

УДК 537.533.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОСЛЕРАЗРЯДНОЙ ЭМИССИИ С ОКИСЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ Mg И Cu ОТ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В. Л. Шатохин, П. Н. Чистяков

Проведено изучение зависимости послеразрядной эмиссии от внешнего электрического поля для Mg и Cu, покрытых тонкими пленками окислов. Для слабого электрического поля, до 70 В/см, зависимость не была обнаружена. В случае полей, превышающих пробойные, т. е. начиная с 300—400 В/см, для Cu обнаружена экспоненциальная зависимость эмиссии от напряженности поля. Для Mg при тех же напряженностях полей зависимость не обнаружена, но после длительной обработки поверхности магния в тлеющем разряде в аргоне, что привело к распылению поверхности слоя и уменьшению толщины пленки MgO, зависимость послеразрядной эмиссии от электрического поля также оказалась экспоненциальной. Приводятся эмпирические формулы зависимостей. В ходе работы было подтверждено, что основную роль при возбуждении эмиссии играют фотоны резонансного излучения ионизированного газа (аргона), однако в случае металла, слой окисла которого имеет высокое электрическое сопротивление (например, магния), значительную роль при возбуждении эмиссии играют также положительные ионы.

Настоящая работа посвящена исследованию воздействия внешнего электрического поля на ток послеразрядной эмиссии электронов с окисленных поверхностей Mg и Cu. Послеразрядная эмиссия представляет собой эмиссию электронов, возникающую под действием электрического разряда в газе и протекающую после прекращения воздействия разряда [1]. Возбуждение эмиссии тлеющим разрядом, где большую роль играет сопровождающее его ультрафиолетовое излучение, и ее инерционность во времени говорят о том, что в данном случае, вероятнее всего, наблюдается экзоэлектронная эмиссия [1—3]. Связь экзоэлектронной эмиссии с присутствием окислов на поверхности металла доказана экспериментально [2—6]. Есть немногочисленные данные, подтверждающие воздействие внешнего электрического поля на экзоэлектронную эмиссию. Так, была получена зависимость кинетики фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии с окисью берилля от внешнего поля [7]. В работе Грунберга [2] есть данные о том, что сила экзоэмиссионного тока зависит от электрического поля над эмиттирующей поверхностью. Сила эмиссионного тока растет с величиной напряжения U , приложенного между счетчиком и образцом в соответствии с формулой

$$N = \alpha(U - U_0)^2,$$

где α — константа и U_0 — напряжение, начиная с которого появляется эмиссия. Результат получен с окисленных поверхностей металлов после механической обработки при возбуждении светом.

Воздействие внешних полей на послеразрядную эмиссию ранее не изучалось.

В настоящей работе представлены экспериментальные данные по влиянию внешнего электрического поля на ток послеразрядной эмиссии с поверхностей металлов, окисленных в атмосферных условиях и подвергавшихся прогреву при 400°C. Ток послеземиссии определялся методом измерения статистических запаздываний возникновения электрического разряда в среде инертного газа (аргона) [1].

Экспериментальные приборы. Для проведения измерений зависимости послеразрядной эмиссии от электрического поля был сконструирован прибор, показанный на рис. 1. В стеклянную колбу впаяны анод (2) и сетка (3). Катод (1) подвижный, может перемещаться относительно сетки (на рис. 1 а — положение катода при измерениях, б — при обработке сетки; 4 — стеклянная пластина). Работа проводилась с двумя такими приборами — с магниевым и медным катодами. Анод и сетка в обоих приборах молибденовые. Такая трехэлектродная система позволяет изучать влияние на послеразрядную эмиссию различных по величине электрических полей. При использовании только двух электродов — сетки и катода — определяется влияние на ток послеразрядной эмиссии сильных надпробойных электрических полей.

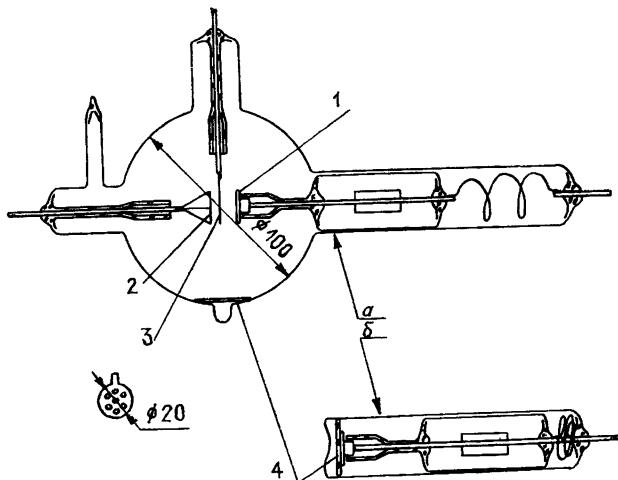


Рис. 1. Конструкция экспериментальных приборов.

Импульсы напряжения нужной амплитуды подаются на эту двухэлектродную систему, и по статистическому времени запаздывания возникновения разряда находится величина тока эмиссии. Зависимость определяется при изменении амплитуды напряжения. Влияние слабых, надпробойных, электрических полей можно изучать с использованием всех трех электродов прибора. В этом случае небольшое напряжение прикладывается между сеткой и катодом, а импульсы более высокого напряжения, вызывающие разряд, подаются между сеткой и анодом. Амплитуда импульсов остается постоянной, а зависимость эмиссии от электрического поля получается при изменениях величины слабого, постоянного напряжения. Измерение тока эмиссии осуществляется в промежутке анод — сетка, куда эмиттированные из катода электроны попадают через отверстия в сетке, прорейфовав от катода к сетке под действием существующего между ними поля. Возбуждение эмиссии с катода происходит за счет разряда в пространстве сетка — анод, связанном с пространством катод — сетка отверстиями в сетке, площадь которых составляет около 10% ее площади. Величина тока тлеющего разряда в пространстве сетка — анод выбиралась такой, чтобы во всех случаях возникало насыщенное состояние послеразрядной эмиссии из катода [1].

Подготовка к измерениям. Перед наполнением аргоном экспериментальные приборы подвергались обработке на вакуумном посту. Они откачивались и прогревались при 400°C при вакууме порядка $1 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$. Затем напускался аргон до давления 1 Torr и производилась очистка поверхности сетки электрическим разрядом до состояния, при котором послеразрядная эмиссия не возникает [8]. При этом ток эмиссии находился на уровне фона, т. е. составлял величину порядка 10^{-19} A . Во время очистки катод отодвигался в крайнее положение и закрывался стеклянной пластинкой (рис. 1). Делалось это для того, чтобы распыляемый с сетки материал не осаждался на поверхности катода. После очистки прибор еще раз откачивался до $p = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Torr}$, наполнялся спектрально-чистым аргоном до давления 5 Torr и отпаявался с вакуумного поста.

Проведение измерений. Результаты. Послеразрядная эмиссия измеряется через 5—10 секунд по окончании возбуждающего тлеющего разряда. До этого преобладает ток в промежутке, вызванный явлениями в газе [9]. Ток эмиссии очень мал ($10^{-13} — 10^{-20} \text{ A}$) и может быть измерен при отсутствии основных видов эмиссии электронов (термо-, авто- и фотожемиссии). Поэтому измерения производились в полной темноте, при комнатной температуре и при внешнем электрическом поле, не превышающем 10^4 V/cm .

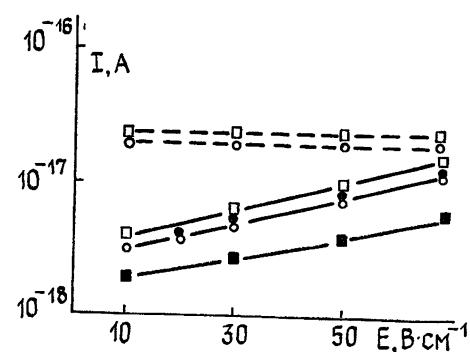


Рис. 2 Зависимость послеразрядной эмиссии электронов от внешнего электрического поля с окисленных поверхностей Mg и Cu. \square , \circ — измерения при постоянном электрическом поле, \bullet , \blacksquare — измерения с чередующимися полями. Пунктирными линиями обозначены результаты, полученные из экспериментальных данных после их обработки с учетом обратной диффузии электронов в прикатодной области [10, 11]

медной, квадраты — магниевой поверхности, см. также рис. 3, 4.). Период следования измерительных импульсов — 10 секунд. Катод поддвигался к сетке на расстояние 10 мм, напряжение на промежуток сетка — катод подавалось с высокоомного делителя, питающегося от сухих батарей. На рис. 2 сплошными линиями показаны зависимости, полученные из опыта. Однако при слабом поле у эмиттирующей поверхности имеет место обратная диффузия эмиттированных электронов [10, 11]. Обработанные с учетом такого эффекта экспериментальные данные дают совершенно иную картину (пунктирные линии на рис. 2). Оказалось, что зависимости от слабого внешнего электрического поля нет.

Послеразрядная эмиссия вызывается, в основном, действием на поверхность катода фотонов резонансного излучения, но определенное воздействие на эту эмиссию могут оказывать и положительные ионы, образовывающиеся в области горения тлеющего разряда и дрейфующие к поверхности катода. Чтобы оценить их роль в механизме возбуждения послеразрядной эмиссии, был поставлен следующий эксперимент. Если к промежутку сетка — катод приложить обратное по знаку напряжение, то во время горения разряда в промежутке

анод—сетка оно будет препятствовать движению ионов к поверхности катода, а ультрафиолетовое излучение разряда по-прежнему будет возбуждать эмиссию. Назовем этот импульс тока в промежутке сетка—анод при обратном поле между сеткой и катодом «возбуждающим». Теперь, чтобы измерить эмиссию, надо к приходу второго импульса напряжения изменить поле на нормальное, транспортирующее электроны от катода к сетке. Этот второй импульс будет «измерительным». Но при «измерительном» импульсе ионы попадут на катод. Чтобы снизить их влияние, надо выждать некоторое время перед подачей следующего «возбуждающего» импульса. Это время взято равным 1 мин, так как за этот период послеразрядная эмиссия с обоих катодов в основном прекратилась. Интервал же между «возбуждающим» и «измерительным» импульсами остался равным 10 с. Обратное поле во всех экспериментах было постоянным по величине и равнялось 90 В/см. Измерение времени запаздывания проводилось только при «измерительном» импульсе. Результаты такого опыта с чередующимися полями даны на рис. 2. Полученные данные для Си соответствуют измеренным ранее. Величина тока послеразрядной эмиссии из Mg уменьшилась при сохранении независимости от внешнего поля. Это говорит о том, что положительные ионы оказывают определенное влияние на послеразрядную эмиссию из магния и степень такого воздействия зависит от состояния эмиттирующей поверхности.

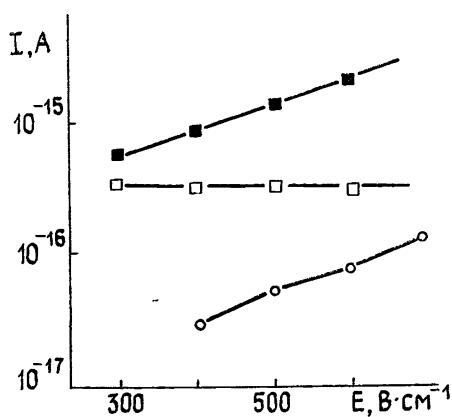


Рис. 3.

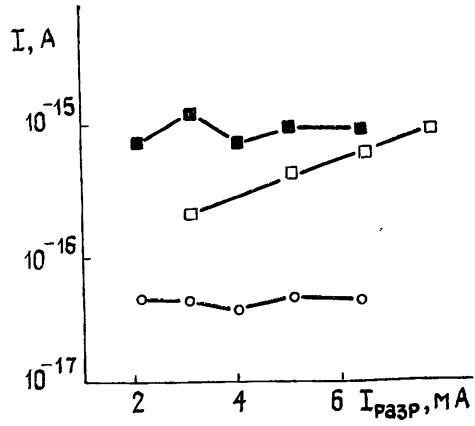


Рис. 4.

Рис. 3 Зависимость тока послеразрядной эмиссии от амплитуды импульса напряжения при постоянном токе разряда: \square , \blacksquare — данные, полученные для Mg соответственно до и после его обработки. Величины токов газового разряда: \circ — 5 мА, \square — 5 мА, \blacksquare — 3 мА.

Рис. 4. Зависимость тока послеразрядной эмиссии от тока электрического разряда в газе: \square , \blacksquare — данные, полученные для Mg соответственно до и после его обработки. Амплитуды импульсов напряжения: \circ — 600 В, \square — 500 В; \blacksquare — 500 В.

На рис. 3 и 4 показаны результаты, полученные при исследовании зависимости послеразрядной эмиссии от сильных электрических полей, когда импульсы напряжения подавались непосредственно на промежуток сетка—катод. На рис. 3 приведены зависимости, измеренные при поддержании постоянной величины тока разряда. Виден экспоненциальный характер зависимости тока послеразрядной эмиссии от амплитуды импульса напряжения для Си. Для катода из Mg влияние поля не обнаружено. Так как влияние положительных ионов на эмиссию из магниевого катода было известно, то здесь, в диапазоне более сильного поля, оно тоже исследовалось. При постоянной величине импульса напряжения изменялся ток разряда. Время горения разряда неизменно и равнялось 3 с. Эти результаты показаны на рис. 4.

Найдена экспоненциальная зависимость послеразрядной эмиссии от тока возбуждающего разряда. Послеразрядная эмиссия с поверхности Си при аналогичных измерениях не изменялась. В целом для обоих металлов наблюдается некая противоположность во влиянии внешних факторов на послеразрядную эмиссию электронов.

После таких измерений для Mg был проведен дополнительный эксперимент. Электрод был подвергнут интенсивной обработке электрическим разрядом пульсирующего тока. Когда величина тока разряда достигала 50 мА, наблюдалось интенсивное распыление Mg, о чем свидетельствовало ярко-зеленое свечение разряда. Всего электрод обрабатывался около 20 ч при изменениях тока разряда от 30 до 60 мА. И снова были повторены измерения с сильными электрическими полями. Результаты также даны на рис. 3 и 4. Картина зависимостей для Mg полностью изменилась и стала по характеру повторять известные зависимости у Si. Величина тока эмиссии с Mg осталась примерно на два порядка большей, чем у меди.

Экспериментально измеренные экспоненциальные характеристики по влиянию внешнего поля на ток послеразрядной эмиссии хорошо описываются уравнением вида $I = ae^{bE}$, где I — ток эмиссии в А, E — поле у поверхности катода в В/см, a и b — коэффициенты. Для магния и меди $b = 6 \cdot 10^{-3}$ см/В, для магния $a = 1 \cdot 10^{-16}$ А и для меди $a = 2,5 \cdot 10^{-18}$ А.

Обсуждение результатов измерений. Во время опытов было установлено, что в механизме послеразрядной эмиссии электронов определенную роль могут играть положительные ионы, образовавшиеся при горении тлеющего разряда и попадающие на эмиттирующую поверхность. Причем влияние их не однозначно, а зависит от состояния поверхности металла. Если на поверхности присутствует окисел с достаточным электрическим сопротивлением, то он может удерживать поверхностный заряд, создаваемый ионами. Так, вероятно, и было в случае с магнием. Чем больший заряд образуется на поверхности, тем большее поле он создает в слое окисла и тем больше воздействует на эмиссию, увеличивая силу эмиссионного тока. Такое поведение эмиссии видно у магния и в опыте с чередующимися слабыми электрическими полями, когда ослабление воздействия ионов влекло за собой уменьшение эмиссионного тока, и в опыте, где исследовалась зависимость тока эмиссии от тока возбуждающего разряда, когда увеличение заряда, проходящего через разрядный промежуток, а следовательно, и попадающегося на поверхности катода, вело к росту тока эмиссии. Окись меди не обладает столь высоким электрическим сопротивлением, позволяющим удержать поверхностный заряд. Изменились в эту же сторону и свойства поверхности магния после ионной обработки и распыления в разряде, что, несомненно, привело к резкому уменьшению толщины пленки MgO. Поэтому в обоих этих случаях не прослеживалось явного воздействия ионов на эмиссию.

Влияние внешних полей на ток эмиссии тоже зависит от состояния поверхности эмиттера, от способности металла образовывать окислы с теми или иными свойствами. Как видно из опытов с магнием, при наличии сильного внутреннего поля, создаваемого **поверхностным** зарядом, используемое в эксперименте слабое внешнее поле не усиливает тока эмиссии, зато со снижением изоляционных свойств окисла ток эмиссии попадает под очень сильную зависимость от внешнего поля. Слабые внешние электрические поля не изменяли силы тока ни у магния, ни у меди. Вероятно, здесь также сказываются свойства окислов создавать большие, чем внешние, внутренние электрические поля либо за счет поверхностного, либо за счет объемного, образуемого фотоэлектронной эмиссией положительного заряда.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Чистяков П. Н. Физическая электроника. Конспект лекций. Ч. 3.—М.: МИФИ, 1979, с. 9.
- 2 Экзоэлектронная эмиссия. Сборник переводов статей.—М: ИЛ, 1962.
- 3 Кортов В. С Тезисы докладов I Всесоюзного совещания.—Свердловск: УПИ, 1979, с. 3.
- 4 Чистяков П. Н., Татаринова Н. В. — Радиотехника и электроника, 1963, 8, № 7, с 1246.
- 5 Чистяков П. Н.—ЖТФ, 1963, 33, № 11, с 1395
- 6 Allen Geoffrey C. et al.—Surface Sci., 1981, 102, № 1, p. 207.
- 7 Mitrikov M. P., Lesz J.—Болг физ журн., 1981, 8, № 4, с 415
- 8 Chistyakov P. N., Shatokhin V. L. Proceedings of XVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Düsseldorf, 1983, 2, p. 298.
- 9 Лукашев А. А, Чистяков П. Н.—ЖТФ, 1971, 41, № 5, с 1053
- 10 Леб Л Основные процессы электрических разрядов в газах —М.—Л. Гостехиздат, 1950.
- 11 Hanzsche E—Beitr. Plasmaphysik, 1968, 8, S. 293.

Московский инженерно-физический
институт

Поступила в редакцию
26 октября 1983 г

DEPENDENCE INVESTIGATION OF AFTERDISCHARGE EMISSION FROM OXIDIZED Mg AND Cu SURFACES ON EXTERNAL ELECTRIC FIELD

V. L. Shatokhin, P. N. Chistyakov

Dependence investigation of the afterdischarge emission on the external electric field for Mg and Cu, covered by thin films of oxides, was carried out. For weak electric field up to $70 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ the dependence was not discovered. For the fields, exceeding breakdown ones, that is starting from $300\text{--}400 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$, for Cu, an exponential dependence was found. For Mg and the same fields the dependence was not discovered, but after prolonged treatment of Mg surface at glowing discharge in Ar, which resulted in surface layer scattering and decreasing of MgO film thickness, the dependence of the afterdischarge emission on electric field proved to be exponential too. Empiric formulas of dependence for Cu and Mg are given here. In the course of the work it was confirmed that the main role in initiation of the emission is played by photons of the resonance radiation of rare gas (Ar), however in the metal case, the oxide layer of which has high electric resistance (for instance, Mg), positive ions played the essential role at emission initiation as well.

УДК 535.31

Аннотации депонированных статей

К ВОПРОСУ О ЛИНЕЙНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

I. B. Еремина, Ю. Я. Яшин

Рассматривается взаимодействие нормальных волн в неоднородной среде. Показано, что компоненты матрицы трансформации могут быть получены с помощью ряда теорий возмущений. С геометрооптической точностью они могут быть вычислены с использованием диаграммной техники. Кроме того, с той же точностью получены решения уравнений для квазисферических связанных мод при учете горизонтальной неоднородности в ионосфере.

Статья депонирована в ВИНТИ,
регистр. № 676—85. Деп. от 23 января 1985 г.