



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ _____ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ _____

КАФЕДРА _____ ФИЗИКА (ФН-4) _____

ОТЧЕТ ПО УЧЕБНОЙ ПРАКТИКЕ

Студент _____ Амелькин Олег Олегович _____
фамилия, имя, отчество

Группа _____ ФН4-62 _____

Тип практики _____ учебная практика _____

Название предприятия _____ МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана _____

Студент _____ Амелькин О. О. _____
подпись, дата *фамилия, и.о.*

Руководитель практики _____ Полуэктов Н. П. _____
подпись, дата *фамилия, и.о.*

Оценка _____

2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Задание	3
2. Введение.....	3
2.1. Осаждение тонких пленок методом распыления	3
2.2. Магнетрон с полым катодом в лаборатории секции физики МФ МГТУ ...	8
2.3. МПК в режиме мощных импульсно-периодических токов (HiPIMS)	9
3. Сбор и обработка зондовых и спектральных измерений.....	12
3.1. Измерение ВАХ зонда Лэнгмюра	12
3.2. Обработка зондовых измерений.....	13
3.3. Измерение спектров излучения.....	16
4. Выводы.....	20
5. Литература	21

1. Задание

Задание для практики: Ознакомиться с назначением и устройством магнетрона с полым катодом, работающего в режиме мощных импульсных токов. Ознакомление с зондовыми и спектральными методами диагностики и систем измерения импульсного разряда.

Практика проводилась в лаборатории секции физики Мытищинского филиала МГТУ им. Баумана.

Проведены исследования магнетронного разряда с полым катодом, питание которого осуществляется источником мощных импульсов тока. Источник питания и система измерений параметров плазмы импульсного разряда разработаны сотрудниками секции физики. С помощью зондовых и спектральных измерений изучены динамика импульсного разряда. Предложен механизм образования и развития разряда.

Ключевые слова: магнетрон с полым катодом, плазма, импульсный разряд, зондовые и спектральные измерения.

2. Введение

2.1. Осаждение тонких пленок методом распыления

Среди различных способов получения тонких (толщиной микро- и нанометры) пленок наиболее широко применяется осаждение пленок в плазме низкого давления методом распыления. В данном методе в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла, которые осаждаются на подложке. В электронной промышленности наиболее широко используется магнетронный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях [1–4] (Рис.1).

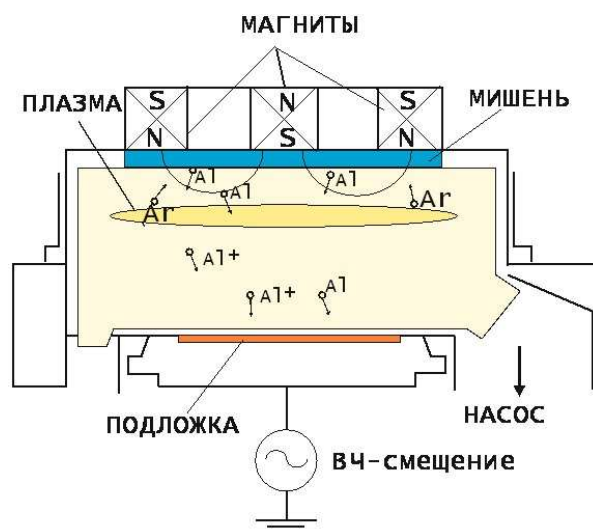


Рис.1. Схема установки магнетронного разряда.

Плазма в аргоне загорается между анодом и катодом, который изготовлен из распыляемого металла. На катод подается отрицательное напряжение 400–800 В. Электроны захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по траекториям вблизи поверхности мишени. Область плазмы с высокой концентрацией (более 10^{11} см⁻³) в виде тора малого объема толщиной порядка 1 см,

а вне его – концентрация уменьшается до 10^9 – 10^{10} см⁻³.

Тонкие пленки, осажденные с помощью магнетрона применяются для создания упрочняющих и антикоррозионных покрытий, оптических покрытий зеркал, а также при создании микроэлектронных устройств.

Рассмотрим более подробно метод создания металлических соединений в изделиях микроэлектроники [5, 6]. Современный процессор содержит 100–500 млн. транзисторов, находящихся на кремниевой подложке. Для электрических соединений используется концепция «вертикальной интеграции» (создание СБИС с многослойной топологией). За рубежом уже освоены промышленностью многослойные (10–15 слоев) интегральные микросхемы с минимальными поперечными размерами элементов 20–30 нм.

В этой технологии в межслойном диэлектрике сначала методом травления создаются канавки (трэнчи) и сквозные отверстия контактных окон (Рис. 2). Для упрощения на рисунке показаны только четыре слоя.

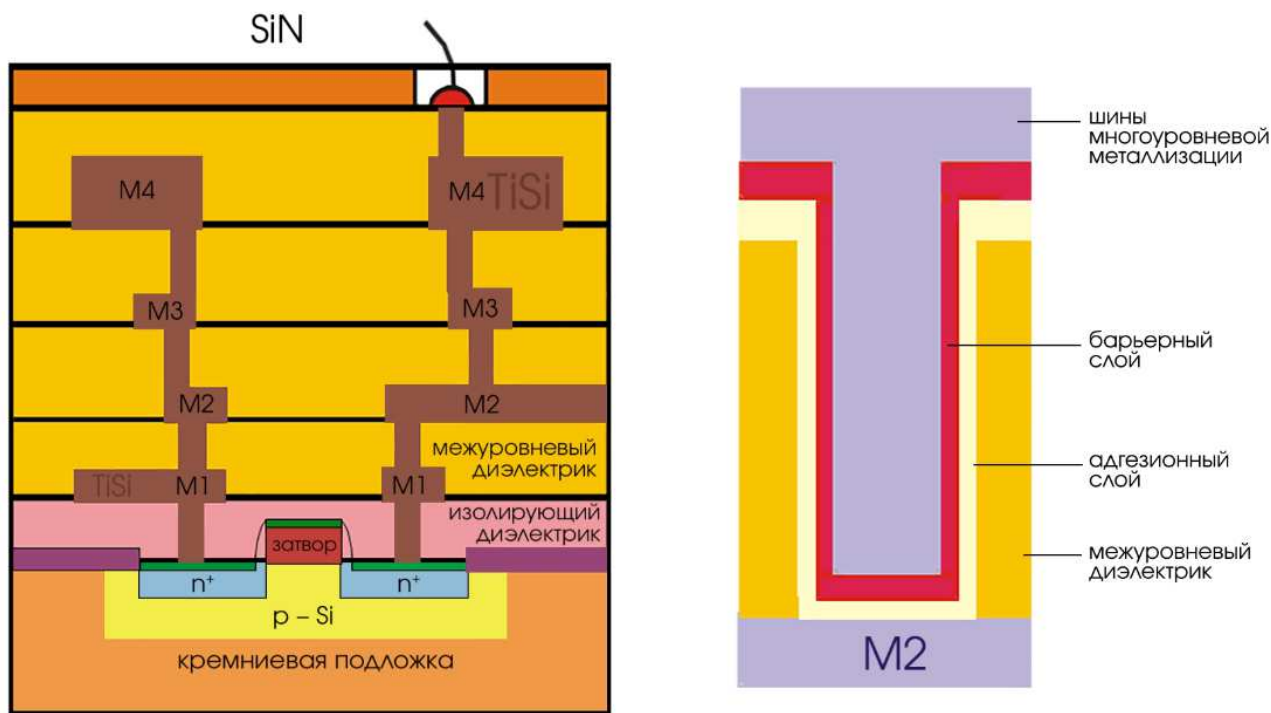


Рис. 2. Поперечное сечение интегральной микросхемы с 4-мя уровнями металлизации в области расположения МДП-транзистора.

Обеспечение соединения транзисторов осуществляется осаждением металла в таких канавках и контактных окнах с аспектным отношением (высота/ширина отверстия) 4–7. При создании металлических соединений внутри окна сначала наносится контактирующий, адгезионный слой (как правило, пленки титана или тантала толщиной 10–30 нм), который обеспечивает электрический контакт и адгезию между металлическими шинами разных уровней, а также адгезию многослойной структуры к материалу межуровневого диэлектрика. Поверх него осаждается барьерный слой (пленки нитрида титана или тантала толщиной <50 нм) для предотвращения диффузии металла с межуровневым диэлектриком. Далее производится заполнение окна металлом (для верхних слоев используются алюминий и медь).

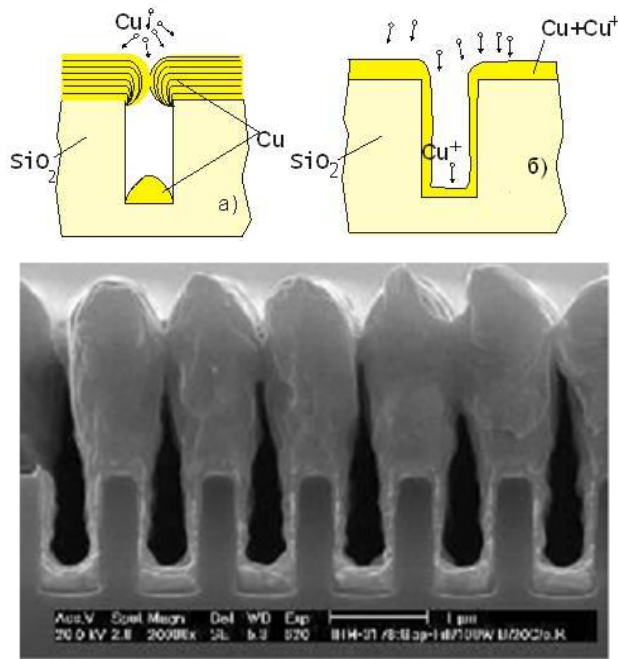


Рис. 3. Металлизация тренчей нейтральными атомами меди в магнетронном разряде с дисковой мишенью.

газа происходит выбивание атомов металла. Поток распыленного металла состоит почти на 100% из атомов, их угловое распределение близко к косинусному (по отношению к нормали). Изотропное распределение частиц приводит к тому, что на верхней части субмикронной структуры образуется навес, а внутри – полость (рис. 3). Чтобы провести анизотропную металлизацию узкого отверстия, необходим поток частиц, приходящий на поверхность подложки вдоль нормали.

Одним из возможных способов решения данной проблемы является ионизация распыляемого металла. Позитивный эффект состоит в том, что на ионы можно воздействовать электрическим полем слоя объемного заряда перед подложкой. Для увеличения вероятности ионизации распыленных атомов мишени необходимо создавать плазму высокой концентрации (более 10^{11} см^{-3}) во всем объеме между мишенью и подложкой (15-20 см).

Для достижения анизотропной металлизации необходимо, чтобы поток ионов металла $\Gamma_{M^+} = (n_{M^+})v_{M^+}$ превышал поток нейтральных атомов металла $\Gamma_M =$

При уменьшении технологических размеров тренчей и контактных/переходных окон менее 0,5 мкм с аспектным отношением более 2 использование для металлизации хорошо отработанного электронной промышленностью магнетронного разряда встречает принципиальные трудности. Для металлизации СБИС широко используется ионный (физический) метод распыления, когда в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного

$(n_M)v_M$, где n и v – концентрация и скорость соответственно. Для количественной оценки вводится параметр степень ионизации потока металла, приходящего на подложку: $\beta = \Gamma_{M+} / (\Gamma_{M+} + \Gamma_M)$. Так как ионы металла приходят на подложку с боровской скоростью, поток ионов равен [7]:

$$\Gamma_{M+} = 0,61(n_{M+}) \cdot (kT_e / M_i)^{1/2}, \quad (1)$$

где n_{M+} – концентрация ионов металла, k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов, M_i – масса иона.

Поток атомов с температурой T_g определяется по формуле $\Gamma_M = 0,25(n_M) \cdot (8kT_g / \pi M)^{1/2}$. Отметим, что эта формула справедлива только в случае, если в результате столкновений атомов металла с атомами инертного газа устанавливается максвелловское распределение по скоростям. Так как $T_e = 2 - 5$ эВ много больше, чем $T_g = 0,05 - 0,1$ эВ, степень ионизации потока металла больше, чем степень ионизации металла: $\alpha = n_{M+} / (n_{M+} + n_M)$. Например, если $\alpha = 0,3$, то $\beta = 0,7 - 0,8$. Это означает, что даже при относительно низкой степени ионизации, поток ионов на подложку вносит основной вклад в процесс осаждения пленки металла.

Длина пути ионизации определяется по формуле [7]:

$$\lambda_i = v_M / \langle \sigma_i v_e \rangle n_e, \quad (2)$$

где v_M – скорость распыленных атомов металла и $\langle \sigma_i v_e \rangle = \int_{E_i}^{\infty} v \sigma_i f(E) dE$,

σ_i – сечение и E_i – энергия ионизации атома металла. Для изучения процесса ионизации атомов металла необходимо измерить следующие величины: концентрацию n_e и функции распределения электронов по энергиям $f(E)$, скорость и температуру атомов металла на разных расстояниях от мишени. Эти измерения достаточно сложны, требуют использования автоматизированных систем диагностики и трудоемки.

Начиная с 80-х годов появились так называемые источники высокоплотной плазмы. Эти источники создают существенно неравновесную

плазму с концентрацией более 10^{11} см⁻³ в объеме нескольких литров. Используют различные виды разрядов с плазмой высокой плотности: совмещение магнетронного разряда с индуктивным для дополнительной ионизации металла [8–12], сверхвысокочастотный разряд в условиях электронно-циклотронного резонанса (СВЧ-ЭЦР) [12–16], магнетрон с полым катодом [17–19] и другие. Так как плазма в этих разрядах создается в большом объеме, на пути от мишени к подложке (10–20 см) атомы металла могут ионизоваться. Для повышения степени ионизации распыленных атомов металла разряд в установках с совмещенным магнетронным и индуктивным разрядами производится при давлении 30–50 мТорр. При таких давлениях возрастает время нахождения атомов металла в области разряда, и как следствие, вероятность ионизации. Однако довольно большое давление увеличивает количество рассеиваемых атомов и существенно снижает скорость осаждения пленки. По расчетам на подложку, находящуюся на расстоянии 15 см от мишени, приходит только не более 1% распыленных с мишени атомов. Поэтому проводятся исследования по достижению высокой степени ионизации атомов металла при давлениях порядка 1–10 мТорр.

2.2. Магнетрон с полым катодом в лаборатории секции физики МФ МГТУ

В лаборатории секции физики МФ МГТУ создан источник высокоплотной плазмы – на основе магнетрона с полым катодом (МПК). МПК является новым типом источника плазмы, предназначенным для осаждения пленок с использованием атомов и ионов мишени методом распыления. Отличительной особенностью магнетронного разряда с полым катодом является возможность конформного осаждения пленок на рельефных субмикронных структурах с большим отношением высоты (глубины) к ширине. Такое анизотропное осаждение достигается ионизацией распыленных атомов металла на пути их движения от мишени к подложке, так как потоком ионов можно управлять с помощью электрического поля вблизи подложки. Большая

степень ионизации распыленных атомов мишени достигается за счет высокой концентрации плазмы (до 10^{12} см⁻³ при давлении 1–20 мТорр), создаваемой в объеме несколько литров, низкой (10–50 эВ) и легко изменяемой энергия ионов, приходящих на подложку. МПК применяется для создания адгезионных, диффузионных и затравочных слоев в канавках (трэнчах) и межслойных отверстиях субмикронных структур интегральных схем, а также в кремниевых структурах микроэлектромеханических систем.

2.3. МПК в режиме мощных импульсно-периодических токов (HiPIMS)

Чтобы еще больше увеличить степень ионизации распыленных атомов, стационарный источник питания магнетрона заменяется на импульсно-периодический, работающий в режиме мощных импульсов (максимум тока 100–1000 А) длительность разряда 10–300 мкс, период разряда 100–300 Гц). Вследствие малой скважности средняя мощность за период не превышает 1-2 кВт). Плотность ионного тока на мишень превышает 1 А/см², что на порядок больше, чем в стационарных магнетронах.

В зарубежной литературе этот тип разряда называется HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) [21–23]. Дело в том, что мишень магнетрона, работающего в стационарном режиме с большой мощностью, испытывает большие тепловые нагрузки, что приводит к срыву тлеющего разряда (дугообразованию). В HiPIMS-разряде вблизи катода концентрация плазмы достигает величины 10^{13} см⁻³, что позволяет электронам ионизовать распыленные атомы мишени на малом расстоянии (несколько см). Часть ионов металла возвращается на мишень и участвует в самораспылении, соответственно на подложку поток ионов металла уменьшается, что снижает скорость осаждения пленки.

Физические, химические и электрические свойства пленок, полученных при осаждении ионов мишени (ионное стимулирование), лучше, чем у пленок, получаемых при осаждении только атомов металла.

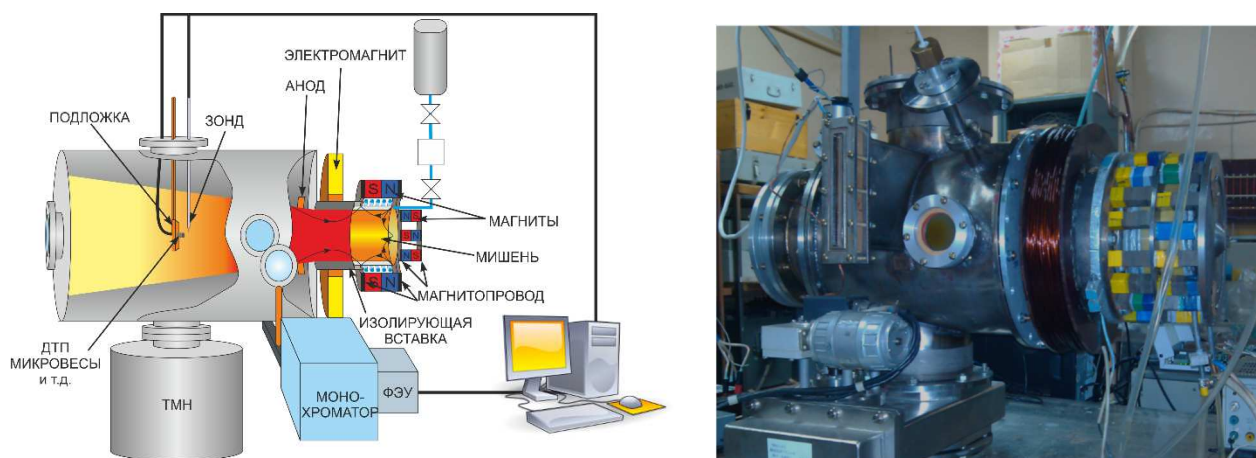


Рис. 4. Схема и фото установки магнетронного разряда с полым катодом

Схема установки показана на рис. 4. Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр 14 см, длина 10 см), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из различных металлов. Напряжение импульсного источника разряда – до 900 В, максимальный ток 150 А. Магнитное поле создается 18-ю столбиками магнитов из сплава Fe-Nd-B, расположенных вокруг катода, концы столбиков соединены кольцевыми железными магнитопроводами. Вблизи выходного сечения магнетрона установлен электромагнит, поле которого направлено навстречу магнитному полю постоянных магнитов. Магнитная пробка, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода.

Внутри магнетрона (область $Z < 0$) индукция магнитного поля на оси 380 Гс, около боковой поверхности 420 Гс. На выходе из магнетрона вблизи оси имеется область с магнитным полем близком к нулю. Через эту область плазма вытекает из магнетрона. Далее замагниченные электроны движутся вдоль расходящегося магнитного поля электромагнита, тянут за собой ионы, таким образом, концентрация плазмы становится более однородной по радиусу.

Скрещенные $E \times B$ поля вызывают дрейф электронов в азимутальном направлении, в результате внутри полого катода создается плазма высокой концентрации (более 10^{12} см^{-3}). Те электроны и ионы, которые имеют начальную аксиальную скорость, способны покинуть полый катод и распространяться к подложке. Для данного катода диаметр центрального ядра потока составляет порядка 5 см на расстоянии 20 см от выходного сечения магнетрона. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от среза и установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов.

Из источника плазма поступает в технологическую камеру диаметром 30 см и длиной 45 см. Н стержне закреплен диск, на котором установлены шесть образцов подложек (размером 2×2 см) для исследования осаждения пленок. Подложки фиксируются на расстоянии 14–20 см от мишени. Перед подложками имеется прямоугольная вращающаяся диафрагма, которая открывает только одну подложку. Таким образом можно исследовать осаждение пленки на различных параметрах разряда, не разгерметизируя камеру.

Анодом источника плазмы является медное кольцо, расположенное в технологической камере, изолированное от нее. На кольцо можно подавать положительный потенциал 20–30 В.

Камера откачивается до давления 10^{-5} Торр с помощью турбомолекулярного насоса (ТМН), аргон подается через электронный регулятор расхода. Рабочее давление 1–20 мТорр. Подложка устанавливается на расстоянии 14–20 см от мишени. Разряд зажигается системой предионизации (2 кВ, 5–10 мА), а затем включается импульсный источник. Система предионизации обеспечивает повторяемость разряда.

Система диагностики включает зондовую и спектральную характеристики. С помощью зондов Лэнгмюра можно определять концентрацию плазмы, температуру электронов, плазменный и плавающий потенциалы в различные

моменты времени импульсного разряда. Тепловые зонды измеряют энергетические потоки плазмы на подложку, в результате которых устанавливается температура подложки. Спектральная диагностика позволяет измерять динамику различных спектральных линий.

Все данные выводятся на компьютер с помощью системы сбора и обработки информации. Для регистрации применяются двухлучевые цифровые осциллограф Bordo 421 (150 МГц) и 423 (200 МГц) и плата National Instruments.

3. Сбор и обработка зондовых и спектральных измерений

3.1. Измерение ВАХ зонда Лэнгмюра

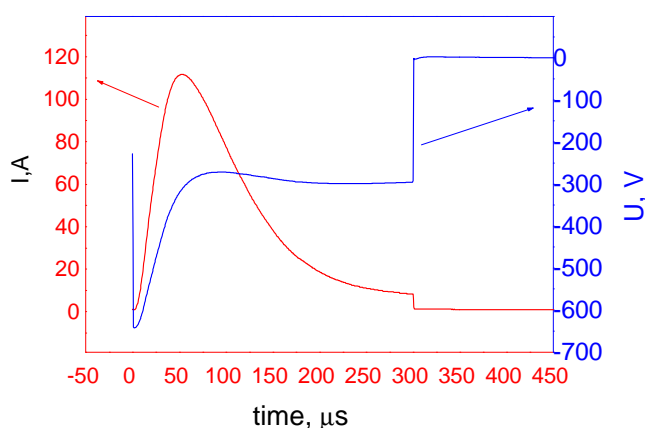


Рис. 5. Ток и напряжение HiPIMS разряда

ВАХ разряда, полученной на 175 мкс разряда. Зонд находится на расстоянии 19 см от мишени. Напряжение зонда меняется от -80 до +35 В. Для уменьшения шумов, полученная кривая усредняется в течении пяти импульсов. Полученные результаты измерений ВАХ зонда обрабатывается программой, скриншот которой показан на рисунке 7.

На рис. 9 показаны характерные осциллограммы тока и напряжения разряда. Видно, что после выключения импульса тока ($t = 300$ мкс) плазма рекомбинирует в течение сотен микросекунд.

Программа измерения ВАХ разряда.

На рисунке 6 показан скриншот программы измерения

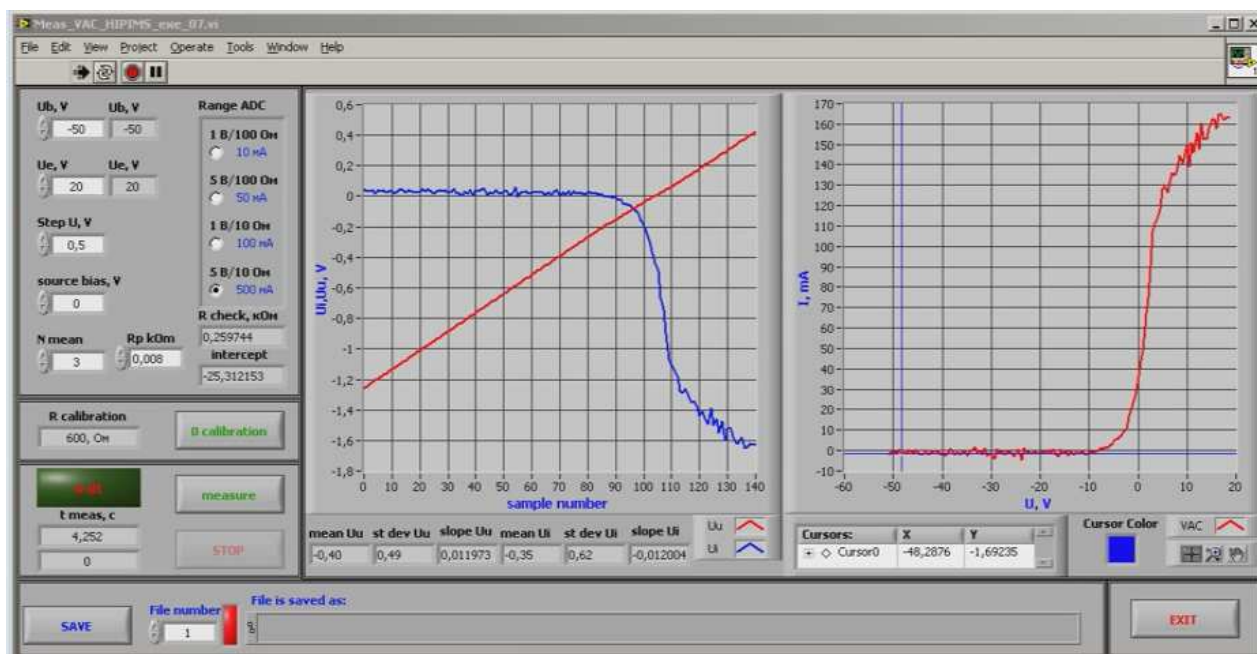


Рис. 6. Скриншот программы снятия зондовых измерений

3.2. Обработка зондовых измерений

Обработка результатов будет проводиться в среде LabVIEW. Программа обработки была разработана доцентом Юрием Петровичем Царьгородцевым.

Сначала проводится сглаживание полученных данных ВАХ зонда (в программе присутствует два метода сглаживания: сплайнами или Савицкого-Голая), для взятия первой и второй производной, при помощи которых мы сможем найти: потенциал плазмы, распределения электронов по энергии и функции вероятности распределении электронов по энергии. Температура электронов определяется тремя способами: по наклону первой производной зондового тока, по наклону электронной ветви и по интегрировании функции распределения электронов по энергиям.

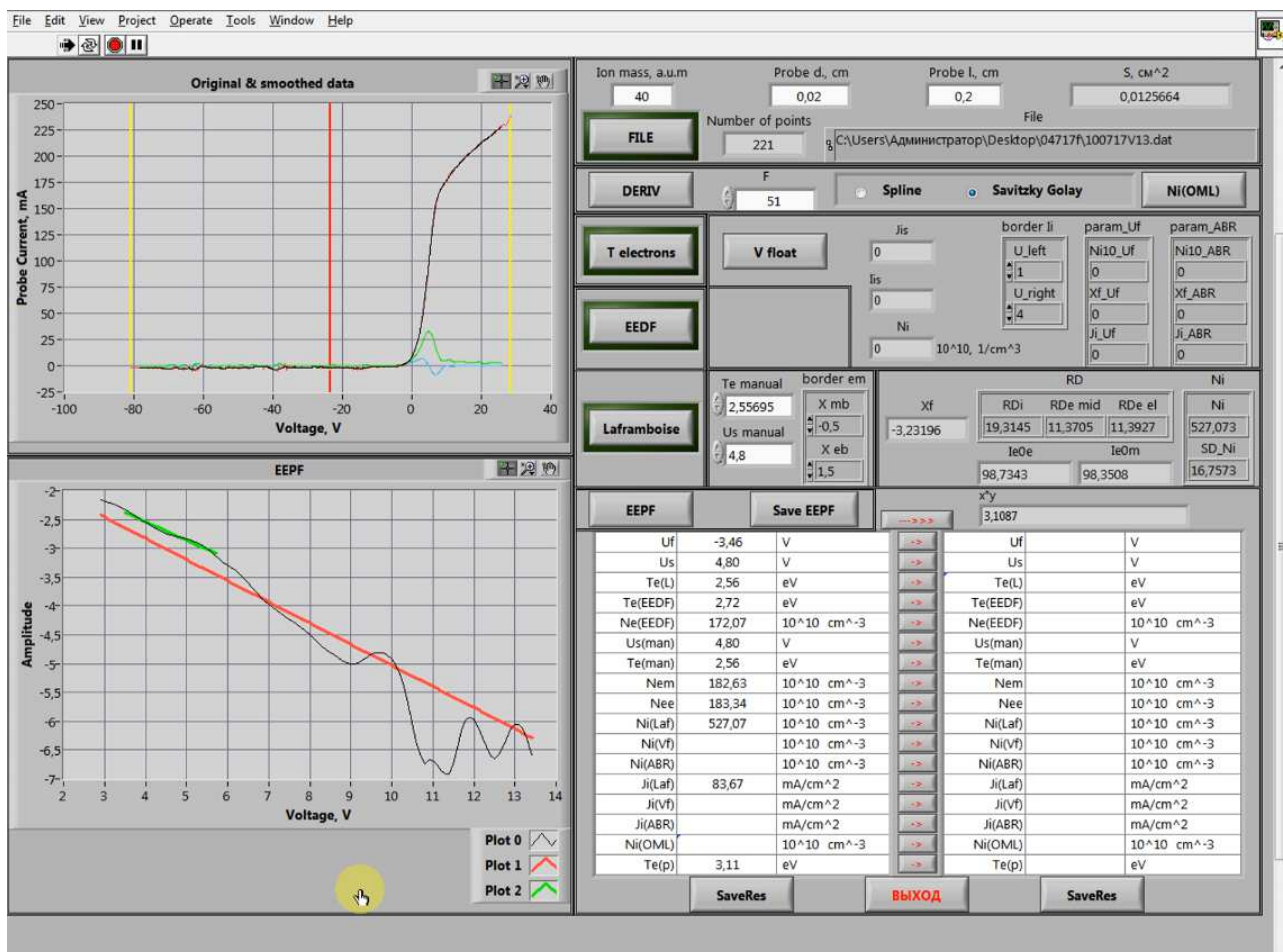


Рис. 7. Программа обработки зондовых измерений

Температура электронов $T_e = 2$ эВ и концентрация электронов ($n_e = 1,7 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, что на 2 порядка больше, чем в обычном магнетроне) измеряются тремя способами. Результаты получаются очень схожими.

Программа позволяет сравнить максвелловскую функцию распределения электронов по энергиям с функцией распределения Дрювестейна и с нашими экспериментальными данными.

На рисунке 8 показана зависимость концентрации электронов в зависимости от времени разряда на расстоянии 19 см от мишени на оси разряда. Там же приведены осциллограммы тока и напряжения

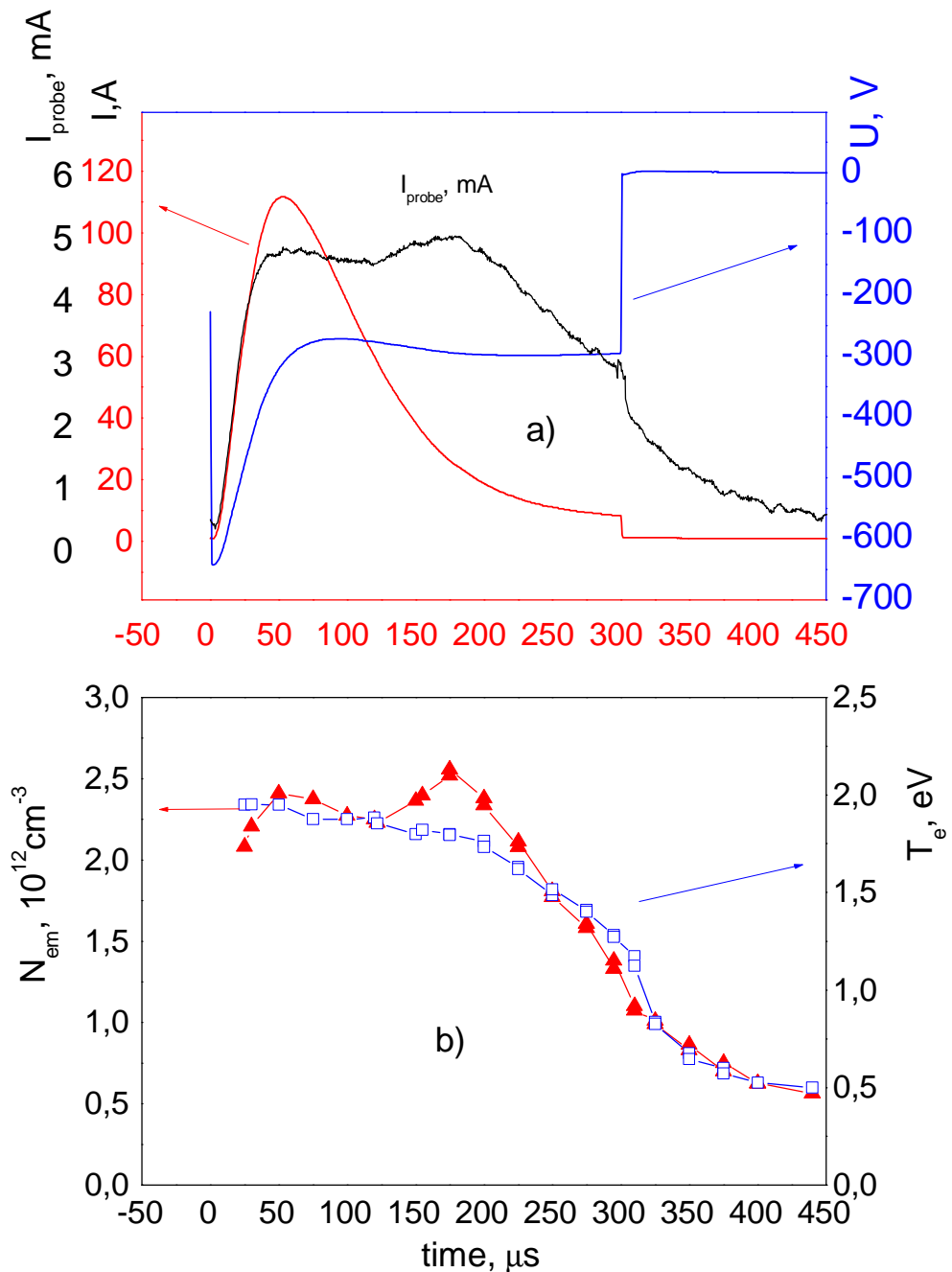


Рис. 8. а) Ток, напряжение разряда, ионный ток зонда; б) концентрация и температура электронов в течение импульсного разряда. 19 см от магнетрона.

На рисунке 8 показан ток (красная) и напряжение (синяя) разряда, длительностью 300 мкс. Там же приведен ионный ток насыщения зонда, установленного на оси разряда. Он имеет двугорбую структуру. Первый максимум достигается в момент максимума разрядного тока (70 мкс). Второй максимум – 200 мкс.

Можно предположить, что первый максимум ионного тока связан с ионами аргона, находящимися вне катода мишени, т.к. пробой происходит без задержки. А второй максимум связан с ионами аргона и меди, которые выходят из катода. На рисунке 8(б) показана динамика концентрации плазмы и температуры электронов. Динамика концентрация плазмы хорошо соответствует динамике ионного тока зонда.

3.3. Измерение спектров излучения

На рисунке 9 показан скриншот программы снятия спектров излучения. На нем представлен участок спектра от 450 до 530 нм. Этот спектр снят из бокового окна, находящегося на расстоянии 19 см от катода, с помощью монохроматора МДР12 с обратной дисперсией 1,5 нм/мм. Окно и линзы кварцевые, что позволяет измерять спектр от 200 до 1000 нм. В качестве



Рис. 9. Скриншот программы снятия спектральных измерений

приемники излучения используется ФЭУ-100 (фотоэлектронный умножитель), установленный за выходной щелью монохроматора. Программа позволяет устанавливать параметры сглаживания получаемых данных измерений. Полученные данные обрабатываются программой, которая позволяет точнее определять длину волны полученных линий.

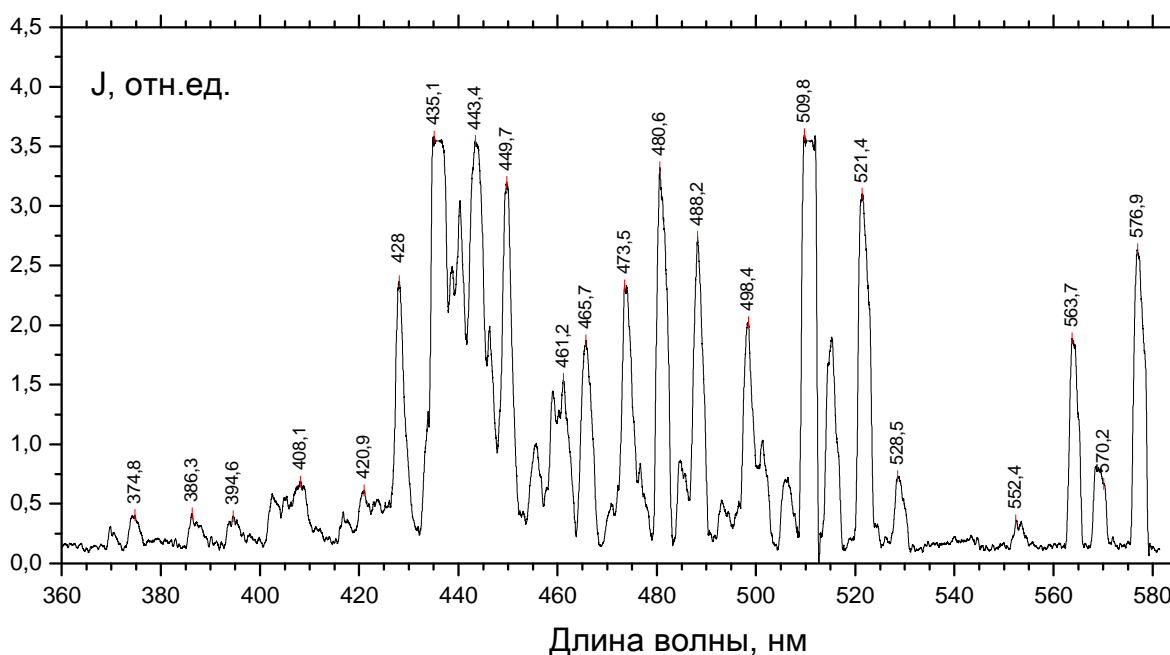


Рис. 10. Данные после обработки

В результате получается спектр, показанный на рисунке 10. Линии 420 и 427 нм – линии нейтрального аргона. От 499-580 нм – распыленные атомы меди. Линии 473,5, 480,6, 488,2 нм – линии ионов аргона.

Настраиваем решетку монохроматора на отдельную линию и сигнал с ФЭУ заводим через усилитель на осциллограф. Прописываем как изменяется интенсивность излучения различных линий в течении импульсного разряда.

На рисунке 11 верхний луч показывает ток, а нижний – интенсивность излучения иона аргона 480,6. Она имеет двугорбую структуру, похожую на сигнал ионного тока зонда.



Рис. 11. Осциллограмма излучения линии $\text{Ag}^+480,6$ в течение разряда

На рис. 12 показано как изменяется в течение импульсного разряда интенсивность излучения спектральных линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии $Z = 19$ см от магнетрона. Из динамики линии длиной 333,8 нм видно, что излучение нейтральных атомов меди медленно нарастает и достигает максимума к концу разряда (до $t = 300$ мкс), скорость этих атомов мала по сравнению со скоростями ионов. Излучение резонансных линий атомов меди (как линия 324,7 нм) отличается от предыдущих. Спад резонансных линий в конце разряда, возможно, связан с самопоглощением в результате увеличения концентрации этих линий в это время (у линии 324,7 нм). Динамика метастабильных (долгоживущих) линий меди (на рисунке приведена динамика метастабильной линии 510,6 нм) также отличается. Она определяется не только столкновениями с электронами, но и столкновениями с тяжелыми частицами.

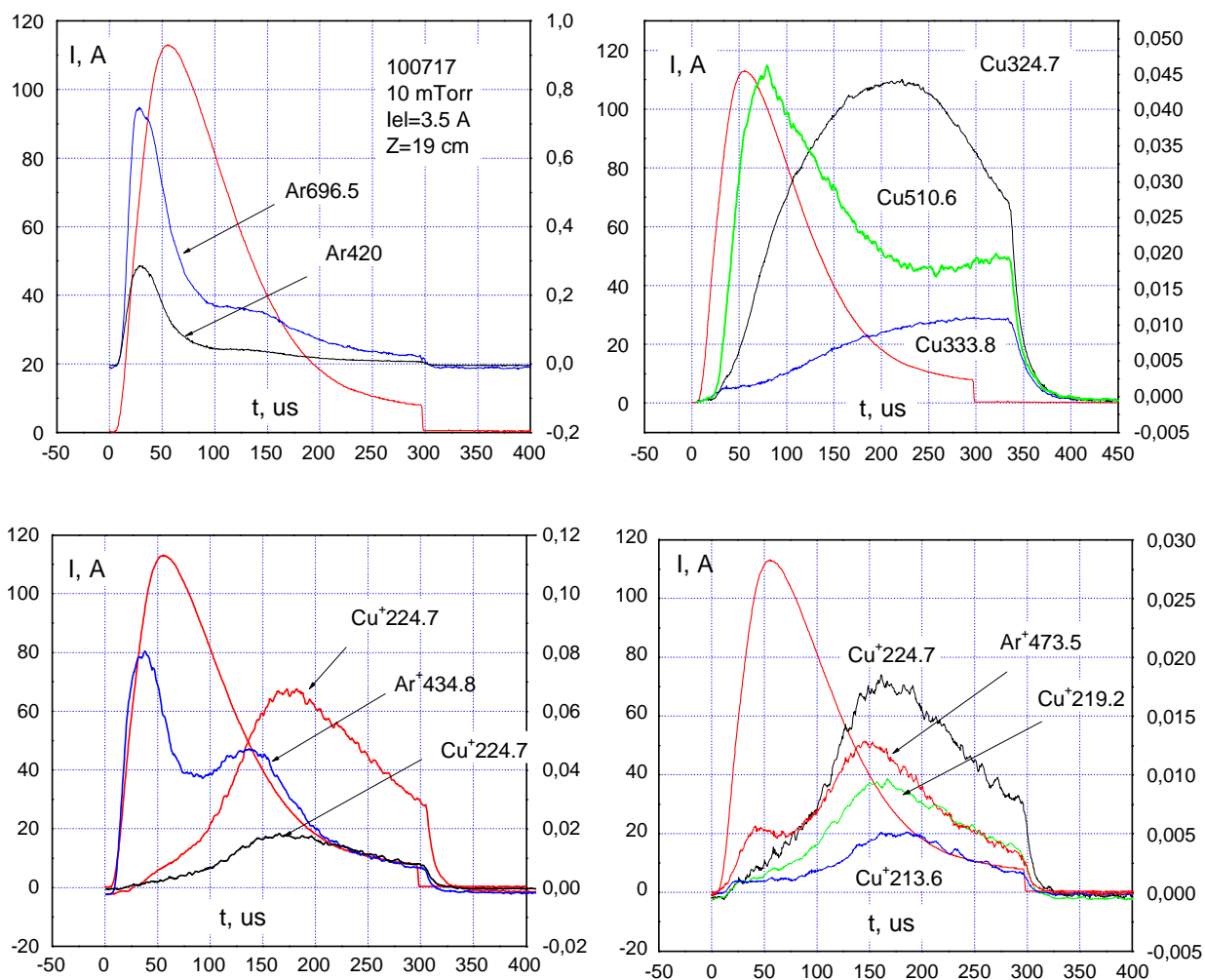


Рис. 12. Динамика излучения линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии $Z = 19$ см от среза мишени, давления $P = 10$ мТор, токе электромагнита $I_{эл} = 3,5$ А.

Как показано, излучение ионов аргона (см. линии 473,5, 434,8 нм) имеет двугорбый характер (имеет два максимума излучения). Максимум линии ионов меди сдвинут к большим временам по отношению к ионам аргона. Это связано с тем, что распыление мишени происходит ионами аргона, после чего атомы меди покидают мишень.

Динамика атомов и ионов буферного газа (аргона) и атомов и ионов мишени (меди) имеет сложный характер и требует дальнейших исследований.

4. Выводы

Мы ознакомились с устройством и принципом работы плазменной установки по осаждению пленок, работающей в режиме мощных импульсно-периодических разрядов. Установка включает систему вакуумирования, систему подачи газа и систему измерения низкого давления, электрическая система включает в себя: систему генерирования импульсов с определённой задержкой, систему предионизации, основного генератора высокомоощных импульсов. Кроме того, мы ознакомились с системой зондовых и спектральных измерений и получили соответствующие данные. Мы освоили и использовали программы обработки зондовых и спектральных измерений для определения параметров плазмы. Ознакомились с назначением, применением и особенностями данной установки, преимуществами импульсного разряда для осаждения пленок в плазменном разряде, подготовили видеоотчет.

5. Литература

1. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М. : Энергоиздат, 1989.
2. Nafa T., Ohsabo K., Hada T. Characteristics of compressed magnetic field magnetron sputtering using magnetic targets // *Electronic and Commun. In Japan*. – 1986. – V. 69. – № 8. – pp. 103–112.
3. Лабутов В. А. Данилович Н. И. Современные магнетронные распылительные устройства // *Зарубежная электронная техника*. – 1982. Вып. 10. – С. 3–62.
4. Rossnagel S. M. Directional and preferential sputtering-based physical vapor deposition // *Thin Solid Films*. – 1995. – V. 263. – pp. 1–12.
5. Плазменная технология в производстве СБИС : пер. с англ. ; ред. Айспрук Н, Браун Д. – М. : Мир, 1987.
6. Hopwood J. Qian F. Mechanism for highly ionized magnetron sputtering // *J. Appl. Phys.* – 1995. – V. 78. – № 2. – pp. 758–765.
7. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, Wiley New York, 1994
8. Keller J. H. Inductive plasmas for plasma processing // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 1996. – V. 5. – pp. 166–172.
9. Hershkowitz N. Role of Plasma-Aided Manufacturing in Semiconductor Fabrication // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1998. – V. 26. – № 6. – pp. 1610 – 162.
10. Rossnagel S. M. Directional and ionized physical vapor deposition for microelectronics application // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1998. – B16 (5). – Sep / Oct. – pp. 2585–2608.
11. Collison W. Z., Ni T. Q., Barnes M. S. Studies of the low-pressure inductively-coupled plasma for a larger area wafer – 1998. – V. 16. – № 1. – pp. 100–107.
12. Nickols C. A., Rossnagel S. M., Hamaguchi S. Ionized physical vapor deposition of Cu for high aspect ratio damascene trench fill applications // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1996. – V. 14B. – № 5. – pp. 3270–3275.
13. Полуэктов Н. П., Царьгородцев Ю. П. Экспериментальная технологическая установка с СВЧ-ЭЦР плазмой // *ПТЭ*. – 1996. – № 4. – С. 150–155.
14. Полуэктов Н. П., Царьгородцев Ю. П., Усатов И. Г. Влияние геометрии магнитного поля на параметры СВЧ-ЭЦР плазмы // *Физика плазмы*. – 1999. – т. 25. – № 10. – С. 981–987.
15. Полуэктов Н. П., Харченко В. Н., Усатов И. Г. Ионизация распыленных атомов металла в СВЧ-ЭЦР источнике плазмы // *Физика плазмы*. – 2001. – т. 27. – № 7. – С. 664–672.
16. Poluektov N. P., Kharchenko, Kamyschov I. A. Thermalization of sputtered aluminium atoms in an electron-cyclotron resonance plasma source // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2003. – V. 3. – pp. 449–453.

17. E.Klawuhn, G.C.D' Couto, K.A.Ashtiani et al., Ionized physical-vapor deposition using a hollow-cathode magnetron source for advanced metallization, *J. Vac. Sci. Technol. A*18 (2000) 1546-1549.
18. L. Meng, R. Raju, R. Flauta, H. Shin, D. N. Ruzic, In situ plasma diagnostics study of a commercial high-power hollow cathode magnetron deposition tool, *J.Vac.Sci.Technol. A*28 (2010) 112 -118.
19. L. Wu, E. Ko, A. Dulkan, K. J. Park, S. Fields, K. Leeser, L. Meng, D. N. Ruzic, Flux and energy analysis of species in hollow cathode magnetron ionized physical vapor deposition of copper, *Rev. Sci. Instrum.* 81 (2010) 123502.
20. J. Alami, J. T. Gudmundsson, J. Bohlmark, J. Birch, U. Helmersson. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005, V.14, pp. 525–531.
21. A. Anders. A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) *Surface & Coatings Technology*
22. D. Lundin, M. Čada, and Z.Hubička. Ionization of sputtered Ti, Al, and C coupled with plasma characterization in HiPIMS, *Plasma Sources Sci. Technol.* 24 (2015) 035018 (11pp)
23. L. Meng, H. Yu, M. M. Szott, Jake T. McLain, D. N. Ruzic. Downstream plasma transport and metal ionization in a high-powered pulsed-plasma magnetron, *J. Appl. Phys.* 115, 223301 (2014)