

Рисунок 13 – Типовые осциллограммы выходного напряжения типа «Кратковременные помехи переменного тока частотой 50 Гц»

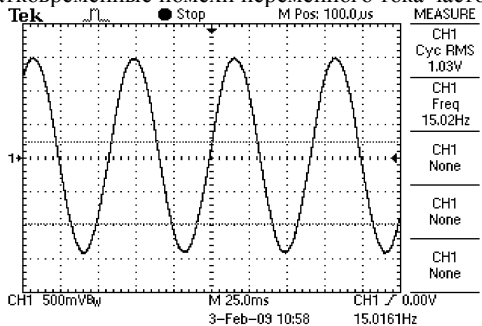


Рисунок 14 – Типовая осциллограмма результатов измерения выходного напряжения на выходе испытательного комплекса ИК-КП-150

Список литературы: 1. ДСТУ ІЕС 61000-4-16:2007 Електромагнітна сумісність. Частина 4-16. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до кондуктивних несиметричних завад у діапазоні частот від 0 Гц до 150 кГц.

Поступила в редколлегию 13.10.2009

УДК 533.9.082.5 : 533.9

Ю.В.КОВТУН, ННЦ ХФТИ НАНУ;
А.И.СКИБЕНКО, канд.физ.-мат.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ;
Е.И.СКИБЕНКО, канд.физ.-мат.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ;
Ю.В.ЛАРИН, ННЦ ХФТИ НАНУ;
В.Б.ЮФЕРОВ, докт.техн.наук, ННЦ ХФТИ НАНУ

ИЗЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

У даній роботі наведені попередні дані проведеного вимірювання параметричних залежностей інтенсивності оптичного випромінювання із плазмового середовища, елементного складу утворюваної плазми, а також проведено порівняльний аналіз випромінювання різних газометалевих плазм однакової середньої щільності в досліджуваному діапазоні довжин хвиль, з огляду можливого використання цих даних в сепараційних технологіях.

The paper presents previous measurement data on parametric dependences of the intensity of optical irradiation from the plasma medium and on the elemental composition of plasma formed. A comparative analysis of the data on irradiation from different gas-metal plasmas of a similar mean density in the investigated wavelength range is performed with the view of applying them in the separation technologies.

Отражательный разряд, известный также как разряд Пеннинга или филлиповский разряд, представляет собой разряд с осесимметричной геометрией, который протекает в скрещенных электрических и магнитных полях [1]. В настоящее время разряд Пеннинга, который реализуется в большом количестве прикладных и технических задач, несмотря на долгую историю продолжает интенсивно исследоваться [2,3]. Однако несмотря на это в исследовании импульсного отражательного разряда существует пробел экспериментальных данных, в частности в определении элементного состава и интенсивности излучения с плазмы, а также при исследовании свойств многокомпонентных как газовых, так и газометаллических плазм, что очень важно для определения энергодисбаланса исследуемых систем подобно [4,5].

Данная работа является продолжением работ по исследованию характеристик многокомпонентной газо-металлической плазмы в импульсном отражательном разряде [6,7]. Целью работы являлось измерение параметрических зависимостей интенсивности оптического излучения плазмы, а также проведение сравнительного анализа излучения газо-металлических плазм одинаковой средней плотности, для определения уровня энергетических потерь из объема в исследуемом диапазоне длин волн.

Эксперименты проводились на установке «МАКЕТ» описанной в [6,7]. Газометаллическая плазма образовывалась в результате разряда в среде рабочего вещества, состоящего из H_2 или газовой смеси 88,9 % Kr – 7 % Xe – 4 % N_2 – 0,1 % O_2 и распыленного металлического Ti , нанесенного на торцевые поверхности катодов. Катоды были выполнены из композитного материала, а именно медь, с напыленным по методу КИБ титаном. Разрядная камера откачивалась диффузионным насосом с адсорбционной ловушкой до давления 10^{-6} торт, затем напускался рабочий газ или газовая смесь. Использовались следующие диагностические средства: временная зависимость средней плотности плазмы определялась с помощью СВЧ-интерферометра на рабочей длине волны $\lambda = 8$ мм; регистрация временных зависимостей интенсивности излучения из плазмы в диапазоне длин волн $\lambda = 180-1100$ нм производилась фотодиодом ФДУК-13У, включенным в фотодиодном режиме, при этом постоянная времени фронта нарастания сигнала составляет $\tau_{н} \sim 300$ нс; элементный состав образуемой плазмы определялся спектрометрическим методом. Излучение регистрировалось через диагностическое окно, находящееся на расстоянии 220 мм от

плазменной границы, выполненное из кварцевого стекла КУ1. Размер фотоприемной поверхности составляет $\varnothing 2,5$ mm, пороговая чувствительность при λ_{\max} $P_{\text{пор.}} = 0,4 \cdot 10^{-14}$ W/Hz^{1/2}. Для проведения измерений излучения в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра использовались фильтры: оптические стекла УФС-2 в ультрафиолетовой области и ИКС-1 в инфракрасной. Зависимость коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ фильтров и кварцевого стекла от длины волны λ представлены на рис 1, а; относительная спектральная чувствительность $S(\lambda)_{\text{rel.}} = S(\lambda)/S(\lambda)_{\max}$ ФДУК-13У представлена на рис.1, б.

Измерение излучения из плазмы и средней плотности проводилось при следующих параметрах установки: разрядное напряжение $U_p = 3,4$ kV; давление рабочего газа (смеси) $p = 1,5-2 \cdot 10^{-3}$ torr; длительность магнитного поля 18ms; максимальная величина магнитного поля в сечении расположения диагностических средств составляла $H_{\max} = 4360$ Oe; разряд инициировался с задержкой 2ms относительно включения магнитного поля.

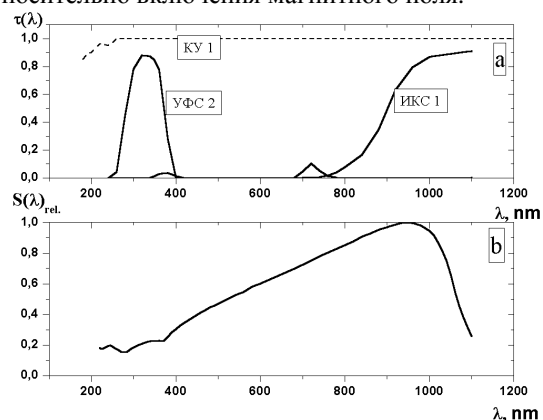


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ фильтров и кварцевого стекла от длины волны λ (а); относительная спектральная чувствительность $S(\lambda)_{\text{rel.}} = S(\lambda)/S(\lambda)_{\max}$ ФДУК-13У (б)

На рис. 2 представлена временная зависимость потока излучения из плазмы, а также средней плотности для водородно-металлической и Kr – Xe - N₂ - O₂ - металлической плазмы. Время нарастания плотности плазмы до значения $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13}$ cm⁻³ составило $\Delta t \sim 110$ μ s для (H₂+Ti) и ~ 80 μ s для (Kr – Xe - N₂ - O₂ +Ti). Помимо первичных атомов Ti, поступающих в разряд за счет корпускулярного взаимодействия с катодами, имеются также атомы других металлов, например, Fe в значительно меньших количествах, за счет распыления конструктивных элементов установки потоками плазмы. Время существования плазменного слоя с плотностью $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13}$ cm⁻³, регистрируемое по отсечке СВЧ-сигнала, составило $\Delta t \sim 1$ ms для плазмы (H₂ + Ti), $\Delta t \sim 1,8$ ms (Kr - Xe - N₂ - O₂ +Ti). Максимальное значение измеренного потока излучения из плазмы составило $3,7 \cdot 10^{-4}$ W (H₂ + Ti), $4,5 \cdot 10^{-4}$ W (Kr – Xe - N₂ - O₂ + Ti),

энергетическая освещенность (облученность) поверхности составляет $7,5 \cdot 10^{-3}$ и $9,2 \cdot 10^{-3}$ W/cm², соответственно. Отношение потока излучения при одинаковой средней плотности в данном диапазоне плотностей для Kr – Xe - N₂ - O₂ + Ti и H₂+Ti находится на уровне 1,1-1,3. В рамках геометрической оптики можно оценить объемную мощность излучения в предположении, что плотность и температура изотропны во всем излучающем объеме, при этом максимальное значение объемной мощности составляет 0,5 W/cm³ (H₂+Ti) и 0,63 W/cm³ (Kr – Xe - N₂ - O₂ + Ti).

На рис. 3 представлены временные зависимости потока излучения из плазмы Kr-Xe-N₂-O₂ +Ti для различных значений разрядного напряжения. Увеличение разрядного напряжения приводит: к уменьшению времени нарастания плотности плазмы $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13}$ cm⁻³ до значения $\Delta t \sim 20-30$ μ s; росту времени существования плазменного слоя с плотностью $N_p \geq 1,7 \cdot 10^{13}$ cm⁻³ до $\Delta t \sim 2,6$ ms; увеличению потока излучения из плазмы, при этом фотодиод переходит в режим насыщения и не позволяет регистрировать излучение с потоком выше $7,2 \cdot 10^{-4}$ W. Временная зависимость потока излучения из плазмы (H₂ + металлы) для различных диапазонов спектра представлена на рис. 4. Из сравнения приведенных экспериментальных зависимостей видно, что основной вклад в общем потоке излучения приходится на видимую часть спектра (\sim до 80 %).

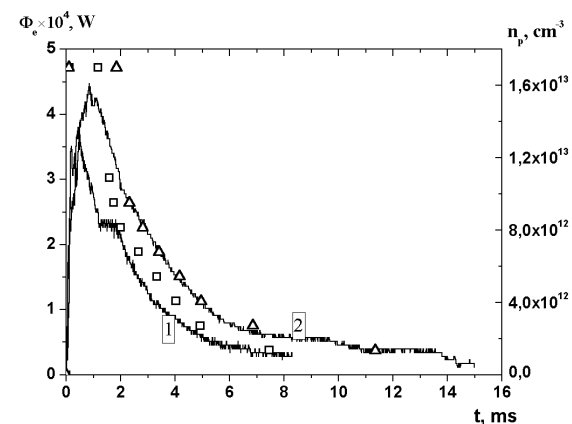


Рисунок 2 – Временная зависимость потока излучения из плазмы (сплошные кривые), а также средней плотности плазмы (точки), $U_p = 3,4$ kV. 1 – H₂ + Ti (\square); 2 – Kr – Xe - N₂ - O₂ + Ti (Δ)

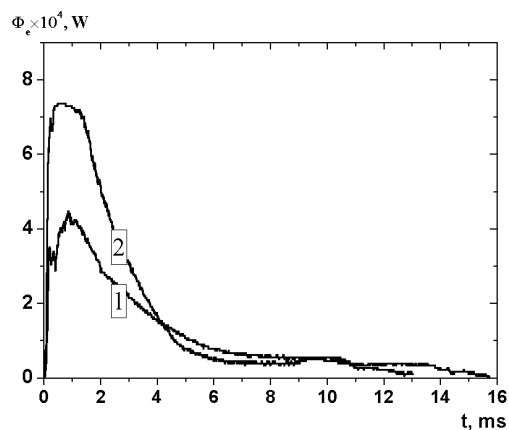


Рисунок 3 – Временная зависимость потока излучения из плазмы (Kr - Xe - N₂ - O₂ + Ti).
1 – U_p = 3,4 kV; 2 – U_p = 4,2 kV

В случае водородно-металлической плазмы основной вклад потерь на излучение вносят примесные ионы [8]. Поэтому проведем оценку количества основных примесей, входящих в состав образуемой плазмы. Основными компонентами водородно-металлической плазмы, определенные спектрометрическим методом (см. рис. 5) ($\lambda = 220-660 \text{ nm}$) являются: H (рабочий газ), OH и N (следы остаточной атмосферы в объеме разрядной камеры), C, Fe, Ti.

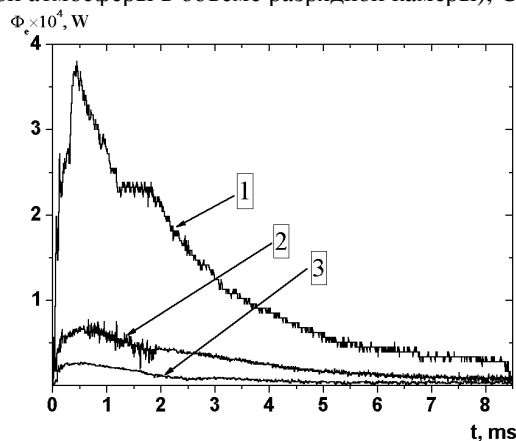


Рисунок 4 – Временная зависимость потока излучения из плазмы (H₂ + Ti).
1 – $\lambda = 180-1100 \text{ nm}$; 2 – $\lambda = 260-390 \text{ nm}$; 3 – $\lambda = 810-1100 \text{ nm}$.

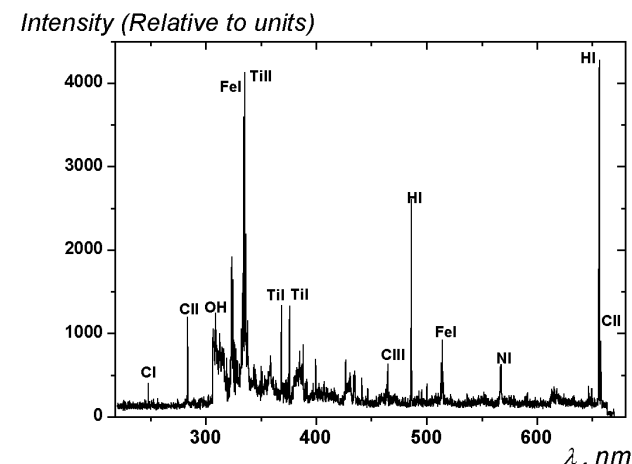


Рисунок 5 – Спектрограмма водородно-титановой плазмы

Используя основные соотношения газокинетической теории переноса нейтральных частиц газа в пространстве «стенка вакуумной камеры-объем плазмы» и учитывая процентное содержание компонентов остаточной атмосферы, расчетным путем, было оценено, что концентрация азота и кислорода в объеме плазмы находится на уровне процента, углерода на уровне нескольких процентов.

Присутствие Fe в разрядной камере, связано с распылением внутренних конструктивных элементов разрядной камеры. Принимая, что распыление происходит по всей внутренней поверхности разрядной камеры за счет высокоэнергетических ионов (то есть с энергией выше порогового значения), общее количество вносимого в разряд железа находится на уровне менее процента. Титан в составе спектра – это материал напыленного слоя катода, который под действием распыления, катодных пятен (дуг), блистиринга попадает в значительном количестве в разряд. Количество титана в разряде определялось путем расчета эффективной скорости ионизации газопаровой смеси с различным процентным содержанием титана и сравнение расчетных значений $\langle \sigma v \rangle_{\text{эффек}}$ с экспериментально полученными для водородно-титановой плазмы, при этом процентное содержание титана в разряде находится на уровне 40 – 50% и более.

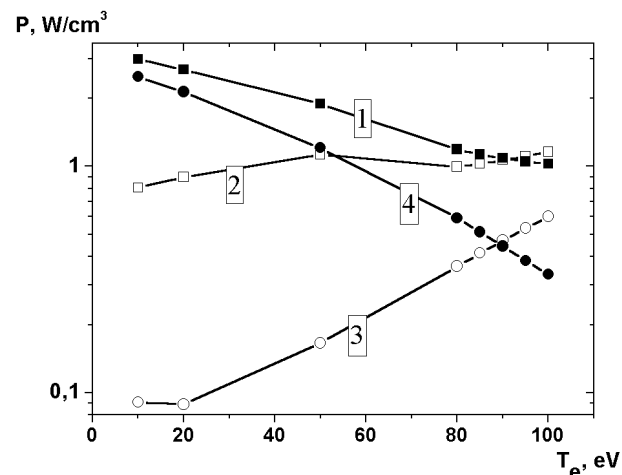


Рисунок 6 – Зависимость суммарных радиационных потерь от температуры электронов. 1 – (■) 40 % Ti - 53,34 % Kr - 4,2 % Xe - 2,4 % N₂ - 0,06 % O₂; 2 – (□) 88,9 % Kr - 7 % Xe - 4 % N₂ - 0,1 % O₂; 3 – (○) 100 % Kr; 4 – (●) 40 % Ti - 55,5 % H₂ - 1 % N₂ - 1 % O₂ - 2 % C - 0,5 % Fe

Суммарная мощность излучательных потерь P_{Σ}^Z на ионах с зарядом Z из единицы объема плазмы складывается из линейчатого P_L^Z , фоторекомбинационного P_R^Z и тормозного P_{Br}^Z , а также излучения, сопровождающего диэлектронную рекомбинацию P_{Dr}^Z и перезарядку P_{Th}^Z . Для оценки мощности излучательных потерь воспользуемся результатами расчетов, приведенных в работе [9] в рамках стационарной коронарной модели для чистых элементов. При этом предполагается, что плазма является оптически тонкой по отношению к собственному излучению; плотность плазмы считается достаточно низкой, так что можно пренебречь ступенчатой ионизацией через возбужденные состояния, следствием этого допущения является то, что энергия, затрачиваемая электронами на возбуждение, всегда теряется в виде излучения; пренебрегается также вкладом циклотронного излучения в полную мощность потерь. Результаты расчета с учетом элементного состава, оцененного выше, при $n_e = 10^{13}$ представлены на рис. 6. Видно, что минимальные потери характерны для чистой криптоновой плазмы (кривая 3); добавка газовых примесей в виде 7 % Xe, 4 % N₂ и 0,1 % O₂ приводит к увеличению потерь примерно на порядок (кривая 2); а введение в состав Ti приводит к нарастанию потерь в диапазоне $T_e = 10 - 90$ эВ (кривые 1,4). Кроме того, наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений отношения потерь для криптоно-титановой и водородно-титановой плазм. Этот факт свидетельствует, что основные потери на излучение связаны с присутствием титана в разряде.

Такое рассмотрение дает только качественную оценку потерь на излучение из плазмы, поскольку допущение стационарного коронарного равновесия

не полностью оправдано [10]. В реальных условиях эксперимента стационарное равновесие не достигается (атомное время релаксации $\tau \approx 10^{12}/n_e$ больше времени жизни плазмы), процессы перезарядки и диффузии будут влиять на зарядовый состав плазмы. В итоге требуется решение полной системы нестационарных уравнений баланса с учетом перезарядки и диффузии, которое является достаточно непростым и которое предполагается провести в последующих работах.

Выводы. Основные потери на излучение в исследуемых газо-паровых смесях связаны с присутствием титана в разряде. При этом максимальные значения потока излучения из плазмы, измеренные с помощью фотодиода ФДУК-13У, составляют $3,7 \cdot 10^{-4}$ W (H₂+Ti), $4,5 \cdot 10^{-4}$ W (Kr-Xe-N₂-O₂+Ti), отношение потока излучения при одинаковой средней плотности для Kr-Xe-N₂-O₂+Ti и H₂+Ti изменяется от 1,1 до 1,3. Основной вклад в общем потоке излучения приходится на видимую часть спектра (~ до 80%). Спектрометрическим методом определены основные компоненты водородно-металлической плазмы (H, OH, N, C, Fe, Ti) и оценено количество примесей, входящих в состав образуемой плазмы. Наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений отношения потерь для криптоно-титановой и водородно-титановой плазм.

Список литературы: 1. Penning F.M. Ein neues manometer für niedrige gasdrucke, insbesondere zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mm // Physica, 1937. – Vol. 4, № 2. – P. 71-75. 2. Toader E.L., Covlea V., Grahamb W.G., Steen P.G. High-density and low electron temperature direct current reflex plasma source // Review of scientific instruments, 2004. – Vol. 75, № 2. – P. 384-386. 3. Taekyun Ha, Sukmin Chung Optimization of cell geometry of a conventional sputter ion pump by a particle-in-cell simulation // Journal of Vacuum Science and Technology A, 2009. – Vol. 27, № 3. – P. 485-491. 4. Дологов А.Н. Скейлинг по току излучательных характеристик микропинчового разряда // Физика плазмы. – 2005. – Т. 31, № 8. – С. 733-741. 5. Морозов Д.Х., Баронова Е.О., Сенченков И.Ю. Излучение примесей в плазме токамака // Физика плазмы, 2007. – Т. 33, № 11. – С. 988-1005. 6. Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Системы с самовозбуждением ВЧ-колебаний для создания, нагрева и сепарации многокомпонентной плазмы // Вісник Харківського Національного Університету імені В.Н.Каразіна. – № 794, серія фізична: Ядра, частинки, поля. Випуск 1/37/. – 2008. – С. 115-120. 7. Скибенко А.И., Ларин Ю.В., Прокопенко А.В., Незовибатько Ю.Н., Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Создание и исследование имитационной плазмы на тяжелых газах и парах металлов в импульсном отражательном разряде для сепарационных технологий // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2007. – № 34. – С. 104-111. 8. Лысенко Э.А., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Влияние вакуумных условий на поступление легких примесей в плазму на начальной стадии разряда. – М. ЦНИИАтоминформ, 1987. – 18 с. 9. Post D.E., Jensen R.V., Tarter C.B., Grasberger W.H., Lokke W.A. Steady-State radiative cooling rates for low-density, high-temperature plasmas // Atomic data and nuclear data tables. – 1977. – V. 20 – P. 397-439. 10. К.Барнет, М.Харрисон Прикладная физика атомных столкновений. Плазма. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 432 с.

Поступила в редакцию 18.08.2009

УДК 621.31

А.И.КОРОБКО, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
З.И.КОРОБКО, научн.сотр., НТУ «ХПИ»

**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО**