=11 мкм, L=15 мкм; **“средние_2”** – W=6 мкм, L=14 мкм; **“маленькие”** – W=4 мкм, L=10 мкм.

После травления W(шаг №8), перед тем как начать травление SiO₂ из окон допирования и удаление резиста, в оптическом микроскопе была рассмотрена нанесенная маска (см. Рис. 4).



Рис. 4 Изображения окон для допирования, выполненные в оптическом микроскопе (а – W=16 мкм; б – W=11 мкм; в – W=6 мкм; г – W=4 мкм).

Убедившись в неплохом качестве проявленных окон (см. Рис. 4), было произведено травление SiO₂ и удаление резиста.

После шагов №9 и №10 образцы были рассмотрены в растровом электронном микроскопе(JSM-7001F) для оценки качества полученных окон(см. Рис. 5).

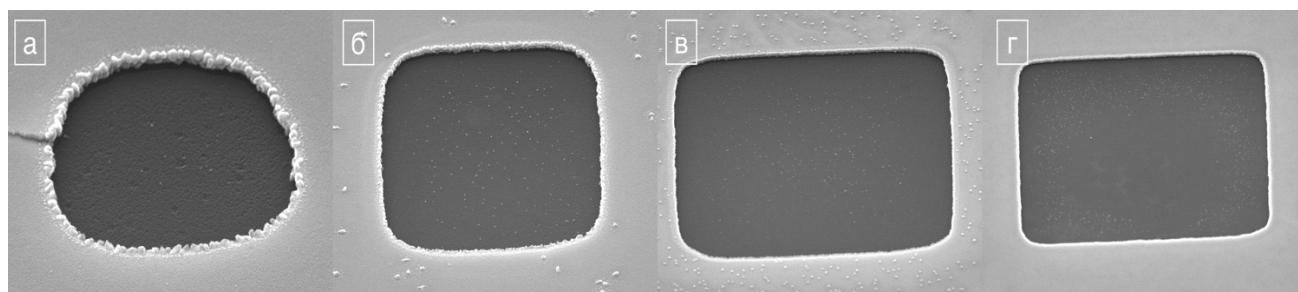


Рис. 5 Изображения окон для допирования, выполненные в РЭМ (г – W=16 мкм; в – W=11 мкм; б – W=6 мкм; а – W=4 мкм).

Усомнившись в качестве окон для допирования, а именно в том, что оксид кремния мог не до конца дотравиться, было решено сделать дополнительное травление оксида кремния в плавиковой кислоте в течении небольшого времени(шаг №11).

После выполнения всех шагов технологического процесса для визуальной оценки качества полученных структур были сделаны изображения с помощью оптического микроскопа (см. Рис. 5).

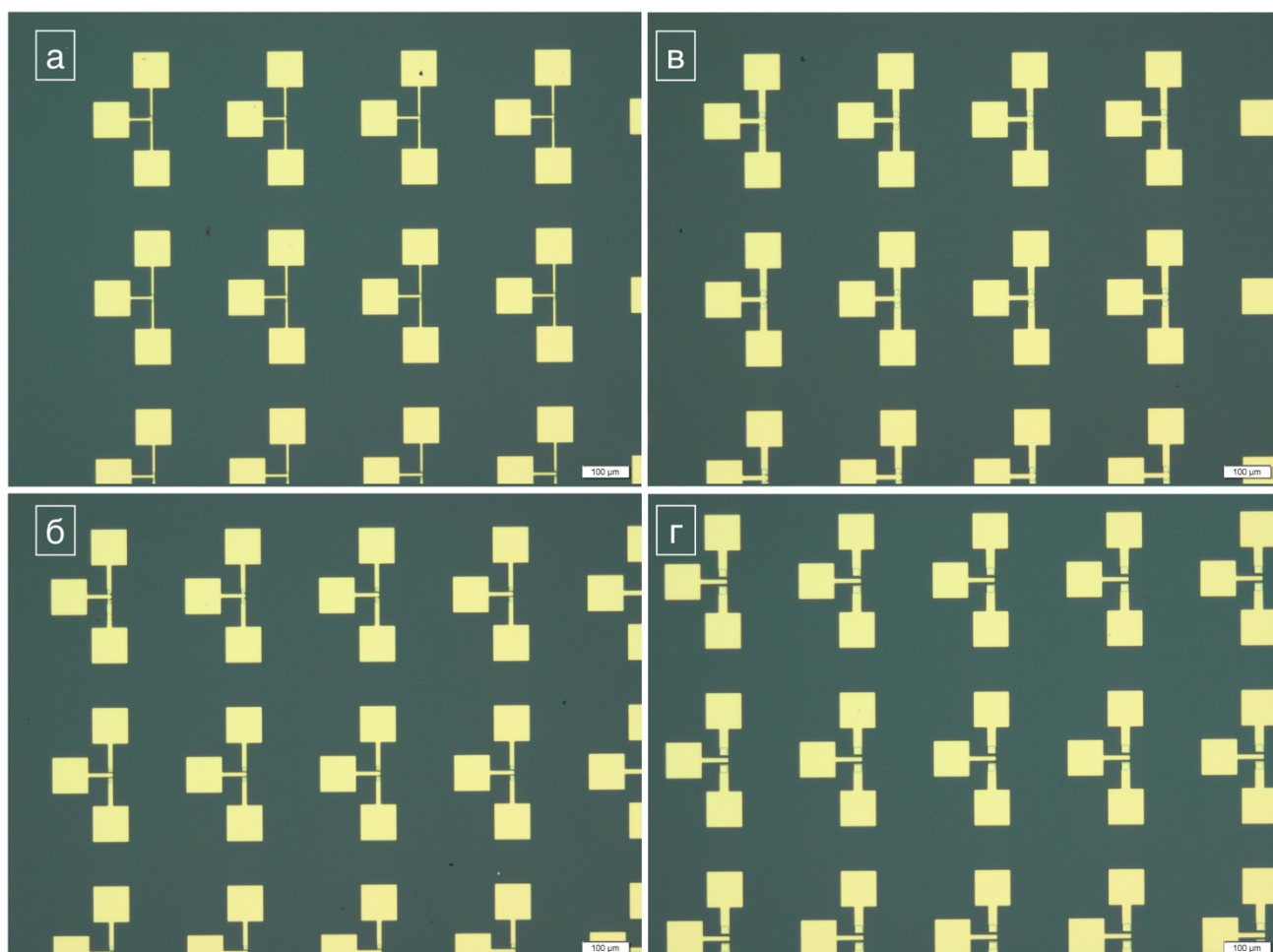


Рис. 6 Изображения итоговых структур, полученных с помощью оптического микроскопа (г – “большие”: $W=16$ мкм, $L=20$ мкм; в – “средние_2”: $W=11$ мкм, $L=15$ мкм; б – “средние_1”: $W=6$ мкм, $L=14$ мкм; а – “маленькие”: $W=4$ мкм, $L=10$ мкм).

По визуальным оценкам среди полученных структур для всех вариантов каналов нашлись как “удачные”, то есть без закороченных контактов, так и “неудачные” (например, см. Рис. 7).

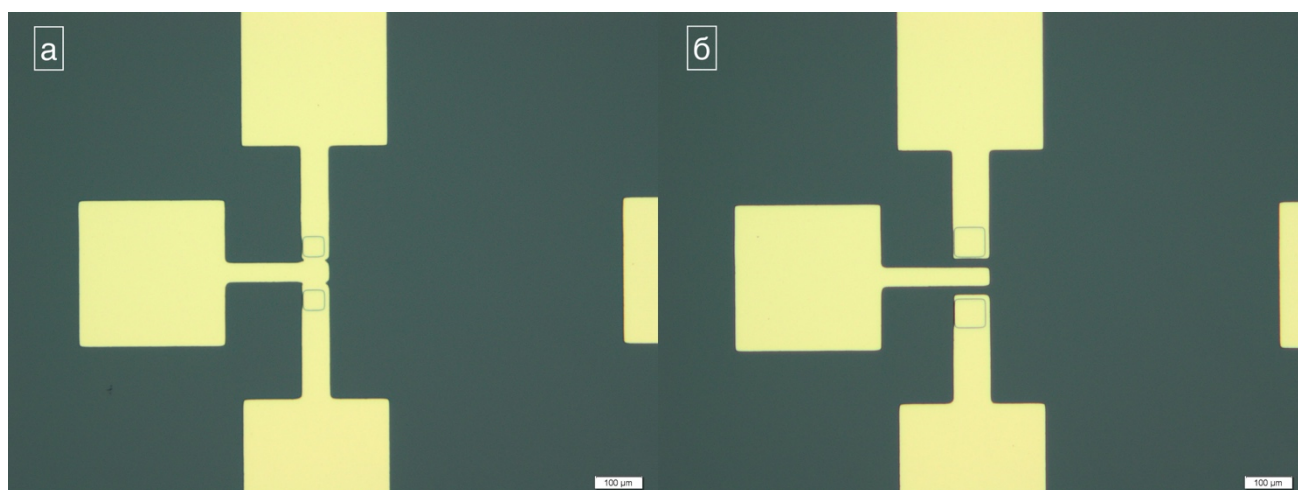


Рис. 7 Изображения итоговых структур, полученных с помощью оптического микроскопа (а – неудачно получившаяся, б – удачно получившаяся структура)

3.3. Электрофизические измерения готовых образцов.

Для проверки работоспособности получившихся структур была проделана серия экспериментов по измерению вольт-амперных характеристик (упрощенная схема измерений показана на Рис. 8) с помощью зондовой станции Cascade Microtech Summit 11000M, результатом которых являлись зависимости тока между истоком и стоком при меняющемся напряжении на затворе.

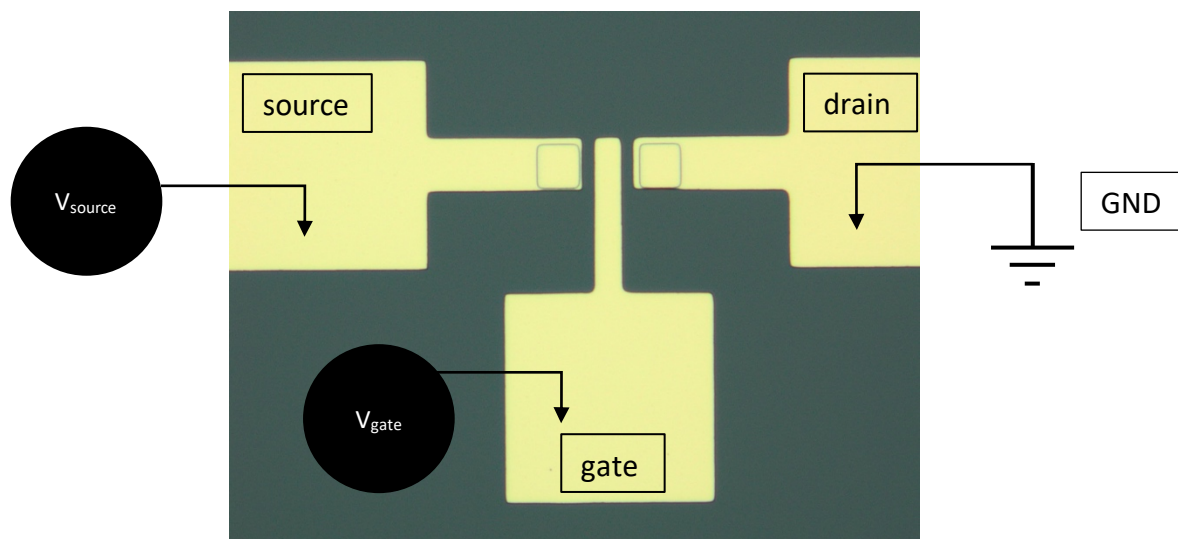


Рис. 8

Для образца, который отжигался при температуре 500°C – 0135:

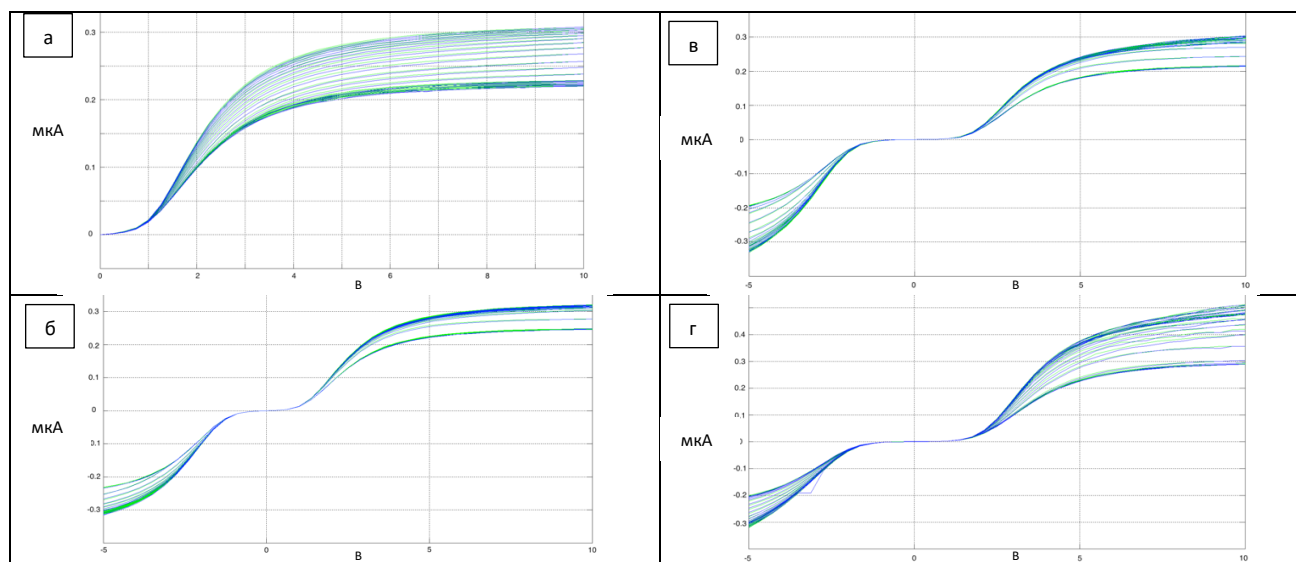


Рис. 9 Измеренные ВАХ для образца 0135, то есть зависимость тока между стоком и истоком(ось y) от напряжение между стоком и истоком(ось x) при меняющемся напряжении на затворе(от -10В до 40В для всех измерений)(а –“большие”: W=16 мкм, L=20 мкм; б – “средние_2”: W=11 мкм, L=15 мкм; и – “средние_1”: W=6 мкм, L=14 мкм; г – “маленькие”: W=4 мкм, L=10 мкм).

Для образца, который не подвергался дополнительному отжигу – 0129:

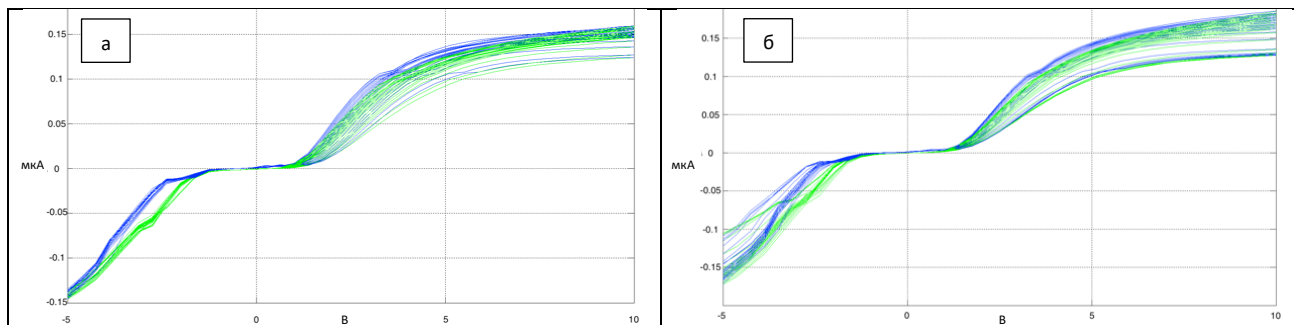


Рис. 10 Измеренные ВАХ для образца 0129, то есть зависимость тока между стоком и истоком(ось y) от напряжения между стоком и истоком(ось x) при меняющемся напряжении на затворе(от -10В до 40В для всех измерений)(а – “средние_2”: $W=11$ мкм, $L=15$ мкм; б – “маленькие”: $W=4$ мкм, $L=10$ мкм).

4. Выводы

- Были успешно проведены все шаги технологического процесса (процессы травления, напыления, литографии и т.д.) изготовления подложки с транзисторами.
- Получены два варианта транзисторов: 1-ый вариант с применением отжига spin-on диффузантов, 2-ой вариант без применения отжига.
- Для двух полученных вариантов полевых транзисторов были проведены электрофизические измерения, в результате которых была подтверждена работоспособность обоих вариантов транзисторов для всех вариантов изготовленных каналов.