

**ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)**

Сведения о результатах фундаментальных научных исследований,
полученных в 2020 году по направлениям исследований в рамках
Программы фундаментальных научных исследований государственных
академий наук на 2013-2020 годы

Номер и наименование направления фундаментальных исследований (по Программе)	Полученные результаты
1	2
II Физические науки	
<p>9. Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы</p>	<p>Исследованы свойства пленок оксида цинка, легированного алюминием (ZnO:Al), наносимых методом сильноточного импульсного магнетронного распыления (HIPIMS) керамической ZnO:Al мишени в атмосфере аргона без нагрева подложки. Установлено влияние параметров магнетронного разряда на структуру, фазовый состав и морфологию поверхности осаждаемых покрытий, их прозрачность, отражение и показатель преломления в видимом диапазоне спектра, прозрачность в инфракрасной области спектра, а также на удельное сопротивление пленок. Показано, что использование метода сильноточного импульсного магнетронного распыления позволяет снизить удельное сопротивление ZnO:Al пленок напротив зоны распыления с единиц Ом·см при токе разряда 10 А до 0,025 Ом·см при токе разряда 130 А.</p>
<p>9. Физическое материаловедение...</p>	<p>Изучены особенности процесса ионизированного физического газофазного осаждения покрытий в комбинированной системе на основе магнетронного и высокочастотного разряда. Измерены зависимости плотности ионного тока на плоский зонд с охранным кольцом от мощности магнетронного и высокочастотного разрядов и спектры излучения из плазмы. Показано, что использование высокочастотного разряда совместно со среднечастотным (100 кГц) магнетронным разрядом или разрядом на постоянном токе приводит к значительному повышению плотности ионного тока на зонд, а также позволяет увеличить степень ионизации материала распыляемой мишени.</p>
<p>9. Физическое материаловедение...</p>	<p>Методом магнетронного распыления на несущем NiO/ZrO₂:Y₂O₃ аноде сформирована тонкопленочная многослойная структура мембранно-электродного блока твердооксидного топливного элемента, включающая в себя NiO/ZrO₂:Y₂O₃ анодный и La_{0.6}Sr_{0.4}CoO₃ катодный функциональные слои, а также двухслойный ZrO₂:Y₂O₃ Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95} электролит. Вольтамперные характеристики многослойных топливных элементов были исследованы в диапазоне температур 800–600°С.</p>

	<p>Максимальная плотность мощности тонкопленочного топливного элемента составила 1990 и 430 мВт/см² при температуре 800 и 600°C, соответственно.</p>
9. Физическое материаловедение...	<p>Показано, что облучение стали аустенитного класса 12X18Н10Т интенсивным импульсным электронным пучком (18 кэВ, 20 Дж/см², 50 мкс, 3 имп.) позволяет формировать в поверхностном слое (20 мкм) в результате высокоскоростной ($\approx 10^6$ К/с) кристаллизации многофазную субмикронанокристаллическую структуру, износостойкость которой многократно (более чем в 30 раз) превышает износостойкость исходной стали. Разработанный метод модифицирования может быть использован для поверхностного модифицирования металлов и сплавов с целью придания материалу высоких физико-механических и трибологических свойств.</p>
9. Физическое материаловедение...	<p>Показана принципиальная возможность варьирования элементного и фазового состава нанокристаллических нитридных покрытий на основе молибдена, синтезируемых вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом, за счет изменения тока разряда ассистирующего плазмодгенератора при постоянном давлении газовой смеси. Выявлено, что увеличение тока разряда в широком диапазоне 10—200 А приводит к увеличению плотности тока газовых ионов над металлическими до 3 раз, что приводит к росту концентрации азота в покрытии системы Mo-N до 2 раз. Выявлено, что с ростом тока разряда основная фаза в покрытии меняется с металлической (Mo) на нитридную с недостатком азота (Mo₂N), а затем на фазу стехиометрического состава MoN. Установлено, что при этом покрытия, полученные в режимах с плазменным ассистированием, обладают нанокристаллической структурой, их нанотвердость увеличивается до 1,3 раз, а износостойкость до 2,4 раз по сравнению с параметрами покрытий, осажденных в режимах без плазменного ассистирования. Разработанные нитридные покрытия перспективны для использования в промышленности, как износостойкие.</p>
9. Физическое материаловедение...	<p>Установлено, что легирование покрытий на основе ZrN, полученных при низком парциальном давлении азота (10⁻² Па) в смеси Ar/N₂ (0.2 Па) вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом, такими элементами как Al, Nb и Ti, приводит к возможности увеличения концентрации азота в покрытии только за счет дополнительной ионизации рабочего газа. Увеличение концентрации азота достигается увеличением доли ионов азота с помощью источника газовой плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодом. Добавление алюминия в состав ZrN-покрытия с концентрацией ≥ 13 ат.% приводит к увеличению концентрации азота в его составе с 20 до 47 ат.% при увеличении тока разряда источника газовой плазмы от 0 до 140 А при постоянном давлении и составе газовой смеси и постоянных токах разряда электродуговых испарителей, что в свою очередь ведет к увеличению твердости покрытия до 39 ГПа. Без легирующих добавок эффект плазменного</p>

	<p>ассистирования с улучшением физико-механических свойств на ZrN-покрытиях, полученных при низком парциальном давлении азота, не наблюдается. Выявленный эффект плазменного ассистирования можно использовать при получении многослойных и градиентных по азоту защитных и упрочняющих покрытий на основе ZrN с дополнительными легирующими элементами, позволяющими улучшить эксплуатационные свойства синтезируемых покрытий, перспективных для использования в промышленности.</p>
<p>13. Фундаментальные проблемы физической электроники, в том числе разработка методов генерации, приема и преобразования электромагнитных волн с помощью твердотельных и вакуумных устройств, акустоэлектроника, релятивистская СВЧ-электроника больших мощностей, физика мощных пучков заряженных частиц</p>	<p>В численном эксперименте на основе нестационарных кодов показано, что введение отражений на концах замедляющей системы релятивистской лампы обратной волны, работающей в режиме сверхизлучения, обеспечивает условия для формирования последовательности мощных ультракоротких СВЧ-импульсов в течение одиночного импульса тока. Частота повторения импульсов задается временем прохода по цепи обратной связи и может составлять около 100 МГц. Коэффициент конверсии, определяемый как отношение пиковой мощности ультракороткого импульса к мощности электронного пучка, составляет для первого импульса около 3 и снижается до 2 для последующих импульсов.</p>
<p>13. Фундаментальные проблемы физической электроники...</p>	<p>На сильноточном генераторе МИГ (амплитуда тока 2 МА, время нарастания 100 нс) проведены эксперименты по нагружению тонких металлических проволочек током генератора за время в несколько наносекунд. Для обострения фронта тока через проводник до нескольких наносекунд применяется оригинальная конфигурация с исходным заполнением области нагрузки плазмой внешнего источника. При взрыве вольфрамовой проволочки диаметром 100 мкм достигнут полный за импульс выход излучения (с энергией квантов до 900 эВ) 41 ± 4 кДж, что составляет около 70% от электромагнитной энергии переданная из водяных линий в область нагрузки.</p>
<p>13. Фундаментальные проблемы физической электроники...</p>	<p>Исследована многоканальная коммутация многозазорным разрядником атмосферного давления при наличии и отсутствии электрической развязки между каналами. Разрядник предназначен для емкостных накопителей энергии с зарядным напряжением до 100 кВ и временем вывода энергии порядка 100 нс. Показано, что электрическая развязка между каналами влияет на количество зажигаемых параллельных каналов и их распределение по зазорам и, следовательно, на коммутационные характеристики разрядника. При высокой скорости нарастания импульса пускового напряжения (~800</p>

	<p>кВ/мкс) большее число искровых каналов зажигается в разряднике с электрической развязкой между каналами и характеристики такого разрядника лучше. При низкой скорости нарастания пускового импульса напряжения (менее 250 кВ/мкс) лучшие характеристики реализуются в разряднике без электрической развязки между каналами. Таким образом, преимущество от отсутствия электрической развязки между каналами проявляется при использовании пусковых импульсов с низкой скоростью нарастания.</p>
<p>13. Фундаментальные проблемы физической электроники...</p>	<p>На импульсном генераторе ГИТ-12 измерены критические параметры нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т для микросекундного режима нарастания сверхсильных магнитных полей, при которых имеет место скиновой взрыв материала проводника с образованием плотной плазмы и ее разлетом в межэлектродный зазор вакуумной передающей линии. Определены величины характеристического магнитного поля $B_0 \approx 100$ Тл, выше которого имеет место эффект нелинейной диффузии магнитного поля в проводник, и критического магнитного поля $B_{cr} \approx 260$ Тл, превышение которого ведет к образованию плотной плазмы на поверхности массивного проводника. Предложен способ увеличения до 1.5 раз критического магнитного поля на поверхности проводника за счет выбора оптимальной толщины проводящей поверхности и даны критерии ее определения.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы, включая физику высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза, физику астрофизической плазмы, физику низкотемпературной плазмы и основы ее применения в технологических процессах</p>	<p>На уникальной исследовательской установке России – мультитераваттном генераторе ГИТ-12 проведены исследования имплозии алюминиевых металло-плазменных лайнеров с внешней плазменной оболочкой. Показано, что нагрузки такого типа позволяют обеспечить стабильное сжатие при временах порядка микросекунды. Максимальный выход излучения в К-линиях алюминия составил 4,5 кДж/см при пиковом токе имплозии 2.4 МА. Сравнение с теоретическими оценками ожидаемого выхода излучения и с результатами ранних экспериментов, проведенных на различных генераторах с нагрузками разного типа, показывает, что в настоящее время металло-плазменный лайнер с внешней плазменной оболочкой является наиболее эффективной нагрузкой для генерации излучения в К-линиях алюминия при микросекундных временах имплозии.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Предложена и реализована новая форма горения диффузного разряда в плотных газовых смесях с электроотрицательными компонентами, состоящая из самоорганизующейся структуры множественных диффузных каналов. Применение такого разряда в плотных газовых средах, включающих в себя электроотрицательные добавки (галогены, кислород) позволило расширить диапазон устойчивого существования диффузной плазмы с концентрацией электронов до 8×10^{15} см⁻³ при сохранении свойств активной среды в течение всей длительности импульса накачки. Формирование множественных равновесных диффузных каналов обеспечивалась за счет скорости роста плотности тока более 6×10^{10} А/(см²×с) и</p>

	<p>приведенной напряженности поля в момент пробоя разрядного промежутка не менее $3 \text{ кВ/см} \times \text{атм}$. Выбор соотношения донора и акцептора электронов в составе газовой смеси позволяет реализовывать завершённую или незавершённую стадию развития множественных диффузных каналов в разряде.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Проведены исследования формирования наносекундных разрядов в неоднородном электрическом поле при различном давлении газов. Показано, что движение стримера сопровождается протеканием тока в промежутке, а его диаметр может быть сопоставим с межэлектродным расстоянием. Величина тока пропорциональна скорости стримера. В неионизованной части промежутка этот ток представляет собой ток смещения, обусловленный перераспределением напряжённости электрического поля при формировании стримера (динамический ток смещения). Разработан метод измерения этого тока, позволяющий исследовать динамику формирования разряда в различных условиях, генерацию убегающих электронов с привязкой к динамике формирования стримера.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Впервые создан и успешно испытан катодный узел сильноточной электронной пушки, включающий взрывоэмиссионный катод и встроенные в него резистивно развязанные дуговые источники плазмы, инициируемые пробоем по поверхности диэлектрика. Отличительной особенностью нового катодного узла является его питание от одного генератора высоковольтных импульсов, обеспечивающего как параллельное срабатывание источников плазмы, так и ускорение электронов пучка к коллектору. Установлено, что такой катодный узел обладает в 1,5–1,7 раза большей эмиссионной способностью по сравнению с медно-оплеточным взрывоэмиссионным катодом, традиционно используемым в пушках с плазменным анодом. Перспективным является использование нового катодного узла в газонаполненном диоде. При этом отпадает необходимость в создании плазменного анода, а повышение первеанса электронного потока по сравнению с вакуумным диодом обеспечивается благодаря ионизации рабочего газа.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Выполнен цикл экспериментальных исследований по генерации пучков ионов дейтерия в ионном источнике на основе вакуумной дуги с насыщенным дейтерием циркониевым катодом. На основе детального измерения углового распределения ионных потоков газового и металлического компонентов в дуговой плазме показано, что распределение дейтерия существенно шире, чем циркония. Функция распределения по энергиям ионов циркония различных зарядностей практически совпадают, а ее максимум достигается при энергиях уровня 100 эВ. При этом аналогичный показатель для ионов дейтерия составляет около 8 эВ. Установлено, что наиболее эффективная генерация ионов дейтерия, и соответственно максимальная доля дейтерия в ионном пучке, обеспечивается при</p>

	<p>остаточном давлении в разрядном промежутке ниже 1×10^{-6} Торр, токе дуги около 200 А и размещении катода на расстоянии (10-20) мм от эмиссионной поверхности. При этом доля ионов дейтерия в ионном пучке может достигают 80%, что в 2 раза выше процентного содержание атомов дейтерия в материале катода.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Реализован вакуумный (безгазовый) планарный магнетронный разряд, инициируемый плазмой вакуумной дуги. Определены режимы работы разряда для различных материалов мишеней магнетрона. Измерен масс-зарядовый ионный состав плазмы и его эволюция во время импульса разрядного тока. Показано, что после переходных процессов дегазации и очистки катода ионная составляющая плазмы состоит в основном из однозарядных ионов материала магнетронной мишени. Измеренный полный ионный ток из плазмы разряда вакуумного магнетрона составляет до 7,5% от тока разряда. Устройство может быть использовано как для создания металлических покрытий, так и для генерации ускоренных пучков ионов металлов. Отсутствие в таком разряде микрокапельной фракции делает вакуумный магнетрон реальной альтернативой вакуумно-дуговым системам.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Показано, что в процессе формирования и транспортировки широкоапертурного (диаметром несколько см) интенсивного (плотность тока 2-3 А/см²) импульсного (длительностью 100 мкс) электронного пучка в плазмонаполненной оптической системе с открытой (бессеточной) подвижной границей анодной плазмы возникает высокочастотная модуляция тока пучка. Эта модуляция связана с колебаниями потенциала положительно заряженной прианодной плазмы, определяющего положение эмиссионной границы плазмы и величину тока эмиссии и ВЧ модуляция тока пучка, приводит к раскачке колебаний в цепях ускоряющего напряжения и может быть подавлена введением в электрическую цепь индуктивности в несколько десятых долей микрогенри.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Проведены исследования усовершенствованных версий макетов отпаянных тиратронов с холодным катодом TP11-10k/50 применительно к проблеме запуска прибора с наносекундной стабильностью. В данных приборах использовался новый узел запуска на основе слаботоchnого тлеющего разряда с полым катодом и полым анодом, разработанный в Лаборатории низкотемпературной плазмы ИСЭ СО РАН. Предложены и испытаны схемы запуска тиратрона, обеспечивающие наносекундную стабильность срабатывания тиратрона относительно момента приложения импульса запуска. Наилучшие результаты соответствуют случаю, когда время запаздывания срабатывания тиратрона относительно момента приложения импульса запуска составляет 60 нс и разброс срабатывания не превышает 2 нс при напряжении на аноде тиратрона на уровне 40 кВ.</p>

<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Проведены исследования тлеющего разряда низкого давления с полым катодом и полым анодом в воздухе и водороде в условиях, когда глубина катодной полости сравнима с ее диаметром. Получены вольтамперные характеристики разряда и данные по распределению тока по поверхности катода с использованием секционированных электродов, измерен размер области катодного падения потенциала. Показано, что в режиме затрудненного тлеющего разряда основная доля тока замыкается на ближнюю к аноду катодную секцию. В режиме обычного тлеющего разряда ток разряда замыкается на всю поверхность катодной полости. Проведены оценки параметров разряда и размера области катодного падения потенциала с привлечением модели поддержания разряда с полым катодом для режима обычного тлеющего разряда. Показано хорошее согласие расчетных данных с экспериментом.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Экспериментально показана возможность реализации электронно-ионной упрочняющей обработки поверхности материалов и изделий с использованием, в том числе одновременным, генераторов газовой и металлической плазмы. Для характерных режимов совместной и раздельной работы были исследованы характеристики разрядов и параметры генерируемой плазмы. Показано, что электронный нагрев образцов происходит за счет ускорения электронов в положительном анодном падении потенциала (≈ 10 В), образующимся вблизи образца, играющего роль анода малой площади. При этом скорость нагрева образцов по сравнению с ионным нагревом, увеличивается в несколько раз. Показано, что разработанная система может использоваться для электронно-ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий как газовыми, так и металлическими ионами в случаях, когда выдвигаются специальные требования к пониженной (по сравнению с традиционными методами ионного нагрева) шероховатости поверхности материалов и изделий.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>В несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом диаметром 0,6 м и длиной 1 м в значительных (до $0,3 \text{ м}^3$) вакуумных объемах при низком ($0,025 - 0,25 \text{ Па}$) давлении в режиме одиночных импульсов при импульсных токах до 800 А при напряжении горения разряда до 400 В и длительности импульсов 1 мс, что по совокупности основных параметров является уникальным для такого типа разрядов низкого давления, сформированы объемные пучково-плазменные образования с концентрацией плазмы около 10^{12} см^{-3} степени ионизации до 16 % и однородности плотности не хуже ± 15 % от среднего значения. Высокая однородность обусловлена интенсификацией кулоновских взаимодействий при относительно высокой степени ионизации плазмы, что способствует более эффективной утилизации энергии быстрых электронов в плазме тлеющего разряда до их ухода на анод. Измеренные плотности электронного тока насыщения из плазмы на зонд в такой плазме при величине тока около 800 А достигают нескольких ампер на квадратный сантиметр, что указывает на перспективность использования</p>

	<p>импульсной плазмы сильноточного тлеющего разряда с полым катодом в устройствах генерации импульсных интенсивных электронных пучков большого сечения, используемых для возбуждения газовых лазеров, реализации плазмохимических процессов, стерилизации и других процессах, число которых растет по мере совершенствования плазменных источников электронов.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Установлено, что в системе генерации объемной газовой плазмы на основе частотно-импульсного (100 Гц, длительность импульса 500 мкс) несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодами и полым анодом большого (0,3 м³) объема при токах до 300 А и рабочем давлении (0,3-0,6) Па повышение напряжения горения разряда с 100 В до 300 В при одинаковой импульсной мощности за счет регулирования тока эмиссии электронов с накала и тока дугового разряда позволяет снизить степень неоднородности плазмы по высоте (≈ 1 м) полого анода в ≈ 4 раза, что вызвано увеличением длины пути ионизирующих газ электронов до их ухода на полый анод или достижения ими состояния теплового равновесия. Синтезированное объемное плазменное образование перспективно для использования в технологиях ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий с целью улучшения их физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик.</p>
<p>14. Современные проблемы физики плазмы...</p>	<p>Установлено, что в системе генерации объемно-однородных пучково-плазменных образований на основе сильноточного, до нескольких сотен ампер, несамостоятельного тлеющего разряда низкого, около 1 Па, давления с полым катодом, поддерживаемого внешней инжекцией электронов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, из двух источников электронов выполняется принцип суперпозиции концентрации синтезируемой плазмы, заключающийся в соблюдении равенства экспериментально полученного как азимутального, так и продольного распределений концентрации плазмы в полем катоде несамостоятельного тлеющего разряда при совместной работе двух и более источников электронов и алгебраической суммы распределений концентрации плазмы, полученных при раздельной работе таких источников электронов.</p>