

необходимости увеличения диапазона варьирования титана и меди до 1000-1500 нм. В дальнейшем планируется продолжать эксперименты ПФЭ с целью получения оптимальных значений толщин для данной многослойной тонкопленочной структуры.

Литература

1. Мясников В. Е. Развитие сверхмощных длинноимпульсных и непрерывных гиротронов в диапазоне 110...170 ГГц / В. Е. Мясников и др. // Радиотехника. – 2000. - №2 – с. 67.
2. Патент РФ 2005135030/09. Способ изготовления окна вывода энергии СВЧ / Ляпин Л.В., Сытилин С.Н., Павлова М.А.; Заявл. 11.11.2005. Оpubл. 11.11.2005. Бюл. № 15.
3. «Снипов.нет» [Электронный ресурс]: ВРД 39-1.10-030-2001. Методика определения качества полимерных адгезионных внутренних покрытий после воздействия коррозионно-агрессивных сред методом автоклавного испытания – Режим доступа: http://snipov.net/database/c_4294956053_doc_4293799494.html , свободный (дата обращения: 02.12.2016).

Исследование жидкофазного магнетрона с двумя областями плазмы

А.А. Храмова, А.Р. Матанин, Д.Д. Васильев, К.М. Моисеев
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
e-mail: annakhramova3@gmail.com

В статье представлен процесс моделирования и сборки магнетрона с двумя областями плазмы с целью повышения магнитной индукции на поверхности мишени в процессе жидкофазного магнетронного распыления. Представлены варианты конструкций и собраны магнитные системы с двумя зонами распыления. Проанализирована причина отсутствия центральной плазмы при запуске и представлены способы устранения этой проблемы.

Investigation of the magnetron with liquid-phase target and two plasma zones. A.A. Khramova, A.R. Matanin, D.D. Vasiliev, K.M. Moiseev. The article briefly describes modelling and assembling magnetron with two plasma fields to increase magnetic induction at the magnetron surface during magnetron sputtering with liquid-phase target process. The construction variants are presented and magnet systems with two sputtering fields are assembled. The reason of central plasma field absence during launching is analyzed and methods to solve this problem by launching are presented.

Введение

Для формирования тонких плёнок из различных материалов в вакууме одним из наиболее распространенных методов является магнетронное распыление [1].

Развитием метода стандартного магнетронного распыления является магнетронное распыление с жидкой мишенью. Расплавленный материал мишени обладает высоким давлением насыщенных паров, что позволяет отключить подачу инертного газа при достижении процессом режима «самораспыления», что снижает концентрацию примесей в формируемом покрытии [1, 2]. К преимуществам данного метода так же относят высокие показатели адгезии из-за наличия ионизированной фазы [3], почти 100% использование материала и низкие энергозатраты от 50 до 100 В/атом на выбивание одного атома распыляемого материала.

Одним из наиболее важных параметров процесса ЖФ магнетронного распыления является мощность разряда. Совокупность напряжения разряда, рабочего давления и индукции магнитного поля должна обеспечивать мощность разряда, необходимую для плавления медных гранул, а затем и перехода процесса в режим «самораспыления» [4]. При недостатке мощности

разряда для плавления медных гранул, простым способом увеличения мощности является повышение давления или напряжения на катоде, но эти параметры ограничены возможностями оборудования. Когда данные параметры достигают предельных значений, повышение мощности разряда обеспечивается повышением магнитной индукции на поверхности магнетрона. Магнитную индукцию можно увеличить заменой магнитов на более сильные по магнитным свойствам либо изменением конструкции магнитной системы. В магнитной системе 2” магнетрона НМСА-52М производства АО «НИИТМ» (рисунок 1, а) установлены сильные по магнитным свойствам магниты IV группы КС 25 ДЦ, поэтому целью данной работы является разработка конструкции магнитной системы 2” магнетрона с большим значением магнитной индукции на поверхности мишени.

Магнитная система с двумя областями плазмы

При сближении магнитов величина индукции магнитного поля между ними увеличивается. Основываясь на этом факте, решено увеличить напряженность магнитного поля посредством сближения внешнего магнита с центральным в существующей магнитной системе (рис. 1, а). При сближении внешнего и внутреннего магнитов, на месте внешнего освобождается пространство, на котором возможно разместить дополнительное магнитное кольцо, которое будет так же располагаться близко к центральному магниту. В результате магнетрон будет иметь две области плазмы (рис. 1, б).

Магнитная система с двумя областями плазмы реализована на цилиндрических магнитах из материала Nd-Fe-B с сильными магнитными характеристиками, что позволяет быстрее изменять конструкцию, по сравнению с изготовлением кольцевых магнитов на заказ.

Диаметры периферийных магнитов подобраны таким образом, чтобы суммарная площадь торцов цилиндров была равна площади торца кольцевого магнита исходной конструкции (рисунок 1, а), а диаметры магнитов промежуточного кольца рассчитаны, как среднее арифметическое между центральным и периферийным диаметрами цилиндров.

Сравнение результатов компьютерного моделирования исходной магнитной системы с магнитной системой с двумя плазмами показало, что максимальная тангенциальная составляющая индукции магнитного поля увеличивается на поверхности магнетрона и составляет 250 мТл по сравнению со 101 мТл (рис. 2, 3).

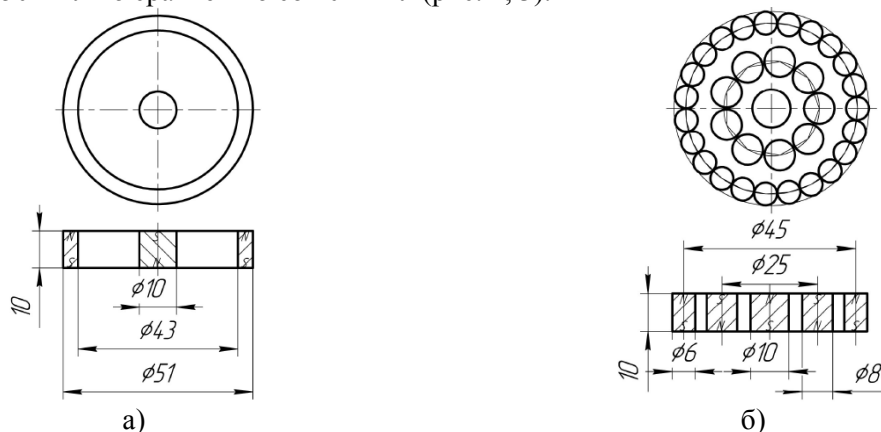


Рис. 1. Конструкции магнитных систем магнетрона НМСА-52М: а) с цилиндрическими и кольцевым магнитами; б) с двумя областями плазмы.

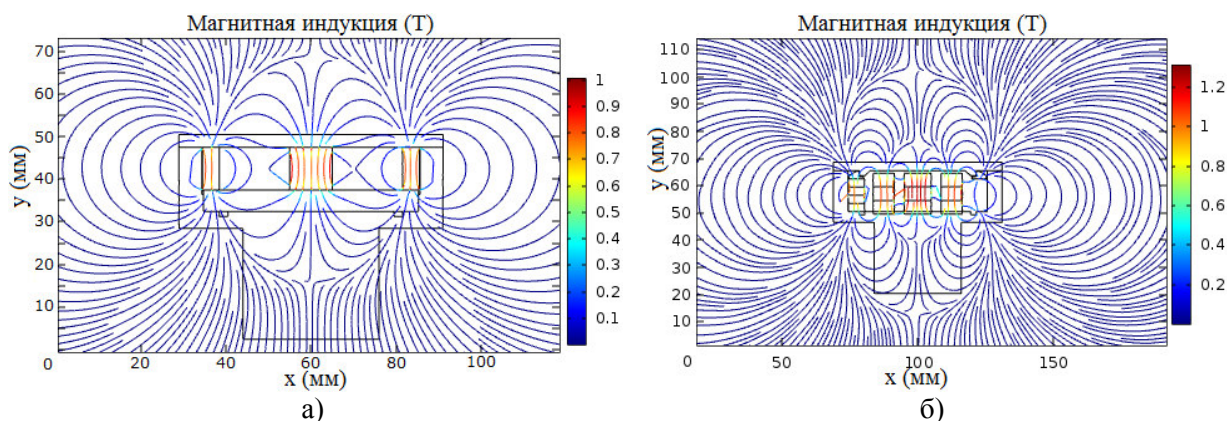


Рис. 2. Распределение магнитного поля: а) исходной магнитной системы с цилиндрическим и кольцевым магнитами; б) магнитной системы с двумя областями плазмы.

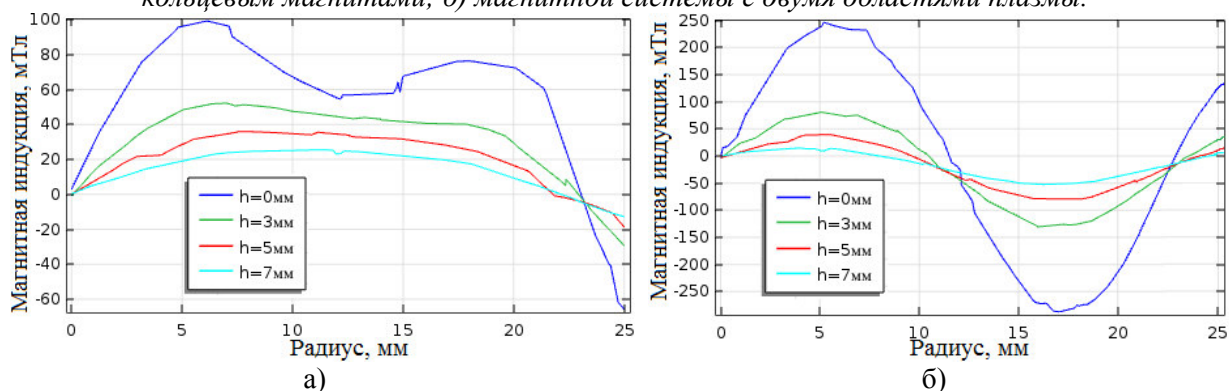


Рис. 3. Зависимость тангенциальной составляющей индукции магнитного поля от расстояния до центра магнетрона: а) имеющейся магнитной системы, б) разработанной магнитной системы.

Для позиционирования магнитов в магнитной системе с двумя областями плазмы разработан сепаратор. Для охлаждения магнитов водой в сепараторе имеются каналы, по которым вода протекает в полость между крышкой магнетрона и сепаратора. Разработана твердотельная модель сепаратора (рисунок 4, а), которая изготовлена при помощи 3D печати (рис. 4, б).

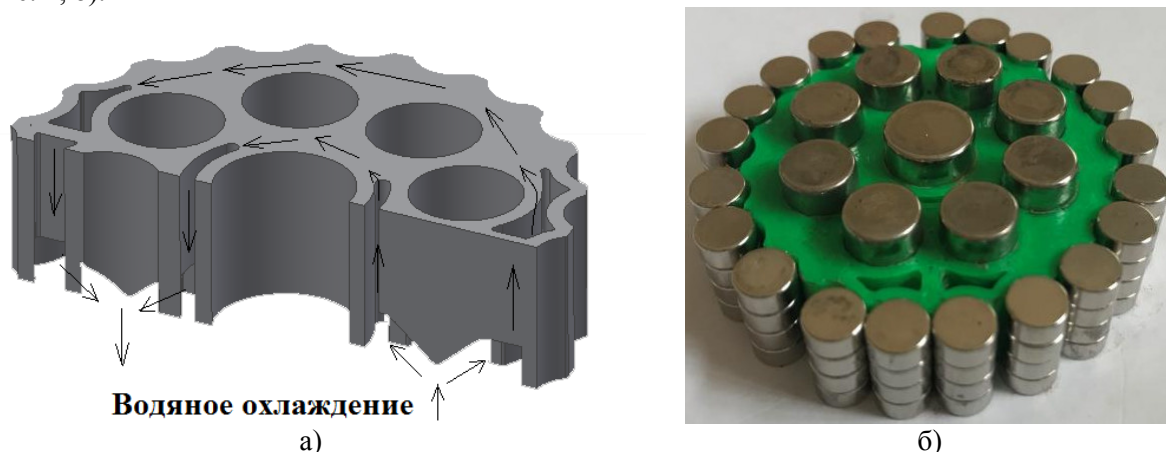


Рис. 4. Сепаратор магнитной системы с двумя областями плазмы: а) разрез 3D модели сепаратора по каналам для охлаждения; б) магнитная система в сборе.

Эксперименты по запуску магнетрона с двумя областями плазмы

В лаборатории «Элионные процессы и нанотехнологии» на установке MBTU-11-1МС реализован метод жидкофазного магнетронного распыления. Магнетрон с магнитной системой с двумя плазмами был собран и получил номер MEL-DP-50-01. В ходе эксперимента по запуску

магнетрона без мишени наблюдалось горение двух областей плазмы. При запуске магнетрона с установленной на крышку магнетрона медной мишенью толщиной 3 мм зажглась только внешняя плазма, образованная средним и периферийным кольцами магнитов (рис. 5, а).

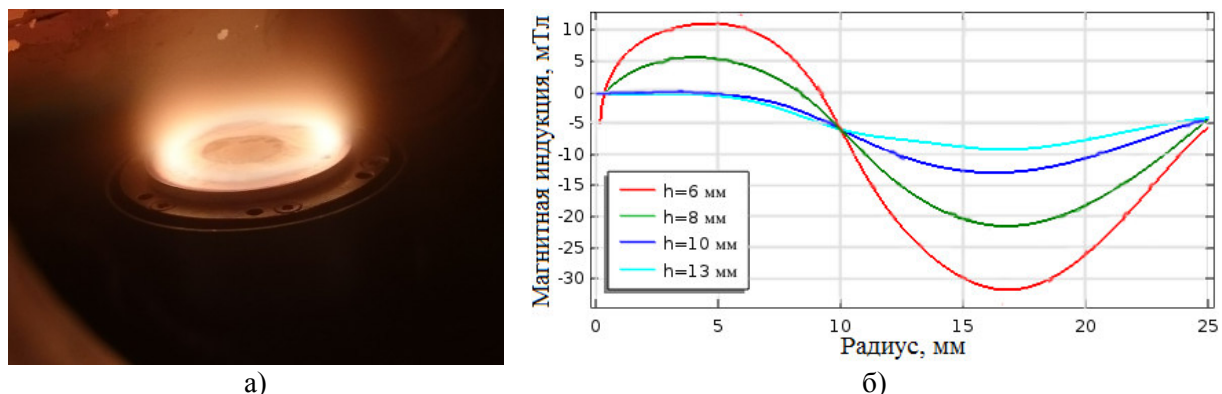


Рис. 5. Магнетрон MEL-DP-50-01: а) запуск магнетрона с медной мишенью; б) зависимость тангенциальной составляющей магнитного поля от радиуса на различных высотах от крышки магнетрона.

Анализ распределения линий магнитной индукции разработанной системы показал, что магнитная система является несбалансированной, а тангенциальная составляющая магнитного поля центральной плазмы полностью исчезает на высоте 10 мм от крышки магнетрона (рис. 5, б).

Повышение линий магнитной индукции центральной области плазмы

Для увеличения высоты, на которой исчезает тангенциальная составляющая магнитного поля в области центральной плазмы, была смоделирована магнитная система с двумя областями плазмы с повышенными линиями магнитной индукции центральной области плазмы.

Магнитная система с повышенными линиями магнитной индукции центральной плазмы отличается тем, что среднее кольцо состоит не из 8-ми цилиндров диаметром 8 мм, как в конструкции магнетрона MEL-DP-50-01, а из 6-ти таких цилиндров. Так же для этой системы был смоделирован и изготовлен сепаратор с отверстиями под охлаждение магнитов (рис. 6, а, б). Собранный магнетрон получил номер MEL-DP-50-02.

В результате высота, на которой исчезает тангенциальная составляющая магнитного поля центральной плазмы, увеличена на 3,9 мм, и составила 13,9 мм (рис. 7, а, б).

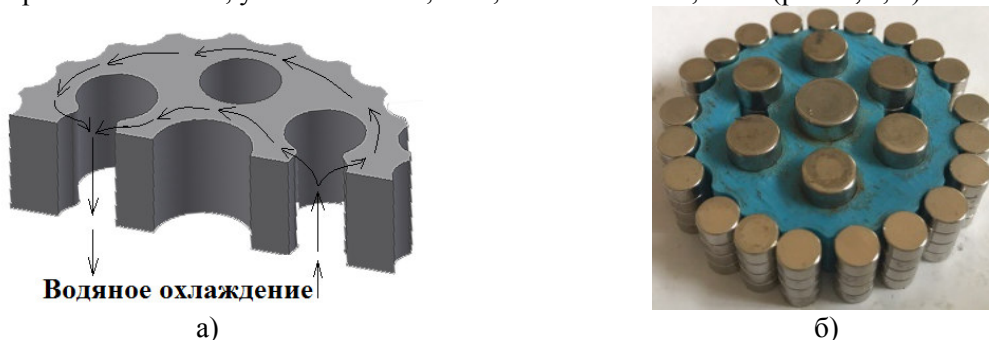


Рис. 6. Сепаратор более сбалансированной магнитной системы с двумя областями плазмы: а) разрез 3D модели по отверстиям для охлаждения; б) магнитная система в сборе.

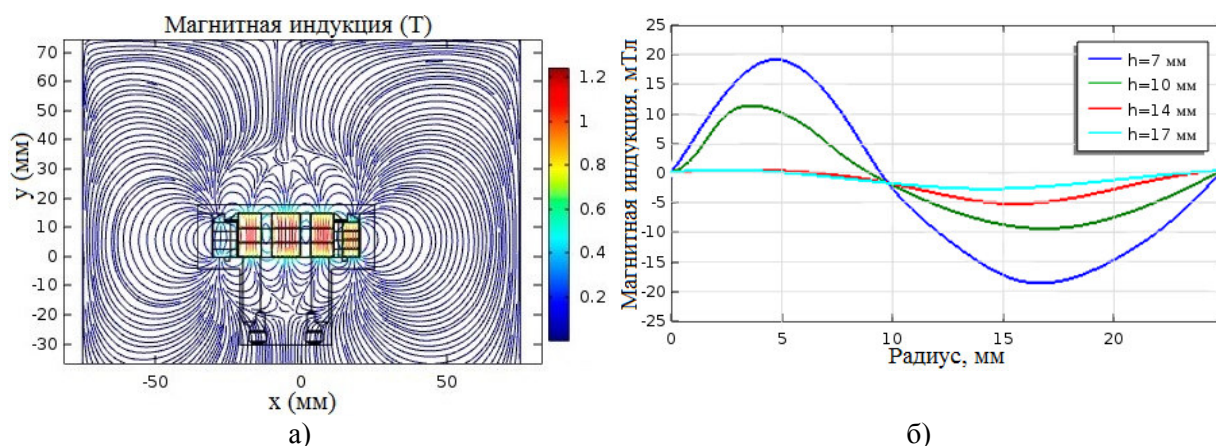


Рис. 7. Магнитная система с двумя областями плазмы с повышенными линиями магнитной индукции центральной области плазмы: а) распределение магнитного поля системы; б) зависимость тангенциальной составляющей магнитного поля от радиуса на различных высотах от крышки магнетрона.

При запуске магнитной системы без мишени обе плазмы загорелись только в начальный момент времени при значении давления процесса 1,147 Па, на блоке питания магнетрона была выставлена мощность разряда 100 Вт, чему соответствовали напряжение разряда 583 В и ионный ток 166 мА (рис. 8, а).

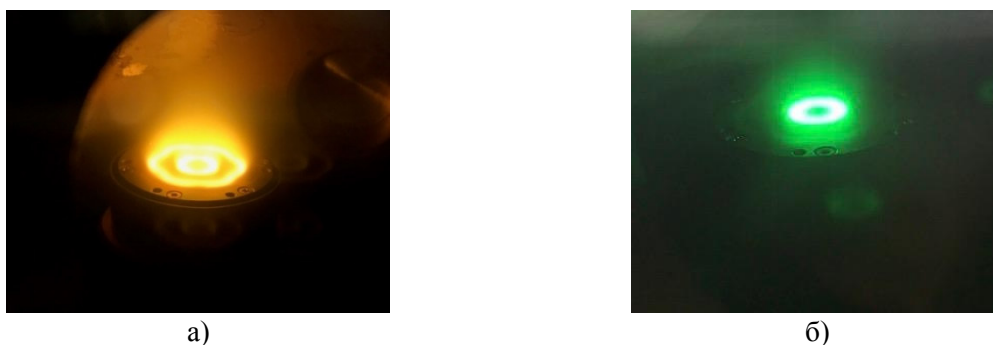


Рис. 8. Запуск магнетрона MEL-DP-50-02 без мишени: а) с двумя областями плазмы; б) с центральной областью плазмы

При наличии мишени толщиной 3 мм центральная плазма не зажигалась, а плазма, образованная периферийным и центральным кольцами магнитов, горела. В связи с таким поведением плазмы сделано предположение, что области плазмы воздействуют друг на друга, и это препятствует стабильной работе центральной плазмы. Для проверки этой гипотезы были проведены эксперименты по запуску центральной и периферийной областей плазм по отдельности без мишени. Периферийная область плазмы вела себя стабильно при различных давлениях процесса от 0,133 до 0,933 Па и напряжениях разряда от 300 до 530 В (рисунок 9).

Центральная область плазмы загорелась только при давлении 1,11 Па и при напряжении разряда 800 В, максимальном для данной установки. При этом ВАХ процесса была очень нестабильна, наблюдалось активное дугообразование (рис. 8, б).

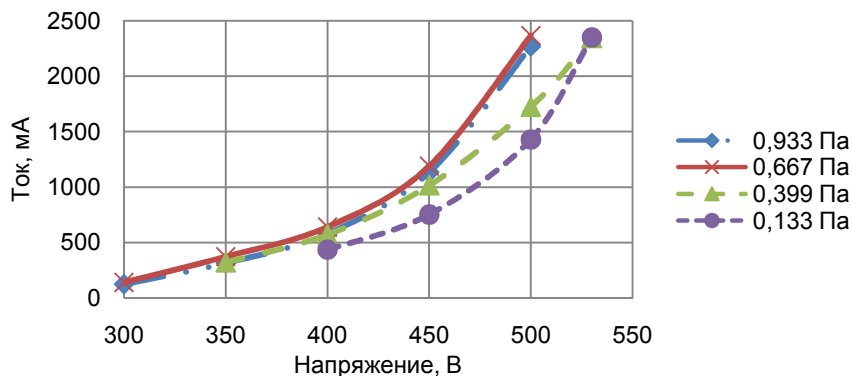


Рис. 9. ВАХ магнетрона с двумя областями плазмы с повышенными линиями магнитной индукции центральной плазмы без мишени.

Центральная плазма ведет себя нестабильно даже при отсутствии периферийной области распыления, значит, гипотеза о влиянии периферийной области плазмы на центральную не подтвердилась и центральная плазма нестабильна сама по себе. Это может быть обусловлено тем, что для образования кольца плазмы электроны, появившиеся из-за вторичной электронной эмиссии, должны двигаться по окружности с центростремительным ускорением, прямо пропорциональным силе Лоренца, которая определяется значением магнитной индукции в каждой точке. Если радиус центральной плазмы оказался очень мал, величина магнитной индукции в этой области должна быть достаточно велика, чтобы удерживать электроны в области плазмы, что не происходит в случае с собранной магнитной системой.

Заключение

В результате проделанной работы была смоделирована и собрана магнитная система магнетрона MEL-DP-50-02 с повышенными значениями магнитной индукции в центральной зоне плазмы, что позволяет увеличить высоту, на которой тангенциальная составляющая для центральной зоны плазмы исчезает, на 3,9 мм. Эта высота составила 13,9 мм. Центральная плазма ведет себя нестабильно при отсутствии периферийной области плазмы. Вариантом устранения данной проблемы является увеличение магнитной индукции в области центральной плазмы или сборка магнитной системы с большим радиусом центральной плазмы.

В дальнейшем планируется моделирование и последующая сборка конструкций магнитных систем с двумя областями плазмы с увеличенным диаметром центральной плазмы и повышенными значениями магнитной индукции центральной плазмы для определения системы с наиболее стабильными показателями процесса.

Литература

1. Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы / Б.С. Данилин [и др.] // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. – 1978. - № 2. – С. 84 – 87.
2. Магнетронный разряд с расплавленным катодом / А.В. Тумаркин [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. - № 3. – С. 276-282.
3. Исследование зависимости скорости осаждения меди от мощности при ее нанесении методом жидкофазного магнетронного распыления/ М.В. Макарова // Научно-технические системы и интеллектуальные системы 2017: сборник трудов девятнадцатой Молодежной международной научно-технической конференции (Москва, 19 апреля 2017 г.). – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2017. – С. 268-271.
4. Духопельников Д.В., Булычев В.С., Воробьев Е.В. Магнетронный разряд с жидкофазным катодом. – «Вакуумная техника, материалы и технология». Коллективная монография. Материалы XI Международной научно-технической конференции. Под редакцией доктора технических наук, профессора С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА. 2016. – С. 108-112.