

УДК 621.79.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ТРАВЛЕНИЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА С АНОДНЫМ СЛОЕМ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ КРУГЛОЙ ФОРМЫ

Дмитрий Александрович Голованов, Денис Дмитриевич Васильев, Юлия Сергеевна Макарова,

Студенты 3 курса

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев,

кандидат технических наук., доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Для выполнения операций: ионное травление, очистка поверхности и ее активация, ионная имплантация, посредственное использование ионов для распыления материала, наносимого на подложку - в микро и нанoeлектронике используют ионные источники. Ионные источники представляют собой систему, состоящую из катода, анода магнитной системы, экстрактора ионов и фокусирующей системы. По типу электронной эмиссии различают источники с горячим катодом, холодным и полым. По способу получения газового разряда – с радиочастотным излучением, с поперечным пучку магнитным полем, с продольным пучку магнитным полем. Существуют источники с сеткой, позволяющей получать пучок с заданным углом расхождения.

Необходимо уделять большое внимание равномерности ионной обработки изделий микро- и нанoeлектроники, что особенно актуально при использовании подложек больших размеров. Для обеспечения минимальной неравномерности обработки заготовки в промышленных условиях используются протяженные линейные источники ионов [1,2]. Однако использование подобных источников в лабораторных условиях на этапе отработки технологии является нецелесообразным по причине больших габаритов, сложности эксплуатации и высокой стоимости. Лабораторные установки, как правило, снабжены источниками ионов меньших размеров, поэтому отработка промышленной технологии может представлять некоторые трудности, связанные с равномерностью ионной обработки, что требует осуществления вращения подложки для повышения равномерности обработки.

Экспериментальный метод подбора закона вращения подложки и измерение неравномерности обработки требует огромных временных и денежных затрат. Отсюда вытекает потребность в создании компьютерных моделей процессов травления [3].

В процессе поиска литературных данных по моделированию процесса ионного травления было найдено немало работ по данной теме [3, 4, 5, 6]. Основными принципами моделирования в них являлись метод модели струны и Монте-Карло, суть которых заключается в разных подходах описания изменения геометрии травящейся поверхности.

Моделирование травления по одному из вышеуказанных методов в лабораторных условиях является сложной задачей и удобнее описать данную модель математически. Математическая модель содержит коэффициенты, зависящие от параметров источника, которые определяются экспериментально. Поэтому данная работа посвящена проведению экспериментов для вычисления эмпирических коэффициентов в формуле профиля ионного тока и профиле травления.

Математическое описание профиля ионного тока и профиля травления

Математическое описание профиля ионного тока проводилось для кольцевого источника ионов с холодным катодом. Принималось допущение, что во всей области кольца наблюдается равномерный поток ионов и заряженные частицы не влияют на траекторию полета друг друга.

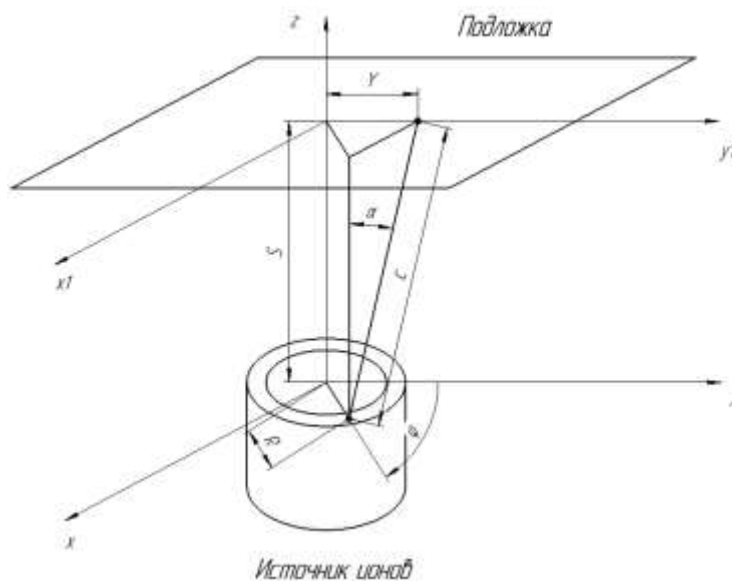


Рисунок 1. Расчетная схема процесса травления

Расчетная схема ионного травления представлена на рисунке 1. Кольцо источника ионов рассматривается как множество точечных источников ионов. В идеальном случае поток ионов параллелен, но в реальности наблюдается отклонение ионов. Для моделирования взято предположение, что отклонение ионов по углу от нормали к поверхности источника ионов подчиняется нормальному закону распределения. В формуле (2), описывающей нормальный закон распределения, используется коэффициент σ (среднеквадратическое отклонение), который определяет ширину телесного угла, в котором находится большинство вылетающих ионов. Область вылета ионов из кольца источника ионов проецируется на плоскость подложки через телесный угол в область обратно пропорционально квадрату расстояния и прямо пропорционально косинусу угла между нормалью плоскости подложки и прямой потока ионов. Для нахождения значения ионного тока в точке на подложке используется интеграл по поверхности кольца источника ионов. Так как источник кольцевой, удобнее проводить расчет в цилиндрических координатах. По причине описания профиля ионного тока, максимальное значение которого из-за нормирования будет равно единице, постоянные коэффициенты в формуле опущены. В результате формула имеет вид:

$$j(Y) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{P(\alpha(R, \varphi, Y)) \cdot \cos(\theta)}{c(R, \varphi, Y)^2} \cdot R d\varphi dR, \quad (1)$$

где: Y – радиус точки на подложке, в которой измеряется ионный ток;

R – радиус зоны эрозии, изменяется от R_1 до R_2 ;

φ – угол интегрирования в цилиндрических координатах;

α – угол вылета ионов из точечного источника;

θ – угол падения иона;

c – расстояние от единичного источника до рассматриваемой точки на подложке;

j – ионный ток;

P – функция нормального распределения отклонения ионов от нормали поверхности источника ионов.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma U} \cdot \exp\left(\frac{-\alpha^2}{2(\sigma U)^2}\right) \quad (2)$$

При расчете формулой (1) ионного тока конкретной системы неизвестным является коэффициент σ в функции нормального распределения отклонения ионов по углу. Данный коэффициент σ подбирается экспериментально в зависимости параметров процесса травления источником ионов.

Профиль травления связан с профилем ионного тока через коэффициент распыления. Умножение на значение коэффициента распыления, зависящего от угла падения иона (рис. 2), формулы внутри интеграла позволяет рассчитать профиль травления подложки.

В связи с тем, что угол, на который отклоняются ионы, не велик, то профиль ионного тока и профиль травления будут не сильно различаться друг от друга.

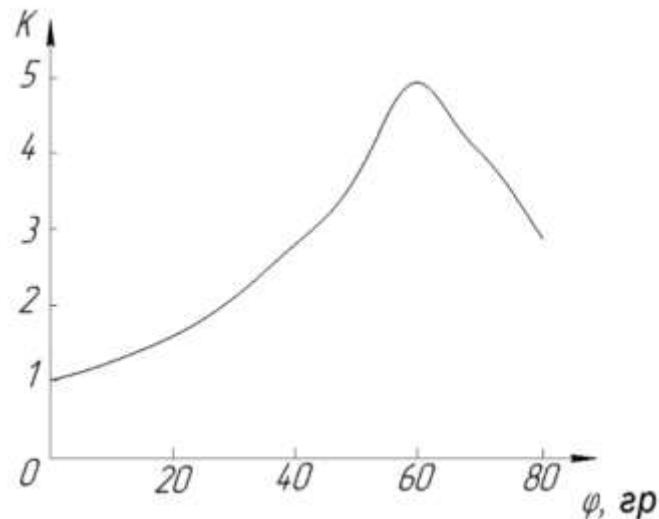


Рисунок 2. Табличная зависимость коэффициента распыления от угла падения заряженной частицы: K – коэффициент распыления, φ – угол падения ионов

Описание экспериментальной установки

Работа проводилась в лаборатории кафедры «Электронное машиностроение» на установке МВТУ-11-1 [7]. Преимуществом данной установки является радиальное расположение источников в камере, обеспечивающее их использование в едином вакуумном цикле. Схема установки представлена на рисунке 3.

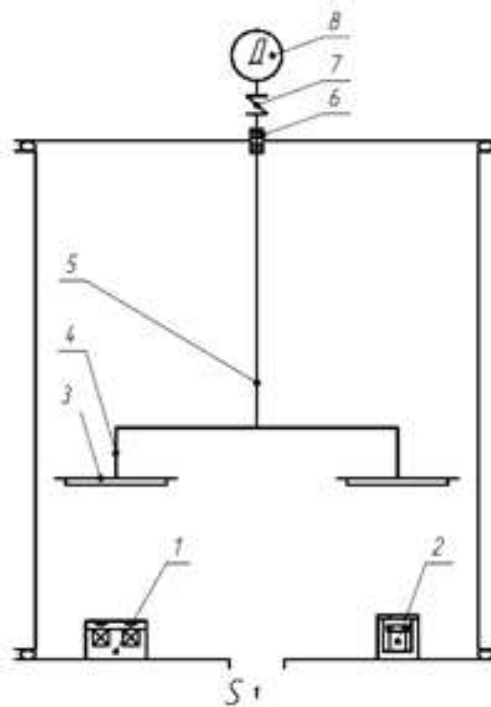


Рисунок 3. Схема вакуумной установки МВТУ-11-1

- 1 – магнетрон; 2 – источник ионов;
3 – подложкодержатель; 4 – вал-держатель; 5 – вал;
6 – ввод вращения; 7 – муфта; 8 – двигатель

Использовался источник ионов с холодным катодом с анодным слоем (рис.4), характеристики которого представлены в таблице 1.

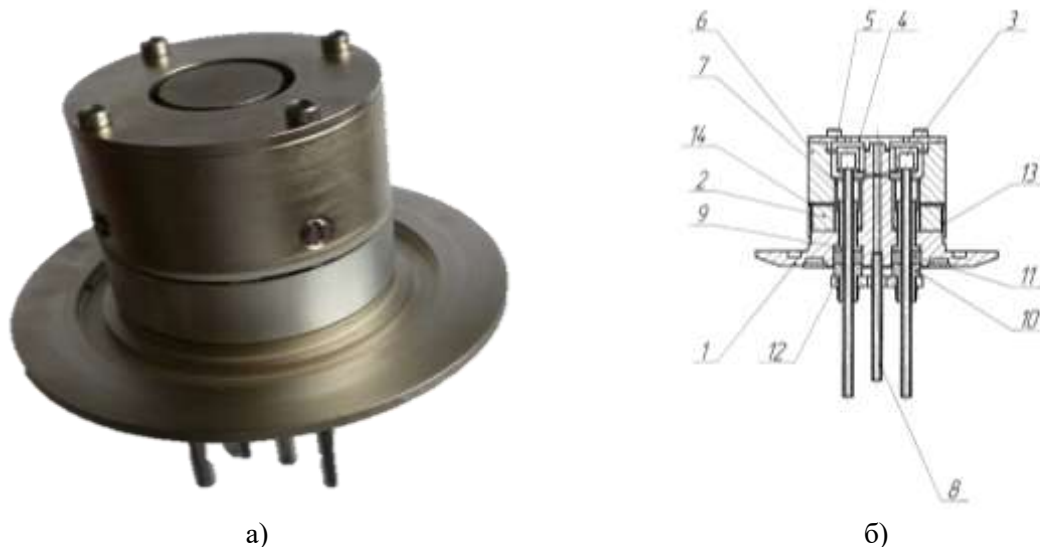


Рисунок 4. Изображение (а) и схема (б) источника ионов с холодным катодом с анодным слоем ИК-023: 1 – водоохлаждаемый корпус; 2 – магнитная система; 3 – водоохлаждаемый анод; 4, 5 – катодные пластины; 6 – боковой магнитопровод; 7 – внутренний вкладыш; 8 – штуцер; 9-внутренний изолятор; 10 – наружный изолятор; 11-резиновое кольцо; 12 – прижимная планка; 13 – обечайка; 14 – полиамидная прокладка

Таблица 1. Основные технические данные и характеристики источника ионов

Параметр	Значение
Напряжение разряда	0 – 3000 В
Ионный ток	3 – 60 мА
Рабочее давление	$(1,8...2,6) \cdot 10^{-2}$ Па
Энергия ионов	0,5 – 0,8 кэВ
Время непрерывной работы	2 ч
Масса	1,3 кг

В камере над источником ионов располагался зонд, фиксирующий ток от ионов, попадающих на его чувствительную часть диаметром 1,2 мм. Измерение тока проводилось пикоамперметром Keithley 6485 (рис.5).



Рисунок 5. Пикоамперметр Keithley модель 6485

Зонд перемещался над источником ионов по средствам шагового двигателя FL42STH. Величина полного шага составляет 1.8° . Управление шаговым двигателем осуществлялось контроллером SMSD-1.5.

Замер экспериментально полученного профиля травления меди, нанесенной на керамику, проводился сканирующим зондовым микроскопом Solver Next.

Проведение эксперимента по измерению ионного тока

Проведены эксперименты с варьированием ускоряющего напряжения, подаваемого на ионный источник, и высотой расположения зонда над источником (табл. 2). Рабочее давление составляло $1,3 \cdot 10^{-3}$ мбар при потоке аргона 0,3 л/ч.

Таблица 2. Параметры экспериментов

№ эксперимента	Ускоряющее напряжение U, кВ	Ионный ток I, мА	Высота расположения зонда над источником h, мм							
1	1.75	9	90							
2	2	12	90							
3	2.25	15	4	2	12	45	5	2	12	5
4	2	12	45							
5	2	12	5							

На основании полученных в результате экспериментов данных были построены следующие профили ионного тока (рис.6, рис.7).

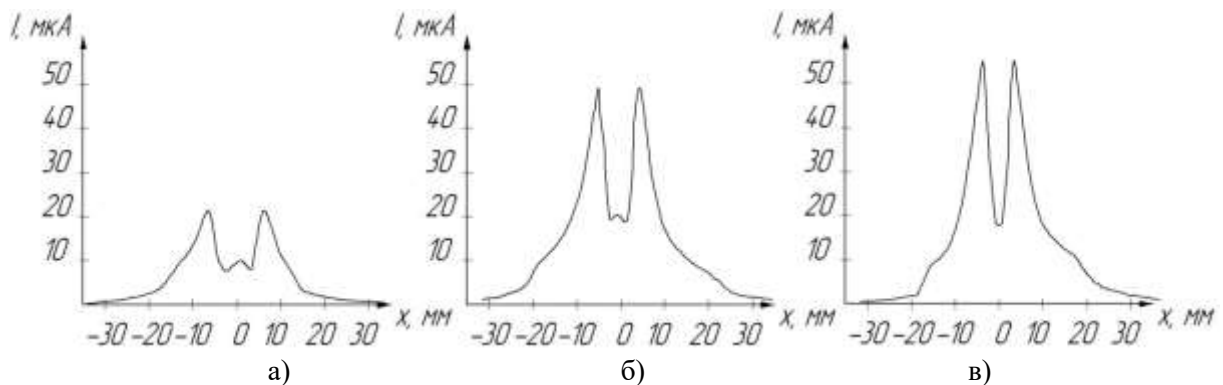


Рисунок 6. Эксперименты с варьированием напряжения, h=90мм а) U=1,75 кВ б) U=2 кВ в) U=2,25 кВ

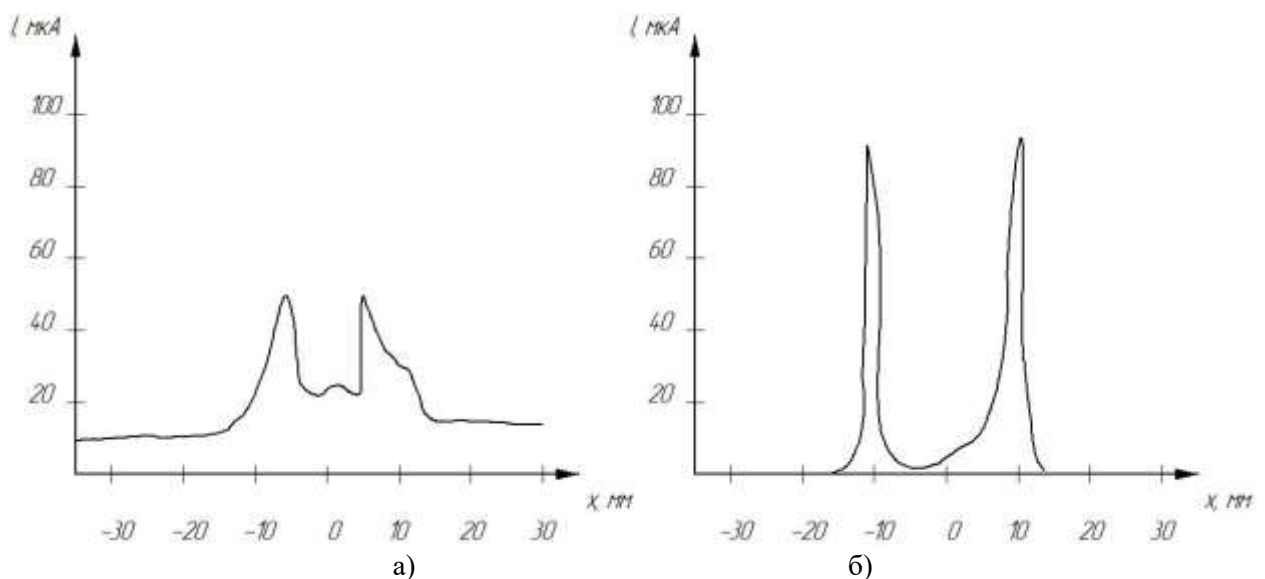


Рисунок 7. Эксперименты с варьированием высоты расположения зонда над источником при ускоряющем напряжении 2кВ а) на высоте 45 мм б) на высоте 5 мм

При проведении экспериментов принимались следующие допущения: движение зонда по дуге окружности принимались равным движению по прямой. Показания ионного тока в точке усреднялись на пикоамперметре. При построении графиков, где это необходимо, усреднялись показания по обе стороны от оси симметрии.

Обработка результатов

Коэффициент отклонения от потенциала высчитывался с использованием среды MathCad. Для этого строился график распределения ионного тока по теоретической формуле, при этом коэффициент отклонения задавался произвольно. Методом интерполирования строился график, полученный в ходе эксперимента. Оба графика нормировались, причем график, полученный по экспериментальной зависимости, дополнительно сжимался (растягивался) по оси x так, чтобы пики обоих графиков оказались на одинаковом отдалении от оси симметрии. Далее методом наименьших квадратов производилось сравнение графиков (рис.8) и подбирался такой коэффициент отклонения, при котором различие между ними было минимальным. Результаты представлены в таблице 3.

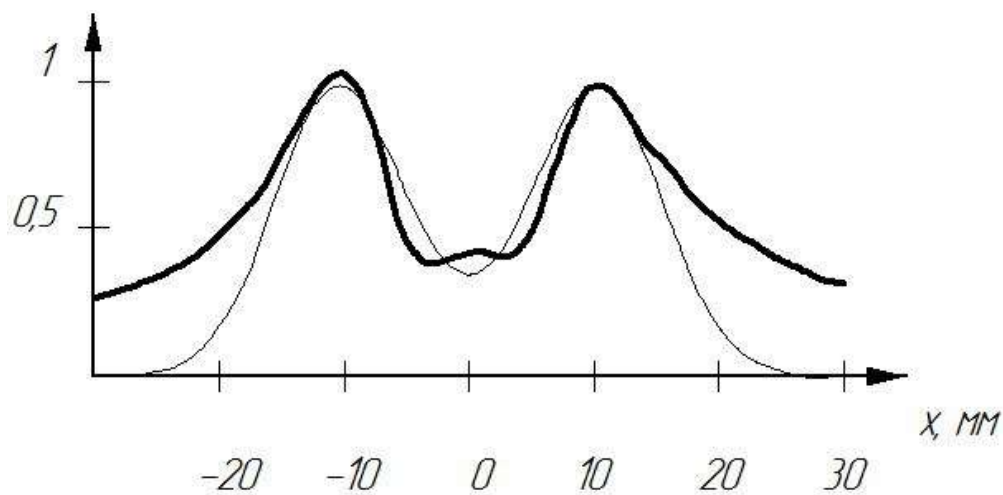


Рисунок 8. Экспериментальный (жирная линия) и смоделированный (тонкая линия) профили ионного тока

Таблица 3. Результаты определения коэффициента смещения

№ опыта	Ускоряющее напряжение U , кВ	Высота расположения зонда над источником h , мм	Значение коэффициента смещения σ
1	2,25	90	0,053
2	1,75	90	0,053
3	2	90	0,053
4	2	45	0,095
5	2	5	0,22

Интерполированием, в среде MathCad был построен график зависимости значения коэффициента смещения от высоты расположения образца над источником ионов (рис.9).

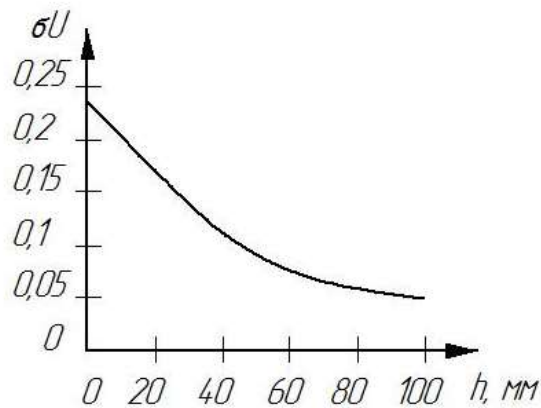


Рисунок 9. График зависимости коэффициента смещения от высоты над ионным источником

Из полученных в ходе экспериментов графиков видно, что в точке, расположенной над центром источника имеется пик, который невозможно получить, строя графики на основе теоретической формулы. Это можно объяснить тем, что теоретическая формула расчета не идеальна и представляет собой лишь приблизительное описание распределения ионов. Анализ графиков показал также зависимость сужения пиков к оси симметрии при увеличении ускоряющего напряжения. Причем столь сильное сужение не отражалось на графиках, построенных на основе теории, что внесло дополнительную погрешность в процессе нормирования экспериментально полученного графика. Из графика профиля тока на высоте 5 мм видно, что пики расположены на расстоянии 20 мм друг от друга, а геометрическое отверстие в источнике ионов имеет канавку шириной 2 мм с центральной окружностью диаметра 23 мм.

Проведение эксперимента по измерению профиля травления

Для проверки полученной модели, был проведен эксперимент по травлению меди, измерению полученного профиля на микроскопе и сравнению его с профилем полученным моделированием.

Медь наносилась методом магнетронного испарения на подложки из керамики (рис. 10). При этом край подложки закрывался от нанесения, для сохранения исходной необрабатываемой зоны. Медь наносилась 20 минут, мощностью источника - 80 Вт (ВЧ).



Рисунок 10. Керамическая подложка с нанесенной на нее медью

Подложка при травлении располагалась на расстоянии 100 мм над источником ионов, ускоряющее напряжение составляло 2 кВ. Поочередно были протравлены 2 зоны на подложки. Одна травилась 15 минут, другая – 30. В результате на подложке можно было наблюдать 4 зоны (рис. 11). Зона более темного цвета была получена в результате окисления из-за попадания материала при тренировке магнетрона.

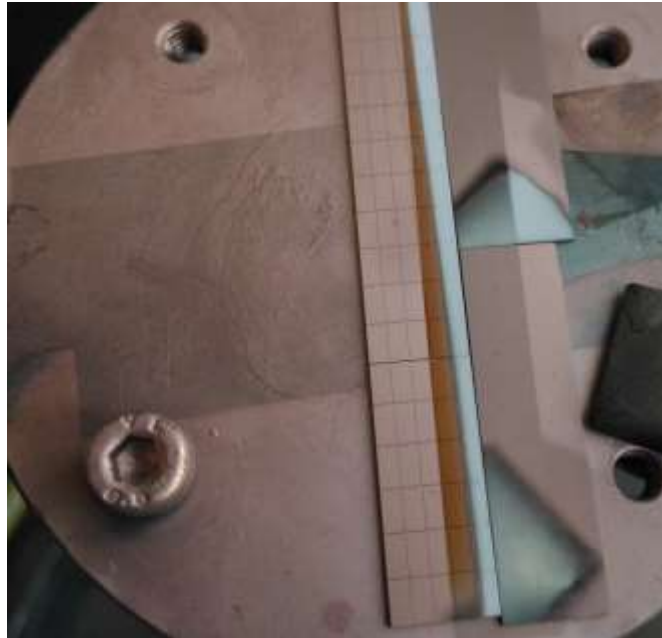


Рисунок 11. Керамическая подложка с протравленной медью

На микроскопе замерялась толщина подложки на участке раздела двух зон (рис.12). Толщина протравленного слоя вычисляется как разность толщин двух сопряженных зон.

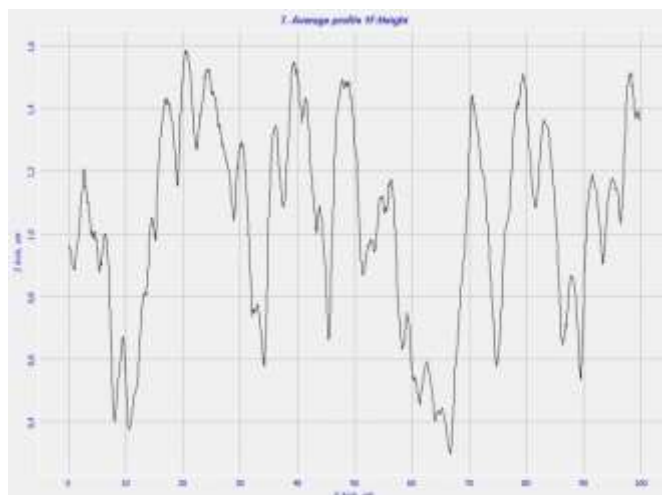


Рисунок 12. Профиль подложки на участке раздела протравленной и непротравленной зон

Шероховатость керамической подложки внесла флуктуации в показаниях толщины подложки, за которыми увидеть изменение толщины при переходе из одной зоны в другую, как и сам этот переход стало проблематично.

Выводы

Коэффициент отклонения потенциала не зависит от ускоряющего напряжения. Зависимость коэффициента от высоты выражается графиком (рис.9).

Анализ графиков ионного тока дал результаты (наличие центрального пика, сужение основных пиков к центру, сужение пучка непосредственно около источника), переводящие

полученную модель в область недоверительного интервала. Для устранения недостатков модели необходимо учитывать следующие факторы. Возможную неоднородность ионного источника, рассматриваемого в теории как множество точечных, в радиальном направлении. Физические взаимодействия ионов друг на друга. Направление силовых линий электрического поля. Особенности конструкции источника. Все эти факторы в совокупности можно объединить в следующую картину движения ионов, которую следовало учитывать при моделировании: в силу конструктивных особенностей источника, ионы вылетают не перпендикулярно, а под углом к нормали, по направлению к центру источника; в результате кулоновских сил, стремящихся расширить пучок, и действия электрического поля, вектора напряженности которого предположительно направлены также под углом к нормали в направлении центра, изменяется угол под которым движутся ионы. В результате ионный пучок может иметь например форму конуса или гиперboloида (рис.13).

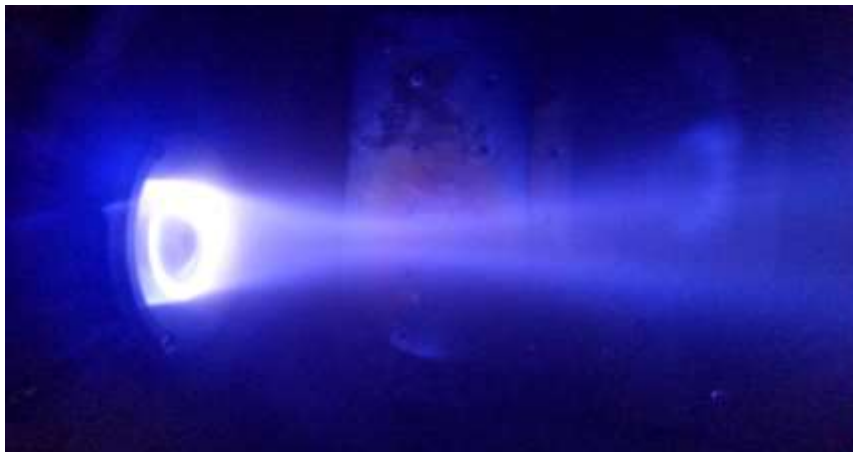


Рисунок 13. Пучок, создаваемый ионным источником

Литература

1. Zhurin, V. V. Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology / V. V. Zhurin. – Weinheim: Wiley-VCH, 2011. – 312 с., ил.
2. Anders, A. Plasma and Ion Sources in Large Area Coatings: A Review / André Anders // The International Conference On Metallurgical Coatings and Thin Films ICMCTF 2005. Session G5: Large Area Production Coatings for Webs, Plasma Cleaning and Pretreatment of Large Surfaces, 28 February 2005. – 42 с., ил.
3. Мухамадеев Р.А. Моделирование процессов травления микро- и наноструктур с использованием программного модуля «NEMO» Etching” [Текст]/ Р.А. Мухамадеев, Т.И. Данилина// Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. - № 1. – с. 95-98.
4. Спресов И.Н. Моделирование процессов формирования твердотельных структур при воздействии ионных потоков [Текст]/ И.Н. Спресов// Проблемы физики, математики и техники. – 2011. - № 2. – С. 43-48.
5. Kwaku O. Abrokwah. Characterization and Modeling of Plasma Etch Pattern Dependencies in Integrated Circuits [Текст]/ Kwaku O. Abrokwah. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006. – 108 с.
6. D.J. Economou. Modeling and simulation of plasma etching reactors for microelectronics [Текст]/ D.J. Economou// Thin Solid Films – 2000. – с. 348-367.
7. Статья: Моисеев К.М. Многопозиционные вакуумные технологические установки. Наноинженерия. №8. 2014. – С. 18-22.