

# Прямоугольные электрические соединители. Пленки на электрических контактах

**В статье изложены основные гипотезы и положения теории образования различного рода пленок и их влияние на работу электрических контактов.**

**Леонид Сафонов  
Александр Сафонов**

edet@online.debryansk.ru

## Введение

Успешное функционирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в значительной степени зависит от четкой безотказной работы электрических соединителей и их основных элементов — электрических контактов.

За последние десятилетия благодаря широкому внедрению автоматизированных систем управления и возросшей сложности РЭА теория электрического контакта получила новый импульс развития. Особое место в этой теории занимает раздел по изучению процесса образования различного рода пленок и их влияния на работу электрических контактов. Однако изучению этого процесса, по мнению авторов, уделяется недостаточное внимание.

В статье обобщена имеющаяся информация о пленках, которые возникают на контактах электрических соединителей в процессе хранения и эксплуатации. Авторы излагают свои взгляды на эту проблему и делятся своими соображениями в этой области. А также обозначают серьезность последствий, которые могут возникнуть при эксплуатации электрических соединителей в составе РЭА, если не будут учтены некоторые особенности, позволяющие минимизировать отрицательные воздействия различного рода пленок на нормальную работу контактных пар.

## Типы пленок на электрических контактах

Практически все металлы подвергаются окислению. Металлические поверхности в процессе обработки и после нее очень быстро покрываются первичной пленкой окисла. Такие пленки обнаруживаются и на благородных металлах. Скорость образования пленки окисла на поверхности металла исчисляется долями секунды. С увеличением толщины рост пленки замедляется. Несмотря на малую толщину, пленка всего в несколько элементарных ячеек кристаллической решетки данной фазы окисла при нормальной температуре приостанавливает дальнейшее окисление.

Внешний слой поверхности контактов состоит из загрязнений, попавших на поверхность при обработке, и адсорбированных газов и паров, находящихся в рабочей зоне электрических соединителей. Толщина этого слоя достигает 0,1–2,5 нм. Расположенный под ним слой, возникающий под влиянием кислорода, имеет на различных металлах толщину от 2–10 нм (по данным А. Д. Манасевича).

На электрических контактах могут образовываться следующие типы пленок:

- пленки потускнения, обычно окисные или сульфидные;
- адгезионные пленки;
- пассивирующие пленки;
- граничные смазывающие пленки;
- другие виды пленок.

Окисные и сульфидные пленки потускнения являются полупроводниками с большим удельным сопротивлением. Из теории полупроводников следует, что проводимость возникает при нарушениях в их решетке. Поскольку плотность таких нарушений изменяется от точки к точке, что частично зависит от строения решетки металла, лежащего под пленкой, удельное сопротивление окислов будет изменяться также от точки к точке. Кроме того, толщина пленок потускнения зависит от того, на какой грани кристалла эта пленка выросла. Из этого следует вывод, что любая пленка потускнения на поликристаллической металлической поверхности неоднородна, то есть гетерогенна. Гетерогенность доказана на основе исследований контакта в работах Р. Хольма, Р. Штермера и др. На исследуемых поверхностях контактов наблюдались пятна с пониженным, нормальным и большим сопротивлениями. Такое явление было отмечено даже у благородных металлов и их сплавов.

Поверхность, по которой происходит соприкосновение контактов с определенным контактным давлением, называется контактной поверхностью, воспринимающей усилие.

Поверхность, воспринимающая усилие, состоит из следующих участков:

- Участка с металлическим контактом, в котором ток протекает без заметного переходного сопротивления, как это имеет место между различными кристаллами в компактном металле.
- Участка с квазиметаллическим контактом — поверхности, покрытой тонкой пленкой, которая легко пропускает ток благодаря туннельному эффекту, не зависящему от проводимости материала пленки. Типичными пленками такого рода являются адгезионные и хемосорбирующие слои атомов кислорода, которые образуются на воздухе на совершенно чистой поверхности металла.
- Участка, покрытого мономолекулярными пленками, в особенности пленками потускнения (окислы, сульфиды и т. п.). Эти пленки практически играют роль изоляторов.

Проводящие контактные поверхности в дальнейшем, как общепринято, будут называться *a*-пятнами (см. рис. 1 в ТвЭП № 4 2008, стр. 58, на котором представлены виды контактных поверхностей и контактных пятен).

Чтобы иметь представление о том, каким образом едва заметные пленки могут оказывать влияние на электрический контакт, сравним контактное сопротивление некоторого *a*-пятна без пленки и такого же пятна, но покрытого пленкой ( $S \approx 10^{-6}$  см). При этом будем полагать, что удельное сопротивление пленки равно  $\rho_f = 10^5$  Ом·см, а металла —  $\rho = 2 \times 10^{-6}$  Ом·см. Радиус *a*-пятна равен  $5 \times 10^{-3}$  см, такую величину радиуса *a*-пятна часто можно наблюдать в плоских контактах:

$$R_f = (\rho_f S) / (\pi a^2), \quad (1)$$

где  $R_f$  — сопротивление *a*-пятна, покрытого пленкой;  $\rho_f$  — удельное сопротивление пленки;  $S$  — толщина пленки;  $a$  — радиус *a*-пятна.

$$R_c = \rho / (\pi a), \quad (2)$$

где  $R_c$  — сопротивление *a*-пятна без пленки;  $\rho$  — удельное сопротивление металла.

Отношение этих величин равно:

$$R_f / R_c = (\rho_f / \rho) (S / a) = 10^7. \quad (3)$$

Видимые глазом пленки, если они не разрушены в результате электрического пробоя, будут практически изолировать металлические контакты.

Изоляция, создаваемая пленками потускнения, значительно затрудняет работу электрических контактов. В начале своего образования пленки потускнения точно так же, как и адгезионные пленки, являются мономолекулярными.

Наиболее известная адгезионная пленка состоит из кислорода. Если чистую поверхность контакта подвергнуть воздействию воздуха, то на ней будет осажаться кислород в виде физически адсорбированных молекул, которые оказываются связанными с поверхностью металла сравнительно небольшими силами, так называемыми силами Ван дер Ваальса. Даже при нормальных условиях требуется не-

много времени, чтобы эти молекулы быстро диссоциировали вследствие каталитического воздействия металла. Одновременно атомы кислорода могут оказаться хемосорбированными, то есть ковалентно связанными с атомами металла.

Д. А. Беккер, изучая хемосорбированные слои, установил, что на поверхности металла существуют два тонких слоя кислородных атомов. (Беккер назвал их адатомными слоями.) Предполагается, что оба слоя соприкасаются с поверхностью металла. Однако не все атомы кислорода, лежащие на поверхности металла, становятся хемосорбированными, но существует, по крайней мере, один хемосорбированный слой, который состоит из молекул кислорода и является физически связанным (силами Ван дер Ваальса). Эта связь примерно на один порядок слабее химической, однако она сопоставима с механической прочностью металла, отнесенной к одному атому. Вследствие этого физически связанная пленка может выдерживать заметные механические нагрузки, но плохо противостоит износу. Адгезионные пленки характеризуются туннельной проводимостью, причем удельное сопротивление таких пленок практически на всех металлах имеет одну и ту же величину.

Хемосорбцию можно объяснить тем, что кислородные адатомы обмениваются электронами с атомами металла на поверхности. Но обычно кислородные атомы долго не существуют, так как электронное сродство кислорода с металлом приводит к вытягиванию электронов из последнего, и атомы кислорода превращаются в отрицательные анионы и образуют отрицательный слой на металле. Этот слой противодействует «испарению» электронов, то есть увеличивает работу выхода  $\phi$ .

Факт образования окисных пленок потускнения означает, что кислородные адатомы или анионы также способны извлекать атомы металла и связывать их в решетку окисла — это и есть начальная стадия потускнения. Отрицательной составляющей в пленке потускнения должен быть кислород, но, кроме него, могут присутствовать также сера, хлор, аммиак и т. п. Когда говорят о потускнении или о пленках потускнения вообще, всегда подразумевают под положительными составляющими атомы или ионы основного металла.

Основное влияние пленок потускнения на контакты состоит в следующем:

- Создают сопротивление, что является основной проблемой при использовании контактов.
- Уменьшают схватывание и трение в контактах, что является положительным моментом. Этот эффект у пленок потускнения находится примерно на том же уровне, что и у тонких адгезионных пленок, пока они еще не повреждены.
- Сопротивление пленок потускнения имеет отрицательный температурный коэффициент, который приводит к спаду RU-характеристик.

## Рост пленки потускнения на металлах

Образование пленки потускнения при нормальных климатических условиях протекает медленно и не может быть измерено с достаточной точностью. Для облегчения наблюдения роста пленки потускнения можно использовать ускоренный метод путем увеличения температуры. При таких условиях действуют сравнительно простые закономерности.

В отношении контактов, находящихся в эксплуатации, нас прежде всего интересует потускнение при низких температурах. Однако при таких температурах наблюдение затруднено. Интервал температур, в которых работает основная масса соединителей, находится в пределах от  $-60$  до  $+125$  °С. По-видимому, правильнее начать со случая, где влияющие факторы сравнительно просты. И именно по этим соображениям рассмотрим процесс роста пленки потускнения на чистом никеле при температуре 100 °С. Безусловно, что загрязненные поверхности будут реагировать сильнее, но на них и значительно сложнее будет проследить интересующий нас процесс.

Предположим, что к началу рассматриваемого процесса уже существует окисная пленка толщиной  $S_0$ . Нам необходимо определить, каким образом эта пленка будет расти дальше. Кислород воздуха быстро осаждается на поверхность, и, когда молекулы кислорода соприкасаются с атомами металла, диффундирующими через уже существующую окисную пленку, образуются молекулы окисла. Этот процесс протекает довольно быстро, на что указывает быстрое нарастание первоначального окисного слоя. Естественно, что скорость нарастания ограничена наиболее медленным процессом, в данном случае транспортировкой атомов никеля посредством диффузии через решетку существующей окисной пленки. В NiO наблюдается так называемый вакантный механизм диффузии, который установили Е. А. Гулбрансен и К. Ф. Эндрю. Они также определили, что окисел не является стехиометрическим (то есть не подчиняется учению о количественных соотношениях между массами веществ, вступающих в химическую реакцию), и во многих точках его решетки атомы никеля отсутствуют. Диффузия протекает таким образом, что атомы никеля перемещаются в одну из ближайших вакансий, оставляя после себя новую вакансию. Ясно, что атом сможет покинуть свое первоначальное положение только тогда, когда ему будет сообщена необходимая энергия активации —  $\phi$ . Так как эта энергия получается за счет теплосодержания окисла, диффузия зависит от температуры. При любой температуре  $T$  в °К эту энергию можно вычислить через коэффициент диффузии  $D(T)$ , температурная зависимость которого описывается уравнением:

$$D(T) \sim e^{-11600\phi/T}, \quad (4)$$

где энергия активации  $\phi$  измеряется в электрон-вольтах.

Необходимо отметить, что перенос ионов можно рассчитать как чисто диффузионный

процесс только при отсутствии электростатических полей. Другое жесткое условие — это отсутствие возникновения тормозящих пространственных зарядов. Все эти условия удовлетворяются при наличии пленки потускнения, состоящей из NiO, примерно при 100 °С. Дополнительно установлено, что процесс диффузии в пленках потускнения имеет направленный характер в сторону наружной поверхности пленки. Это связано с тем, что решетка пленки потускнения, примыкающая к металлу, оказывается насыщенной или даже перенасыщенной ионами этого металла, в то время как ионы кислорода в избытке находятся на внешней стороне пленки. Таким образом, между плотностью  $\eta$  металлических ионов на наружной и внутренней поверхностях пленки поддерживается некоторая постоянная разность  $\Delta\eta$ . Если  $S$  — толщина пленки, градиент  $\Delta\eta/S$  вызывает диффузионный ток металлических ионов к наружной стороне пленки. Плотность этого тока будет равна:

$$I = D(\Delta\eta/S). \quad (5)$$

Если  $\omega$  представляет собой объем окисла, приходящийся на один металлический ион, то скорость увеличения толщины пленки  $S$  описывается уравнением:

$$ds/dt = I(\omega) = D(\Delta\eta/S)\omega, \quad (6)$$

которое после интегрирования принимает вид:

$$S^2 - S_0^2 = 2D\omega\Delta\eta t, \quad (7)$$

где  $S_0$  — толщина начальной пленки при  $t = 0$ .

Уравнение (7) выражает параболическую зависимость роста пленок потускнения. Для данного уравнения безразлично, положительные или отрицательные ионы перемещаются через пленку.

Используя уравнения (4) и (7), можно получить:

$$S^2 - S_0^2 = \text{const} \times e^{-11600\phi/T}. \quad (8)$$

Это уравнение выведено для NiO, однако опыт показывает, что оно справедливо и для других металлов при температуре выше 300 °С. Для данного уравнения необязательно, чтобы начальная пленка  $S_0$  росла по параболическому закону.

Сказанное о диффузии справедливо в том случае, если все положения, с которых перескакивают ионы, аналогичны, однако в действительности эти положения различны и, соответственно, характеризуются разными величинами энергии активации.

Рассмотрим упрощенные уравнения роста пленок потускнения, относящиеся к некоторому значению энергии активации, выбранному так, что оно соответствует относительно низким температурам, находящимся в диапазоне 18...150 °С. Коэффициенты этих уравнений выбраны в соответствии с вышеуказанными условиями:

$$S^2 = 20^2 + t \times 10^{8,2 - (1310/T)}. \quad (9)$$

Уравнение (9) дает толщину  $S$  (Å) пленки из окиси меди ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), которая возникает на свежезачищенной поверхности поликристаллической меди, подвергавшейся действию воздуха в течение  $t$  (ч) при  $T$  в °К.  $S_0$  принята равной 20 Å по полученным экспериментальным данным, показатель экспоненты соответствует энергии активации  $\phi = 0,25$  эВ. Бронза оказывает окислению то же сопротивление, что и медь.

Уайт и Гермер установили, что нарастание окиси меди происходит по логарифмическому закону и практически прекращается после того, как ее толщина достигает приблизительно 50 Å. Таким образом, последняя стадия нарастания пленки состоит в создании на меди некоторой защитной пленки.

Упрощенное уравнение роста пленки потускнения соответственно выглядит следующим образом:

$$S^2 = t \times 10^{13,3 - (6000/T)} + 5^2, \quad (10)$$

где  $S$  — в  $10^{-6}$  см;  $t$  — в часах;  $T$  — в °К.

### Потускнение благородных металлов

#### Золото

Золото не окисляется на воздухе и неэффективно при образовании полимеризованных углеводородных отложений, ускоряющегося при действии катализатора. При температуре 180 °С золото взаимодействует с хлором, образуя  $\text{AuCl}_3$ , который растворяется в воде. На золоте в воздухе, так же как и на всяком металле, образуется адгезионный слой кислорода, который легко преодолевается посредством туннельного эффекта и поэтому не представляет опасности для контактов.

#### Серебро

Серебро окисляется при комнатной температуре только в присутствии озона, образуя при этом соединение  $\text{Ag}_2\text{O}$ , которое разрушается при температуре 200 °С. Окись серебра очень мягкая и легко удаляется с поверхности контактов механическим путем. Эта окись редко нарушает работу контактов, однако такие нарушения создаются сульфидом серебра  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Темные пятна, возникающие на серебре в нормальных климатических условиях, состоят из  $\text{Ag}_2\text{S}$ , и если не учитывать склонности к сульфидизации, то серебро — идеальный материал для контактов, поэтому изучению сульфида серебра уделяется большое внимание. Слой  $\text{Ag}_2\text{S}$  на серебре не является защитным, он нарастает медленно, поскольку в обычных условиях концентрация агрессивных газов невелика. Отметим следующие факты, которые установил Кемпбелл. Сухой  $\text{H}_2\text{S}$  не действует на серебро. Однако  $\text{H}_2\text{S}$  в присутствии  $\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{SO}_2$  вызывает сульфидизацию серебра. Известно, что сернистый газ, выделяющийся из твердого куска серы, воздействует на серебро энергичнее, чем  $\text{H}_2\text{S}$  в значительных концентрациях.

Почти все известные продукты потускнения  $\text{Ag}_2\text{S}$  намного мягче самого серебра, твердость их примерно вдвое меньше твердости

серебра. Поэтому пленки  $\text{Ag}_2\text{S}$  легко разрушаются при сочленении контакта, благодаря чему обеспечивается вполне надежная проводимость по всему контактному пятну. Удельное сопротивление  $\text{Ag}_2\text{S}$  при комнатной температуре находится в пределах  $10^3$ – $10^8$  Ом·см, в зависимости от того, насколько его состав отличается от стехиометрического состава и по величине приближается к удельному сопротивлению  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Пленки с таким удельным сопротивлением, даже очень тонкие (5–10 Å), ведут себя практически как изоляторы, если они перекрывают  $a$ -пятна.

#### Палладий

Палладий не подвергается действию серы при комнатной температуре. В сплаве с серебром (Pd — 50%, Ag — 50%) он защищает его от сульфидизации.

#### Платина

Платина в обычной атмосфере покрывается поверхностным слоем, который может существенно увеличить сопротивление контакта. По Кемпбеллу, слой вещества, ухудшающий контакт, образуется в результате каталитического воздействия платины на некоторые углеводородные газы, содержащиеся в атмосфере.

### Граничные смазывающие пленки

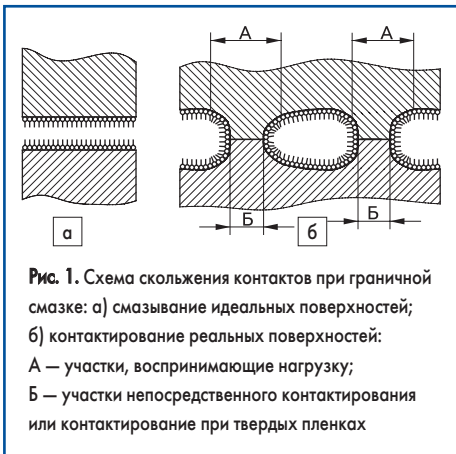
Состояние, когда смазка уже не может более действовать гидродинамически, но, несмотря на это, помогает нести контактное усилие и обеспечивает малый износ, называется граничной смазкой. Она преимущественно характеризуется коэффициентом трения  $\mu$  — переменной, легко измеряемой величиной. Значения  $\mu$ , лежащие в пределах 0,03–0,2, являются типичными, и в тех случаях, когда  $\mu$  имеет этот порядок, можно с уверенностью считать, что имеет место граничная смазка.

Тот факт, что граничная смазка сопровождается износом, совсем не означает, что металлические контакты возникают на всех вершинах, где нарушаются гидродинамические пленки. Установлено, что мономолекулярные пленки на каждом элементе остаются в контакте на вершинах многих шероховатостей. Сила трения будет определяться главным образом трением между такими мономолекулярными пленками и трением в металлических контактных пятнах контактной пары.

При граничной смазке на поверхностях контактов в контактной паре образуется граничная фаза квазиметаллической структуры толщиной от одной молекулы до 0,1 мкм, обладающая более или менее прочной связью с поверхностью и продольной когезией.

Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно к поверхности контактов, что позволяет представить для наглядности граничную пленку в виде «ворса» (рис. 1).

При взаимном перемещении контактов «ворсинки» как бы изгибаются в противоположные стороны. На самом же деле происходит сдвиг с перекосом квазикристаллической структуры пленки. Квазикристаллическая



**Рис. 1.** Схема скольжения контактов при граничной смазке: а) смазывание идеальных поверхностей; б) контактирование реальных поверхностей; А — участки, воспринимающие нагрузку; Б — участки непосредственного контактирования или контактирование при твердых пленках

структура граничной пленки анизотропна, в тангенсальном направлении молекулярные слои легко изгибаются и при толщине слоя больше некоторой критической величины скользят друг по другу, а по нормали к поверхности контактов пленка обладает достаточно высоким сопротивлением к сжатию.

Типичные характеристики граничной смазки:

- Коэффициент трения часто бывает порядка  $\mu \approx 0,1$ , независимо от вязкости смазочного материала  $\eta$  и твердости контактирующих металлических контактов. Имеется существенное отличие и от сухого трения ( $\mu \approx 1$  для чистых металлов и  $\mu \approx 0,4$  для окисных пленок) и от гидродинамической смазки ( $\mu \approx 0,001$ ). Известно, что величина  $\eta$  может меняться более чем на порядок, не оказывая при этом какого-либо влияния на коэффициент трения  $\mu$  в граничной смазке.
- Износ при граничной смазке часто составляет  $\sim 1/10$  износа при скольжении сухих гладких контактов.
- Электропроводность смазанных контактов при граничных условиях достаточно высокая.

Можно сделать вывод, что в контактной паре в граничном состоянии существуют металлические и квазиметаллические пятна. Проводимость через квазиметаллические пятна осуществляется за счет туннельного эффекта.

### Исследование туннельного эффекта

Пассивирующие и адгезионные пленки на металлах электрических контактов имеют настолько малую толщину, что оказываются проницаемыми для электрического тока, проводимость которого обуславливается туннельным эффектом.

Первые достоверные измерения в этой области выполнили Р. Хольм и Мейснер, до них сведения о рассматриваемых пленках были весьма скудными.

В основу метода определения переходного сопротивления металлических и квазиметаллических контактов был положен метод, для которого не было различия, обусловлено ли сопротивление собственно контактом или же пленкой на нем. Опыты показали, что в пределах небольшой ошибки измерений переходное сопротивление можно сделать бесконечно малым при помощи тщательной очистки контактных поверхностей, а именно при испаре-

нии в вакууме при высокой температуре. Без такой очистки остается некоторое характерное сопротивление, с количественной точки зрения его можно объяснить только туннельным эффектом, поскольку оно не зависит от температуры. Эти опыты были первыми прямыми наблюдениями туннельного эффекта.

Основное уравнение определения контактного сопротивления симметричных контактов имеет следующий вид:

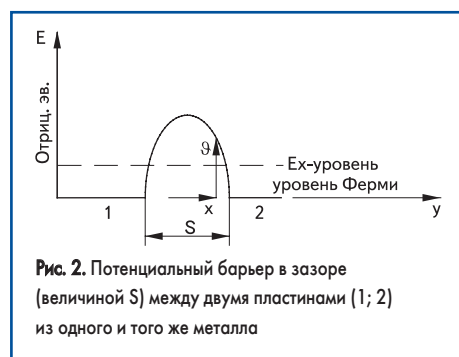
$$R = (\rho/2a) + (\delta/\pi a^2), \quad (11)$$

где  $\delta$  — сопротивление пленки, отнесенное к единице поверхности.

Позднее Вент подтвердил результаты, которые получили Хольм и Мейснер. Эти данные показали, что дегазация контактов снижает контактное сопротивление до бесконечно малой величины и что агентом, создающим сопротивление, является физически адсорбированная пленка.

С помощью классической физики нельзя объяснить фактическую электропроводность пленок, которая определяется в результате инструментальных замеров (при толщине пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  не менее  $5 \text{ \AA}$  на основании уравнения  $\delta = \rho f \times S$  получаем, что  $\delta > 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ , в то время как измеренная величина составляет  $10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ). Точно так же несовместима значительная зависимость удельного электрического сопротивления от температуры, с одной стороны, и наблюдаемая на опыте независимость от температуры, с другой. Поведение таких пленок становится понятным благодаря квантовой теории, которая объясняет сопротивление туннельным эффектом.

Электрический туннельный эффект объясняет высокое значение проводимости через тонкие окисные пленки на металлах.



**Рис. 2.** Потенциальный барьер в зазоре (величиной S) между двумя пластинами (1; 2) из одного и того же металла

На рис. 2 изображены потенциалы внутри и между металлическими пластинами, изготовленными из одного и того же металла. Уровни Ферми в данном случае совпадают, следовательно, между электродами не возникают напряжения. Граничные барьеры, проникающие в зазор, налагаются друг на друга и образуют общий потенциальный барьер, высота которого равна работе выхода  $\phi$ .

Высота барьера на любом расстоянии  $x$  может быть равной  $\phi$ . Представим электрон с массой  $m$ , который движется от контакта 1 к контакту 2 и достигает границы с компонентой скорости  $v_x$ . Что при этом произойдет?

Обозначим компоненту энергии  $(mv_x^2)/2$  через  $\epsilon E_x$ , где  $\epsilon$  заряд электрона в кулонах, а  $E_x$  измеряется в вольтах, тогда:

$$(mv_x^2)/2 = \epsilon E_x. \quad (12)$$

Если  $E_x$  больше, чем высота потенциального барьера, то электрон перепрыгнет барьер и достигнет пластины 2. Если  $E_x$  ниже высоты потенциального барьера, то классическая физика исключает возможность нахождения электрона в зазоре. Квантовая теория утверждает иное. Функция Шредингера  $\psi$  имеет конечные величины в зазоре, даже когда высота потенциального барьера больше, чем  $E_x$ , то есть существует определенная вероятность для электрона проникнуть сквозь потенциальный барьер. Величина вероятности достижения электроном контакта 2  $D(E_x)$  называется коэффициентом перехода и определяется:

$$D(E_x) = e^{-\frac{4\pi}{h} \int_0^S (2m\sqrt{\phi(x) - E_x}) \times dx} \quad (13)$$

Когда электрон у контакта 1 с энергией  $E_x$ , более низкой, чем высота потенциального барьера, достигает контакта 2, он проходит как бы туннель сквозь потенциальный барьер, и, следовательно, нарушение энергетически запрещенного перехода не явилось результатом перепрыгивания потенциального барьера и не сопровождалось каким-либо изменением общей энергии электрона. Сохранение энергии электрона выражено в этом решении уравнения Шредингера сохранением постоянной частоты электрона, проходящего по «туннелю». Это явление проникновения частиц, в нашем случае электронов, сквозь потенциальный барьер называется туннельным эффектом.

### Водяные пленки

#### Толщина водяных пленок

Известно, что вода адсорбируется на поверхности твердых тел при соприкосновении с влажным воздухом. Однако еще нет сведений о том, располагается ли эта вода непосредственно на чистой металлической поверхности или на наружной стороне химически адсорбированного кислорода. Адсорбцию воды на чистых металлических поверхностях изучали Боуден и Троссель. Они установили, что на предварительно нагретых платиновых и золотых пластинках толщина пленки не превышает двух монослоев воды, даже если влажность приближалась к 90%. Измерение толщины адсорбированных водяных пленок производилось посредством эллиптической поляризации света. Однако платиновая пластина, очищенная, но не подвергнутая предварительному нагреву, покрывалась водяной пленкой, толщина которой составляла примерно  $35f$  молекулярных слоев, где  $f$  — относительная влажность (насыщение соответствует  $f = 1$ ). Эти данные хорошо согласуются с данными работы Р. Штрэмберга и вполне соответствуют практическим условиям. В лабораториях фирмы Siemens определили, что толщина водяной пленки зависит от металла

и влажности воздуха. Пленка на платине, золоте и серебре очень часто имеет толщину не более 50 Å. На благородных металлах она достигает толщины 100 Å.

При наблюдении за смыканием и размыканием контактов, имеющих адсорбированную водяную пленку, можно заметить, что при расхождении контактов водяная пленка не тянется за движущимся контактом, образуя мостик, а обрывается; причем обрыв происходит почти на том же расстоянии, на котором при сближении контактов было установлено касание. Таким образом, тонкие водяные пленки, в отличие от толстых, обладают заметной жесткостью, однако они недостаточно прочны, чтобы противостоять контактному давлению.

#### Локальные элементы

Представим себе воду в контакте с металлом. Молекулы воды являются сильными диполями (поэтому вода имеет очень высокую диэлектрическую постоянную), которые могут создавать возмущающие электрические микрополя в поверхностной решетке металла и растворять ионы металла до тех пор, пока эти ионы достаточно многочисленны, чтобы поддерживать по отношению к металлу потенциал, тормозящий дальнейшее поступление ионов. Этот потенциал часто называют напряжением Нернста. Его понятие лежит в основе теории электрических элементов. Элемент образуется тогда, когда вода или раствор соединяют две твердые поверхности с различными напряжениями Нернста. Электрический ток пойдет между анодом с высоким напряжением и катодом с низким напряжением.

Совершенно не обязательно, чтобы эти электроды были из различных металлов. Если имеется водяная пленка, способная переносить ток между отдельными участками поверхности, то участки, состоящие из чистого металла, служат анодами, а участки, покрытые пленкой окисла, — катодами. Такое соединение, способное создавать электрический ток, называется локальным элементом. Ток в воде создается положительными ионами металла, идущими от анода, и отрицательными ионами ОН, движущимися в противоположном

направлении. Встречаясь между электродами, ионы металла и ионы ОН образуют окись металла.

Действие локальных элементов зависит от присутствия водяной пленки, которая могла бы проводить электричество. Было установлено, что процесс окисления при уменьшении влажности до определенного предела прекращается. Это связано с тем, что при определенной относительной влажности водяная пленка либо очень тонка, либо не является непрерывной. Известно, что гигроскопические пылевидные частицы стимулируют образование локальных элементов.

Считалось, что газовые пленки на металлических поверхностях могут затруднить или даже изолировать контакт, как если бы они были твердыми или очень толстыми. Но мы уже установили, что адгезионные пленки настолько тонки, что делают контакт квазиметаллическим. Это относится и к водяным пленкам, так как очевидно, что при замыкании контакта внешние слои водяной пленки выжимаются, особенно в процессе искусственного старения (когда контакт подвергается небольшой вибрации). Остается только мономолекулярный слой, который проницаем для тока благодаря туннельному эффекту.

#### Заключение

Авторы рассмотрели основные виды пленок и характер их образования на контактах электрических соединителей. Необходимо отметить, что в реальных условиях эксплуатации чистых поверхностей, свободных от пленок, не существует. Чистый металлический контакт, свободный от пленок, можно получить только в вакууме. Поэтому наличие пленок на контактах необходимо воспринимать как естественное состояние.

При оценке влияния различного рода пленок на электрические параметры контактов в каждом конкретном случае нужно применять дифференцированный подход, который должен учитывать весь спектр воздействующих факторов на электрический соединитель, его условия эксплуатации и требования по надежности.

С учетом этих требований необходимо рассматривать конкретную конструкцию контактной пары, определять требуемое контактное давление, геометрические параметры шероховатости поверхности, материалы контактных электродов и их покрытие. Особое внимание при работе соединителей в агрессивных средах необходимо обращать на выбор материала покрытия, так как он в значительной степени определяет вид пленки и ее толщину и, в конечном счете, переходное сопротивление контактной пары и нормальный режим эксплуатации соединителя.

Знание причин и процессов образования пленок позволяет минимизировать их отрицательные воздействия на работу соединителей и дает возможность проводить предупреждающие и корректирующие действия в процессе эксплуатации.

#### Литература

1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963.
2. Гаркунов Д. Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1989.
3. Демкин Н. Б. Контактное трение шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970.
4. Лихтман В. И., Шукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М.: Издательство АН СССР, 1962.
5. Ребиндер П. А., Шукин Е. Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения. Успехи физических наук. 1972.
6. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
7. Электрические контакты. Труды совещания (26–28 ноября 1956 г.). М.: Госэнергоиздат, 1958.
8. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Анализ физических процессов, происходящих в контакте // Компоненты и технологии. 2007. № 6.
9. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Электролитическое получение серебряных и золотых покрытий повышенной твердости и износостойчивости // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 7.