

## К вопросу о механизмах свечения поверхности металла при бомбардировке его интенсивным потоком электронов

И.В. Барсук\*

Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

(Получено 20.12.2011; опубликована online 04.06.2012)

В данной работе кратко рассмотрены и проанализированы основные физические процессы, которые могут влиять на характер свечения поверхности металлических элементов в электровакуумных приборах при бомбардировке их электронными пучками. Установлено, что эффекты свечения электронов на поверхности металлов в зависимости от их энергии являются либо переходным рассеянием плазменных волн на ионах, либо переходным излучением. Данный факт является важным как с точки зрения классической трактовки физики наблюдаемых явлений свечения элементов поверхности металлов, так и с точки зрения оптимизации методик диагностики металлов и электронных пучков.

**Ключевые слова:** электронный пучок, переходное излучение, плазма, переходное рассеяние.

PACS numbers: 41.60.Dk, 68.43.Rs, 68.43.Vx, 81.65.Cf

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Особый интерес в производстве электровакуумных приборов представляют вопросы формирования и диагностики электронных пучков (ЭП) с заданными параметрами, которые в значительной мере зависят от механизмов поверхностных явлений на металлических элементах изделий при бомбардировке их ЭП.

В [1] было показано, что основным доминирующим механизмом свечения при падении электронов из вакуума на поверхность металла является переходное излучение, которое было использовано в работе [2] для диагностики ЭП малых энергий. Дальнейшие экспериментальные исследования поверхностных свойств металлов при бомбардировке их ЭП [3] привели авторов к выводу о новом физическом явлении, не связанном с переходным излучением: возможностью устойчивого преобразования энергии электронов в энергию плазмы, локализованной по поверхности. Таким образом, выдвинутая в работе [3] гипотеза в какой-то мере ставит под сомнение фундаментальные результаты природы возникновения излучения при бомбардировке поверхности металла электронами [1]. Вместе с тем, последующие исследования данного явления в работах [4-6] показали, что доминирующими механизмами возникновения излучения на поверхности металлических мишеней являются переходное излучение или переходное рассеяние. Поэтому вопрос сравнительного анализа результатов работы [3] и работ [1, 4-6] является актуальным с точки зрения определения и констатации фундаментальных представлений физики возникновения свечения на поверхности металлов при их бомбардировке ЭП, что является одним из определяющих факторов при диагностике поверхности металлов и ЭП.

### 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В электровакуумной технике сорбционные явления играют важную роль, существенно влияя на степень вакуума в приборах. Поэтому еще на первых стадиях технологического процесса изготовления

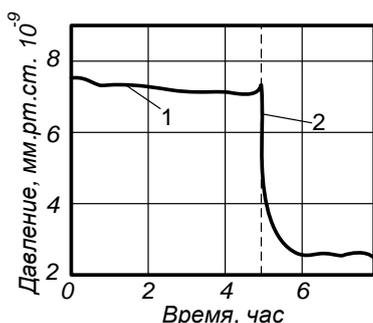
любых типов электровакуумных приборов встает вопрос о тщательной очистке их внутренних поверхностей. Существуют различные виды очистки поверхностей электродов: химическая, термическая, откачка и тренировка электровакуумных приборов и др. Однако очищенные детали неизбежно покрываются тонкими окисными пленками, на их поверхности в структурных дефектах адсорбируются компоненты воздуха. Строение и химический состав поверхностей еще больше усложняется при обезгаживающем нагреве в процессе откачки: примеси, содержащиеся в объеме металлов, диффундируют к поверхности, в результате чего на окисной пленке или в ее объеме появляются новые вещества, а это приводит к существенному изменению механических и электрических свойств приповерхностных слоев металлов [7].

При бомбардировке таких «загрязненных» металлических поверхностей электронами происходит резкий всплеск десорбируемых газовых компонентов самого различного состава. Для ряда объектов десорбция с их поверхности, а в некоторых случаях и разрушение самих объектов, происходят при энергиях электронов, меньших 50 эВ (так называемая электронно-стимулированная десорбция [8]).

Обильная десорбция газов с деталей наблюдается уже при низких энергиях электронов порядка 10-15 эВ. Причем газовыделение, вызванное электронной бомбардировкой, обычно в несколько раз, а иногда более чем на порядок, превышает газовыделение этих же деталей, но при обычном термическом обезгаживании, хотя в обоих случаях температура обезгаживаемых деталей может быть одинакова, что продемонстрировано на рис. 1. При этом в начальный момент бомбардировки очищенной поверхности металла может возникать газовый разряд [9].

Логично предположить, что подобные десорбционные процессы происходили и при экспериментальных исследованиях, описанных в статье [3]. А если принять во внимание, что в статье нет ни одного упоминания о степени вакуума в камере, то данное предположение является вполне закономерным.

\* [IvanBarsuk@gmail.com](mailto:IvanBarsuk@gmail.com)



**Рис. 1** – Равновесное давление газов в экспериментальной электровакуумной установке, возникающее при электронной бомбардировке анода (кривая 1) и нагреве его отдельным нагревателем (кривая 2)

Поэтому объяснимы ионизационные процессы, возникающие в прианодной области и локальный характер образования плазмы. Как бы тщательно не была обработана поверхность металла, она содержит выступы различной величины. Так, при наивысшем, 14-м классе чистоты обработки высота неровностей на поверхности составляет в среднем 0,5 мкм. Фактически металлические образцы, применяемые в экспериментах авторами статьи, имеют значительно большие неровности (6 – 11 класс). Локальный разогрев дефектов поверхности, имеющих ограниченный контакт с массивом образца, способствует увеличению сублимации микрочастиц материала, возрастанию вторичной электронной эмиссии за счет снижения работы выхода, возрастанию диффузионных процессов в зонах неоднородностей, что неизбежно приводит к ионизации «облака газа» и образованию плазменного факела в области дефекта поверхности.

Следует также отметить некоторые неточности авторов статьи [3] в трактовке механизмов излучения плазменных факелов на поверхности металлических образцов. Так, в разделе о предполагаемом механизме явления авторы говорят об отсутствии каких-либо опубликованных материалов, объясняющих возникающее свечение анодных поверхностей при электронной бомбардировке. Ссылаясь на статью Гинзбурга [1], авторы делают вывод о невозможности трактовки явления с позиций переходного излучения, который, однако, является некорректным. В той же статье можно найти детальное описание явления переходного рассеяния, имеющего место для случая с плазмой. Природа указанных явлений одинакова с той лишь разницей, что переходное излучение образуется движущимся зарядом, в то время как переходное рассеяние возможно при рассеянии волны проникаемости на неподвижном заряде. Как будет показано ниже, именно последнее вносит существенный вклад в механизм возникновения излучения плазменных факелов.

Плазменное излучение носит гораздо более сложный характер, чем указано в статье [3], поскольку основные механизмы излучения определяются не только индивидуальными свойствами заряженных и нейтральных частиц, образующих плазменную систему, но также и коллективными — колебательно-волновыми характеристиками. Более того, специфика плазмы, в частности её отличие от нейтрального газа, связана как раз с волновыми

процессами. Помимо механизмов излучения, связанных с наличием плазменных волн (в статье Гинзбурга [1] — обычное рассеяние, оно же томсоновское рассеяние), в плазме присутствует еще и так называемое переходное рассеяние — рассеяние волны проникаемости на неподвижном заряде. При этом волны данных типов интерferируют, что еще более усложняет картину формирования излучения.

При рассеянии на ионах, десорбированных под действием электронной бомбардировки с поверхности исследованных образцов, обычное рассеяние оказывается ничтожно мало из-за большой массы иона. Переходное же рассеяние вообще не зависит от массы частицы [1]. Отсюда ясно, что рассеяние плазменных волн на ионах — практически чисто переходное. Данный факт подтверждается также и тем, что интенсивность наблюдаемого свечения практически не зависела от материала бомбардируемых образцов.

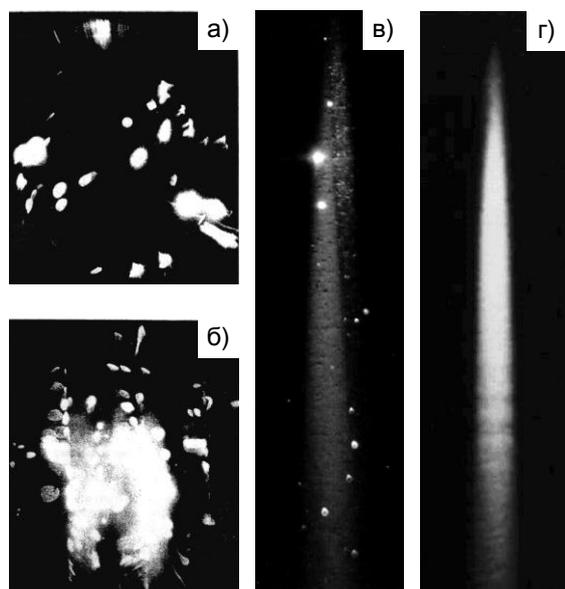
При облучении металлических мишеней интенсивными ЭП помимо образования плазменных факелов, излучение которых имеет достаточно сложную природу, должно иметь место и переходное излучение. Вопрос заключается только в механизме его регистрации и общем вкладе в фиксируемое излучение. Как показали результаты исследований [4], появление такого излучения неизбежно при использовании ЭП с плотностью мощности в диапазоне от единиц Вт/см<sup>2</sup> до десятков кВт/см<sup>2</sup>.

Подобные визуальные эффекты свечения поверхности мишени наблюдались в экспериментах по измерению статических параметров интенсивных аксиально-симметричных пучков по переходному излучению, описанных в работе [5]. В ходе экспериментов электронной бомбардировке подвергалась медная мишень с качеством поверхности порядка 9-10 класса чистоты обработки материала (зеркальное полирование). Давление в вакуумной камере анализатора достигало ( $10^{-8}$ - $10^{-9}$ ) мм.рт.ст., плотность мощности непрерывного аксиально-симметричного ЭП — (1,3-17,3) кВт/см<sup>2</sup> (энергия электронов варьировалась в диапазоне (2,5-4,5) кэВ в зависимости от режима работы электронной пушки). Следует отметить, что в связи с особенностями методики исследования микроструктуры ЭП, поток электронов падал на мишень под углом  $\alpha = 5^\circ$ , распределяя мощность по поверхности площадью 4,7 мм<sup>2</sup> (площадь полуэллипса, образованного следом свечения ЭП с диаметром 1 мм в месте контакта с поверхностью).

Было установлено, что излучение, возникающее при наклонном падении заряда на границу раздела двух сред, обладает рядом важных свойств, отличных от нормального падения: поляризовано в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а полная плотность излучения определяется суммой ее продольной и поперечной составляющих. В то же время, при рассмотрении нерелятивистских частиц (в нашем случае данное приближение применимо, поскольку при ускоряющих потенциалах  $U = (10^3$ - $10^4)$  В релятивистский корень дает отклонение всего в (0,196-1,965) %) переходное излучение оказывается поляризованным так же, как и при нормальном падении. Указанное свойство является чрезвычайно важным при детектировании переходного излучения, поскольку позво-

ляет отделить его от всевозможных шумов и побочных эффектов.

Кроме того, в [4] экспериментально были установлены и другие свойства переходного излучения: прямая пропорциональность интенсивности излучения величине энергии бомбардирующих электронов в диапазоне энергий от 30 эВ до 100 кэВ; однородность по структуре на всей поверхности металла, подвергающегося бомбардировке электронами; спектр излучения непрерывен в наблюдаемой области длин волн от 350 нм до 600 нм; излучение локализовано на поверхности металла в области падения на него электронов и его интенсивность не зависит от давления остаточных газов в рабочем интервале давления в приборе; распределение интенсивности излучения определяется распределением плотности тока в поперечном сечении падающего на мишень пучка.



**Рис. 2** – Свечение поверхности металла при электронной бомбардировке: а, б – фотографии, полученные авторами [3] (молибденовая и медно-вольфрамовая мишени соответственно); в, г – фотографии следа свечения аксиально-симметричного ЭП на медной мишени при значениях мощности пучка 17,3 кВт/см<sup>2</sup> и 1,6 кВт/см<sup>2</sup> соответственно

В качестве примера на рис. 2 представлены фотографии следов свечения ЭП, полученных при бомбардировке металлических мишеней импульсным (2а, б) [3] и непрерывным (2в, г) ЭП. В последнем случае для регистрации излучения нами использовалась фотокамера с эффективным количеством точек по сечению ЭП  $N = (10^4 \cdot 10^5)$  (эффективное количество точек, составляющих свечение ЭП, как правило, не превышает 25 % числа пикселей камеры). Если энергетические характеристики потока и плотность мощности на поверхности металла соответствовали режиму работы импульсного ЭП с длительностью импульса  $\tau = (1 \cdot 10^2)$  с [3], на поверхности металла также происходило образование локальных источников плазменного излучения. На рис. 2в на фоне экспериментально зарегистрированного следа пучка, образованного переходным излучением, четко просматриваются микрофакелы, распределенные по площади контакта ЭП с поверхностью. В детектируемом излучении появлялись существенные неоднородности, что приводило к значительным погрешностям в измерениях. Однако при снижении мощности ЭП до единиц кВт/см<sup>2</sup> плазменные факелы исчезали и наблюдалось исключительно переходное излучение (рис. 2г).

### 3. ВЫВОДЫ

В ходе сравнительного анализа результатов работ [3] и [1, 4-6] были рассмотрены различные механизмы возникновения поверхностного свечения металлов при электронной бомбардировке. Установлено, что явления устойчивого преобразования энергии электронного потока на поверхности металла в энергию плазмы [3] не могут быть классифицированы как «новое физическое явление», поскольку находят объяснение в рамках классических представлений переходного излучения и его разновидности – переходного рассеяния, что подтверждает фундаментальность изложенных в работе [1] выводов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной темы № 0109U001378.

## Aspects of Metal Surface Glowing Mechanisms with Intensive Electron Beam Bombardment

I.V. Barsuk

*Sumy State University, 2, Rimsky-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine*

The paper gives a brief description and analysis of the main physical processes which can have an effect on the glowing nature of metal element surfaces in different electric vacuum devices when they are bombarded by electron beams. It has been found that the electron glowing effects on metal surfaces according to the electron energy can be explained with the help of the transition scattering on plasma waves or just with the classical transition radiation effect. This fact is rather important in terms of classical physics interpretation of the observed glowing effects on metal surface elements and techniques optimization of metal and electron beams diagnostics as well.

**Keywords:** Electron beam, Transition radiation, Plasma, Transition scattering.

## До питання про механізми світіння поверхні металу при бомбардуванні його інтенсивним потоком електронів

І.В. Барсук

*Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна*

У даній роботі коротко розглянуті та проаналізовані основні фізичні процеси, які можуть впливати на характер світіння поверхні металевих елементів в електровакуумних приладах при бомбардуванні їх електронними пучками. Виявлено, що ефекти світіння електронів на поверхні металів в залежності від їх енергії можуть бути або перехідним розсіянням хвиль плазми на іонах, або чисто перехідним випромінюванням. Даний факт є важливим як з точки зору класичного трактування фізики явищ світіння елементів поверхні металів, так і з точки зору оптимізації методик діагностування металів та електронних пучків.

**Ключові слова:** електронний пучок, перехідне випромінювання, плазма, перехідне розсіяння.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.Л. Гинзбург, *Природа*, **8**, 22 (1975).
2. А.Н. Mahan, A. Gallagher, *Rev. Sci. Instrum.* **47**, 81 (1976).
3. В.П. Гамарский, Г.Г. Гонтарев, А.А. Жучков, В.А. Хмара, Ю.М. Яшнов, *Электронная промышленность* **1**, 22 (1978).
4. И.М. Балаклицкий, Е.В. Белоусов, В.Г. Корж, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **25**, 38 (1982).
5. E.V. Belousov, G.S. Vorobyov, A.A. Drozdenko, A.S. Kornyushchenko, V.G. Korzh, Y.V. Shulga, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **55**, 11001 (2011).
6. Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, Ю.В. Шульга, И.В. Барсук, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре* **89**, 7 (2010).
7. M.V. Knat'ko, M.N. Lapushkin, V.I. Paleev, *Tech. Phys.* **49**, 905 (2004).
8. V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina, *Tech. Phys.* **52**, 1962 (2010).
9. В.И. Новоселец, *Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника* **2**, 53 (2008).