

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ТРУДЫ

XXXI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 05-10 июля 2021 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва – 2021

УДК 669.
ББК 22.38
P15
ISBN 978-5-89671-026-4

Труды XXXI Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 05 – 10 июля 2021 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2021 г., 450с.

В рамках конференции проводилась XXV Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор,
Председатель Оргкомитета),
к.ф.-м.н. Дьячкова И.Г. (ученый секретарь),
Смирнова Е.В. (секретарь-координатор),
к.т.н. доцент Мамонтов А.В. (Директор ФГБНУ «НИИ ПМТ»),
д.ф.-м.н., проф. Кристя В.И.,
к.ф.-м.н. Гайдар А.И.

УДК 669.
ББК 22.38

© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2021

ISBN 978-5-89671-026-4

© Труды XXXI Международной
конференции «Радиационная физика
твёрдого тела»

ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

Понедельник, 5 июля**10.00-13.00****Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.**

1. Рогожкин С.В., Хомич А.А., Клауз А.В., Богачев А.А., Никитин А.А., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С. «Наноструктура дисперсно-упрочненных оксидами сталей и ее перестройка при облучении ионами»	10
2. Овчинников В.В., Макаров Е.В., Гущина Н.В., Семенкин В.А. «Образование обогащенного марганцем аустенита при аномально низких для протекания диффузионных процессов температурах в ходе «радиационной тряски» сплава Fe 6,35 ат. % Mn ионами Ag ⁺ , E=15 кэВ»	20
3. Стальцов М.С., Чернов И.И., Диков А.С., Иванов И.А., Калинин Б.А., Джумаев П.С., Лагов П.Б. «Эволюция микроструктуры стали X18H10T при высокодозном облучении ионами никеля с энергией 101 МэВ»	33
4. Милёхин Ю.М., Коптелов А.А., Садовничий Д.Н. «Тепловые процессы, протекающие в полимерных материалах в ходе воздействия ионизирующего излучения»	44
5. Жарков М.Ю., Вертков А.В., Люблинский И.Е., Крат С.А. «Макет приемного элемента литиевого дивертора токамака мифист на основе текущего слоя лития»	54

13.00-14.00 Перерыв.**14.00-16.00 Секция “Радиационная физика металлов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Епифанов Н.А., Дёмин А.С., Латышев С.В., Масляев С.А., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Сасиновская И.П. «Поведение ниобия в условиях короткоимпульсных энергетических воздействий»	60
2. Крюков А.М., Лебединский В.И. «Оценка влияния примесных элементов на радиационное охрупчивание корпусных сталей ВВЭР-440 при высоких флюенсах нейтронов»	68
3. Аверкиев И. К., Бакиева О.Р., Колотов А.А. «Морфология и химический состав Ti ₃ AlC ₂ после воздействия ионов аргона»	77

4. Долуденко И.М. «Кинетика роста нанопроволок в порах ядерных фильтров»	80
--	----

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.**Вторник, 6 июля****10.00-13.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов”**

1. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Применко Д.А., Устинов А.И. «Некоторые особенности электростатических разрядов при облучении стекла электронами средних энергий»	85
2. Никольская А.А., Королев Д.С., Михайлов А.Н., Чигиринский Ю.И., Белов А.И., Нежданов А.В., Трушин В.Н., Николичев Д.Е., Тетельбаум Д.И. «Влияние радиационных повреждений при ионном облучении на структуру и свойства пленок оксида галлия»	94
3. Степович М.А., Калманович В.В., Филиппов М.Н. «О моделировании процесса взаимодействия киловольтных электронов со структурами нитрида галлия на различных подложках»	102
4. Арутюнян В.В., Алексанян Э.М., Григорян Н.Е., Бадалян А.О., Арестакян А.Г., Баграмян В.В., Саргсян А.А. «Оптические свойства и радиационная стойкость силиката магния»	111
5. Углов В.В., Гуркинов М.С., Гринчук П.С., Кияшко М.В., Холод В.М., Злоцкий С.В. «Структурно-фазовое состояние керамики на основе карбида кремния, облученной ионами криптона и ксенона»	120
6. Рысбаев А.С., Камилов Т.С., Клечковская В.В., Иргашев С.У., Турапов И.Х. «Исследование электронной структуры наноразмерных пленок $BaSi$, полученных низкоэнергетической высокодозной имплантацией ионов Ba в $Si(111)$ »	127
7. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш.М., Сулайманов Н.Т., Умарова Ф.Т., Нормуродов А.Б. «Исследование локальной структуры и энергетических параметров взаимодействующих примесных атомов O и C в кластере $SI_{29}H_{36}$ »	136

13.00-14.00 Перерыв.**14.00-16.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Лебедев А.А., Козловский В.В., Давыдовская К.С., Левинштейн М.Е., Иванов А.Е., Оганесян Г.А. «Влияние температуры облучения на радиационную стойкость SiC»	140
2. Маснавиев Б.И., Савичев И.А., Косарев И.Н., Шешин Е.П. «Исследование эмиссионных и прочностных характеристик углеродных материалов»	146
3. Андреев Д.В., Ахмелкин Д.М., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Столяров А.А., Романов Д.А. «Моделирование зарядовых процессов в МОП сенсорах радиационных излучений, работающих в условиях сильных электрических полей»	149
4. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьоти Ха, Фишер М.Р. «Моделирование нагрева катода с тонкой диэлектрической пленкой в тлеющем разряде»	159

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.**Среда, 7 июля****10.00 – 13.00 Секция “Радиационная физика металлов”**

1. Загорский Д.Л. «Трековые матрицы для матричного синтеза металлических нанопроволок»	165
2. Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Петрикова Е.А., Толкачев О.С., Тересов А.Д., Крысина О.В. «Комплексное электронно-ионно-плазменное насыщение высокохромистой стали бором: структура, свойства»	172
3. Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Крысина О.В., Прокопенко Н.А., Петрикова Е.А., Толкачев О.С., Тересов А.Д. «Высокоэнтропийные полиметаллические пленки, полученные электронно-ионно-плазменным методом»	177
4. Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Крысина О.В., Иванов Ю.Ф., Прокопенко Н.А., Ахмадеев Ю.Х., Семёнов Г.В. «Финишная обработка поверхности образцов нержавеющей стали, полученных методом электронно-лучевой наплавки»	184
5. Созонова Н.М., Воробьев В.Л. «Изучение поверхности сплава ВТ6 с нанесённой углеродной плёнкой при ионном перемешивании»	192

6. Поролло С.И., Мосеев Л.И., Конобеев Ю.В. «Исследование выхода продуктов деления из облученного оксидного и нитридного ядерного топлива при высокотемпературном нагреве в потоке гелия»	200
7. Черенда Н.Н., Прилуцкий С.А., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Структурно-фазовое состояние и коррозионная стойкость циркония, обработанного компрессионными плазменными потоками»	210

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-16.00 Секция «Физические основы радиационных технологий» (заседание школы молодых ученых)

1. Арзуманян В.В., Саакян А.А., Арутюнян В.В., Григорян Н.Е., Григорян Б.А., Давтян А.Д., Еремян А.С., Ассовский И.Г. «Моделирование космической среды на низкой околоземной орбите для наземных радиационных испытаний материалов и устройств»	218
2. Панов Д.В., Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Бондаренко Г.Г. «Применение ядерных фильтров для получения различных типов нанопроволок из кобальта»	226
3. Огородников Д.А., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кетько А.В., Лемешевская А.М., Цымбал В.С., Шпаковский С.В., Рубанов П.В., Луконин С.Е. «Влияние облучения альфа-частицами на вольтамперные характеристики кремниевых фотоумножителей»	231
4. Жданович Д.Н., Огородников Д.А., Гуринович В.А., Ластовский С.Б., Маркевич В.П., Шпаковский С.В. «Особенности образования радиационных дефектов в кремниевых JBS-диодах при облучении α -частицами в различных электрических режимах»	241
5. Ташметов М.Ю., Исматов Н.Б., Адизов С.М. «Исследование структуры археологических объектов методами нейтронной томографии»	251

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Четверг, 8 июля

10.00-13.00 Секция “Физические основы радиационных технологий”

1. Гынгазов С.А., Костенко В.А. «Обработка алюмооксидной керамики интенсивными электронными и ионными пучками»	257
--	-----

2. Ивлев Г.Д., Гацкевич Е.И. «Лазерно-индуцированные наносекундные процессы модификации тонкопленочной системы a-Ge/Si»	265
3. Ташметов М.Ю., Исматов Н.Б., Буриев М.М. «Радиационное упрочнение режущих инструментов из твердого сплава»	273
4. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Гиллаев Т.С., Эрдонов М.Н., Саттиев А.Р., Холмедов Х.М. «Определение содержания примеси кобальта в легированном кремнии ядерно-аналитическим методом»	276
5. Рысбаев А.С., Бекпулатов И.Р., Нормурадов М.Т., Игамов Б.Дж., Турсунметова З.А. «Термоэлектрические свойства пленок Mn ₄ Si ₇ , полученных магнетронным напылением»	279
6. Пискарев М.С., Гильман А.Б., Зиновьев А.В., Скрылева Е.А., Сенатулин Б.Р., Гатин А.К., Кечекьян А.С., Кузнецов А.А. «Модифицирование пленок полипиромеллитимида в разряде постоянного тока»	285
7. Ковальчук Н.С., Марудо Ю.А., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Понарядов В.В., Солодуха В.А., Филипня В.А., Шестовский Д.В. «Влияние предокислительной быстрой термообработки на качество оксидов затвора»	292

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-16.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов»

1. Ашуров М.Х., Нуритдинов И., Бойбобоева С.Т., Сайдахмедов К.Х. «Оптические свойства монокристаллов на основе CaF ₂ -YbF ₃ »	296
2. Нуритдинов И., Саидахмедов К.Х. «Влияние высоких доз γ -облучения на стеатитовую керамику СНГ»	303
3. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И., Самойлова Е.С., Клопот Е.П. «Устойчивость полимерных композитов ПИ/WO ₂ к электронному облучению»	308
4. Mirzayev M.N., Popov E., Doroshkevich A.S., Demir E., Mamedov F., Genov I.G., Mehdiyeva R.N., Sharipov Z.A. «Thermic and electrical analogy of B ₄ C and BN under different irradiation»	313
5. Бондаренко Е.В., Мотавкин А.В., Скородумов В.Ф. «Термодинамическое исследование формирования структуры полимера с использованием решеточной модели»	316

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Пятница, 9 июля**10.00-13.00 Секция «Физические основы радиационных технологий»**

1. Асадчиков В.Е., Бедин С.А., Васильев А.Б., Дьячкова И.Г., Назьмов В.П., Андреев А.В., Коновко А.А., Потёмкин Ф.В., Мигаль Е.А. «Создание регулярных приповерхностных субмикроструктур для генерации гармоник излучения среднего ИК-диапазона»	321
2. Лабис В.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Рошин Б.С., Волков А.В., Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Сизова С.В., Хайдуков С.В., Базикян Э.А., Козлов И.Г. «Комплексное исследование причин возникновения периимплантита при дентальной имплантации»	328
3. Григорьев М.В., Дьячкова И.Г., Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Поволоцкий М.А., Кохан В.В., Чукалина М.В., Уваров В.И. «Усовершенствованные методы математической обработки томографических данных при исследовании пористых мембран»	336
4. Золотов Д.А., Бузмаков А.В., Григорьев М.В., Дьячкова И.Г., Ингачева А.С., Николаев Д.П., Чукалина М.В., Щелоков И.А. «Развитие метода спектральной томографии с применением кристалла-анализатора»	345
5. Кривоносов Ю.С., Бузмаков А.В., Юнеман О.А., Букреева И.Н., Савельев С.В., Асадчиков В.Е. «Экспериментальная реализация рентгеновской фазоконтрастной томографии с использованием лабораторного источника»	352
6. Камбарова Ж.Т., Саулебеков А.О. «Расчет и выбор геометрии энергоанализатора с электростатическим полем для исследования корпускулярных потоков»	357
7. Ерофеев В.Т., Урбанович А.И. «Конструирование импульсных широкополосных и узкополосных электромагнитных сигналов, распространяющихся в материальных средах»	363

13.00-14.00 Перерыв.**14.00-16.00 Секция «Радиационная физика металлов»**

1. Крутилина Е.А., Терешко М.И., Шиманский В.И., Черенда Н.Н., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Эрозия поверхностного слоя композиционного твердого сплава Т15К6 при воздействии компрессионных плазменных потоков»	376
---	-----

2. Михайлова А.Б., Боровицкая И.В., Никулин В.Я., Силин П.В., Перегудова Е.Н. «Результаты исследования влияния ударно-волнового воздействия на микроструктуру и структуру сверхпроводящих покрытий (Bi-2223+ZrN)»	384
3. Монахов И.С., Удовский А.Л. «Влияние наклепа поверхностного слоя сплава состава Fe-8%Cr на размеры областей когерентного рассеяния по различным кристаллографическим направлениям»	393
4. Селищев П.А., Тропин Т.В., Петренко В.И., Авдеев М.В., Аксенов В.Л. «Двухстадийная модель роста кластеров»	399

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Суббота, 10 июля

10.00

1. Боровицкая И.В., Пименов В.Н., Масляев С.А., Михайлова А.Б., Бондаренко Г.Г., Матвеев Е.В., Гайдар А.И., Демин А.С., Морозов Е.В. «Влияние облучения на установке плазменный фокус на структуру и механические свойства поверхности медных сплавов Cu - 10 ат% Ga и Cu - 10 ат% Ga – 4 ат% Ni»	405
2. Карлова Г.Ф., Белозерова Е.А. «Технология ионной имплантации для создания магниточувствительных датчиков на арсениде галлия»	420
3. Волков С. С., Николин, С. В., Пузевич Н.Л. «Применение ионных пучков для анализа поверхности и направленного движения электронов в проводниках»	431
4. Стук А.А., Бабаева Ю.А., Разикова И.А., Степанов В.И., Кочнов О.Ю. «Современные тенденции в развитии технологии и производства ядерно-легированного кремния»	441
Обсуждение докладов	
Общая дискуссия	
Заккрытие конференции	

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КАТОДА С ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

Бондаренко Г.Г.¹, Кристя В.И.², Мьоти Ха², Фишер М.Р.²

¹ Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики» (101000, Москва, ул. Мясницкая, 20,
e-mail: gbondarenko@hse.ru)

² Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана, Калужский филиал (248000, Калуга, ул. Баженова, 2,
e-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru)

В приборах дугового разряда, таких как осветительные лампы [1–3], после их включения происходит пробой рабочего газа в межэлектродном промежутке и зажигается тлеющий разряд, в котором основным механизмом эмиссии с катода электронов, необходимых для поддержания разряда, является ионно-электронная эмиссия. Через некоторое время температура катода в результате его нагрева потоком тепла, поступающего из разряда, достигает значений, при которых возможна термическая электронная эмиссия, и разряд переходит в дуговой.

Так как в состав электродов дуговых ламп часто включают оксиды металлов, являющиеся диэлектриками [4], на их поверхности могут формироваться тонкие диэлектрические пленки. При протекании разрядного тока, в результате бомбардировки катода ионами, на пленке накапливается положительный заряд, что приводит к возникновению в ней сильного электрического поля, обуславливающего возникновение полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в пленку. Некоторая доля таких электронов, величина которой называется эмиссионной эффективностью пленки [5], имеет энергии, достаточные для преодоления потенциального барьера на поверхности пленки, и выходит из нее в разрядный объем, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода [6]. В процессе его нагрева в разряде полевая эмиссия из подложки в диэлектрическую пленку должна переходить в термополевую, а затем в термическую.

В данной работе предложена модель, позволяющая рассчитать зависимость эмиссионных характеристик катода с диэлектрической пленкой от его температуры, и исследовано влияние термополевой электронной эмиссии на динамику его нагрева в разряде.

Пусть на плоском металлическом катоде газоразрядного прибора находится тонкая диэлектрическая пленка толщиной H_f . При его

бомбардировке ионами в разряде на внешней поверхности пленки происходит накопление положительного заряда, создающего в пленке электрическое поле с напряженностью E_f . Когда она достигает величины порядка 10^8 – 10^9 В·м⁻¹, начинается туннелирование электронов через потенциальный барьер на границе металл–диэлектрик [7]. При этом макроскопическая плотность тока термополевой электронной эмиссии из подложки электрода в зону проводимости диэлектрика, эмиссионная эффективность пленки и плотность тока электронов, выходящих из пленки в разряд, определяются выражениями [8]:

$$j_f(H_t) = \frac{4\pi e m^* s_f k_b T}{h^3} [I_1(\varepsilon_l) + I_2(\varepsilon_l)], \quad (1)$$

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_0^n}{n! \lambda_e^n} \frac{B_n(E_f, T)}{A(E_f, T)}, \quad (2)$$

$$j_e = j_e(H_f) = \delta_f j_f(H_f), \quad (3)$$

где

$$A(E_f, T) = I_1(\varepsilon_l) + I_2(\varepsilon_l),$$

$$B_n(E_f, T) = \begin{cases} 0 & \text{при } \varepsilon_{0n} < 0, \\ I_1(\varepsilon_{0n}) & \text{при } 0 < \varepsilon_{0n} < \varepsilon_l, \\ I_1(\varepsilon_l) + I_2(\varepsilon_l) - I_2(\varepsilon_{0n}) & \text{при } \varepsilon_{0n} > \varepsilon_l, \end{cases}$$

$$I_1(\varepsilon_l) = \int_0^{\varepsilon_l} \ln \left(1 + \exp \left(-\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_F}{k_b T} \right) \right) \left(1 + Q(\varepsilon_z, E_f) \right)^{-1} d\varepsilon_z,$$

$$I_2(\varepsilon_l) = \int_{\varepsilon_l}^{\infty} \ln \left(1 + \exp \left(-\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_F}{k_b T} \right) \right) d\varepsilon_z,$$

$$Q(\varepsilon_z, E_f) = \exp \left[\frac{8\sqrt{2}\pi}{3h} \left(\frac{k^3 e^5 (m^*)^2}{E_f} \right)^{1/4} \frac{v(y)}{y^{3/2}} \right],$$

$$\varepsilon_l = \varepsilon_F + \varphi_m - \chi_d - \sqrt{ke^3 E_f / 2}, \quad \varepsilon_{0n} = \varepsilon_F + \varphi_m - (e\varphi E_f H_f - n\Delta\varepsilon),$$

$$y = \sqrt{ke^3 E_f} / (\varepsilon_F + \varphi_m - \chi_d - \varepsilon_z), \quad k = 1/4\pi\varepsilon_0\varepsilon_f,$$

$H_0 = H_f - H_t$, H_t – длина туннелирования электронов, T – температура катода, s_f – доля поверхности металл-диэлектрик вблизи вершин

ее рельефа, с которой, вследствие усиления на них электрического поля, характеризующегося коэффициентом усиления поля β , происходит эмиссия электронов, $\nu(y)$ – функция, выражающаяся через эллиптические интегралы, m^* – эффективная масса электрона в диэлектрике, ε_F и φ_m – энергия Ферми и работа выхода материала подложки, χ_d и ε_f – электронное сродство и высокочастотная диэлектрическая проницаемость материала пленки, k_b – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, e – величина заряда электрона, ε_0 – диэлектрическая постоянная.

При бомбардировке катода в тлеющем разряде ионами, плотность тока которых равна j_i , с него происходит эмиссия электронов с плотностью тока $f_{es}\gamma_i j_i$ [1], где γ_i – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала катода, f_{es} – доля эмитированных с катода электронов, не возвращающихся на его поверхность вследствие рассеяния на атомах рабочего газа. Эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода при этом равен [6]:

$$\gamma_{\text{eff}} = (\gamma_{ie} + \delta_{fe}) / (1 - \delta_{fe}), \quad (4)$$

где $\delta_{fe} = f_{es}\delta_f$, $\gamma_{ie} = f_{es}\gamma_i$, а напряженность электрического поля E_f в пленке может быть найдена из условия [7]:

$$j = j_f(H_f). \quad (5)$$

В тлеющем разряде выполняется условие его поддержания [1]:

$$\int_{H_f}^{d_c+H_f} \alpha(z) dz = \ln(1 + 1/\gamma_{\text{eff}}), \quad (6)$$

где $\alpha(z) = Ap \exp(-Bp/E(z))$ – ионизационный коэффициент рабочего газа, A и B – постоянные для данного рода газа, $E(z) = 2U_c(d_c + H_f - z)/d_c^2$ – распределение напряженности электрического поля в катодном слое разряда, U_c – катодное падение напряжения, d_c – длина катодного слоя. При этом связь между плотностью тока разряда $j = (1 + \gamma_{\text{eff}})j_i$ и величиной U_c задается соотношением [1, 9]:

$$j/p^2 = (1 + \gamma_{\text{eff}}) K U_c^{3/2} / (pd_c)^{5/2}, \quad (7)$$

где $K = 4\varepsilon_0 (ep\lambda_c/M)^{1/2}$, p – давление рабочего газа, λ_c – длина перезарядки иона в газе, e и M – заряд и масса иона.

Для стабилизации горения разряда в его цепь последовательно включается балластное сопротивление R [1], поэтому разрядный ток определяется уравнением

$$U_c + RSj = U_0, \quad (8)$$

где U_0 – межэлектродное напряжение, S – площадь части поверхности катода, занятой разрядом.

Если размеры катода достаточно малы, так что разряд заполняет всю его поверхность, а температура T во всем его объеме V одинакова, уравнение теплового баланса катода, определяющее изменение его температуры в процессе разогрева, имеет вид [10]:

$$cV\rho \frac{dT}{dt} = j_i S \left[2U_c \frac{\lambda_c}{d_c} + U_i - (1 + \gamma_t)\varphi_c \right] - \vartheta \sigma T^4 S, \quad (9)$$

где U_i – потенциал ионизации атома газа, c , ρ и ϑ – теплоемкость, плотность и излучательная способность материала катода, σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Соотношения (1)–(9) описывают параметры катодного слоя тлеющего разряда при наличии на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки и позволяют оценить влияние термополевой электронной эмиссии на динамику разогрева катода.

Вычисления проводились для разряда в аргоне при $p = 2660$ Па, $T_0 = 300$ К, $U_0 = 200$ В, $R = 84$ Ом с цилиндрическим вольфрамовым катодом диаметром 2,8 мм и длиной 3,5 мм с диэлектрической пленкой оксида алюминия толщиной $H_f = 5$ нм на поверхности, так как для оксида алюминия известны значения необходимых параметров [1, 5, 7]: $\gamma_i = 0,1$, $\varphi_m = 4,5$ эВ, $\chi_d = 2$ эВ, $\varepsilon_f = 3$, $\beta = 3,8$, $\Delta\varepsilon = 0,125$ эВ, $\lambda_e = 0,3$ нм, $m^* = m$, m – масса электрона в вакууме.

Зависимости температуры катода T и плотности разрядного тока j от времени горения разряда, найденные с использованием моделей полевой и термополевой электронной эмиссии из подложки катода в пленку [7, 8], приведены на рис. 1, 2.

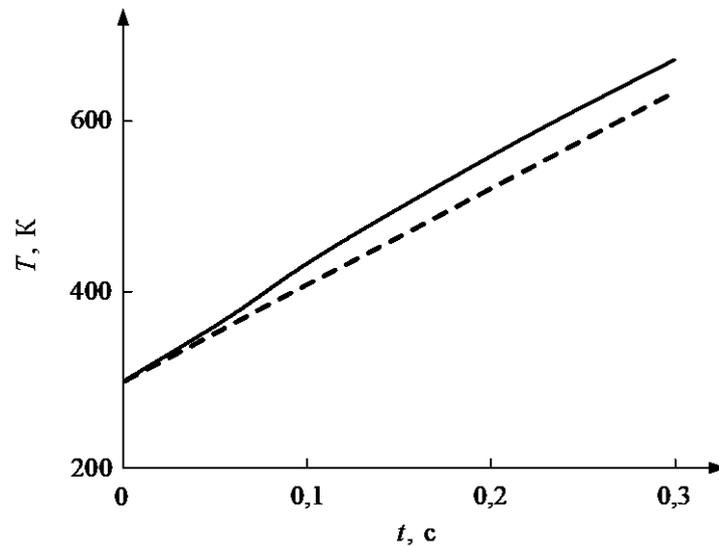


Рис. 1. Зависимость температуры катода от времени, рассчитанная с использованием моделей термополевой электронной эмиссии (сплошная линия) и полевой электронной эмиссии (штриховая линия)

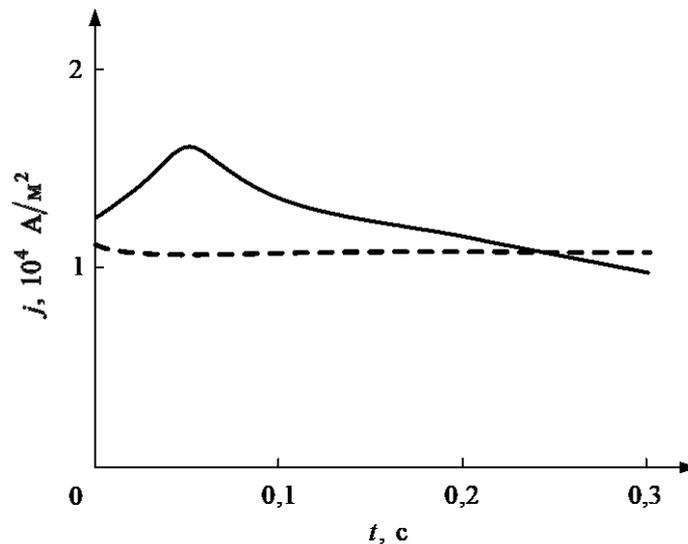


Рис. 2. Зависимость плотности разрядного тока от времени. Обозначения те же, что на рис. 1

Из них следует, что так как в модели термополевой эмиссии учитывается, что часть электронов в металлической подложке катода имеет энергии, превосходящие уровень Ферми металла, и, следовательно, большую вероятность туннелирования через потенциальный барьер в зону проводимости диэлектрика, то при ее использовании на этапе разогрева катода до температуры порядка 500 К, вследствие увеличения эмиссионной эффективности пленки δ_f и эффективного коэффи-

циента ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} , возрастает плотность разрядного тока j . В результате, заметно увеличивается интенсивность нагрева катода. Однако при дальнейшем повышении температуры катода, вследствие увеличения роли термополевого механизма электронной эмиссии, происходит снижение напряженности электрического поля E_f в пленке, обеспечивающей необходимую плотность эмиссионного тока из подложки в пленку. Следствием этого является уменьшение δ_f , γ_{eff} и j , что обуславливает некоторое замедление нагрева катода.

Следовательно, термополевым механизмом электронной эмиссии может влиять на динамику физических процессов, протекающих на поверхности катода с тонкой диэлектрической пленкой в газовом разряде уже при его температуре, превосходящей комнатную на несколько сотен градусов, и его необходимо учитывать при моделировании тепловых процессов в разрядах с такими катодами.

Литература

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный, ИД «Интеллект», 2009. 736 с.
2. Schwieger J., Baumann B., Wolff M., Manders F., Suijker J. // J. Phys.: Conf. Series. 2015. V. 655. 012045.
3. Langer R., Garner R., Paul I., Horn S., Tidecks R. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2016. V. 76. № 1. 10802.
4. Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Prassitski V.V. // Vacuum. 2004. V. 73. № 2. P. 155.
5. Suzuki M., Sagawa M., Kusunoki T., Nishimura E., Ikeda M., Tsuji K. // IEEE Trans.: ED. 2012. V. 59. № 8. P. 2256.
6. Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I. // Vacuum. 2016. V. 129. P. 188.
7. Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. // Vacuum. 2018. V. 149. P. 114.
8. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьо Ти Ха, Фишер М.Р. // Радиационная физика твердого тела: Труды XXX международной конференции. – Севастополь: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2020. С. 285.
9. Кристя В.И., Мьо Ти Ха, Фишер М.Р. // Поверхность. 2019. № 4. С. 79.
10. Кристя В.И., Йе Наинг Тун // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 6. С. 752.

**Труды XXXI Международной конференции
«Радиационная физика твёрдого тела»
(Севастополь, 05 – 10 июля 2021 г.)**

Научный редактор:
заслуженный деятель науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Геннадий Германович

Подписано в печать 10. 06. 2021г.
Бумага типографская. Печать - ризография.
Формат 70x108/16.
Тираж 100 экз. Заказ 385.

Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ»
115054, Москва, ул. М.Пионерская, д. 12
Тел/факс (499) 283-90-63, 959-37-05 e-mail: niipmt@mail.ru

Отпечатано в ООО «Телер»
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 28
Тел/факс (495) 937-86-64, e-mail: piskarev@teler.ru

ISBN 978-5-89671-026-4



9 785896 710264