

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИОННОГО ПУЧКА В ОДНОСТУПЕНЧАТОМ УСКОРИТЕЛЕ С АНОДНЫМ СЛОЕМ

Д.А. Омельницкий

dmitry.omelnitsky@yandex.ru

SPIN-код: 3097-3813

Н.А. Подгуйко

podguyko.nikolay@mail.ru

SPIN-код: 6033-2190

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Представлено исследование режимов работы ускорителя с анодным слоем. В ходе экспериментов было обнаружено, что существует такой диапазон напряженности магнитного поля в ускорительном канале ускорителей с анодным слоем, в котором ускоритель работает в так называемом диффузном режиме, за пределами этого диапазона имеет место режим ускорения. С помощью коллектора ионного тока наблюдали распад пучка при переходе в диффузный режим. Дано описание установки, на которой проводили эксперименты, перечислено составляющее ее оборудование, изложена суть экспериментов. Сделан вывод, что переход из режима ускорения в диффузный режим предположительно связан с ростом положительного объемного заряда ионного пучка.

### Ключевые слова

Ускоритель с анодным слоем, напряженность магнитного поля, диффузный режим, режим ускорения, ионный пучок, расходимость ионного пучка, положительный объемный заряд, коллектор ионного тока

Поступила в редакцию 12.04.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

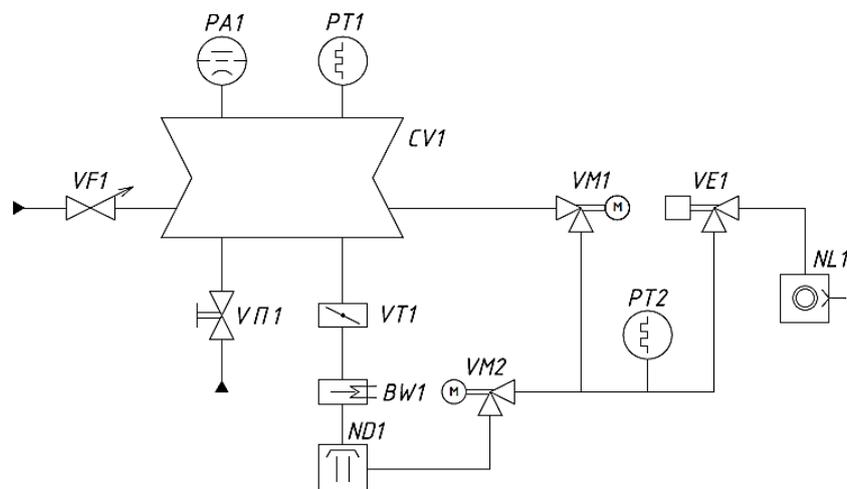
**Введение.** Ускорители с анодным слоем (УАС) имеют много прикладных применений. С их помощью выполняют очистку подложек от адсорбированного слоя атомов и различных загрязнений перед напылением покрытий [1, 2]. Сами тонкопленочные покрытия можно формировать с помощью распыления мишеней из различных материалов ионным пучком УАС [3]. В электронной промышленности эти устройства используют для реактивного ионно-лучевого травления в целях формирования специального рельефа на подложках (обычно кремниевых). Также УАС широко востребованы в оптике при обработке стекол и линз [4, 5]. Благодаря простоте конструкции и технологичности изготовления данные ускорители применяют для обработки больших поверхностей, в том числе рулонных материалов.

Режим работы ускорителя определяется напряженностью магнитного поля в ускорительном канале, разрядным напряжением и расходом плазмообразующего газа. Экспериментально наблюдали различные стационарные режимы работы [6]. Наиболее часто УАС применяют в режиме, характеризующемся наличием направленного ионного пучка с относительно малой расходимостью.

В данной работе представлено исследование влияния напряженности магнитного поля на параметры разряда и ионного пучка, режима работы ускорителя без катода компенсатора.

**Описание экспериментальной установки.** Исследование режимов работы УАС проводили на экспериментальной установке, созданной на базе вакуумного поста установки «Булат-6», схема которой представлена на рис. 1. В состав установки входят: роторно-пластинчатый насос ВМ-18Г, высоковакуумный паромасляный насос НД-250, вакуумметр ВИТ-3 с термопарным преобразователем ПМТ-4М и ионизационным преобразователем ПМИ-2, УАС модели ИИ-4-0,15 («Радикал») с электромагнитной катушкой со средним диаметром ускорительного канала 100 мм, источник питания БП-94, U-образный расходомер, система напуска газа СНА-2, коллектор ионного тока.

Коллектор ионного тока представлял собой конструкцию из двух изолированных друг от друга медных электродов: торцевого и цилиндрического (рис. 2, а). Такое разделение токособирающих поверхностей позволяло не только фиксировать значение ионного тока, но и получать представление о направлении его распространения в пространстве за срезом УАС.



**Рис. 1.** Вакуумная схема установки «Булат»:

*CV1* — вакуумная камера; *NL1* — насос форвакуумный; *ND1* — насос диффузионный; *BW1* — масляная ловушка с водяным охлаждением; *VE1* — аварийный клапан; *VM1* — байпасный клапан; *VM2* — форвакуумный клапан; *VT1* — затвор; *VП1* — клапан напуска воздуха; *VF1* — натекатель; *PA1* — ионизационный вакуумметр; *PT1* — вакуумметр термосопротивления; *PT2* — вакуумметр термопарный

Размеры электродов были выбраны из следующих соображений (рис. 2, б): диаметр цилиндрического электрода должен превышать диаметр ускорительного канала, чтобы весь ионный пучок оказался внутри электродов. Между электродами необходимо предусмотреть зазор, чтобы не препятствовать откачке из полости цилиндрического электрода. Диаметр торцевого электрода должен

быть больше диаметра цилиндрического, чтобы без потерь регистрировать ионный ток через зазор.

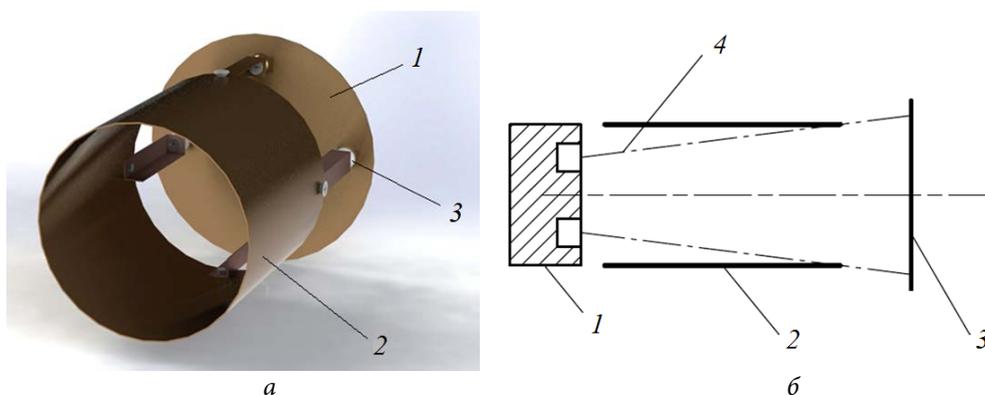


Рис. 2. Коллектор ионного тока:

*a* — общий вид (1 — торцевой электрод; 2 — цилиндрический электрод; 3 — керамический изолятор);  
*б* — иллюстрация работы коллектора ионного тока (1 — торцевой электрод; 2 — цилиндрический электрод; 3 — УАС; 4 — ионный пучок)

Электрическая схема подключения коллектора представлена на рис. 3. Ионный ток снимался с обоих электродов коллектора в одном положении тумблера и только с торцевого электрода в другом. Ток измеряли датчиком тока 5. На коллектор подавали отрицательный потенциал 30 В, чтобы отсечь электронную составляющую тока. Это значение было получено в ходе предварительного эксперимента по определению тока насыщения, т.е. когда ток переставал расти при дальнейшем понижении потенциала коллектора.

Эксперименты проводили с использованием автоматической системы сбора данных на основе микроконтроллера семейства ARM. Блок-схема автоматической системы сбора данных показана на рис. 4. Все необходимые сигналы снимали с соответствующих делителей напряжения и датчиков тока. Использование фильтров низких частот на входе в микроконтроллер позволило уменьшить шумы, а также в сочетании со стабилитронами защитить микросхему от возможных перенапряжений.

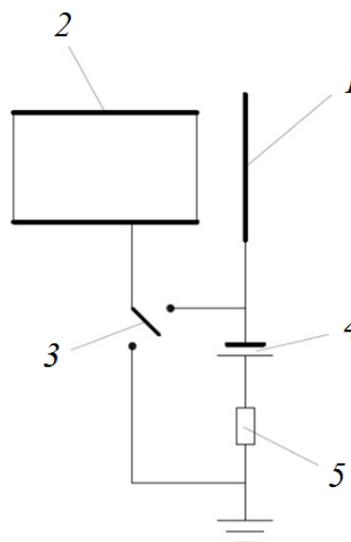


Рис. 3. Электрическая схема подключения коллектор ионного тока:

1 — торцевой электрод; 2 — цилиндрический электрод; 3 — тумблер; 4 — источник напряжения смещения; 5 — датчик тока

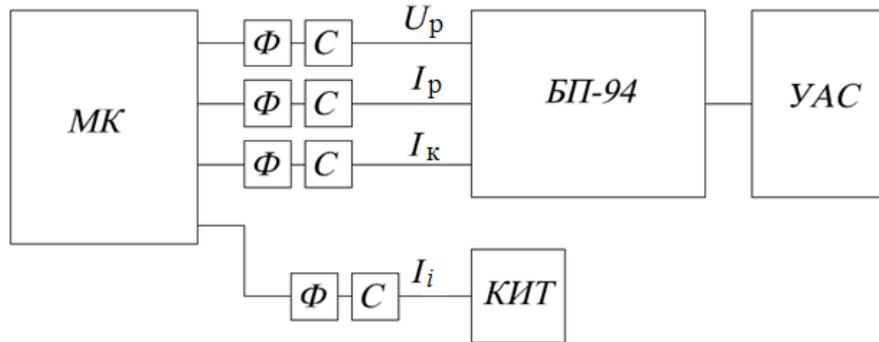


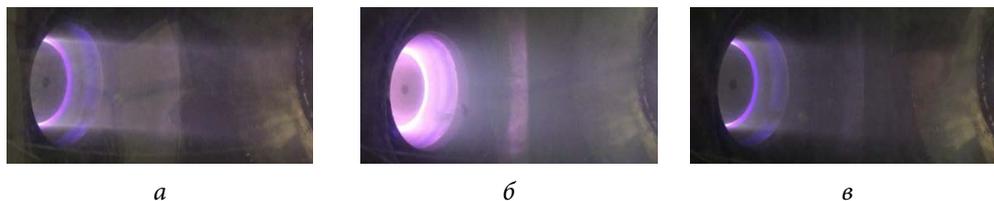
Рис. 4. Блок-схема автоматической системы сбора данных:

МК — микроконтроллер; БП-94 — источник питания УАС; УАС — ускоритель с анодным слоем; КИТ — коллектор ионного тока;  $\Phi$  — фильтр низких частот; С — стабилизатор;  $U_p$  — разрядное напряжение;  $I_p$  — разрядный ток;  $I_k$  — ток катушки магнитной системы;  $I_i$  — ионный ток

**Экспериментальная часть.** Первая часть эксперимента заключалась в визуальном наблюдении поведения ионного пучка при изменении магнитного поля в ускоряющем канале. Магнитное поле варьировалось путем изменения тока через катушку магнитной системы ускорителя в пределах 2,5...0 А, при этом разрядное напряжение и расход плазмообразующего газа поддерживались на постоянном уровне. Давление в вакуумной камере было постоянным и составляло  $(2,9...3,1) \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Расход плазмообразующего газа 0,18...0,19 см<sup>3</sup>/с, разрядное напряжение 2; 3; 4 кВ.

В диапазоне токов катушки 2,2...1,5 А УАС работал в режиме «ускорения». Вблизи величины тока катушки магнитной системы 1,5 А было зафиксировано изменение режима работы ускорителя, характеризующееся увеличением расходимости ионного пучка. Такой режим работы ускорителя далее будем называть диффузным. Дальнейшее уменьшение тока катушки магнитной системы привело к увеличению разрядного тока; параметры разряда стабилизировались — имел место устойчивый диффузный режим. При достижении током катушки значения 0,75 А наблюдалось обратное изменение режима работы ускорителя с формированием направленного ионного пучка — УАС переходил в режим ускорения, но уже при меньшем разрядном токе. Таким образом, наблюдалась определенная последовательность переходов режима работы при уменьшении магнитного поля: режим ускорения — диффузный режим — режим ускорения (рис. 5).

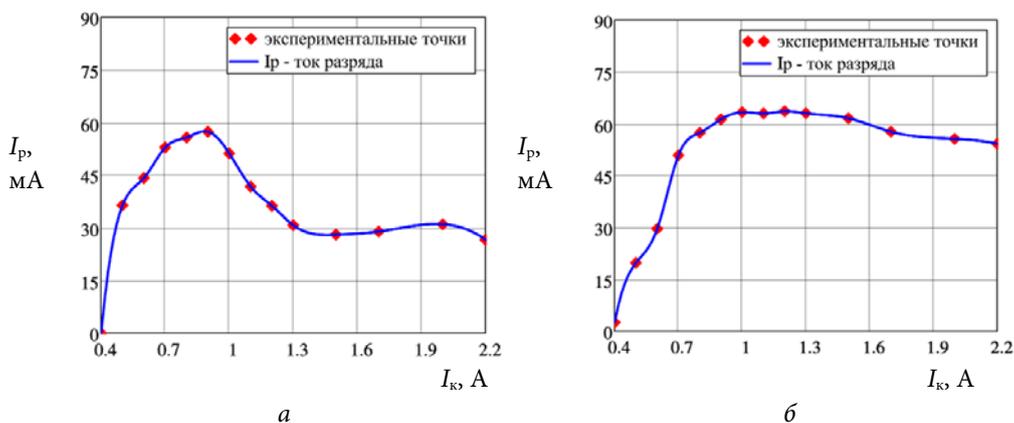
В момент перехода из режима ускорения в диффузный режим и обратно параметры разряда были нестабильны, в частности, напряжение разряда стремилось уменьшиться (поскольку источник питания БП-94 не имеет функции стабилизации напряжения). Чтобы упростить методику проведения эксперимента и избавиться от необходимости поддержания напряжения разряда, провели ряд экспериментов, в которых при постоянном значении напряженности магнитного поля изменяли напряжение разряда.



**Рис. 5.** Фотографии режимов работы УАС при уменьшении магнитного поля и различном значении тока катушки:

*a* — 2 А; *б* — 1 А; *в* — 0,6 А

Уровень напряженности магнитного поля изменяли ступенчато путем установления соответствующего тока магнитной катушки, лежащего в диапазоне 0,4...2,2 А, с шагом 0,1 А. Для каждого значения тока катушки плавно изменяли напряжение разряда в диапазоне от 0 до 3,5 кВ. Диапазон напряжений проходили дважды, чтобы измерить ионный ток на торцевой электрод коллектора и суммарный ионный ток. Автоматическая система сбора данных вела запись следующих параметров разряда: ток катушки магнитной системы, разрядное напряжение, разрядный ток, ионный ток. После соответствующей обработки данных получены зависимости тока разряда и ионного тока от напряжения разряда при заданном токе катушки магнитной системы. Затем на основе этих зависимостей построены зависимости тока разряда и ионного тока от тока катушки магнитной системы для различных разрядных напряжений (рис. 6, *a*, *б*). Значения в экспериментальных точках переходов из одного режима в другой хорошо согласуются с результатами, полученными в первой части эксперимента (рис. 7).

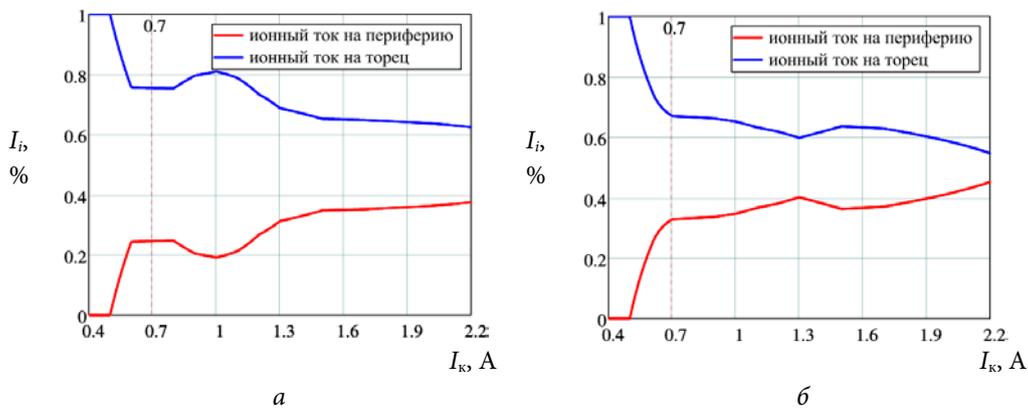


**Рис. 6.** Зависимость разрядного тока от тока катушки магнитной системы:

*a* — при напряжении разряда 1300 В; *б* — при напряжении разряда 3500 В

**Обсуждения и результаты.** Как следует из проведенных экспериментов, ускоритель с анодным слоем может работать в различных режимах. Первый режим — режим ускорения, при работе в котором наблюдается ярко выраженный направленный пучок ускоренных частиц, как показано на рис. 5, *a*, *в*. Вто-

рой режим — диффузный, он характеризуется наличием ярко светящейся области вблизи ускоряющего канала и отсутствием направленного пучка ускоренных частиц (см. рис. 5, б). Показано, что существует диапазон значений напряженности магнитного поля в ускорительном канале при постоянных значениях разрядного напряжения и расхода газа, в котором ускоритель работает в режиме, характеризующимся увеличением угла расходимости ионного пучка (диффузный режим). Для разрядного напряжения 1,3 кВ и расхода газа 0,18...0,19 см<sup>3</sup>/с этот диапазон лежит в пределах значений напряженности магнитного поля, соответствующих токам катушки магнитной системы 0,75...1,50 А (см. рис. 6, а). При разрядном напряжении 3,5 кВ и расходе газа 0,18...0,19 см<sup>3</sup>/с УАС работал в режиме ускорения и переходов не наблюдалось (см. рис. 6, б). Результаты измерений с помощью двухэлектродного коллектора ионного тока хорошо отражают переходы из одного режима в другой. При переходе в диффузный режим доля ионного тока на торцевой электрод уменьшалась, в то время как доля ионного тока на цилиндрический электрод коллектора возрастала. Возвращение УАС в режим ускорения, наоборот, сопровождалось увеличением доли ионного тока на торцевой электрод и уменьшением доли ионного тока на цилиндрический электрод. Это соответствовало визуально наблюдаемому «распаду» и обратному формированию направленного ионного пучка. Таким образом, на графике, приведенном на рис. 7, а, можно наблюдать минимум ионного тока на торцевой электрод и максимум на цилиндрический в диффузном режиме. На рис. 7, б показан аналогичный график для напряжения 3,5 кВ, когда переход визуально не наблюдался. Характерные минимум и максимум тока здесь отсутствуют.



**Рис. 7.** Зависимость отношения ионного тока на цилиндрический электрод к общему ионному току и ионного тока на торцевой электрод к общему ионному току:

а — при напряжении разряда 1300 В; б — при напряжении разряда 3500 В

Причиной возникновения диффузного режима работы может быть образование объемного положительного заряда, тормозящего ускоренные ионы, часть которых возвращается на катод ускорителя. Предположение о торможении ионного пучка положительным объемным зарядом позволяет объяснить пере-

распределение токов между торцевым и цилиндрическим электродами коллектора, наблюдаемое в эксперименте.

**Выводы.** В результате проведенных исследований установлено, что при значениях разрядного напряжения УАС 0...3,5 кВ, расходе аргона 0,18...0,19 см<sup>3</sup>/с и давлении в вакуумной камере  $(2,9...3,1) \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст., существуют два диапазона значений напряженности магнитного поля, в которых реализуется режим ускорения ионов, характеризующийся наличием направленного ионного пучка с малой расходимостью. Существуют режим ускорения ионов с «низким» магнитным полем (ток катушки 0...0,75 А) и режим ускорения с «высоким» магнитным полем (ток катушки 1,5...2,2 А). При промежуточных значениях тока катушки наблюдается диффузный режим работы источника ионов, характеризующийся увеличением разрядного тока и угла расходимости ионного пучка. Переход из режима ускорения в диффузный режим предположительно связан с ростом положительного объемного заряда ионного пучка.

### Литература

- [1] Крылов П.Н., Закирова Р.М., Федотова И.В., Гильмутдинов Ф.З. Влияние ионной обработки на свойства пленок  $\text{In}_2\text{O}_3$ : Sn. *Физика и техника полупроводников*, 2013, т. 47. № 6, с. 859–863.
- [2] Зайцева Е.А., Закирова Р.М., Крылов П.Н., Лебедев К.С., Федотова И.В. Влияние ионной обработки в процессе ВЧ магнетронного распыления на толщину и показатель преломления ИТО пленок. *Вестник удмуртского университета. Серия физика и химия*, 2012, № 4-2, с. 26–30.
- [3] Достанко А.П., Агеев О.А., Голосов Д.А., Завадский С.М., Замбург Е.Г., Вакулов Д.Е., Вакулов З.Е. Электрические и оптические свойства пленок оксида цинка, нанесенных методом ионно-лучевого распыления оксидной мишени. *Физика и техника полупроводников*, 2014, т. 48, № 9, с. 1274–1279.
- [4] Крынин А.Г., Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Кисляков П.П. Прозрачные интерференционные покрытия для функциональных материалов остекления. *Труды ВИАМ*, 2013, № 11, с. 5.
- [5] Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К. Холловский ускоритель с фокусированным пучком для наноразмерной обработки крупногабаритных зеркал оптических телескопов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № SP3, с. 35–41.
- [6] Shabalin A., Amann M., Kishinevsky M., Nauman K., Quinn C. Industrial ion sources and their application for DLC coating. *SVC — 42nd Annual Technical Conference Proc. Chicago, Illinois*, 1999. 4 p.

**Омельницкий Дмитрий Аркадьевич** — студент кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Подгуйко Николай Андреевич** — студент кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Марахтанов Михаил Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**THE INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD STRENGTH  
ON THE ION BEAM GENERATION IN THE SINGLE-STAGE ACCELERATOR  
WITH THE ANODE LAYER**

**D.A. Omelnitskiy**

dmitry.omelnitskiy@yandex.ru

SPIN-code: 3097-3813

**N.A. Podguyko**

podguyko.nikolay@mail.ru

SPIN-code: 6033-2190

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

*The article presents the investigation of the operation modes of the accelerator with the anode layer. The experiments revealed that there exists such a range of the magnetic field strength in the accelerator channel of the accelerators with the anode layer, in which the accelerator operates in the so-called diffusive mode, and there is an acceleration mode beyond this range. Through the use of the ion current collector we have observed a disintegration of the beam during the transition into the diffusive mode. The article describes an installation used for conducting the experiments, specifies the equipment it consists of, and outlines the essence of the experiments. We deduce that the transition from the acceleration mode into the diffusive mode is allegedly associated with the buildup of the ion beam positive space charge.*

**Keywords**

*Accelerator with the anode layer, magnetic field strength, diffusive mode, acceleration mode, ion beam, ion beam divergence, positive space charge, ion current collector*

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

---

**References**

- [1] Krylov P.N., Zakirova R.M., Fedotova I.V., Gil'mutdinov F.Z. Effect of ion treatment on the properties of  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  films. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2013, vol. 47, no. 6, pp. 859–863. (Eng. version: *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 6, pp. 870–874.)
- [2] Zaytseva E.A., Zakirova R.M., Krylov P.N., Lebedev K.S., Fedotova I.V. The effect of ion treatment on thickness and refractive index of ITO films during RF magnetron sputtering. *Vestnik udmurtskogo universiteta. Seriya fizika i khimiya* [The Bulletin of Udmurt University. Physics. Chemistry], 2012, no. 4-2, pp. 26–30.
- [3] Dostanko A.P., Ageev O.A., Golosov D.A., Zavadskiy S.M., Zamburg E.G., Vakulov D.E., Vakulov Z.E. Electrical and optical properties of zinc-oxide films deposited by the ion-beam sputtering of an oxide target. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2014, vol. 48, no. 9, pp. 1274–1279. (Eng. version: *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 9, pp. 1242–1247.)
- [4] Krynin A.G., Khokhlov Yu.A., Bogatov V.A., Kislyakov P.P. Transparent interference coating for functional glass materials. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2013, no. 11, pp. 5.
- [5] Vorob'yev E.V., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Makhkhanov M.K. Hall current accelerator with focused beam for nano-processing of large mirrors for optical telescopes. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostroyeniya*

*nostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, no. SP3, pp. 35–41.

- [6] Shabalin A., Amann M., Kishinevsky M., Nauman K., Quinn C. Industrial ion sources and their application for DLC coating. *SVC — 42nd Annual Technical Conference Proc.*, Chicago, Illinois, 1999. 4 p.

**Omelnitskiy D.A.** — student, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Podguyko N.A.** — student, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — M.K. Marakhtanov, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.