

неравномерность осаждаемого слоя до значения $\pm 2\%$ (на пластинах диаметром 200 мм) сопоставимого со значениями аналогичных зарубежных установок [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф.И. Григорьев. Осаждение тонких пленок из низкотемпературной плазмы и ионных пучков в технологии микроэлектроники. Моск. гос. ин-т электроники и математики. М., 2006. С. 25-27.
2. А.И. Охапкин, С.А. Королёв, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов, С.А. Краев, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Низкотемпературное осаждение пленок SiN_x в индуктивно-связанной плазме $\text{SiH}_4/\text{Ar}+\text{N}_2$ в условиях сильного разбавления силана аргоном. ФТП, 51(11), 2017.
3. А.И. Охапкин, С.А. Королёв, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов, С.А. Краев, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. ФТП, 49(11), 1469 (2015).
4. Patent United States № US 2014/0073143 A1, Mar. 13. 2014.
5. Установка низкотемпературного плазмохимического осаждения Advanced Vacuum – Apex LSR HDPCVD, 2018.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ЖИДКОФАЗНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВАКУУМНЫХ УСТАНОВОК

DEVELOPMENT OF A LIQUID PHASE ION-PLASMA SPRAYING MODULE FOR SMALL-SIZED TECHNOLOGICAL VACUUM UNITS

А.Д.Купцов / alex-kouptsov@yandex.ru

Н.А.Гребнев, С.В.Сидорова, К.М.Моисеев, Д.Д.Васильев

A.D. Kuptsov, N.A. Grebnev, S.V. Sidorova, K.M. Moiseev, D.D. Vasiliev

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Млосква

Приведена актуальность метода жидкофазного магнетронного распыления для металлизированных покрытий микроэлектроники. Проведено компьютерное моделирование магнитной системы. Разработана конструкция модуля магнетрона для малогабаритной вакуумной камеры.

The relevance of the method of liquid-phase magnetron sputtering for metallized coatings of microelectronics is given. Computer simulation of the magnetic system is carried out. The design of the magnetron module for a small-sized vacuum chamber is developed.

Ключевые слова: *жидкофазное магнетронное распыление, металлизированное покрытие, компьютерное моделирование*

Key words: *liquid-phase magnetron sputtering, metallized coatings, computer simulation.*

ВВЕДЕНИЕ

Процесс металлизации проводят для изменения основных свойств материала: керамики, металла, полимера и т.д. Для большинства областей техники и технологий в

качестве метода металлизации применяют ионно-плазменное нанесение. Областей применения покрытий, получаемых методом ионно-плазменного нанесения, достаточно много: от токопроводящих слоев для микро- и нанoeлектроники до упрочняющих покрытий в машиностроении и просветляющих покрытий для оптики.

Процесс ионно-плазменного формирования тонкопленочных покрытий отличается высоким качеством, хорошей адгезией. Данный метод отличается универсальностью, так как позволяет наносить любые металлы, а также полимеры.

Ионное распыление является многофакторным физическим процессом. Коэффициент распыления S зависит от многих параметров [1 - 3]:

- Угол падения иона;
- Масса бомбардирующего иона;
- Температура мишени;
- Шероховатость и пористость поверхности мишени;
- Количество фаз вещества (карбиды, оксиды и т.д.);
- Давление рабочего газа;
- Величина магнитной индукции (B);
- Напряжение источника питания (концентрация ионов и электронов, энергия ионов).

Обычно первые два фактора являются неконтролируемыми и не варьируемыми. Чем больше температура мишени, тем эффективнее процесс распыления (выше энергия частиц). При этом стоит помнить, что не все мишени можно разогревать до высоких температур, таким образом есть некий предел по температуре мишени. Механическое влияние на шероховатость (шлифовка или полировка мишени) приводит к уменьшению срока службы, что при высокой стоимости мишеней является не лучшим фактором варьирования коэффициента распыления. При использовании мишеней разного состава (сплавов и т.д.) возникают сложности из-за разности скоростей распыления материалов, а также получения нужной стехиометрии покрытия.

Таким образом, в распоряжении варьирования параметров остается три фактора – напряжение, магнитная индукция, давление. Взаимосвязь всех трех параметров показана на рис. 1.

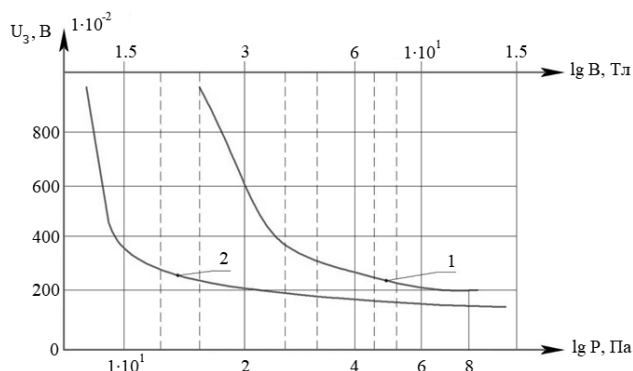


Рис.1. Зависимость напряжения зажигания разряда U_z от индукции магнитного поля B (1) и давления аргона P (2).

Сопоставление кривых 1 и 2 указывает на то, что влияние магнитного поля на напряжение зажигания разряда аналогично влиянию давления – увеличение уровня того или иного фактора упрощает момент зажигания плазмы. А также увеличивает эффективность магнетронного распыления. Таким образом, разработку магнетронного модуля необходимо начинать именно с магнитной системы.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Одной из ключевых задач при проектировании магнетрона является выбор материала магнитов для магнитной системы, поскольку от этого напрямую зависит величина магнитного поля в области распыляемой мишени.

На сегодняшний день востребованы следующие виды постоянных магнитов:

- 1) NdFeB (неодимовые);
- 2) AlNiCo;
- 3) Ферритовые;
- 4) SmCo (самариевые);

Стоит отметить, что неодимовые магниты являются наиболее перспективными: они обладают высокой коэрцитивной силой порядка 1000 кА/м и остаточной намагниченностью порядка 1,1 Тесла. Это позволяет магниту сохраняться на протяжении многих лет, за 10 лет неодимовый магнит теряет лишь 1% своей намагниченности, если температура его в условиях эксплуатации не превышает +80°C. Главное требование к магнитам для магнетрона – сильные магнитные свойства, поэтому сравнение магнитов проводится по величине магнитной энергии. На диаграмме 1 представлены данные для некоторых популярных марок, относящихся к различным видам магнитов.

Выбрав материал магнитов, необходимо определиться с размерами магнитной системы. Исходя из проведенного в программе Comsol Multiphysics моделирования, были определены размеры и конфигурация магнитной системы. Магнитная система состоит из центрального 1 и кольцевого 2 магнитов (рис. 2).

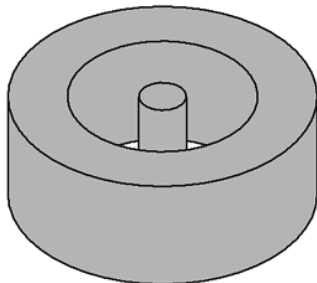


Рис.2. Магнитная система проектируемого магнетрона.

В ходе моделирования поочередно варьировались три параметра: высота магнитов, внутренний диаметр кольцевого магнита и диаметр центрального магнита. Для каждого моделирования получили зависимость распределения тангенциальной составляющей магнитного поля по радиусу магнетрона (именно эта величина важна при магнетронном распылении). Внешний диаметр кольцевого магнита – 65 мм. Данное значение выбрано, исходя из конструктивных соображений. В качестве уровней моделирования были выбраны значения 1, 3, 5, 7 мм относительно вершины магнитной системы.

При моделировании высоты магнитов неизменными параметрами являлись:

- диаметр центрального магнита: 10 мм;
- внешний диаметр кольцевого магнита: 65 мм;
- внутренний диаметр кольцевого магнита: 50 мм;

Высоты варьировались от 5 до 50 мм с шагом 5 мм. Наилучший результат был достигнут при высоте 25 мм: было обеспечено высокое значение тангенциальной составляющей магнитного поля при его более равномерном распределении в центре и на периферии (рис. 3).

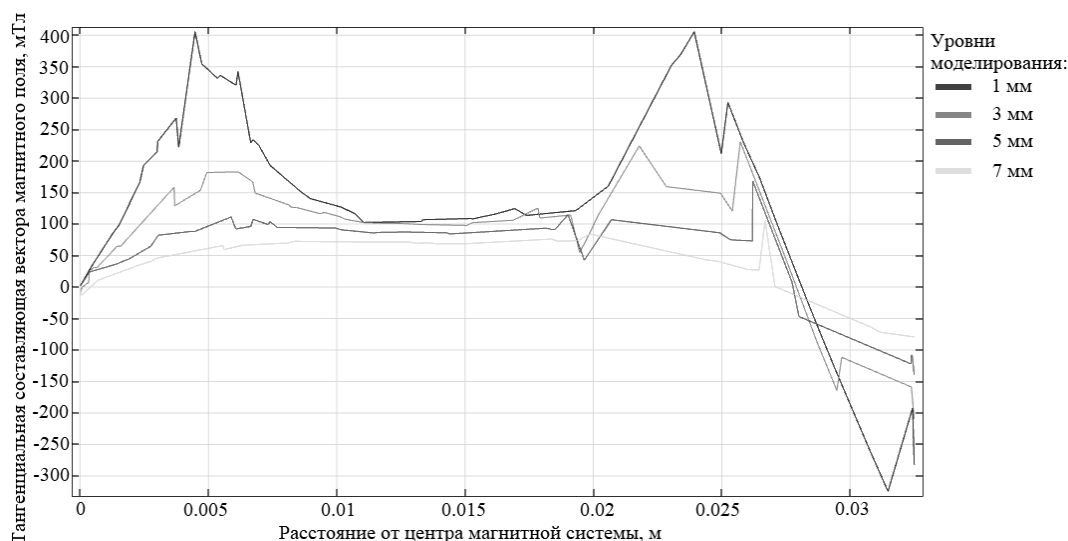


Рис.3. График распределения тангенциальной составляющей магнитного поля (мТл) по радиусу магнетрона для определения высоты.

Аналогичным образом были проведены этапы моделирования для внутреннего диаметра кольцевого магнита.

Неизменным параметрам являлись:

- высота магнитов: 25 мм;
- диаметр центрального магнита: 10 мм;
- внешний диаметр кольцевого магнита: 65 мм;
- внутренний диаметр варьировался от 40 до 55 мм с шагом 5 мм.

Был выбран диаметр 40 мм, поскольку при данном варианте получается самая большая зона магнитной ловушки (рис. 4).

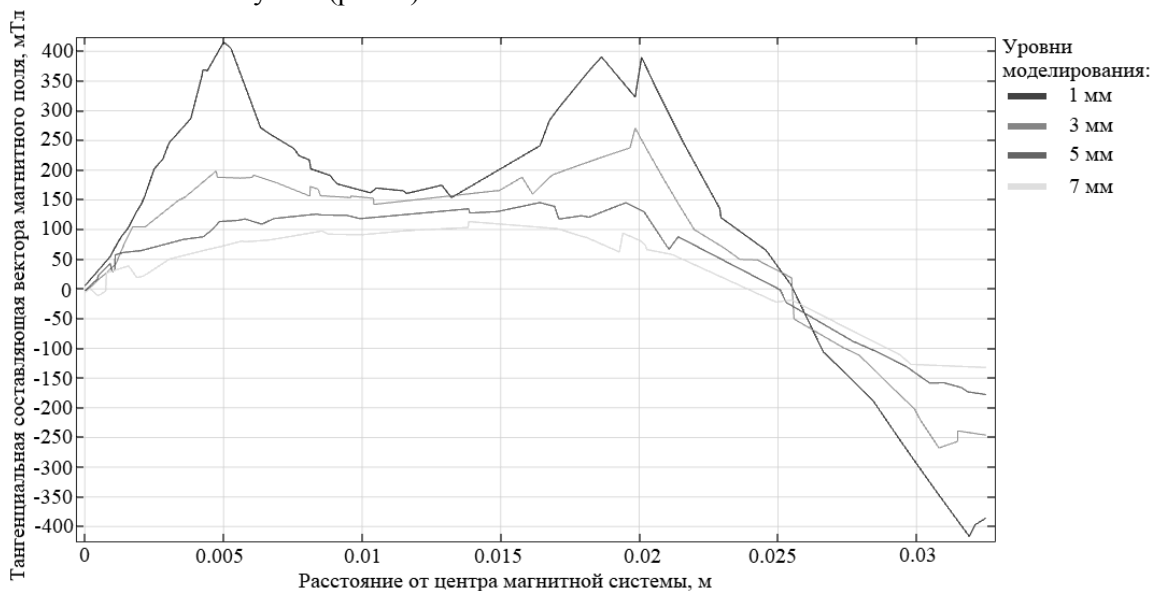


Рис.4. График распределения тангенциальной составляющей магнитного поля (мТл) по радиусу магнетрона для определения внутреннего диаметра кольцевого магнита.

Диаметр центрального магнита варьировался от 10 до 25 мм с шагом 5 мм.

Неизменными параметрами являлись:

- высота магнитов: 25 мм;
- внешний диаметр кольцевого магнита: 65 мм;
- внутренний диаметр кольцевого магнита: 40 мм.

Зона магнитной ловушки получается наибольшей при значении диаметра центрального магнита 10 мм.

Для спроектированной системы магнитов необходимо подобрать магнитопровод. Эффективный магнитопровод для данной конфигурации имеет форму сплошного диска с диаметром равным внешнему диаметру кольцевого магнита. Расположен он под магнитами. В ходе моделирования выяснилось, что увеличение толщины магнитопроводов приводит к увеличению интенсивности магнитного поля. Однако данная зависимость нелинейная и при увеличении толщины свыше 2,5 мм интенсивность магнитного поля изменяется незначительно. На рис. 5 показано распределение тангенциальной составляющей магнитного поля при толщине магнитопровода 2,5 мм.

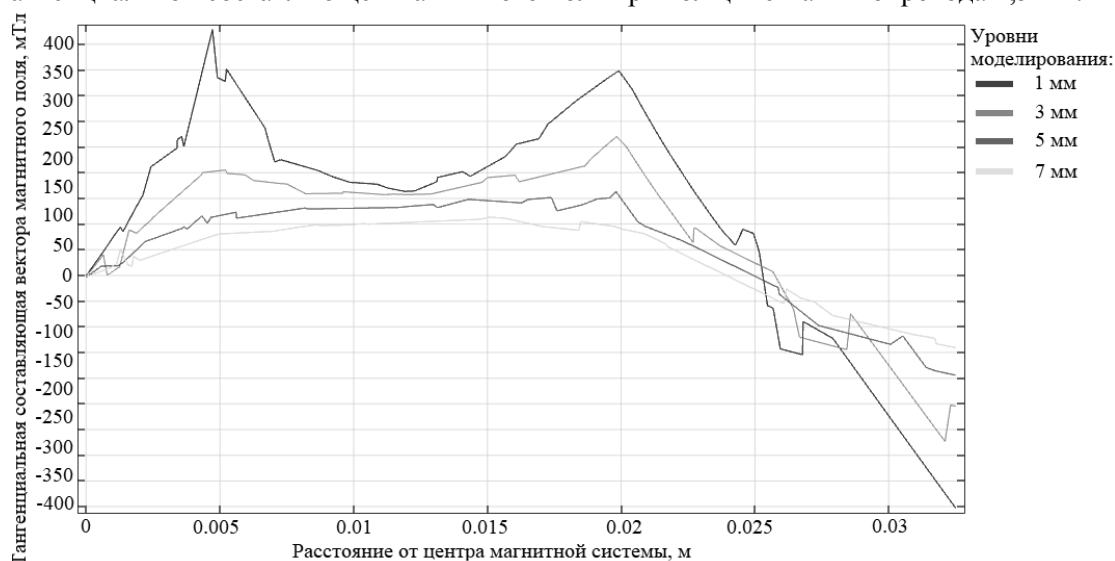


Рис.5. График распределения тангенциальной составляющей магнитного поля (мТл) по радиусу магнетрона для определения внутреннего диаметра центрального магнита.

Предыдущий магнетрон имеет аналогичную конфигурацию магнитной системы со следующими параметрами:

- диаметр центрального магнита: 10 мм;
- внешний диаметр кольцевого магнита: 50 мм;
- внутренний диаметр кольцевого магнита: 38 мм;
- высота системы: 9 мм;
- толщина магнитопровода: 1 мм;

Среднее значение тангенциальной составляющей магнитного поля на расстоянии 1 мм относительно вершины данной системы составляет 157 мТл. Для новой магнитной системы при одних и тех же материалах магнитов и магнитопроводов данный показатель равен 290 мТл, согласно моделированию, проведенному в программе Elcut (рис. 6). Таким образом, эффективность новой системы выше на 85%.

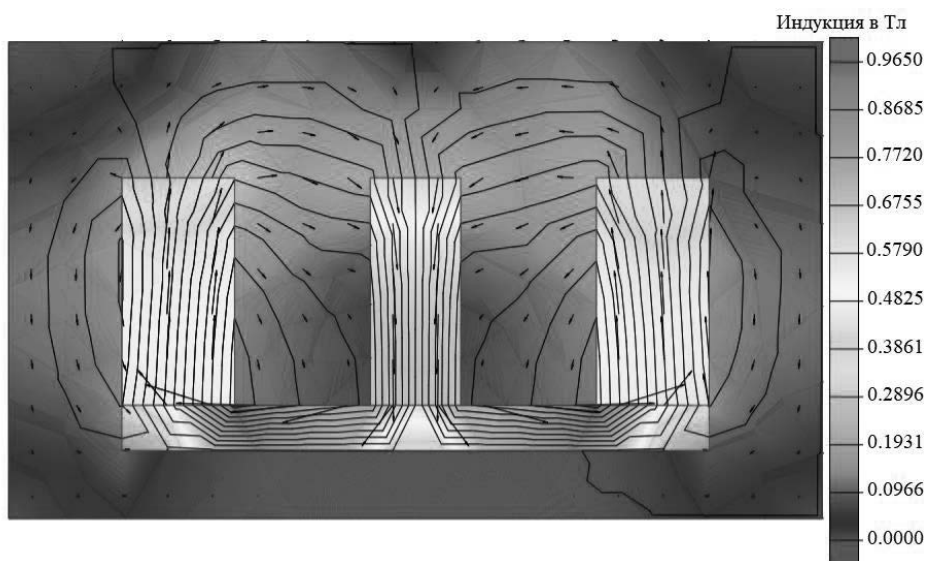


Рис.6. Распределение тангенциальной составляющей магнитного поля для новой магнитной системы.

КОНСТРУИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В конструкции магнетронных систем существуют базовые элементы, при изготовлении которых необходимо совместить их технологичность, а также эффективность работы самого модуля магнетрона.

На рис. 7 представлен эскизный проект модуля жидкофазного магнетрона.

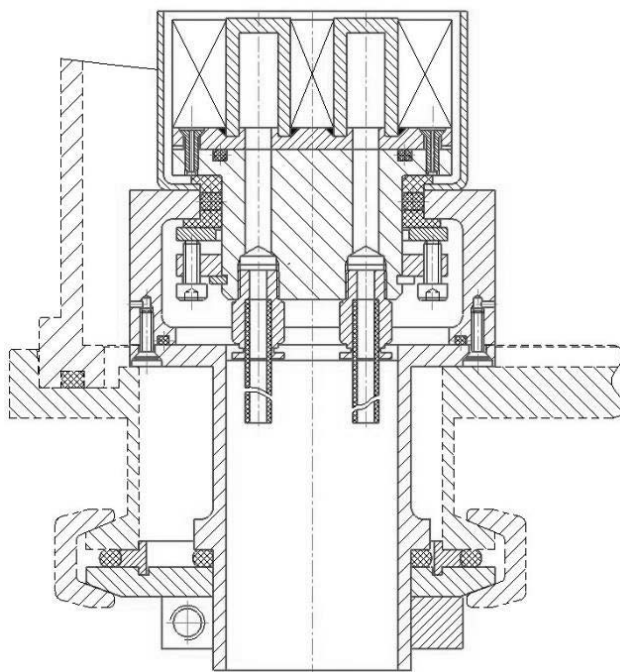


Рис.7. Эскизный проект модуля жидкофазного магнетрона.

Тигель – объем, в котором происходит расплавление мишени, дальнейшее ее испарение и распыление. Температура плавления меди – 1085 °С; температура кипения меди – 2562 °С [4]. Ожидаемая температура расплавленной меди – 1100 ... 1500 °С. При использовании некачественных материалов частые перегревы повысят износ тигля и выход его из строя. Необходимо подобрать материал, который позволит проводить

многочисленные опыты с жидкими мишенями. Такими свойствами обладает танталовый лист после электронно-лучевой плавки (ЭЛП-2 - двойной переплав, ЭЛП-3 - тройной переплав) [5]. Таким образом, использование высокочистого танталового тигля позволит увеличить срок службы тигля и качество получаемых пленок за счет того, что в объеме тигля не будет вредных примесей и дислокаций. Толщина тигля – 0.5 мм.

Магнитная система

Зачастую простые конструкции магнетронов имеют закрытый корпус магнитной системы с крышкой, которая обеспечивает герметичность охлаждаемой воды при помощи уплотнительных колец и винтовых соединений. В нашем случае использование паяного соединения позволит установить тигель как можно ближе к магнитам, что увеличит эффективность магнитной ловушки магнетрона. Охлаждение магнитной системы будет происходить за счет циркуляции воды. Теплоотвод обеспечивается за счет прессы посадки магнитов на медной крышке.

При выборе материала магнитов стоит обратить внимание не на вакуумную чистоту, а на магнитные свойства.

На настоящий момент лучшими магнитами являются – неодимовые. В таблице 1 представлена сравнительная характеристика наиболее распространенных магнитов [9].

Таблица 1.

Магнитная энергия некоторых марок магнитов.

NdFeB		AlNiCo		SmCo	
Марка	Магнитная	Марка	Магнитная	Марка	Магнитная
N35	33-36	LNG40	5	YXG-28H	26-28
N38	36-39	LNG44	5,5	YXG-30H	28-30
N40	38-41	LNG52	6,5	YXG-32	29-32
N42	40-43	LNG60	7,5		
N45	43-46	LNGT72	9		
N48	46-49	LNGT80	10		
N50	48-51				
N52	50-53				

Так и в нашем модуле в качестве магнитной системы будут использоваться магниты марки – N52.

Газовая система

Для подачи газа из баллона в вакуумную камеру и непосредственно к источнику магнетрона лучше всего подходит фторопластовая (тефлоновая) трубка – PTFE (политетрафторэтилен). Аналогично газовой системе для воды также предусмотрены требования по коррозионной стойкости. Лучше всего для этого подходит нержавеющая труба с ДУ 4 мм, Вторым вариантом является полиуретановая трубка. Стандартный ДУ 4х6 мм. Полиуретановая трубка хороша тем, что она позволяет прокладывать магистраль в том направлении, как нам это требуется, трубка из стали хороша тем, что позволяет избежать повреждений системы [6 - 9].

Крепежные изделия

В вакуумной технике самым распространенным материалом для метизов является нержавеющие винты и болты, так как они обладают коррозионностойкими свойствами. В случае магнетронного распыления нержавеющая сталь не магнитная. Это означает, что винты не будут «забирать на себя» линии магнитной индукции.

В таблице 2 представлена сводка элементов и соответствующих им материалов.

Таблица 2.

Материалы деталей магнетронного модуля.

Элемент	Материал
Втулки изоляционные	Ф-4
Корпус, анод, шайбы прижимные	12X18H10T / AISi 304 / Д16Т
Крепежные изделия	AISi 304
Крышка магнитов	Медь
Магнитопровод	Сталь электротехническая
Магниты	NdFeB (N52)
Тигель	Тантал
Уплотнительные кольца	ИРП 1345
Шланг охлаждения водой	Полиуретан
Шланг подачи газов	PTFE

Поскольку модуль магнетрона является источником распыления, который находится в вакууме и служит для формирования зачастую сверхтонких покрытий (единицы нанометров), то для них, как и других внутрикамерных приборов и оснасток применяются специальные требования по шероховатости поверхностей и наименованию материала изделий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружено, что наибольшую силу магнитного поля создают неодимовые магниты. Правильно выбранные габариты позволяют спроектировать подходящую систему для малогабаритных вакуумных камер. Расчет магнитной системы показал, что разработанная магнитная система эффективнее существующей на 85%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных этапов моделирования магнитной системы ионно-плазменного источника подобраны размерные параметры магнитной системы на постоянных магнитах. Высота магнитов – 25 мм, толщина кольцевого магнита – 12.5 мм, диаметр кольцевого магнита – 65 мм, диаметр центрального магнита – 10 мм, толщина магнитопровода – 5 мм. Предлагаемая магнитная система позволила увеличить величину магнитной индукции на 85 %.

Разработан комплект конструкторской документации для изготовления модуля магнетронного распыления с жидким катодом. Подобраны основные элементы и покупные изделия. Выбраны материалы для изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Знакомство с вакуумно-технологической установкой магнетронного распыления «Caroline D12A» и исследование технологических режимов получения аморфных и поликристаллических слоев неорганических материалов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ipsi.smr.ru/Lab/CKPO/Nanofot/doc/D12APosobie.pdf>– Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.10.2019).
2. Плешивцев Н. В. Физические проблемы катодного распыления. Институт атомной энергии имени И. В. Курчатова, Москва, 1979. – 90 с.
3. Рогов А. В., Капустин Ю. В., Мартыненко Ю. В. Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Журнал технической физики, 2015, том 85, вып. 2. С. 126 – 134.

4. Температура плавления и кипения металлов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/metally-i-splavy/temperatura-plavleniya-i-kipeniya-metallor-plotnost-i-teploprovodnost> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.11.2019).

5. Производство слитков тантала. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ulba.kz/ru/production3_01.htm – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.12.2019).

6. Таблица совместимости пневматических трубок. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.aircrafter.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=62&Itemid=75 – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 05.12.2019).

7. Пластики с растворами (Katalog_Azlon_2016_Duran_EN).pdf

8. Таблица коррозионной стойкости. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fluid-line.ru/koroziya?sel=27&sel1=0> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 05.12.2019).

9. Сравнение магнитов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://magnit96.com/blog/article/sravnenie_neodimovyh_samarievyh_i_alnico_magnitov/ Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 07.12.2019).

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ УСТНОВКИ ВАКУУМНОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

TECHNOLOGICAL EQUIPMENT MODERNIZATION OF THE VACUUM COATING

О.Г.Андреасян / ovs.andreasyan@gmail.com

А.А.Исаева / Isaevanastasiya13@gmail.com

O.G.Andreasyan, A.A.Isaeva

МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва

Разработана конструкция модуля термического испарения. Рассмотрены варианты реализации модуля в камере, испарителя, материалы тоководов и испарителя. Проведен расчет сопротивления испарителя.

The design of the thermal evaporation module has been developed. Implementation options for the module in the chamber, the evaporator, the materials of the current leads and the evaporator are considered. The evaporator resistance is calculated.

Ключевые слова: *термическое испарение, тонкие пленки, островковые наноструктуры, вакуум, источник термического испарения, испаритель.*

Key words: *thermal evaporation, thin films, island nanostructures, vacuum, thermal evaporation source, evaporator.*

ВВЕДЕНИЕ

Островковые тонкие плёнки (ОНС) – это плёнки, рост которых был прекращён на этапе образования островков [1]. Они влекут к себе интерес за счёт особенных свойств, \ связанных с наноразмерностью таких структур в одном из трёх измерений.