

УДК 533.9.072

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

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

## Экспериментальное исследование электрофизических свойств приповерхностной электронно-пучковой плазмы

Экспериментально исследована генерация электронно-лучевой плазмы (ЭПП) вблизи поверхности твердых тел и жидкостей. Проводящие и диэлектрические материалы использовались в качестве субъектов пучкового плазменного воздействия, а различные молекулярные газы (воздух и его компоненты, инертные газы, газообразные углеводороды) были плазмообразующими средами. Образование плазмы изучалось в широком диапазоне давления газа  $10^{-1} - 20$  Торр. Выявлены особенности плазменных облаков вблизи поверхности термоэмиссионной керамики. Обнаружено, что испарение материала с поверхности мишени, контактирующей с ЭПП, существенно влияет на форму плазменного облака и ее оптическое излучение.

**Ключевые слова:** электронно-пучковая плазма, взаимодействие плазмы с поверхностью.

*Ye Hlaing Htun, Aung Kyaw Oo, M. N. Vasiliev*

Moscow Institute of Physics and Technology

## Experimental study of electrophysical properties of electron beam plasma generated near the surface

Electron Beam Plasma (EBP) generation near the surface of solid bodies and liquids is studied experimentally. Conductive and dielectric materials are used as subjects of beam plasma action and various molecular gases (air and its components, noble gases, gaseous hydrocarbons) are plasma generating media. Plasma generation is studied in a wide range of the gas pressure  $10^{-1} - 20$  Torr. Peculiarities of plasma clouds near the surface of thermionic ceramics are detected. Material evaporation from the target surface contacting with the EBP is found to significantly influence the plasma cloud shape and its luminescence.

**Key words:** electron beam plasma, plasma surface interaction.

### 1. Введение

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 (независимо от его агрегатного состояния), контактирующего с электронно-пучковой плазмой, одновременно протекают многочисленные физические и химические процессы, кинетика которых определяется свойствами приповерхностной плазмы.

© Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Васильев М. Н., 2019

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2019

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.

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 облаке ЭПП помещается плоская мишень, твердая или жидкая. Направление оси инжекции пучка образует угол  $\varphi$  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, а 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.

Задачей работы являлось накопление экспериментальных данных об особенностях генерации электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности помещенного в нее объекта в различных условиях, определяемых:

- свойствами материала (электрическими и теплофизическими) и геометрией мишени;
- параметрами электронного пучка и химическим составом плазмообразующей среды;
- факторами, характеризующими специфические условия взаимодействия плазмы с объектом (например, наличие/отсутствие контакта объекта с «землей», угол падения быстрых электронов и др.).

## 2. Экспериментальная установка

В ходе наших экспериментов измерялся потенциал металлической мишени  $U$  и ее температура  $T$ ; регистрировался спектр излучения приповерхностной плазмы на фоне спектра люминесценции мишени и непрерывного спектра ее теплового излучения. Варьировались давление плазмообразующего газа  $P_m$  (в диапазоне  $10^{-1} - 20$  Торр) и ток пучка  $I_b$ , (от 1,0 до 100 мА). Эксперименты проводились для различных углов  $\varphi$  в следующих газах: воздух, кислород, инертные газы (гелий, аргон), газообразные углеводороды (метан, пропан). Потенциал проводящих мишеней измерялся непосредственно (см. рис. 1), а для исследования электростатической зарядки диэлектрических материалов, так же, как и в [2], применялся метод «конденсатора». В последнем случае экспериментальная установка переводилась в импульсно-периодический режим работы, а потенциал поверхности мишени восстанавливался путем интегрирования измеренного тока зарядки и разрядки диэлектрика в переходных процессах. Температура мишени измерялась вольфрам-рениевой термопарой ВР 5/20.

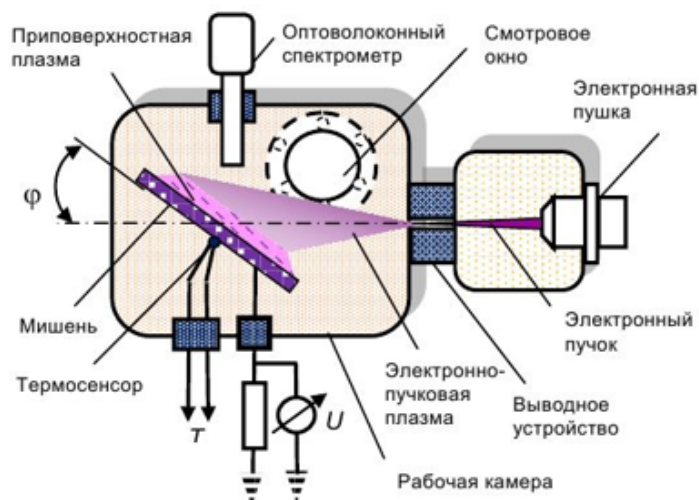


Рис. 1. Схема экспериментов по генерации плазмы вблизи поверхности плоской мишени

### 3. Результаты

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 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. Нагрев металлических мишеней, сопровождающийся даже незначительным ее испарением, значительно увеличивает размеры зоны, в которой формируется приповерхностная плазма.

7. Наибольшие размеры облака приповерхностной плазмы зарегистрированы при использовании в качестве мишени термоэмиссионных керамик, например  $\text{LaB}_6$ .

8. 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.

9. Слой приповерхностной плазмы является оптически тонким и прозрачным для излучения поверхности мишени (теплового 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , помещенной в ЭПП воздуха.

10. Формирование приповерхностной плазмы при давлениях буферного газа  $P_m \sim 10^{-2} - 10^2$  Торр вблизи поверхности жидкости требует специального исследования. К настоящему времени нами проведены лишь единичные эксперименты с жидкостями, обладающими низким давлением насыщенных паров (вакуумные масла, диэтиленгликоль). Показано, что при малых  $I_b$ , генерация плазмы вблизи поверхности таких жидкостей сле-

дует перечисленным выше (см. п. 1–9) закономерностям. Однако увеличение тока пучка, сопровождающееся интенсификацией испарения жидкости, радикально изменяют процесс плазмообразования.

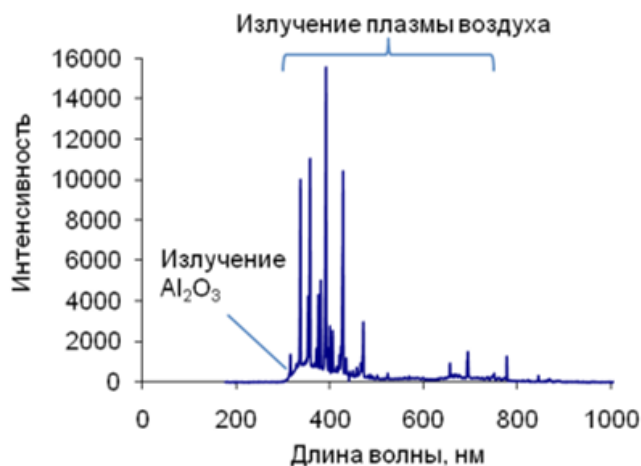


Рис. 2. Спектр излучения ЭПП воздуха вблизи поверхности керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $P_m = 5,0$  Торр,  $T = 420$  К,  $U \approx 4$  В

На рис. 3 представлены фотографии, иллюстрирующие вид облака приповерхностной плазмы в различных условиях проводившихся нами экспериментов.

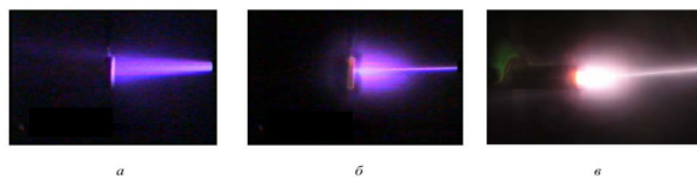


Рис. 3. Плазма вблизи поверхности изолированной от земли мишени

- а) мишень – титан, плазмообразующий газ – воздух,  $P_m = 2,0$  Торр,  $T \approx 500$  К,  $U \approx 10$  В;  
 б) мишень титан, плазмообразующий газ – воздух,  $P_m = 0,1$  Торр,  $T \approx 900$  К,  $U \approx 300$  В;  
 в) мишень  $\text{LaB}_6$ , плазмообразующий газ – гелий,  $P_m = 0,5$  Торр,  $T \approx 1400$  К,  $U \approx 250$  В

#### 4. Выводы

Формирование приповерхностной плазмы вблизи поверхности жидкости при давлениях буферного газа  $P_m \sim 10^{-2}$ – $10^2$  Торр требует специального исследования. К настоящему времени нами проведены лишь единичные эксперименты с жидкостями, обладающими низким давлением насыщенных паров (вакуумные масла, диэтиленгликоль). Показано, что при малых  $I_b$ , генерация плазмы вблизи поверхности таких жидкостей следует перечисленным выше (см. п. 1–9) закономерностям. Однако увеличение тока пучка, сопровождающееся интенсификацией испарения жидкости, радикально изменяют процесс плазмообразования.

#### Литература

1. *Vasiliev M., Vasilieva T.* Materials production with Beam Plasmas. 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. 104 с.

## References

1. *Vasilev M., Vasilieva T.* Materials production with Beam Plasmas. Encyclopedia of Plasma Technology (Ed. J.L. Shohet, Taylor Francis), 2017. P. 152–166.
2. *Yushkov U. G.* Fore-vacuum pulsed plasma electron source for surface modification of dielectric materials. Diss. for the degree of kand. tech. Sciences. Tomsk. 2012. 104 p.

*Поступила в редакцию 21.01.2019*