

Генерация электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности диэлектриков

Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Васильев М.Н.

*Московская обл., г. Долгопрудный, Московский физико-технический институт
Институтский пер, 9*

E-mail: yehlaingtun@phystech.edu

Экспериментально исследована генерация электронно-лучевой плазмы (ЭЛП) вблизи поверхности твердых тел и жидкостей. Диэлектрические материалы использовались в качестве объектов воздействия пучка плазмы, а различные молекулярные газы (воздух и его компоненты, благородные газы, газообразные углеводороды) являлись плазмообразующими средами. Генерация плазмы изучалась в широком диапазоне давлений газа $10^{-1} - 2 \cdot 10^1$ Торр; выявлены особенности плазменных облаков вблизи поверхности термоэлектронной керамики.

Generation of electron-beam plasma near the surface of dielectrics. Ye Hlaing Htun, Aung Kyaw Oo, M.N.Vasiliev. Electron-Beam Plasma (EBP) generation near a surface of solid bodies and liquids was studied experimentally. Dielectric materials were used as subjects of the beam-plasma action and various molecular gases (air and its components, noble gases, gaseous hydrocarbons) were plasma-generating media. Plasma generation was studied in wide range of the gas pressure $10^{-1} - 2 \cdot 10^1$ Torr; peculiarities of plasma clouds near a surface of thermionic ceramics were detected.

Задачи о генерации электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности компактного твердого тела, слоя жидкости, частицы диспергированного порошка или жидкой капли являются типичными для анализа процессов пучково-плазменной модификации материалов, плазмохимического синтеза и управляемой деструкции сложных органических и биоорганических соединений. Как показано в [1], вблизи поверхности образца (не зависимо от его агрегатного состояния), контактирующего с электронно-пучковой плазмой, одновременно протекают многочисленные физические и химические процессы, кинетика которых определяется свойствами приповерхностной плазмы. Свойства электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности могут существенно отличаться от свойств плазмы в неограниченном объеме. Теоретическое описание этих процессов и компьютерное моделирование взаимодействия электронно-пучковой плазмы с поверхностью помещенного в нее образца, требуют самосогласованного решения многочисленных электрофизических, молекулярно-кинетических, плазмохимических тепловых и газодинамических задач, каждая из которых, даже решаемая отдельно, является весьма сложной. Поэтому при исследовании упомянутых выше процессов наиболее информативными оказываются экспериментальные методы.

Целью настоящего исследования является накопление экспериментальных данных об особенностях генерации электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности помещенного в нее объекта в различных условиях, определяемых свойствами материала, параметрами электронного пучка и плазмообразующей среды, а также факторами, характеризующими специфические условия взаимодействия плазмы с объектом, в частности - углом падения быстрых электронов.

Рис.1 иллюстрирует общую постановку задачи экспериментального исследования. Тонкий электронный пучок (ЭП), предварительно сформированный в высоковакуумной камере электронной пушкой, инжектируется в заполненную плазмообразующим газом рабочую камеру через выводное устройство (газодинамическое окно). В результате упругих и неупругих процессов, сопровождающих распространение ЭП в газе, пучок рассеивается и деградирует. В результате, формируется облако электронно-пучковой плазмы (ЭПП); в облако ЭПП помещается

плоская мишень, твердая или жидкая. Направление оси инжекции пучка образует угол ϕ с плоскостью мишени.

Поверхность мишени, взаимодействуя с ЭПП, подвергается воздействию тяжелых

частиц плазмы (заряженных и нейтральных), а также электронов деградационного спектра ЭП. Поглощение быстрых электронов веществом изолированной от «земли» мишени приводит к ее электростатической зарядке. Если мишень диэлектрическая, то потенциалы различных ее зон могут отличаться друг от друга, т.е. наблюдается эффект дифференциальной электростатической зарядки. При определенных условиях сама мишень может быть источником электронов, в частности, упруго- и неупругоотраженных электронов и электронов истинно-вторичной эмиссии. Если мощность ЭП достаточно велика, мишень может нагреваться, а на ее поверхности происходить фазовые переходы. Имея в виду, что неравновесная ЭПП является химически активной, нельзя исключить изменение электрофизических свойств материала в приповерхностном слое в результате плазмохимических реакций, стимулированных пучково-плазменным воздействием на вещество.

В ходе наших экспериментов измерялась температура мишени T ; регистрировался спектр излучения приповерхностной плазмы на фоне спектра люминесценции мишени и непрерывного спектра ее теплового излучения. Варьировались давление плазмообразующего газа P_m (в диапазоне 10^{-1} - $2 \cdot 10^1$ Торр) и ток пучка I_b , (от 1,0 до 100 мА). Эксперименты проводились для различных углов ϕ в следующих газах: воздух, кислород, инертные газы (гелий, аргон), газообразные углеводороды (метан, пропан). Для исследования электростатической зарядки диэлектрических материалов, также как и в [2], применялся метод «конденсатора» в импульсно-периодическом режиме работы установки. Потенциал поверхности мишени восстанавливался путем интегрирования измеренного тока зарядки и разрядки диэлектрика в переходных процессах. Для сравнения исследовалась зарядка и металлических мишеней такой же геометрии.

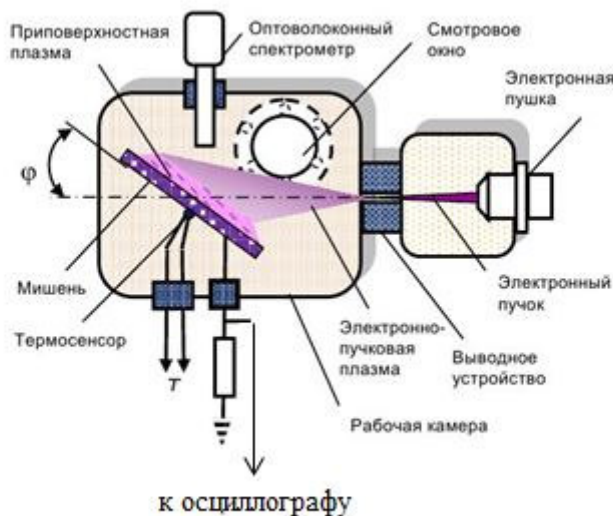


Рис.1. Схема экспериментов по генерации плазмы вблизи поверхности плоской мишени.

Эксперименты по воздействию ЭПП на мишени, изготовленные из материалов с различными электрическими и теплофизическими свойствами, показали, что:

1. Отрицательный потенциал на поверхности мишени, изготовленной из диэлектрического материала, значительно (вплоть до 2-х раз) превышает потенциал изолированной металлической мишени при тех же условиях. При давлениях $P_m \sim 0,1$ Торр он может достигать 500 В.
2. Потенциал диэлектрических мишеней практически не зависит от площади поверхности мишени, в то время как при прочих равных условиях потенциал металлической мишени возрастает по мере увеличения ее площади.
3. Увеличение давления приводит к резкому снижению потенциала: при давлениях $P_m > 1$ Торр потенциал U не превосходит нескольких вольт.
4. При увеличении тока пучка потенциал U возрастает и для металлических, и для

диэлектрических мишеней.

5. При давлениях $P_m < 0,1$ Торр наблюдается дифференциальная зарядка диэлектрических мишеней, сопровождающаяся электрическими пробоями по их поверхности.
6. Наибольшие размеры облака приповерхностной плазмы зарегистрированы при использовании в качестве мишени термоэмиссионных керамик, например LaB_6 .
7. Наличие заземленных элементов внутренней оснастки рабочей камеры вблизи мишени, заряженной до высокого потенциала (при $P_m < 1$ Торр), провоцирует электрический пробой между мишенью и «землей». Возникновению этого явления способствует повышение температуры мишени, которым сопровождается увеличение тока пучка.
8. Слой приповерхностной плазмы является оптически тонким и прозрачным для излучения поверхности мишени (теплого и/или люминесценции). Спектры, регистрируемые, как изображено на Рис. 1, представляют собой суперпозицию спектра излучения поверхности мишени и спектра излучения ЭПП.

На рис.2, представлен спектр излучения плазмы, возбуждаемой вблизи поверхности керамики Al_2O_3 , помещенной в ЭПП воздуха, а на рис.3- фотография, иллюстрирующая вид облака приповерхностной плазмы.

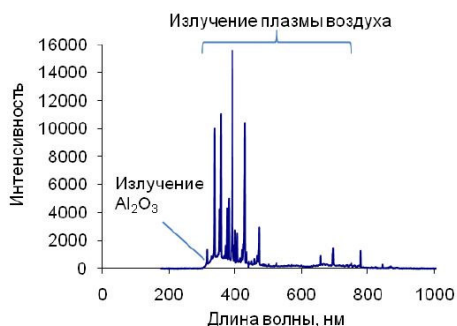


Рис.2. Спектр излучения ЭПП воздуха вблизи поверхности керамики Al_2O_3 , $P_m = 5,0$ Торр, $T = 420\text{K}$, $U \approx 4\text{В}$.



Рис.3. Плазма вблизи поверхности керамической мишени: мишень LaB_6 , плазмообразующий газ – гелий, $P_m = 0,5$ Торр, $T \approx 1400\text{K}$, $U \approx 250\text{В}$.

Литература

1. *M. Vasiliev, T. Vasilieva. Materials production with Beam Plasmas // In Encyclopedia of Plasma Technology (Ed. J.L. Shohet, Taylor & Francis), 2017. P. 152-166.*
2. *Юшков Ю.Г. Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов для модификации поверхности диэлектрических материалов // Дисс.на соискание уч.степени канд. техн. наук, Томск, 2012. 104с.*