

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ ХРОМА СУБМИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С ВЫСОКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ МОЩНОСТИ

А.В. ГУРУЛЕВ, А.И. РЯБЧИКОВ

Томский политехнический университет

E-mail: avg72@tpu.ru

Ионная имплантация обладает уникальными свойствами и способна к контролируемому изменению элементного, фазового составов, а также микроструктуры поверхности материала. Метод, основанный на синергии высокоинтенсивной имплантации ионов и энергетического воздействия пучка на поверхность направлен на создание глубоких ионно-модифицированных слоев [1]. Использование импульсных и импульсно-периодических пучков ионов металлов и газов субмиллисекундной длительности с высокой импульсной плотностью мощности является ключом для реализации данного метода. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по формированию импульсно периодических высокоинтенсивных пучков ионов хрома из плазмы вакуумной дуги.

В настоящее время циркониевый сплав, содержащий 1% ниобия (Zr-1%Nb) является основным материалом для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) водо-водяных реакторов. Хром способен защитить ТВЭЛы от высокотемпературного окисления. Синергия высокоинтенсивной имплантации пучков ионов хрома высокой плотности мощности субмиллисекундной длительности с одновременным энергетическим воздействием на поверхность ионного пучка предполагает формирование глубокого ионно-легированного слоя за счет радиационно-стимулированной диффузии, эффектов энергетического воздействия на поверхность и сохранения микроструктуры материала мишени за пределами ионно-легированного слоя. В работе представлены данные по влиянию энергетического воздействия пучка ионов хрома на микротвердость и износостойкость поверхности.

Исследования осуществлялись на комплексной установке для ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов. В качестве генератора плазмы, использовался вакуумно-дуговой генератор плазмы ионно-плазменного источника «Радуга-5». Экстракция ионов со свободной плазменной границы и их баллистическая фокусировка осуществлялась с помощью заземленного сеточного электрода с радиусом части сферы 130 мм, размером ячейки $1,2 \times 1,1 \text{ мм}^2$ и прозрачностью 60%. Пространство дрейфа пучка при баллистической фокусировке ограничено цилиндром радиусом 100 мм и длиной 175 мм.

Исследования проводились при токе непрерывного дугового разряда 170 А. Для формирования ускоряющих потенциалов использовались два генератора импульсов. Высокочастотный генератор с частотой 1 кГц с длительностью импульса 100 мкс, использовался формирования потенциалов положительной полярности с амплитудой в диапазоне от 100 до 1800 В. Высоковольтный генератор импульсов обеспечивал потенциалы смещения амплитудой от 5 до 35 кВ, длительностью 450 мкс. В целях исключения перегрева коллектора в условиях баллистической фокусировки пучка частота импульсов ускоряющего напряжения не превышала 2 имп./с. В целях повышения точности измерений осциллограммы тока усреднялись с помощью математического аппарата осциллографа LeCroy. В случае высокочастотного генератора усреднение осуществлялось по 1024 импульсам. При высоких амплитудах потенциалов смещения в целях исключения перегрева мишени усреднение осуществлялось по 16 импульсам.

Воздействие баллистически фокусируемого пучка на мишень сопровождается ионно-электронной эмиссией. Ионно-электронная эмиссия играет важную роль в процессах нейтрализации пространственного заряда ионного пучка. При ускоряющих напряжениях в диапазоне до 2 кВ, как показано в работах [2, 3], уход электронов плазмы в ускоряющий зазор через ячейки сетки приводит к формированию виртуального анода и срыву транспортировки баллистически фокусированного пучка на мишень. Ионно-электронная эмиссия с мишени при

малых энергиях ионов не обеспечивает компенсацию потери плазменных электронов. В данных экспериментах при формировании пучка ионов хрома энергия ионов с учетом среднего зарядового состава плазмы варьируется от 10 до 70 кэВ. Многократный рост энергии ионов должен способствовать увеличению ионно-электронной эмиссии и улучшению стабильности транспортировки баллистически сфокусированного ионного пучка при больших длительностях импульса. Определение ионно-электронной эмиссии важно и для правильной оценки плотности мощности ионного пучка, поскольку измеряемый коллектором ток складывается из тока ионов и тока ионно-электронной эмиссии.

Для измерения амплитуды ионного тока во всем диапазоне ускоряющих напряжений от 100 В до 35 кВ использовался сплошной коллектор диаметром 277 мм. Диаметр анода дугового испарителя был равен 178 мм. Таким образом, сплошной коллектор полностью перекрывал поток плазмы, выходящий из дугового испарителя.

Результаты исследования изменения тока на сплошной коллектор в зависимости от амплитуды ускоряющего напряжения при токе дугового разряда 170 А представлены на рисунке 1.

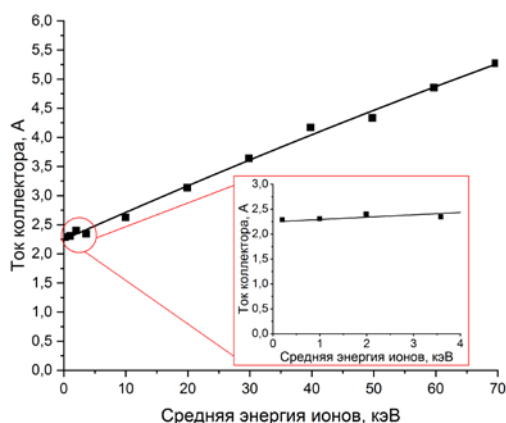


Рисунок 1 - Полный ток на сплошном коллекторе в зависимости от ускоряющего напряжения, при токе вакуумно-дугового разряда 170 А.

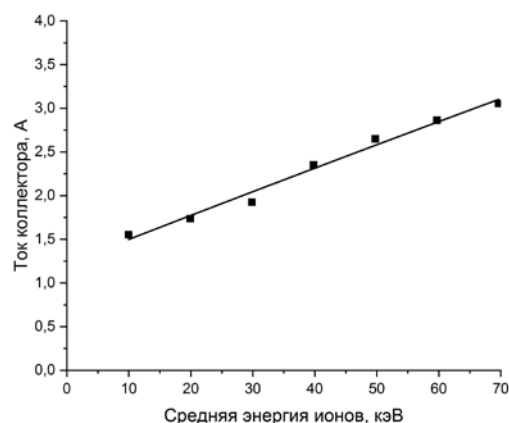


Рисунок 2 – Зависимость тока на коллектор от средней энергии ионов при баллистической фокусировке ионного пучка формируемого из плазмы вакуумной дуги при токе разряда 170 А.

При малых потенциалах смещения, когда отсутствует ионно-электронная эмиссия, коллектором измеряется ионный ток насыщения из плазмы вакуумной дуги. В диапазоне напряжений от 100 В до 1800 В он был равен около 2,25 А. Увеличение амплитуды ускоряющего напряжения в диапазоне от 5 до 35 кВ приводит к росту энергии ионов в пучке от 10 до 70 кэВ и как видно из рисунка 1 регистрируемый на коллекторе ток при этом существенно возрастает. Увеличение тока на коллектор обусловлено ионно-электронной эмиссией. При токе дугового разряда 170 А, как следует из рисунка 1, максимальный коэффициент ионно-электронной эмиссии при энергии ионов 70 кэВ равен примерно 1,33.

Результаты измерения динамики изменения тока на коллектор в условиях баллистической фокусировки пучка ионов хрома представлены на рисунке 2. Наличие сеточного электрода при малых потенциалах смещения в диапазоне нескольких сотен вольт приводило к формированию слоя разделения заряда шириной сравнимой с размерами ячеек сетки. Это исключало возможность эффективного формирования и транспортировки баллистически фокусируемого пучка до коллектора. Поэтому измерения тока на коллектор проводились при изменении ускоряющего напряжения в диапазоне от 5 до 35 кВ, что обеспечивало изменение энергии ионов от 10 до 70 кэВ. Как и в случае сплошного коллектора, увеличение энергии

ионов приводит примерно пропорциональному увеличению тока. Сравнение данных рисунка 2 и рисунка 1 позволяет сделать вывод, что при увеличении плотности ионного тока на несколько порядков в результате баллистической фокусировки, коэффициент ионно-электронной эмиссии с коллектора не изменился. Важно отметить, что с одной стороны наличие ионно-электронной эмиссии может повлиять на точность измерения тока пучка ионов при больших ускоряющих напряжениях. Но с другой стороны, ионно-электронная эмиссия обеспечивает стабильное формирование и транспортировку пучков ионов хрома при больших длительностях импульса. При малых ускоряющих напряжениях, не превышающих нескольких киловольт, экспериментально и численным моделированием наблюдалось формирование виртуального анода с укорочением длительности импульса до 10-15 мкс [4]. Срыв транспортировки пучка был связан с уходом электронов плазмы компенсирующих пространственный заряд ионного пучка ускоряющий зазор за счет проникновения электрического поля в пространство дрейфа через ячейки сетки. В данных экспериментах, при увеличении ускоряющего напряжения за счет возникновения ионно-электронной эмиссии обеспечивается компенсация потерь плазменных электронов и сохраняется условия для эффективной нейтрализации пространственного заряда пучка и его транспортировке в условиях баллистической фокусировки при длительностях импульса 450 мкс. Можно предположить, что это соответствует квазистационарному состоянию и обеспечивает возможность формирования баллистически фокусируемого пучка при любой длительности импульса.

Полученные результаты демонстрируют возможность формирования высокоинтенсивного импульсно-периодического пучка ионов хрома с импульсной плотностью мощности превышающей 100 кВт/см² с плотностью энергии в импульсе достигающей 45 Дж/см².

Исследования по модификации сплава Zr1 %Nb импульсно-периодическим энергетическим воздействием пучка ионов хрома с высокой импульсной плотностью мощности проводились в режиме облучения неподвижной мишени с частотой импульсов до 35 имп./с. Исследовалось как энергетическое воздействие пучка ионов высокой импульсной мощности при временах импульсно-периодического облучения в диапазоне 1-4 минуты, так и синергия высокоинтенсивной имплантации в течение одного часа с одновременным импульсно-периодическим энергетическим воздействием пучка ионов хрома на поверхность мишени. Исследование микротвердости, коэффициента трения и износостойкости показали значительное улучшение микроскопических характеристик поверхности как при энергетическом воздействии пучка на мишень, так и особенно при синергии высокоинтенсивной имплантации ионов и энергетического воздействия пучка.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного Фонда (грант РНФ № 22-19-00051). <https://rscf.ru/project/22-19-00051>.

Список литературы

1. Ryabchikov A. I. High-Intensity Implantation With an Ion Beam's Energy Impact on Materials // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – Vol. 49, №. 9. – P. 2529-2534.
2. Ryabchikov A. I., Anan'in P.S., Dektyarev S.V., et al. High intensity metal ion beam generation // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 447-453.
3. Koval T. V., Ryabchikov A. I., Shevelev A.E., et al. Formation of high intensity ion beams with ballistic focusing // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 927, №. 1. – P. 012082.
4. Ryabchikov A. I., Anan'in P.S., Dektyarev S.V., et al. Plasma-immersion formation of high-intensity ion beams // Technical Physics Letters. – 2017. – Vol. 43. – P. 1051-1053.