

Предисловие

Настоящий тематический выпуск журнала посвящен памяти заслуженного деятеля науки РФ, доктора физико-математических наук, профессора Щанина Петра Максимовича, безвременно ушедшего из жизни в августе 2019 г. Тематический выпуск содержит статьи коллег, учеников и соратников Петра Максимовича по разделам науки, где он был либо непосредственно занят на протяжении своей творческой жизни, либо внимательно следил за развитием этих научных направлений, участвуя в работе конференций, консультируя и оказывая помощь в реализации новых научных идей.

Весь жизненный путь Петра Максимовича может быть примером служения науке. После окончания в 1956 г. Томского политехнического института (ТПИ, в настоящее время Национальный исследовательский Томский политехнический университет) он остался работать в Институте ядерной физики и автоматики при ТПИ, войдя в состав коллектива, создававшего электронный синхротрон «Сириус», который на момент запуска в 1965 г. являлся самым мощным в своем классе ускорителей в стране и одним из крупнейших в мире. В 60-е годы Петр Максимович был главным инженером «Сириуса», обеспечивая работу всех его основных служб, модернизацию и подготовку научных экспериментов. Занимаясь разработкой и созданием микротрона в качестве инжектора для «Сириуса», он успешно защитил кандидатскую диссертацию по этой тематике, что в дальнейшем во многом определило его пристрастие к изучению процессов движения заряженных частиц в магнитных полях различных конфигураций. Параллельно Петр Максимович начал преподавательскую деятельность в качестве доцента кафедры физической электроники ТПИ, где он читал курсы лекций по взаимодействию частиц с электромагнитными полями, по электронной оптике, по вакуумной и криогенной технике. В это же время на кафедре им была создана научная группа, которая занималась применением электронных и ионных источников, в том числе для космических исследований. По этим вопросам он стал плотно взаимодействовать с профессором Юлием Ефимовичем Крейнделем. В 1977 г. при создании Института сильноточной электроники СО РАН его директор-организатор, будущий академик РАН, Геннадий Андреевич Месяц предложил Ю.Е. Крейнделю и П.М. Щанину создать отдел плазменной эмиссионной электроники, в котором Петр Максимович возглавил лабораторию с одноименным названием. На протяжении более чем четверти века Петр Максимович успешно руководил лабораторией, занимаясь разработкой электронных, ионных и плазменных источников, параметры которых соответствовали, а зачастую превосходили, характеристики лучших зарубежных аналогов. Многие из этих разработок были изготовлены и поставлены как в отечественные, так и в зарубежные научные центры. В 1986 г. Петр Максимович успешно защитил докторскую диссертацию «Импульсные ускорители с плазменными катодами, генерирующие электронные пучки большого сечения», заложив основы нового научно-технического направления, которое в настоящее время успешно развивается.

Петр Максимович воспитал учеников, которые сами стали известными учеными и возглавили научные коллективы. Статьи настоящего номера посвящены развитию плазменной эмиссионной электроники, физики разрядов низкого давления, генерации низкотемпературной плазмы, использованию плазмы и эмитированных ею заряженных частиц в различных процессах, составляющих основы новых технологий и изделий. Проанализируем лишь основные направления исследований, результаты которых приведены в настоящем номере. Для краткости будем называть лишь фамилию первого автора статей, отсылая за подробностями к самой статье.

В статье Н.Н. Коваля рассмотрены устройства, принцип действия, основные характеристики и особенности работы семейства электронных источников с сеточным плазменным эмиттером, отличающихся рядом важных преимуществ перед другими источниками электронов и обеспечивающих параметры, удовлетворяющие требованиям их использования как в научных, так и техно-

логических целях. Показан прогресс развития этих источников и перспективы их дальнейшего совершенствования.

В обзоре Я.Е. Красика подробно рассмотрены несколько типов электронных источников с плазменными эмиссионными структурами. Исследования проведены с использованием широкого спектра современных методов и методик, что позволило однозначно ответить на вопросы, вызывавшие дискуссию в научных кругах. В обзоре приведены параметры сильноточных электронных пучков, достигнутые с использованием электронных источников на основе исследованных плазменных катодов.

Современное состояние исследований в области генерации электронных пучков в форвакуумном диапазоне давлений приведено в обзоре В.А. Бурдовицина. Такие источники электронов не имеют аналогов, что определяет их сферу применений. Авторы анализируют проблемы и формулируют задачи дальнейших исследований.

Обзорная статья С.Л. Косогорова посвящена ускорителям электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда, который генерирует пучки большого сечения. Серия таких ускорителей разработана для применения как в электроионизационных лазерах, так и технологических целях. Обсуждаются основные достоинства таких ускорителей по сравнению с ускорителями на основе термоэмиттеров, приведены особенности конструкции, основные параметры и режимы их работы.

В статье И.С. Егорова приведены результаты использования импульсного электронного пучка, генерируемого ускорителем со взрывоэмиссионным катодом, для радиационной обработки семян пшеницы с целью их обеззараживания. Особенностью полученного электронного пучка является достаточно широкий спектр кинетической энергии ускоренных электронов, что позволяет найти оптимальные режимы облучения семян и что резко снижает их зараженность грибковыми культурами с сохранением удовлетворительной всхожести.

Детальные исследования формирования и транспортировки ионных пучков металлов при относительно низкой (до нескольких килоэлектронвольт) энергии приведены в статье А.И. Рябчикова. Авторы рассматривают особенности баллистической фокусировки пучков и их транспортировки в пространстве дрейфа в условиях, когда это пространство заполняется предварительно инжектируемой плазмой разряда низкого давления. Анализируются условия устойчивой и эффективной транспортировки субмиллисекундных высокоинтенсивных пучков ионов металлов (алюминия, титана, молибдена) в условиях компенсации или декомпенсации их пространственного заряда электронами, появляющимися как в результате вторичной эмиссии, так и ионизации рабочего газа.

В статье Д.А. Антоновича представлена концепция плазменного источника с совмещенными электронным и ионным пучками. Рассмотрены принципиальная схема и конструкция такого источника, физика его работы, основные характеристики, а также перспективы его использования в технологических целях.

Описание оригинальной схемы электронного источника с ионным подогревом термокатода и оценки его эффективности, а также анализ существования биполярного пучка в подобных системах приведены в статье М.А. Завьялова. Результаты теоретических оценок позволяют предсказать режимы с наибольшим коэффициентом усиления электронного тока в одномерных режимах биполярного диода, в том числе и с учетом собственного магнитного поля.

В.Т. Астрелиным рассмотрены реальные условия и сформулирована физическая модель слоя пространственного заряда в биполярном диоде на границе анодной плазмы, имитирующей ионы. Это позволяет провести численное моделирование такой структуры применительно к открытой магнитной ловушке, в которую инжектируется электронный пучок.

Результаты исследования основных параметров плазмы, генерируемой дуговым разрядом низкого давления в сетчатом аноде оригинальной электродной системы, приведены в статье С.С. Ковальского. Показано, что зажигание несамостоятельного тлеющего разряда и инжекция из него ионов в выполняющий роль эмиттера электронов сетчатый электрод позволяют улучшить распределение плотности плазмы по длине протяженного (≈ 1 м) сетчатого анода, соответственно и плотности инжектируемых в плазму тлеющего разряда электронов. Результаты представляют интерес для специалистов, занимающихся созданием источников электронов с радиально-расходящимся пучком.

В статье А.И. Кузьмичева приведены результаты расчетов по распылению тяжелых металлов Ir, Os и W ионами азота N^+ при энергии бомбардирующих ионов от 0.5 до 2.5 кэВ. Полученные результаты, демонстрирующие значительные $\approx 30\%$ коэффициенты отражения атомов и ионов азота от тяжелых металлов, важны при создании плазменных эмиссионных систем для напыления металлических покрытий.

Оригинальная схема планарного магнетрона с инъекцией ионного пучка рассмотрена в статье А.П. Семенова. Представленные экспериментальные характеристики такого магнетрона свидетельствуют о возможности расширения диапазона устойчивого зажигания и горения магнетронного разряда за счет энергии и тока инжектируемых в него ионов. Последние, распыляя специальный анод (мишень), позволяют расширить функциональные возможности системы за счет синтеза, например, нанокристаллических композитов TiN–Cu со свойствами сверхтвердых материалов.

В статье В.В. Яковлева приведены теоретические оценки и результаты экспериментальных исследований процесса синтеза низкотемпературной газоразрядной плазмы в несамостоятельном разряде низкого (0.025–0.25 Па) давления при значительных (0.34 м^3) объемах генерируемой плазмы. Показано, что при импульсных (1 мс) токах амплитудой до 800 А создана плазма с концентрацией около 10^{12} см^{-3} со степенью ионизации до 16 % и однородностью плотности по объему не хуже чем 25 % от среднего значения, что перспективно для создания эффективных электронных источников с плазменными катодами для получения пучков большого сечения.

Процесс горения разряда низкого давления в электродной системе с полым катодом и полым анодом достаточно подробно рассмотрен в статье Н.В. Ландля. В частности, показано, что синтез плазмы в полном аноде обеспечивается за счет осцилляции электронов в полном аноде, а ток разряда на аноде переносится не только электронами, но и ионами из плазмы положительного столба, доля которых в условиях эксперимента может достигать 17 %.

Экспериментальные данные по генерации пучков ионов дейтерия источником на основе вакуумной дуги с газонасыщенным циркониевым катодом приведены в статье А.Г. Николаева. Выполнена оптимизация параметров ионного источника, позволяющая показать, что доля ионов дейтерия в ионном пучке может достигать 60 %, что в 2 раза больше содержания атомов дейтерия в газонасыщенном циркониевом катоде.

Статья В.П. Фроловой посвящена исследованиям 2-компонентного ионного пучка, полученного в вакуумном дуговом источнике с катодом из медно-хромового композита при наличии достаточно сильного $\approx 1\text{ Тл}$ магнитного поля. При ускоряющем напряжении 60 кВ получен ионный пучок с площадью сечения 100 см^2 с током $\approx 1\text{ А}$ при длительности импульсов 250 мкс и исследован его масс-зарядовый состав.

Тематика ионных пучков развивается в статье Я.Г. Брауна, в которой анализируется возможность создания ионных пучков площадью более 1 м^2 для использования в технологии модификации неполупроводниковых материалов. Показано, что существующие решения, а именно: вакуумно-дуговые ионные и газоразрядные ионные источники – близки по параметрам к тем, которые требуются для высокопроизводительной модификации поверхности. Автор рассматривает разные варианты и заключает, что в настоящее время созданы условия для разработки и создания серийных крупномасштабных ионных источников.

Результаты по оптимизации процесса синтеза α -фазы в Al_2O_3 -покрытиях, получаемых испарением в дуговом разряде с ионным сопровождением, приведены в статье А.С. Каменецких. Показано, что формирование $\alpha-Al_2O_3$ при температуре 500–550 °С происходит в достаточно узком диапазоне параметров: при скорости осаждения покрытия $\approx 3\text{ мкм/ч}$, пороговом напряжении смещения 75–100 В и токе ионного сопровождения $\approx 20\text{ мА/см}^2$. Полученные покрытия перспективны для применения во многих отраслях современной промышленности.

В статье Е.В. Яковлева приведены результаты исследования адгезионной прочности поверхностного сплава, созданного путем расплава тонких пленок Ni на поверхности образца из Cu методом импульсной электронно-пучковой обработки с использованием низкоэнергетического сильного электронного пучка. Показано, что Ni–Cu-поверхностный сплав, сформированный вышеописанным методом, обладает лучшей адгезией по сравнению с магнетронным покрытием.

Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований особенностей высокоинтенсивного облучения металлических образцов ионами низких (до 1.5 кэВ) энергий приведены в статье А.И. Рябчикова. Показано, что при плотностях ионного тока в десятки и сотни миллиампер на квадратный сантиметр и достижении высоких (≈ 900 К) температур коэффициент диффузии имплантируемой примеси может на порядок превышать классический коэффициент термодиффузии, что весьма важно для применения высокоинтенсивной ионной имплантации.

В статье А.С. Бугаева представлено оборудование для генерации пучков ионов бора, а также магнетронная распылительная система для напыления борсодержащих слоев на материалы и изделия. Приведены примеры использования созданного оборудования для модификации свойств различных материалов.

Результаты по комбинированной электронно-ионно-плазменной обработке поверхности конструкционной стали 40Х с использованием установки «КОМПЛЕКС», включающей блок плазменно-ассистированного напыления покрытий и блок импульсной электронно-пучковой обработки, представлены в статье Н.Н. Ковалья. Показано, в частности, что созданная магнетронным (Si) и электродуговым (Nb) методами пленка Si–Nb толщиной 2 мкм с последующим высокоскоростным плавлением системы пленка – подложка импульсным электронным пучком (50 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.) в едином вакуумном цикле позволяет более чем в 15 раз повысить износостойкость исходной стали 40Х.

Таким образом, настоящий выпуск дает срез работ в области плазменной эмиссионной электроники и ее применений, выполненных коллегами, учениками и соратниками П.М. Щанина, хотя охватить эту динамично развивающуюся тематику не представляется возможным.

Академик РАН
Профессор

Н.А. Ратахин
Н.Н. Коваль