

04.1;12.1;13.3;13.4

## Механизм ионизации пучковой плазмы, генерируемой электронным пучком в среднем вакууме

© А.В. Тюньков, А.А. Андронов, Ю.Г. Юшков, Д.Б. Золотухин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия  
E-mail: ZolotukhinDen@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 14 марта 2023 г.

Принято к публикации 14 марта 2023 г.

Представлены результаты измерений ионного состава плазмы, генерируемой ускоренным электронным пучком в области давлений среднего вакуума (форвакуума). Приведены расчеты вклада в механизм ионизации плазменных электронов и электронов пучка. Сопоставление расчетных данных с экспериментальными привело к выводу об определяющем вкладе электронов пучка в процесс ионизации.

**Ключевые слова:** пучковая плазма, форвакуум, электронный пучок, плазменный источник электронов.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.10.55427.19539

При транспортировке килоэлектронвольтовых электронных пучков сквозь газовую атмосферу в диапазоне давлений среднего вакуума 1–100 Па генерируется плотная пучковая плазма с температурой электронов несколько эВ [1], обладающая рядом уникальных параметров и свойств. Высокая эффективность диссоциации молекул и ионизация продуктов их распада в пучковой плазме [2], а также установившийся положительный относительно заземленных стенок вакуумной камеры потенциал плазмы [3] делают такую плазму привлекательной для использования в технологиях ионно-плазменной модификации материалов [4,5].

Практический интерес представляет процесс испарения электронным пучком высокотемпературных керамик и металлов с последующей ионизацией испаряемого материала и синтеза диэлектрических покрытий [6,7]. Ионный состав пучковой плазмы в процессе электронно-лучевого испарения оказывает влияние на процесс формирования и параметры такого рода покрытий, поскольку подачей отрицательного либо знакопеременного смещения на подложку можно управлять свойствами получаемых покрытий. Именно поэтому критически важны достоверные измерения масс-зарядового состава ионов и выявление основных физических механизмов, ответственных за ионизационные процессы в пучковой плазме. Последнему и посвящены исследования, представленные в настоящей работе.

Идея эксперимента заключалась в напуске пары инертных газов (аргон–гелий) в вакуумную камеру с образованием газовой смеси с равными парциальными давлениями уровня 1 и 1.5 Па. Для этого использовались две отдельные газовые магистрали, позволявшие подавать в камеру каждый из рабочих газов. В откачанную до остаточного давления камеру сначала напускался аргон до необходимого давления,

которое отслеживалось вакуумметром ВИТ-2, а затем гелий, парциальное давление которого отслеживалось как приращение полного давления в камере. Выбор для проведения исследований инертных газов был связан с необходимостью исключения влияния процессов диссоциации. С целью явного прослеживания механизма ионизации использовалась смесь газов аргона и гелия как газов с резким различием потенциала и сечения ионизации.

В ходе генерации пучковой плазмы измерялся масс-спектр ионов и фиксировалось долевое отношение количества ионных компонентов рабочей смеси. Данное отношение сравнивалось с теоретическими оценками отношения вероятностей ионизации указанной выше пары газов плазменными электронами и электронами пучка. Для плазменных электронов функция распределения по энергиям предполагалась максвелловской, а температура — равной 1.5 эВ [1]. Электроны пучка практически моноэнергетичны, и их энергия намного превышает энергию электронов, соответствующую максимуму сечения ионизации. В этом случае сравнение вероятностей ионизации электронным пучком будет определяться отношением сечений ионизации каждого из газов при фиксированной энергии электронов.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Для генерации пучковой плазмы использовался форвакуумный плазменный источник электронов на основе разряда с полым катодом, функционирующий в непрерывном режиме [8]. Ток электронного пучка поддерживался на уровне 50 мА. Существенная разница между энергиями плазменных электронов и электронов пучка обеспечивалась значением ускоряющего напряжения в экспериментах на уровне 10 кВ. Предельный вакуум 0.027 Па обеспечивался турбомолекулярным насосом nEXT300D со скоростью откачки 300 л/с.

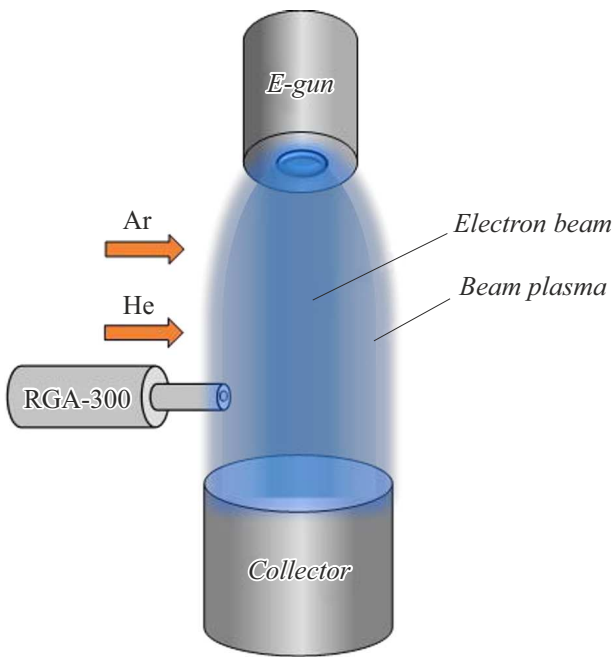


Рис. 1. Схема эксперимента.

Для анализа масс-зарядового состава плазмы использовался модернизированный квадрупольный масс-спектрометр анализатора остаточной атмосферы RGA-300. Принцип действия и изменения в конструкции штатного масс-спектрометра подробно изложены в [8].

Для оценки роли плазменных электронов в образовании пучковой плазмы для выбранной нами пары газов воспользуемся известным выражением выхода ионизации  $v_i$  для энергий электронов, близких к энергии ионизации. Это выражение получено в предположении максвелловского распределения электронов по энергиям и линейной аппроксимации зависимости сечения ионизации электронным ударом от энергии электронов [9]:

$$v_i = n_e n_a C_i \left( \frac{8kT_e}{\pi m_e} \right) (eU_i + 2kT_e) \exp\left(-\frac{eU_i}{kT_e}\right), \quad (1)$$

где  $C_i$  — константа в линейной зависимости сечения ионизации от температуры,  $n_a$  — плотность молекул газа,  $n_e$  — концентрация плазменных электронов,  $U_i$  — потенциал ионизации.

При одинаковом парциальном давлении каждого из газовых компонентов в смеси сравнение вероятностей ионизаций этих газов  $P_{Ar}$  и  $P_{He}$  сводится к отношению скоростей их ионизации:

$$\frac{P_{Ar}}{P_{He}} = \frac{v_{iAr}}{v_{iHe}} = \frac{C_{iAr}}{C_{iHe}} \left( \frac{eU_{iAr} + 2kT_e}{eU_{iHe} + 2kT_e} \right) \times \exp\left(\frac{eU_{iHe} - eU_{iAr}}{kT_e}\right). \quad (2)$$

С учетом отношения констант в линейной зависимости сечения ионизации от температуры  $C_{iAr}/C_{iHe} = 2.0/0.13$

расчеты показали, что отношение вероятностей ионизации составляет  $P_{Ar}/P_{He} = 3677$ .

Для сечения ионизации атомов из основного состояния воспользуемся аппроксимацией, предложенной Лотцем [10]:

$$\sigma(E) = \sum_{i=1}^N a_i q_i \frac{\ln \frac{E}{U_a}}{EU_a} \left\{ 1 - b_i \exp\left(-c_i \left(\frac{E}{U_a} - 1\right)\right) \right\}, \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — константы эмпирической формулы [10],  $q_i$  — число эквивалентных электронов на оболочке,  $E$  — энергия электронов,  $U_a$  — потенциал ионизации. Формула (3) описывает однократную ионизацию атомов, и именно присутствие в основном однозарядных ионов характерно для пучковой плазмы среднего вакуума.

На рис. 2 представлены результаты данной аппроксимации. Видно, что отношение сечений ионизации атомов аргона и гелия составляет 5.5, что в случае ионизации газа электронами пучка равно отношению их вероятностей ионизации  $P_{Ar}/P_{He} = 5.5$ .

Из приведенных выше оценок видно, что отношение вероятностей ионизации аргона и гелия плазменными электронами (3677) сильно отличается от соответствующего отношения, вычисленного для пучковых электронов (5.5). Таким образом, измерив экспериментально это отношение, в зависимости от того, к какому из вычисленных значений будет ближе экспериментальное отношение, можно сделать вывод о преобладании того или иного механизма ионизации (т.е. плазменными или пучковыми электронами) в пучковой плазме среднего вакуума.

На рис. 3 представлены результаты исследований масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы смеси газов (аргон–гелий) для двух парциальных давлений. Исследования показали, что масс-спектры практически идентичны, за исключением абсолютных значе-

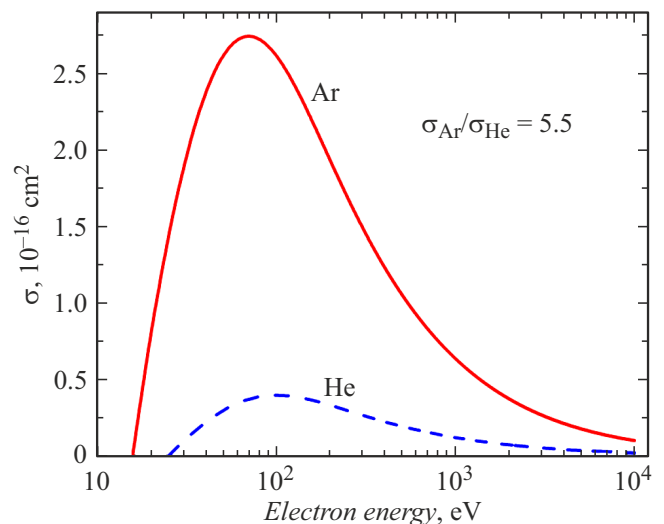


Рис. 2. Аппроксимации для сечений ионизации атомов аргона и гелия.

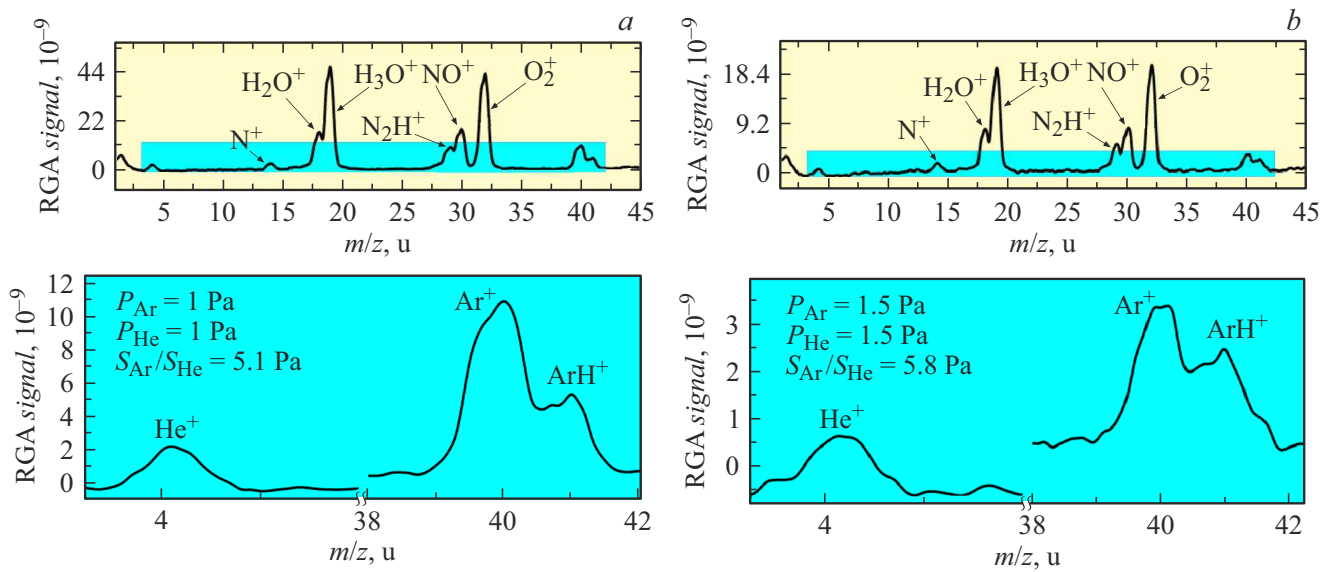


Рис. 3. Результаты масс-спектрометрии при парциальных давлениях газов 1 (а) и 1.5 Па (б).

ний амплитуд пиков спектров, полученных при различных парциальных давлениях. Уменьшение амплитуды пиков связано с рассеянием части ионного потока, вызванным увеличением полного давления в камере и соответственно увеличением числа столкновений ионов с нейтралами рабочей смеси и остаточной атмосферы.

Отношение количества ионов аргона к количеству ионов гелия, выраженное площадью под кривой данных пиков, в случае парциальных давлений газов 1 Па составило 5.1 (рис. 3, а), а для парциального давления 1.5 Па — 5.8 (рис. 3, б).

Таким образом, результаты расчетов и экспериментов указывают на то, что основной вклад в ионизацию атомов вносят именно электроны пучка. При ионизации пучковой плазмы плазменными электронами отношение вероятностей ионизации пар рабочих газов отличается на несколько порядков от отношения вероятностей ионизации при ионизации электронным пучком. Полученные экспериментальные значения отношения количества ионов аргона и ионов гелия составили 5.1 и 5.8 для соответствующих значений парциальных давлений в 1 и 1.5 Па. Данный экспериментальный факт указывает на определяющий вклад электронов пучка в механизме ионизации пучковой плазмы. Незначительное отклонение теоретических и экспериментальных результатов связано с неточностями аппроксимации сечения ионизации и возможными погрешностями в проведении экспериментов. Результаты настоящей работы позволят в дальнейшем интерпретировать результаты масс-спектрометрических исследований пучковой плазмы и подбирать оптимальные параметры при модификации поверхностей при воздействии ионного потока.

### Финансирование работы

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ в рамках конкурса FEWM-2021-0013.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov, *Phys. Plasmas*, **26** (5), 053512 (2019). DOI: 10.1063/1.5095165
- [2] C. Muratore, D. Leonhardt, S.G. Walton, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, R.A. Meger, *Surf. Coat. Technol.*, **191** (2-3), 255 (2005). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.02.026
- [3] S.G. Walton, D. Leonhardt, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, D.P. Murphy, R.A. Meger, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **19** (4), 1325 (2001). DOI: 10.1116/1.1345901
- [4] A.V. Tyunkov, D.B. Zolotukhin, Y.G. Yushkov, E.V. Yakovlev, *Vacuum*, **180**, 109573 (2020). DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109573
- [5] A.V. Tyunkov, D.A. Golosov, D.B. Zolotukhin, A.V. Nikonenko, E.M. Oks, Y.G. Yushkov, E.V. Yakovlev, *Surf. Coat. Technol.*, **383** 125241 (2020). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125241
- [6] Y.G. Yushkov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, D.B. Zolotukhin, *Ceram. Int.*, **45** (8), 9782 (2019). DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.02.014
- [7] Y.G. Yushkov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, D.B. Zolotukhin, *Coatings*, **12** (2), 130 (2022). DOI: 10.3390/coatings12020130

- [8] A.V. Tyunkov, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks, Yu.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin, *Vacuum*, **163**, 31 (2019).  
DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.02.010
- [9] С.М. Левитский, *Сборник задач и расчетов по физической электронике* (Изд-во Киев. ун-та, Киев, 1964).
- [10] W. Lotz, *Z. Phys.*, **206** (2), 205 (1967).