

## ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭМИССИЮ ЧАСТИЦ С КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Павленко Т.П., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел. (057) 707-62-81

*В работе проведен анализ факторов, которые, возможно, определяют движение электрической дуги по рабочей поверхности контактов. Приведенные предположения основаны на квантовомеханической теории твердого тела, процессах термоэлектронной эмиссии и диффузионных явлениях.*

*У роботі запроваджен аналіз факторів, щодо можливого руху електричної дуги по робочій поверхні контактів. Дані припущення основані на квантовомеханічній теорії твердого тіла, процесах термоелектронної емісії та дифузійних явищах.*

### ВВЕДЕНИЕ

Проведенные ранее исследования контактного материала, которые были отражены в работах [1-3], показали, что на износ контактной поверхности очень большое влияние оказывает эмиссия электронов и других частиц. Кроме этого, обнаружены следы диффузии, образованные после введения в композицию контактного материала активатора. Это подтверждение основано на том, что контактная поверхность после испытания имеет вид равномерной дисперсной структуры. Работы по исследованию полученной композиции еще недостаточно изучены, в результате чего ведется постоянный поиск причин такого равномерного износа контактной поверхности по всему периметру.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из основных положений теории твердого тела можно сказать, что если вне тела нет силовых линий, то потенциальная энергия  $U(r)$  электрона во всем пространстве одинакова и обычно принимается равной нулю. При этом и полная энергия с покоящегося вне тела электрона также равна нулю. Если электрон вне тела движется, то его полная энергия  $E_n$  при этом может быть только положительной. Таким образом, в отсутствие силовых полей вне тела  $E_n \geq 0$ . Внутри тела возможны состояния электронов с энергиями  $E_B$  как положительными, так и отрицательными (рис.1).

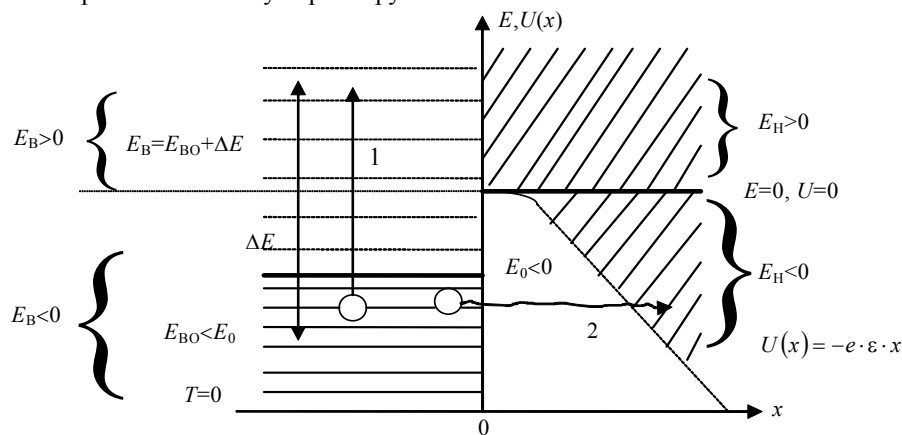


Рис. 1.

Наиболее низкие уровни электроны занимают в невозбужденном состоянии системы при  $T=0$  с энергиями  $E_{BO}$  вплоть до уровня  $(E_B)_{max} = E_0$ , причем  $E_0 < 0$ , значит и  $E_{BO} < 0$ . Таким образом, электроны не могут выходить из тела. Следовательно, эмиссия электронов при  $U(r)=0$  и  $T=0$  невозможна. Для того, чтобы электроны могли выйти (эмитировать), им необходимо сообщить энергию  $\Delta E$  такую, чтобы их энергия в возбужденном состоянии  $E_B$ , равная  $E_{BO} + \Delta E$  стала положительной (переход 1). Различают эмиссии с предварительным и без предварительного возбуждения. Эмиссия с предварительным возбуждением может происходить от нескольких источников, а эмиссия без предварительного возбуждения может происходить за счет силового поля, расположенного вне тела и вблизи его поверхности, которое тянет электроны от границы тела, а именно, если к поверхности приложено внешнее однородное электрическое поле, напряжен-

ностью  $\varepsilon$ , то потенциальная энергия в нем на расстоянии  $x$  от границы тела равна  $U(x) = U_0 - e \cdot \varepsilon \cdot x$  (где  $U_0$  - потенциальная энергия электрона при  $x=0$ , т.е. на границе тела  $U_0 = 0$ , тогда  $U(x) = -e \cdot \varepsilon \cdot x$ ).

Полная энергия, с которой теперь может существовать электрон в области пространства с  $x > x^*$ ,  $E_n \geq U(x) = -e \cdot \varepsilon \cdot x^*$ , т.е. при наличии силовых полей у поверхности тела, энергия электрона вне его может быть отрицательной и, в частности, принимать значения  $E_n = E_{BO} \leq E_0$ . Хотя эти области, в которых могут двигаться электроны с  $E_{BO} = E_n$ , разделены пространственно - потенциальным барьером, где  $U(x) > E_{BO}$ , в соответствии с представлениями о квантовой механике, возможен переход электрона из тела во внешнее пространство путем туннельного эффекта (переход 2), эмиссия электрона при этом не требует предваритель-

ного возбуждения. Аналогичная ситуация имеет место, если вблизи поверхности тела находится положительный ион, создающий кулоновскую потенциальную яму (рис. 2).

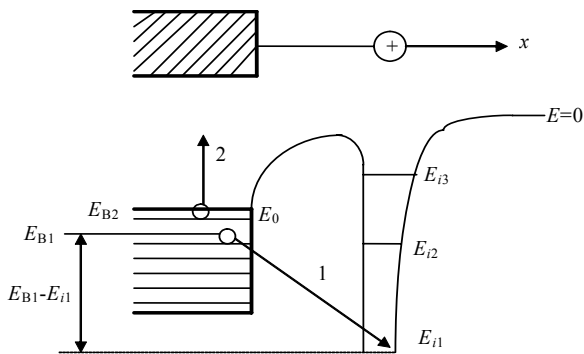


Рис. 2.

Атомные частицы (ионы, атомы, молекулы) также как и электроны могут быть эмитированы твердыми телами при нагревании их или бомбардировке их поверхности атомными частицами, электронами и фотонами. При этом эмитируемыми атомными частицами могут быть молекулы, атомы и ионы вещества мишени или адсорбированных на ее поверхности веществ, а в случае бомбардировки мишени атомными частицами также и сами эти бомбардирующие частицы.

Для того чтобы атом поверхностного слоя вещества мишени или адсорбированного вещества мог уйти с поверхности, он также должен обладать достаточной энергией, за счет которой он может преодолеть силы, удерживающие этот атом на поверхности. Это означает, что акту испускания атомной частицы должен предшествовать акт передачи энергии активации, не меньше энергии связи частицы с поверхностью. Эту энергию активации частица может получить за счет тепловой энергии тела, либо за счет кинетической энергии бомбардирующей поверхность этого тела частицы.

В настоящее время различают большое разнообразие эмиссий. Их изучение затруднено тем, что во многих случаях одновременно происходит несколько видов эмиссии, как электронов, так и атомных частиц. Например, при высоких температурах может одновременно с термоэлектронной эмиссией происходить эмиссия атомных частиц с тепловым возбуждением всех видов. При ударе быстрых ионов о поверхность мишени наряду с кинетическим и потенциальным вырыванием электронов могут протекать процессы испускания атомных частиц. При этом, если разделение положительно заряженных частиц и отрицательно заряженных без особого труда осуществляется с помощью электрического поля (задерживающего частицы одного знака и ускоряющего - другого знака), то разделение различных отрицательно и положительно заряженных частиц значительно сложнее.

Сопоставляя эмиссионные процессы как электронов, так и атомных частиц, можно сказать, что выход электронов и частиц из потенциальной ямы и преодоление потенциального барьера, в основном, зависит от работы выхода. Испускание электронов и частиц с контактной поверхности под действием температуры определяется явлением термоэлектронной эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия характеризуется величиной плотности тока насыщения.

$$j_s = A_0 \cdot (1 - R) \cdot T^2 \cdot \exp\left[-\frac{e \cdot \phi}{k \cdot T}\right] \quad (1)$$

где  $A_0$  - универсальная постоянная для всех видов эмиттеров;  $R$  - средний коэффициент отражения электронов от границы;  $e \cdot \phi = -E_0$  - работа выхода эмиттера.

При рассмотрении процесса термоэмиссии и выводе основного уравнения для плотности термоэмиссионного тока (1) можно показать два пути:

Во-первых, задачу можно решать, исходя из законов термодинамики, используя аналогию между испарением атомов и испусканием электронов. Это означает, что между процессами эмиссии частиц, зависящими от свойств тела и процессами их конденсации, зависящими от свойств закономерности эмиссии существует определенная связь. Поэтому закономерности эмиссии электронов можно определить, исходя из рассмотрения свойств насыщенного электронного газа. Такие процессы называются "термодинамическими".

Во-вторых, к изучению закономерностей термоэмиссии можно подойти, исходя из рассмотрения свойств электронного газа внутри эмиттера. Такие процессы называются "статистическими".

К сожалению, эти две задачи не могут быть решены по-отдельности и не могут быть доведены до конца, т.к. в первом случае для получения выражения плотности тока эмиссии необходимо привлечение законов квантовой статистики, во втором - решение уравнения плотности тока в конечном виде можно получить только для одного частного случая - системы свободных электронов.

Таким образом, необходимо искать пути для решения таких задач, и по всей вероятности они должны быть комбинированными.

Проведенные исследования показали, что наилучшими эмиссионными свойствами обладают окислы щелочноземельных металлов (оксидные катоды), которые были тщательно изучены и исследованы автором для возможности их применения в конструкциях контактных систем низковольтных электрических аппаратов.

Как показали исследования, распределение работы выхода по поверхности оксидного катода зависит от температуры и от степени его активирования; разброс работы выхода уменьшается по мере улучшения активирования.

В процессе активирования, оксид превращается в проводник, т.к. в нем создаются избыточные атомы металла, приводящие к появлению локальных донорных уровней. Это вызывает подъем уровня электрохимического потенциала и уменьшает работу выхода электронов с поверхности катода.

Проведенные исследования также показали, что плохо активированный катод является не электронным, а дырочным проводником. Т.е. иными словами можно сказать, что в оксидном катоде кроме доноров могут находиться акцепторы.

Анализ распределения частиц показывает, что доноры появляются в процессе активирования. Сначала их число меньше, чем акцепторов, поэтому все электроны с донорных уровней переходят на акцепторные и еще остаются свободные акцепторные уровни, обуславливающую дырочную электропроводность оксидного слоя в этом состоянии. По мере активирования

число доноров растет и для хорошо активированного катода намного превышает число акцепторов; при этом число электронов с уровней доноров перейдет на уровни акцепторов, заполнив уже все эти уровни. Но может оставаться еще много доноров с электронами, способными возбуждаться в зону проводимости оксида и создавать электронную электропроводность.

По мнению автора, этот процесс, может быть, объясняет быстрое перемещение дуги по контактам, но он не последний.

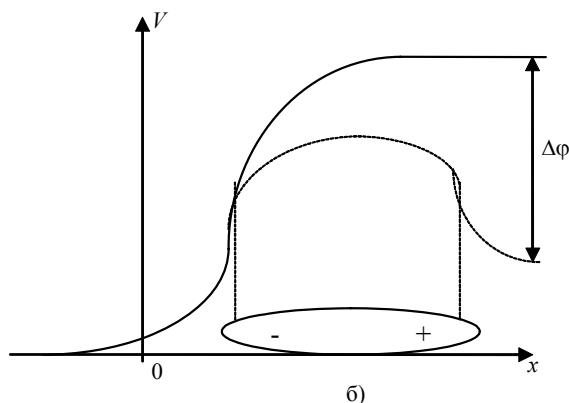
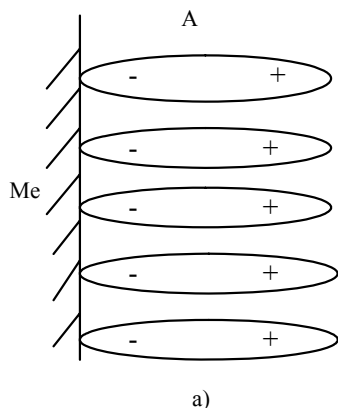


Рис. 3.

Совокупность таких диполей образует двойной электрический слой, вызывающий скачок потенциала в нем (рис. 3б), за счет чего понижается работа выхода электрона.

Скачок потенциала в этом двойном слое равен

$$\Delta\phi = 4 \cdot \pi \cdot n \cdot p \quad (2)$$

где  $n$  - число диполей на  $1 \text{ см}^2$ ;  $p$  - момент отдельного диполя.

В процессе работы контактов моноатомный слой разрушается под действием электрической дуги. Однако, в результате объемной и поверхностной диффузии атомов активатора, моноатомный слой восстанавливается. Таким образом, можно сказать, что ресурс работы активированного катода зависит от количества растворенного в материале-основе активатора.

Диффузия является немаловажным процессом, происходящим в металлах. Она объединяет многие разделы физики твердого тела (перемещение микрочастиц в поле сил, отсюда и связь с неравновесной термодинамикой, физической кинетикой, учением о дефектах в кристаллах и т.д.).

Обсуждению физики диффузии посвящено очень много работ. Диффузия в твердых телах - это результат случайных периодических скачков атомов из одного узла решетки в соседний. Скачки случайны в том смысле, что движение атомов не зависит от того, как перед этим он двигался сам.

Возможные механизмы диффузии в кристаллах показаны на рис. 4.:

- 1) простой обменный (два соседних атома меняются местами);
- 2) циклический обменный (совместное перемещение группы атомов, при котором каждый занимает место предыдущего);
- 3) вакансионный (обмен местами атома и вакансиями, т.е. пустого узла);
- 4) простой междуузельный (атом движется по междуузлиям);

По представлениям Ленгмюра, процесс активирования заключается в том, что на эмитирующей поверхности адсорбируется моноатомный слой электроположительных атомов примеси (активатора) по отношению к металлу-основе. Атомы активатора в результате высокой температуры диффундируют через металл-основу и, поляризуясь на границе металл-вакуум образуют на поверхности электрический диполь, направленный отрицательным полюсом к металлу-основе (рис. 3а).

5) междуузельный механизм вытеснения (атом вытесняет в междуузлие другой атом, занимая его место в узле; каждый смещается на половину расстояния между соседними междуузлиями);

6) краудинный (эстафетное смещение группы атомов).

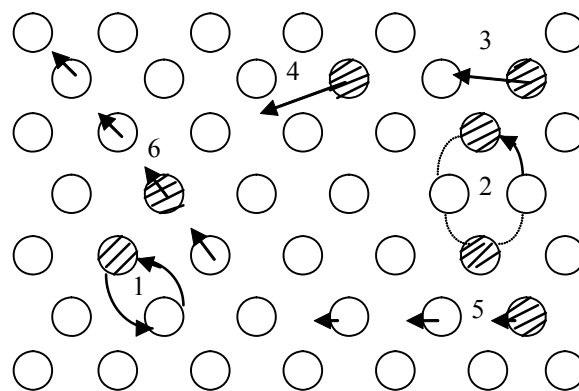


Рис. 4.

Основным механизмом диффузии, и самодиффузии, по мнению автора, является вакансионный. Вакансия является дефектом кристалла, и свободная энергия кристалла с вакансиями меньше, чем кристалла без вакансий. Минимуму свободной энергии кристалла соответствует равновесная концентрация вакансий.

$$N_v^e = \exp\left(-\frac{G_v^f}{R \cdot T}\right) = \exp\left(\frac{S_v^f}{R \cdot T}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H_v^f}{R \cdot T}\right) = \exp\left(\frac{S_v^f}{R \cdot T}\right) \cdot \exp\left[-\frac{U_v^f + p \cdot V_v^f}{R \cdot T}\right] \quad (3)$$

Здесь  $G_v^f, S_v^f, H_v^f, U_v^f, V_v^f$  - изменение свободной энергии, энтропии, энтальпии, энергии объема образца при образовании в нем вакансий.

Как следует из уравнения (3), равновесная концентрация вакансий экспоненциально растет с температурой; она достигает вблизи  $T_{пл}$  значений порядка  $10^{-4}$ , т.е. примерно один пустой узел на десять тысяч.

При самодиффузии по межузельному механизму

$$D^{(i)} = \gamma \cdot f \cdot \Delta^2 \cdot \nu \cdot \exp\left[-\frac{S_i^f + S_i^m}{R}\right] \cdot \exp\left[-\frac{H_i^f + H_i^m}{R \cdot T}\right], (4)$$

где  $\gamma$  - коэффициент термодинамической активности компонента  $\approx 1$ ;  $f$  - коэффициент самодиффузии  $\approx 1$ ;  $\Delta$  - длина скачка (величина постоянная и равная расстоянию до ближайшего соседа),  $A$ ;  $\nu$  - частота колебаний атомов ( $10^{12} \text{ с}^{-1}$ );  $i$  - индекс относится к атому в межузлии.

Структурный аспект диффузии, т.е. связь ее со структурой твердого тела, в частности, с дефектами структуры, известен давно. Развитие теории несовершенства кристаллической решетки подчеркнуло практическое значение диффузионных измерений.

По геометрическим признакам дефекты делятся на точечные (нульмерные), линейные (одномерные), поверхностные (двумерные).

Точечные дефекты малы во всех 3-х измерениях, параметры их не превышают нескольких атомных

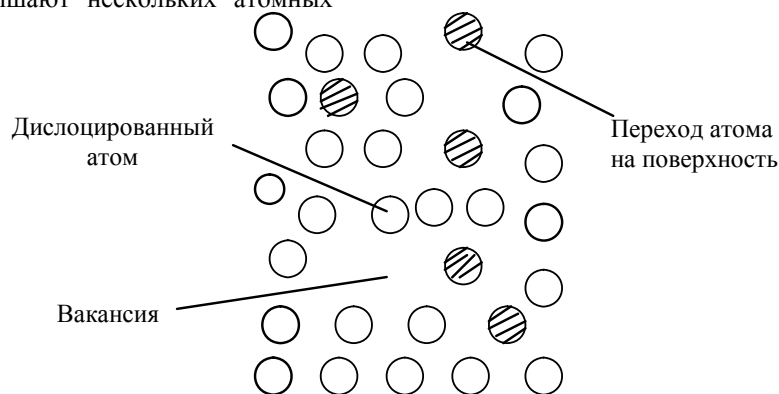


Рис. 5.

Если перемещения атомов не связаны с изменением концентрации в отдельных объемах, то такой процесс называется самодиффузией и наоборот - гетеродиффузией.

Атомы металла при самодиффузии, а также примеси, атомы которых замещают атомы основного металла в кристаллической решетке, перемещаются путем обмена местами с вакансиями, примеси, располагающиеся в межузлии (при диффузии) передвигаются путем перехода из одного межузлия в другое

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований контактной поверхности после испытания и теоретического анализа системы твердого тела можно сказать что, на эмиссию электронов влияет работа выхода, распределение которой по поверхности контакта (катода) зависит от температуры и степени активирования, а именно, с улучшением активации работа выхода уменьшается. По всей вероятности, быстрое перемещение опорных пятен дуги по поверхности контакта (как показали испытания), объясняют процессы, которые происходят в кристаллической решетке под действием температуры и влияния электрического поля, а именно: образование двойного электрического слоя, вызывающего скачок потенциала, за счет чего

диаметров. К ним относятся вакансии (дефекты Шоттки), т.е. узлы решетки, в которых атомы отсутствуют. Вакансии чаще образуются в результате перехода атомов из узла решетки на поверхность или полного испарения с поверхности кристалла и реже в результате их перехода в межузлие (рис.5).

Точечные вакансии вызывают местное искажение кристаллической решетки. Смещение (релаксация) вокруг вакансий обычно возникает в первых двух-трех слоях соседних атомов и составляют доли межатомного состояния. Точечные несовершенства появляются и как результат присутствия атомов примесей. Атомы примесей или замещают атомы основного металла в кристаллической решетке или располагаются в межузлии, искажая решетку. Наличие вакансий предопределяет возможность диффузии, т.е. перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные для данного металла. Точечные дефекты влияют на некоторые физические свойства металла (электрическую проводимость, магнитные свойства и др.) а также на фазовые превращения.

работа выхода уменьшается, а также влияние процесса диффузии, который связан с термодинамическими явлениями (энтальпия, энтропия, свободная энергии) и фазовыми превращениями. Совокупность рассмотренных явлений приводит к уменьшению работы выхода электронов и сокращению эмиссии, что заставляет дугу перескакивать на другое место, а на предыдущих местах идет процесс восстановления моноатомного слоя за счет вакансий, т.е. происходит переход атома из узла решетки на поверхность.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крыгина Т.П., Павленко Ю.П. Электрические контакты высокой эрозионной стойкости. Сб. научн. тр. "Низковольтные аппараты защиты и управления", - Харьков, ВНИИЭА, 1993, С.230-235.
- [2] Павленко Т.П. Контактные композиции повышенной дуговой стойкости для силовых электрических аппаратов. Вестник ХПИ, Сб. научн. тр. "Новые решения в современных технологиях", №84, - Харьков, ХПИ, 2000, С.154-157.
- [3] Павленко Т.П. Термоэмиссионная активность композиционных контактных материалов., Вестник НТУ "ХПИ", Сб. научн. тр. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов" № 48, - Харьков, НТУ "ХПИ", 2005, С.115-119.

Поступила 1.12.2005