

Прямоугольные электрические соединители.

Фриттинг окисных пленок на электрических контактах

В статье рассмотрен механизм проводимости электрического тока через пленки потускнения и другие виды окисных пленок, имеющих значительную толщину. Определены необходимые условия для реализации этого процесса.

**Александр Сафонов
Леонид Сафонов**

edet@online.debryansk.ru

Введение

Основным требованием к электрическим соединителям является обеспечение ими с достаточно высокой вероятностью надежного электрического контакта с заданным стабильным значением переходного сопротивления контактов при внешних эксплуатационных воздействиях, то есть обеспечение высокой проводимости электрического тока. Проводимость электрического тока через контактную поверхность, кроме прочих факторов, в значительной степени зависит от величины эффективной поверхности.

С точки зрения электропроводности эффективную контактную поверхность ($A_{эфф.}$ представляет собой сумму фактических площадок контакта) можно представить в виде трех групп участков:

- участков, покрытых органическими пленками и пленками потускнения, практически не проводящих электрический ток;
- участков, покрытых электропроводными адгезионными и пассивирующими пленками (они называются участками квазиметаллического контакта);
- участков с металлическим контактом, образованных за счет высоких контактных давлений, разрушающих пленку.

Если механизм проводимости электрического тока через участки с металлическим контактом сравнительно прост и ничем не отличается от механизма проводимости непосредственно в металле, то при наличии пленок явления, обуславливающие проводимость, достаточно сложны и требуют специального рассмотрения.

В ранее опубликованных статьях [1–4] анализировались отдельные аспекты механизма проводимости электрического тока через контакты, покрытые различного рода пленками. В частности, рассматривалась проводимость через квазиметаллические пятна, которая основана на туннельном эффекте, однако это касалось только тонких адгезионных и пассивирующих пленок.

Механизм проводимости электрического тока через пленки потускнения и другие виды окисных пленок, имеющих значительно большую толщину (от 100 до 2500 Å и более) по сравнению с адгезион-

ными и пассивирующими пленками, имеет совершенно иной характер.

В данной статье авторы попытались объяснить особенности этого механизма на основе существующих сведений и сообщить варианты решения этой проблемы с учетом своих наработок в этой области.

Общие черты процесса фриттинга

Проводимость через толстые пленки, наблюдаемая на практике, не является свойством пленок. Она обусловлена тем, что пленки при замыкании контактов либо разрушаются в некоторых местах механически, либо электрически пробиваются после того, как приложено напряжение. Электрический пробой, который рассматривается в данной статье, относится к типу так называемого фриттинга. Изучение этого явления, понимание причин его возникновения и характера проявления имеет большое практическое значение для прогнозирования возможных отказов в работе электрических соединителей при их эксплуатации в определенных климатических условиях при воздействии различных внешних факторов.

Согласно нашему определению истинным фриттингом является процесс разрушения связей в диэлектрике. Такое разрушение может привести к образованию каналов проводимости через рассматриваемую пленку, а в более простых случаях — к разрушению пленки вокруг уже существующего металлического а-пятна.

Если при пробое пленки возникает напряжение, примерно соответствующее плавлению хотя бы одного контакта или его покрытия, то говорят о так называемом А-фриттинге. Совершенно очевидно, что в этом случае начальное напряжение должно быть выше напряжения плавления. Процесс пробоя окисной пленки приводит к образованию в ней канала и к расплавлению металла на одном или обоих концах этого канала. Расплавленный металл контактов втягивается в канал электростатическими силами, образуя проводящий мостик между контактами.

Если напряжение, при котором происходит пробой, слишком мало, чтобы вызвать плавление одного или обоих контактов, то говорят о В-фриттинге.

Установлено, что В-фриттинг может даже создавать первичную проводимость через пленку, однако чаще в результате В-фриттинга увеличивается поверхность существующего а-пятна. В этом случае процесс развивается по периферии а-пятна, заставляя при этом отступать пленку, окружающую пятно, в результате чего освобождается больший участок для прямого металлического контакта между обеими сторонами контактной пары. В-фриттинг между металлическими контактами происходит при более тонких пленках, чем А-фриттинг.

Разрушение связей решетки пленки потускнения, которым начинается фриттинг, является также и начальной стадией пробоя толстого диэлектрика, поскольку для обоих явлений требуется одна и та же напряженность поля. Однако в толстых диэлектриках вторую фазу процесса образует электрический поток. Подробнее процесс пробоя пластмассовых изоляторов электрических соединителей нами будет рассмотрен при изучении электропрочности соединителей и сопротивления изоляции.

А-фриттинг

Типичный А-фриттинг может быть создан присоединением контактной пары с заметной пленкой потускнения к источнику тока через активное сопротивление и амперметр таким образом, чтобы контактное напряжение могло изменяться непрерывно (потенциометрическая схема), начиная от очень малых значений до нескольких вольт.

При малых напряжениях в цепи через контактную пару протекает и очень малый ток, поскольку пленка потускнения является практически изолятором. Однако при увеличении напряжения, как только на пленке будет достигнуто напряжение фриттинга — U_F , ток резко возрастет в результате скачкообразного уменьшения сопротивления в контактной паре, которое будет и дальше уменьшаться, пока не установится в цепи напряжение ~0,5 В. Такое изменение тока и контактного напряжения характерно для нормального проявления А-фриттинга. Возросшая проводимость может сохраняться при неподвижном контакте в течение продолжительного времени. В зависимости от источника тока изменение либо уменьшается до субмикроскопического изменения в пленке, либо продолжается вплоть до видимого пробоя, более или менее разрушительного для контактных поверхностей. Однако начальное критическое напряжение U_F в обоих случаях одинаково.

Рассмотрим результаты измерений, выполненных лабораторией фирмы Siemens на окисной пленке Cu_2O (рис. 1). Контактная пара была образована, с одной стороны, медным стержнем диаметром 3 мм, на поверхности которого была пленка потускнения Cu_2O толщиной 840 Å, и, с другой стороны, золотым стержнем таких же размеров и формы. Контактное усилие было 0,0032 кгс.

В случае, когда медный контакт был анодом (кривая А), начало RU-характеристики почти

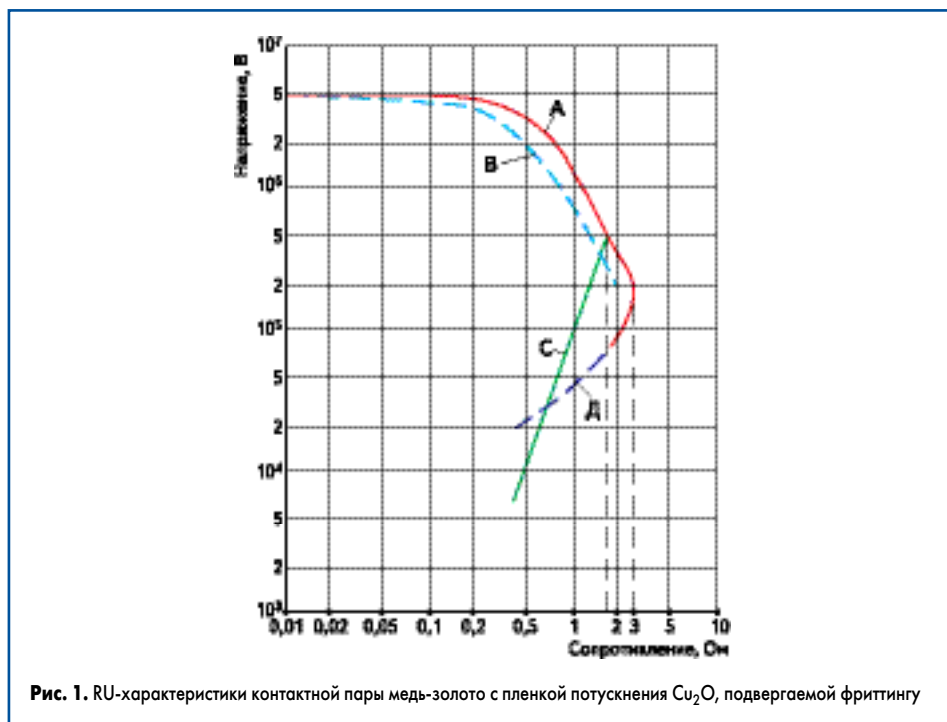


Рис. 1. RU-характеристики контактной пары медь-золото с пленкой потускнения Cu_2O , подвергаемой фриттингу

горизонтально. Затем при возрастании тока контактное сопротивление до возникновения фриттинга может уменьшиться примерно в 10 раз, на что указывает внезапное уменьшение сопротивления пленки и напряжения на ней (ветвь С). Ветвь С начинается в точке (1,8 В; 5×10^5 Ом), где напряжение еще имеет тенденцию к увеличению, но иногда это происходит при прохождении характеристики через максимум напряжения (на рис. 1 этот максимум составляет около 3 В). Первое появление фриттинга наблюдается, когда напряжение начинает падать, а ток продолжает увеличиваться (ветвь Д).

Когда медный контакт являлся катодом, RU-характеристика смещалась примерно до пунктирной линии В. Таким образом, в данном случае выпрямление незначительно и совсем исчезает при напряжении около 0,01 В.

Данные замеры относятся к двум контактными пятнам, выбранным так, что начальное сопротивление обоих пятен было одинаковым. Практика показывает, что при переходе от одной контактной точки к другой характеристики заметно изменяются даже в том случае, если цвет пленки в обоих местах кажется совершенно одинаковым. Особенно сильно изменяются сопротивления.

Напряжение при прекращении фриттинга

Процесс фриттинга приводит к уменьшению контактного сопротивления с 5×10^5 до $5,7 \times 10^3$ Ом и напряжения на пленке с 1,8 до 0,4 В (рис. 1). Если бы последовательно включенное сопротивление имело меньшую величину, контактное сопротивление уменьшалось бы еще больше. Однако конечное значение напряжения сразу после появления фриттинга соответствует контактному напряжению U_B , равному 0,3–0,5 В, что несколько меньше напряжения плавления металла.

С целью определения изменения напряжения фриттинга в различных точках одной и той же контактной поверхности, покрытой пленкой, и определения зависимости от времени ее образования, была выполнена опытная работа, результаты которой в виде графика представлены на рис. 2.

График на рис. 2 суммирует в статистической форме изменения напряжения фриттинга в различных точках пленки NiO (толщина пленки — 1200–1300 Å) на никеле. Измерения выполнялись при различном времени образования пленки (через 3 часа —; через 3 дня —; через 1 месяц —). Каждая из представ-

Таблица 1. Параметры процесса фриттинга на пленках потускнения

№ п/п	Пленка потускнения	Толщина пленки, Å	Сопротивление пленки $R_p \times 10^6$ Ом	Напряжение фриттинга U_F , В	Состояние пленки	Полярность	Напряженность поля фриттинга $E_F \times 10^6$ В/см
1	Cu_2O	240	4,0	1,3	Новая	Cu-	0,54
2	Cu_2O	300	2,8	1,5	Новая	Cu-	0,37
3	Cu_2O	680	4,6	4,05	Новая	Cu+	0,6
4	Cu_2O	940	7	5,5	Новая	Cu-	0,58
5	Cu_2O	1110	9,5	5,0	Новая	Cu+	0,62
6	Cu_2O	1480	12	4,2	Новая	Cu+	1,0
7	NiO	125	1,6	1,5	Старая	Ni±	1,2
8	NiO	275	3,5	4,0	Старая	Ni±	1,45
9	NiO	300	5,0	5,0	Старая	Ni±	1,5
10	NiO	1250	20	17,5	Старая	Ni±	1,4
11	NiO	1250	14	13	Новая	Ni±	1,05

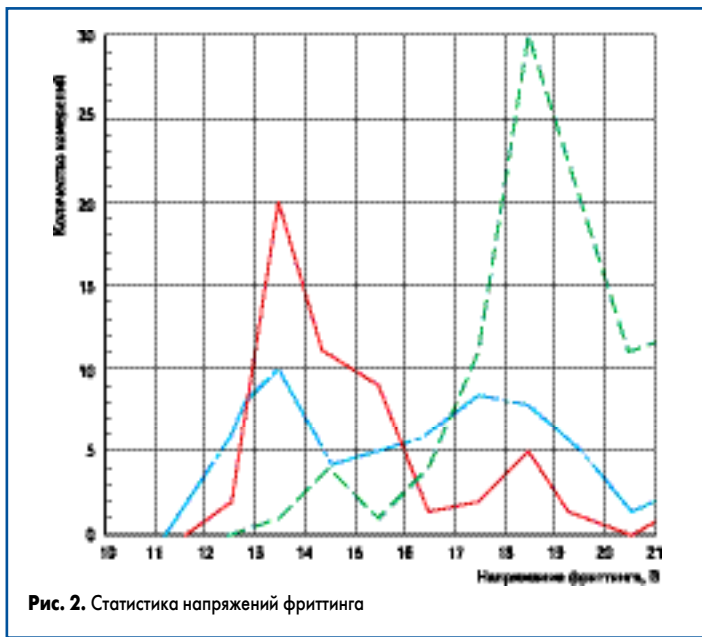


Рис. 2. Статистика напряжений фриттинга

ленных кривых соответствует определенному времени образования пленки и включает около 100 отдельных измерений. На кривых выделяются два максимума: один при 13,5 В, другой — в промежутке между 18 и 19 В. В пленках с меньшим временем образования превалирует максимум при 13,5 В, у пленок с более длительным временем образования почти все максимумы группируются вблизи 18,5 В.

Влияние толщины пленки на напряжение фриттинга U_F определялось именно значениями U_F для различных значений толщины пленки NiO. На график (рис. 3) нанесены наибольшие и наименьшие значения U_F в зависимости от толщины пленки.

Прямые линии, ограничивающие зону напряжений фриттинга, проходят через начало координат, это указывает на то, что напряженность поля при фриттинге падает. Однако не все точки прямых соответствуют одной и той же напряженности поля. Верхней линии, которая включает в себя точку максимума 18,5 В, на графике (рис. 2) соответствует напряженность поля фриттинга $E_F = 1,2 \times 10^6$ В/см, нижней линии соответствует $E_F = 1,1 \times 10^6$ В/см.

Рассмотрим результаты измерений некоторых параметров при протекании процесса фриттинга на пленках потускнения Cu и Ni в контакте со стержнем из мягкого золота, при постоянном токе и контактном усилии $P = 0,0036$ кгс.

Приведенные в таблице 1 сведения являются усредненными значениями результатов, полученных в лаборатории фирмы Siemens, данных работ Р. Хольма (R. Holma) и Р. Штёрмера (R. Störmera) и результатов измерений на ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь»».

Анализ результатов, полученных на пленке Cu_2O , в первом приближении подтверждает вывод о том, что для фриттинга независимо от толщины пленки требуется определенная напряженность поля E_F . Эта напряженность, рассчитанная как средняя величина для контактов Cu-Cu₂O и Au и равная $E_F = 0,6 \times 10^6$ В/см, на самом деле оказывается слишком занижена. При проверочных испытаниях, где вместо золотого контакта использовался контакт из мягкого электрографита, на аналогичных пленках было зафиксировано увеличение напряженности поля до $E_F \approx 10^6$ В/см. Это связано с тем, что более мягкий контакт из электрографита обладает меньшей возможностью, чем контакт из золота, локально разрушать окисную пленку и поэтому позволяет с меньшей погрешностью определять фактические значения E_F .

Возможно также, что некоторые измерения на NiO относятся к поврежденным местам пленки и несколько увеличивают разброс результатов при низких напряжениях.

На разброс показаний могут влиять недостаточная зачистка контролируемых поверхностей, а также наличие посторонних, порой невидимых частиц, способных создавать зазор между контактами примерно до 10^{-4} см.

В таблице 1 приведены не только значения напряжения фриттинга, но и величина сопротивления пленки R_f , зависящая от ее толщины. Значения R_f , приведенные в таблице 1, являются нормальными, так как относятся к группе наиболее часто получаемых измерений.

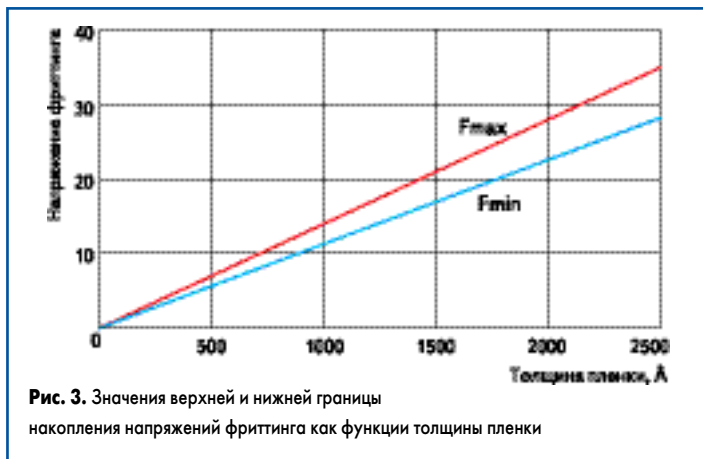


Рис. 3. Значения верхней и нижней границы накопления напряжений фриттинга как функции толщины пленки

Рассмотрим некоторые факторы, которые влияют на напряжение фриттинга и напряженность электрического поля.

Нагревание пленки в вакууме освобождает ее от акцепторов кислорода, это проявляется в возрастании удельного сопротивления. Нагревание ведет также к увеличению напряженности электрического поля. Однако в Стэкпольской лаборатории было установлено, что простое изменение температуры NiO в сухом воздухе в пределах от -150 до $+100$ °С очень мало отражается на величине E_F . Если и существует некоторое увеличение при низких температурах по сравнению с комнатой, то оно не превышает 20%. В вакууме при температуре выше 100 °С напряженность поля фриттинга быстро падает с возрастанием температуры.

Влажность воздуха практически не оказывает влияния на изменение величины E_F . Однако длительность замкнутого состояния контакта отражается на величине E_F . Достаточно сказать, что E_F тем меньше, чем продолжительнее время замкнутого состояния контакта. Возможно, что это проявление эффекта усталости, обусловленного вибрацией, поскольку E_F очень чувствительно к механическому напряжению. Если пленка потускнения имеется на обоих контактах контактной пары, то напряжение фриттинга U_F обычно соответствует суммарной толщине пленки.

Необходимо отметить, что напряженность поля в пределах от 10^6 до 10^7 В/см оказывает решающее значение на пробой окисной пленки.

Фриттинг при переменном токе

При наложении переменного тока на пленки потускнения было установлено, что при частотах $5 \times 10^2 - 10^5$ Гц эффективные величины напряжения фриттинга совпадают с соответствующими величинами при постоянном токе. При более низких частотах, например 50 Гц, величина напряжения постоянного тока совпадает с пиковыми значениями напряжения переменного тока. Это происходит потому, что интервалы между максимумами достаточны для развития процесса фриттинга. Далее мы более подробно рассмотрим влияние частоты на процесс фриттинга.

Мостики фриттинга

Конечным результатом А-фриттинга являются микромостики через изолирующую пленку. Рассмотрим таблицу 2, где приведены значения конечного напряжения U_δ (U_δ — напряжение размягчения), измерен-

Таблица 2. Конечные напряжения мостика U_δ

Контакт	Ni-NiO на никеле			Au-NiO на никеле		
	R_f , гс	R_s , Ом	Толщина пленки S, Å:	R_f , гс	R_s , Ом	Толщина пленки S, Å:
	3,6	90	100	3,6	15	100
	3,6	90	170	3,6	15	170
	3,6	810	220	3,6	15	220
	3,6	810	360	3,6	15	360
	3,6	90	600	3,6	15	600
	3,6	90	1100-1200	3,6	15	1100-1200
	3,6	90	2200	3,6	15	2200

ные сразу после появления фриттинга. Отметим, что постоянный ток ограничивался последовательно включенным сопротивлением R_p , положительным контактом являлся контакт из никеля.

Заметим, что для металлических контактов U_0 лежит в пределах 0,3–0,6 В, то есть U_0 по порядку величины всегда соответствует напряжению плавления металлов контактов. Эти экспериментальные результаты позволяют сделать следующий вывод. На первой стадии фриттинга образуется узкий токопроводящий канал, в котором выделяется тепло, которое заставляет металл плавиться с одной или с обеих сторон канала, это зависит от температур плавления металлов контактной пары. Расплавленный металл вытягивается в канал электростатическими силами (Р. Хольмом было установлено, что электростатические силы, с которыми расплавленный металл вытягивается в канал, могут достигать 100 г/см²) и образует контактный мостик, который растет до тех пор, пока не приобретает способность переносить ток уже в твердом состоянии. После этого мостик затвердевает и его рост прекращается. Протекающий по нему ток поддерживает в нем температуру, близкую к температуре плавления. Данная температура поддерживается за счет того, что мостики имеют такие размеры, при которых внутренние тепловые потери в них невелики, это во-первых, и, во-вторых, сами мостики не приводят к заметному нарушению зависимости $\varphi-u$, (зависимость между электрическим потенциалом φ и температурой u), поскольку их длина не превышает их пятикратного диаметра. Это и есть условие, при котором U_0 оказывается близким к напряжению плавления.

Справедливость выводов, изложенных выше, подтверждается наличием у контактных мостиков металлических RU-характеристик: при уменьшении тока их сопротивление тоже уменьшается. Только для узких мостиков, полученных при больших R_p , уменьшение сопротивления мало заметно, что соответствует температурному коэффициенту сопротивления, меньшему, чем для чистых металлов. Это объясняется тем, что металл мостика смешивается с материалом пленки, а это приводит к сокращению свободного пробега электронов проводимости, так как из-за наличия в мостике окислов не обеспечивается условие чисто металлической проводимости.

Размеры мостика

В мостике проводимости его длина равна толщине пленки. Во время фриттинга на контакте может возникать только один мостик, поскольку его образование сопровождается падением напряжения на контакте, что исключает возможность возникновения фриттинга в других точках контактной пары.

Диаметр мостика можно рассчитать по величине контактного сопротивления после фриттинга, если известно удельное сопротивление материала мостика ρ_0 . Пусть ρ — удельное сопротивление чистого металла покрытия контакта, а α и α_0 — температурные коэффициенты ρ и ρ_0 . Тогда:

$$\rho_0 = \rho(\alpha/\alpha_0). \quad (1)$$

Величина температурного коэффициента α_0 определяется из RU-характеристики мостика. Предполагая, что оба контакта контактной пары имеют покрытия, выполненные из одного металла, и что мостик является цилиндром диаметра d и длиной S (S — толщина пленки), находим R — сопротивление мостика совместно с сопротивлением стягивания:

$$R = ((\rho_0 \times S)/\pi d^2) + \rho/2d. \quad (2)$$

Из этого уравнения находим α , если R , S , ρ и ρ_0 известны. На рис. 4 представлены схемы мостиков проводимости в зависимости от условий их образования.

Установлено, что мостики образуют механическую связь между электрическими контактами. Т. Зундорф (Th. Sundorph) наблюдал аналогичное явление связывания. После фриттинга никелевых опилок он мог с помощью магнита поднять большую часть этих опилок. Однако некоторое количество их, связанное с электродами, осталось на месте. Опытным путем было определено, что силы связывания контактов пропорциональны вычисленному сечению мостика фриттинга. Этот факт подтверждает, что измеренное связывание обусловлено

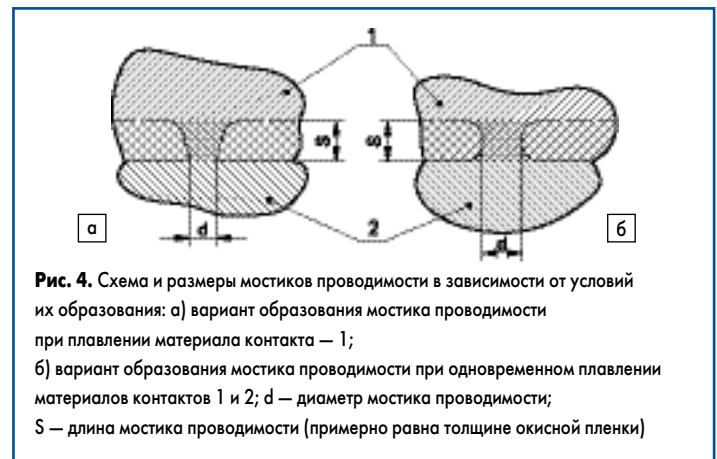


Рис. 4. Схема и размеры мостиков проводимости в зависимости от условий их образования: а) вариант образования мостика проводимости при плавлении материала контакта — 1; б) вариант образования мостика проводимости при одновременном плавлении материалов контактов 1 и 2; d — диаметр мостика проводимости; S — длина мостика проводимости (примерно равна толщине окисной пленки)

главным образом мостиками. Этот вывод не находится в противоречии с тем фактом, что расчетная прочность мостиков почти всегда превышает прочность основного материала покрытия контактов. Это объясняется тем, что истинное сечение мостика обычно больше расчетного, а также, как установлено О. Райнкобером, тонкие цилиндры, такие как мостики, обладают большей прочностью на разрыв, чем толстые, в том числе и основной металл покрытия контактов.

В-фриттинг

Явление носит название В-фриттинга, если ЭДС недостаточна для плавления металла покрытия контактов. Однако в этом случае напряженность поля фриттинга имеет ту же величину, что и при А-фриттинге. Это подтверждается примером фриттинга, протекающего при напряжении, меньшем напряжения плавления меди. Пленка Cu_2O подвергается фриттингу при напряжении 0,2 В, когда величина напряженности поля $0,33 \times 10^6$ В/см почти такая же, что и полученная при более толстых пленках.

График (рис. 5) раскрывает некоторые особенности фриттинга. Применялись контакты из медной проволоки без каких-либо следов

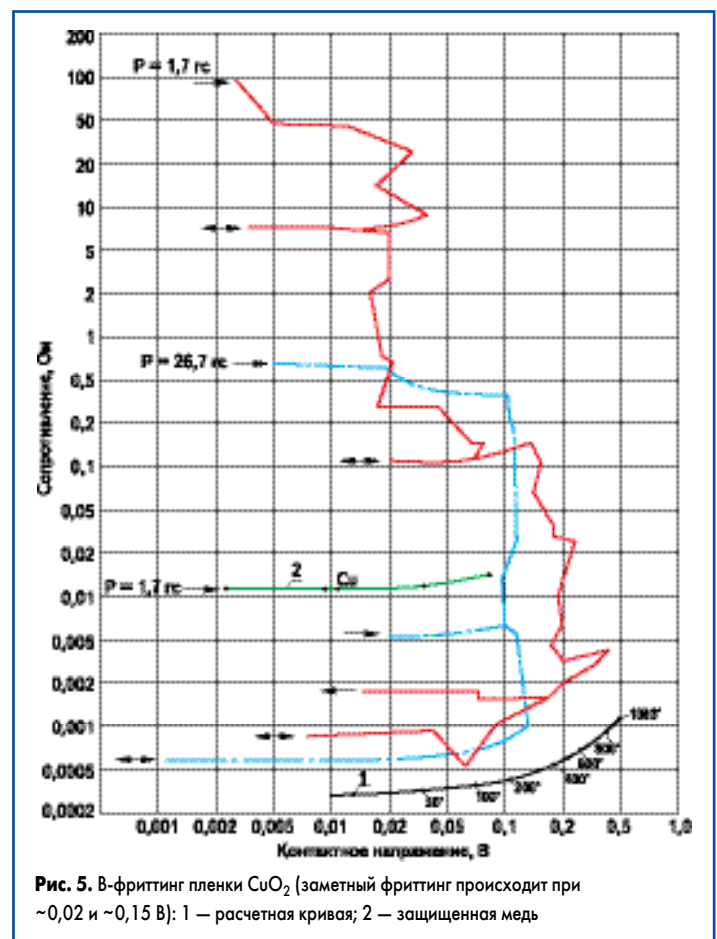


Рис. 5. В-фриттинг пленки Cu_2O (заметный фриттинг происходит при ~0,02 и ~0,15 В): 1 — расчетная кривая; 2 — защищенная медь

пленки потускнения, с нанесенным тонким слоем смазки. Однако совершенно очевидно, что поверхность была покрыта тонкой пленкой смазки неравномерно. При замыкании контактов на микровыступах пленка продавливается и образуются небольшие а-пятна, что отмечалось как некоторая начальная небольшая проводимость. При увеличении напряжения эти пятна расширялись В-фриттингом. При напряжениях на контактах от $\sim 0,02$ до $\sim 0,15$ В происходило хорошо заметное снижение сопротивления, которое каждый раз уменьшалось примерно в 10 раз. Металлический или квазиметаллический характер расширенных а-пятен иллюстрируется обратимыми ветвями, которые заметно повышаются при увеличении напряжения, хотя скорость повышения несколько меньше, чем могла бы быть в случае чисто металлических контактов. ЭДС в данном случае подводилась от потенциометра практически без добавочного последовательного сопротивления, поэтому изменения проводимости происходили почти при постоянном напряжении.

Результаты, подобные приведенным на графике (рис. 5), были получены П. Клауди (P. Klaudy).

Клауди исследовал контакт между ртутью и потускневшей медной пластинкой. В этом случае обеспечивалась большая величина контактной поверхности, вследствие чего имелась возможность измерения проводимости через пленку Cu_2O . Он установил, что эта пленка до фриттинга имеет отрицательный температурный коэффициент (обратимый вплоть до 80°C) и принадлежит к разряду полупроводников. При увеличении контактного напряжения до $0,01$ В происходило скачкообразное снижение сопротивления вследствие В-фриттинга. Это приводило к образованию металлических пятен, что подтверждалось повышением обратимых RU-характеристик.

Дефриттирование после А-фриттинга

С течением времени, в процессе эксплуатации проводимость контактов, покрытых толстыми пленками потускнения, в цепях малой мощности постепенно снижается. Это объясняется тем, что вследствие малого размера мостиков под действием вибраций и других механических воздействий происходит их разрушение, так называемое дефриттирование. Кроме того, существует и спонтанное дефриттирование. Оно проявляется в виде возрастания сопротивления мостиков проводимости до тех пор, пока не произойдет их полного разрыва. Возрастание сопротивления в этом случае обычно происходит не плавно, а ступенчато. Средством спонтанного дефриттирования является перемещение атомов из мостиков в материал покрытия контактов.

Можно восстановить прежнюю проводимость контактной пары, что означает восстановить ослабленный мостик в прежних размерах или даже увеличить его поперечное сечение, если через него пропустить ток такой силы, при котором сам мостик и металл по его краям расплавятся, благодаря чему будет создан источник металла для пополнения толщи-

ны мостика. Этот процесс будет выглядеть как сумма фриттингов по периметру ослабленного мостика с очень небольшими изменениями напряжения. Процесс дефриттирования вследствие механического разрушения мостиков проводимости в цепях малой мощности не требует особых объяснений. Необходимо только отметить, что восстановление проводимости контактов в данном случае не происходит из-за недостаточной величины напряжения в цепи для образования новых мостиков проводимости.

Спонтанное дефриттирование представляет собой более сложный процесс, который не поддается простому объяснению. Как было сказано выше, средством спонтанного дефриттирования является перемещение атомов из мостиков в материал покрытия контактов, но это предположение требует более фундаментального изучения и практического подтверждения. Бесспорно только одно, что снижение проводимости мостика происходит за счет уменьшения в нем атомов металла покрытия и, соответственно, увеличения переходного сопротивления. За счет оттока атомов металла меняется структура мостика, в ней начинают преобладать окислы, из которых состоит пленка потускнения. В конце концов, сопротивление мостика достигает такой величины, когда прохождение через него электрического тока становится невозможным. В данном процессе спонтанного дефриттирования остаются не выясненными до конца вопросы: что провоцирует спонтанный отток атомов металла из контактного мостика и что поддерживает этот отток вплоть до нарушения проводимости? Ответы на эти вопросы позволяют в значительной степени приблизиться к решению проблемы «сухого» контакта и в целом — к стабилизации работы «сухих» цепей.

Начальная стадия фриттинга

Установлено, что любой пробой окисной пленки на электрических контактах независимо от того, приводит ли он к образованию токопроводящих мостиков или к лавинообразному пробую, начинается при одной и той же напряженности поля, которая практически не зависит от толщины пленки.

Однако на сегодня еще не существует завершенной, экспериментально подтвержденной теории начального действия напряженности электрического поля. В. Франц (W. Franz) в своей работе «Dielektrischer Durchschlag» («Диэлектрический пробой») склонен предполагать, что первым шагом пробоя является внутреннее освобождение электронов посредством «эмиссии внутреннего поля», а вторым шагом — нагрев пути прохождения тока протекающим потоком электронов. Его выводы сделаны исключительно на экспериментах, относящихся к пробую сравнительно толстых диэлектриков, в них даже не упоминается о специфических особенностях пробоя при низких напряжениях, которые мы называем фриттингом. В его работе главным объектом исследования была роль электронных лавин в пробое диэлектрика, и внимание в основ-

ном сосредотачивалось на том, каким образом электроны могут получить энергию ионизации, равную примерно 10 В. Нами установлено, что фриттинг может протекать даже при напряжении менее 1 В, и поэтому он не может быть объяснен только лавинообразными процессами.

Необходимо отметить, что напряженность поля фриттинга изменяется в зависимости от времени образования пленки потускнения (рис. 2).

Инициирование фриттинга зависит от того, насколько стабилизировалась решетка пленки, поскольку было установлено, что после достижения определенной толщины рост пленки практически прекращается, и что нарастание пленки во время ее старения незначительно, чтобы оказать какое-либо влияние. Высокая стабильность решетки означает, что относительно немногочисленные потенциальные источники ее атомов беднее, чем регулярные источники. Этот факт позволяет сделать вывод, что иницирующим процессом фриттинга является освобождение электронов из относительно бедных источников под действием сильного электрического поля.

Другой подтвержденный факт, который имеет значение для дальнейшего развития теории фриттинга, состоит в том, что весь процесс фриттинга требует определенного времени. Установлено, что А-фриттинг может произойти во время одного пика напряжения при частоте 50 Гц. При частоте 5000 Гц для этого необходимо много периодов, и действие определяется эффективным значением напряжения. Эти факты означают, что формирование канала фриттинга требует нагревания в течение примерно $1/300$ с. Однако это не означает, что вторая фаза фриттинга является тепловым пробоем.

Большой интерес для общей теории фриттинга представляют некоторые результаты исследования фриттинга темных коллекторных пленок, которые проводила Э. Хольм. Данные ее исследования полностью подтверждают рассмотренную нами теорию процесса фриттинга не только с точки зрения теоретических аспектов, но и хорошо вписываются в количественные значения основных параметров процесса, таких как напряжение пробоя, ток, сопротивление, время протекания отдельных его фаз и др.

Заключение

Проводимость электрических контактов с наличием толстых окисных пленок потускнения является серьезной проблемой для обеспечения безотказной работы электрических соединителей. Нами ранее отмечалось, что чистый металлический контакт, свободный от окисных пленок, можно получить только в условиях вакуума, поэтому наличие пленок на контактах необходимо воспринимать как естественное состояние контактных поверхностей. В связи с этим нормальную работу электрических соединителей необходимо обеспечивать с учетом фактического состояния контактных поверхностей и реальных условий эксплуатации.

Рассмотренный в данной статье процесс проводимости через электрические контакты, покрытые толстыми окисными пленками потускнения, относящийся к так называемому фриттинг-процессу, позволяет лучше понять физический смысл явлений, происходящих в рамках этого процесса, и установить степень влияния различных факторов на проводимость.

Авторами установлены определенные закономерности и зависимости между основными характеристиками процесса проводимости, такими как переходное сопротивление, напряжение, ток, частота электрического тока, вид окисной пленки, сопротивление пленки и давность ее образования, состояние окружающей среды — температура, влажность, давление и др. Определены значения верхней и нижней границы накопления напряжений фриттинга как функции толщины и пленки. Установлены также другие зависимости и взаимосвязи па-

раметров и внешних воздействующих факторов, использование которых в практической деятельности при проектировании соединителей и их эксплуатации позволит с меньшими затратами и потерями решать вопросы по обеспечению нормальной работоспособности электрических соединителей.

Литература

1. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Анализ физических процессов, происходящих в контактах // Компоненты и технологии. 2007. № 6.
2. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Основные аспекты теории неподвижного электрического контакта // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 4.
3. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Пленки на элек-

трических контактах // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 5.

4. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Работа электрических соединителей в цепях с микроотками и микронапряжениями // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 2.
5. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / Учебник для вузов. Под общ. ред. В. А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
6. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970.
7. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
8. Сотсков Б. С. Электрические контакты. М.: Энергия, 1967.
9. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1967.