

С. Э. ХАЙКИН, Г. К. ДЕМИШЕВ и А. Е. САЛОМОНОВИЧ

## ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 9 XII 1949)

Для выяснения механизма электрической проводимости между соприкасающимися проводниками представляет интерес исследование зависимости сопротивления контакта от величины относительного смещения образующих контакт поверхностей. При этом подлежит исследованию та область относительных смещений, в которой происходит переход от полного контакта к разрыву контакта, т. е. область, в которой сопротивление контакта быстро изменяется, но имеет еще конечную величину. Пока речь идет, например, об электронной проводимости (а не о пробое промежутка), эта область относительных смещений должна быть очень мала. В самом деле, для соприкасающихся металлических поверхностей в вакууме расстояние, на котором будет происходить разрыв контакта, должно быть порядка толщины „электронной атмосферы“, покрывающей металл, т. е. порядка  $1 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-8}$  см.

Попытки исследовать зависимость сопротивления контакта от статически задаваемого относительного смещения соприкасающихся поверхностей<sup>(1,2)</sup> показали, что все явление разыгрывается, действительно, в пределах весьма малых смещений порядка  $1 \cdot 10^{-7}$  см. Однако эти попытки, вследствие возникших больших экспериментальных трудностей, не дали сколько-нибудь надежных количественных результатов. Основная экспериментальная трудность такого рода статических исследований заключается в невозможности надежно задавать и контролировать столь малые относительные смещения.

Одним из нас (С. Э. Хайкиным) был предложен динамический метод исследования, полностью исключающий указанную трудность. Этот метод, по идее близкий к предложенному ранее методу исследования механических сил между соприкасающимися поверхностями при малых относительных смещениях поверхностей<sup>(3)</sup>, состоит в следующем.

Одной из поверхностей исследуемого контакта служит металлизированная поверхность пьезокварцевого резонатора, другой — свободно лежащая на этой поверхности металлическая пластинка. Если частота колебаний пьезокварца достаточно высока (десятки килогерц или больше), пластинка практически покоится, так как механические силы взаимодействия между кварцем и пластинкой недостаточны для того, чтобы сообщить пластинке такие же ускорения, с которыми колеблется кварц. Вследствие этого при колебаниях пьезокварца происходят периодические изменения расстояния между поверхностью пьезокварца и поверхностью пластинки, причем амплитуду колебаний пьезокварца, а вместе с тем и амплитуду относительных смещений поверхностей

легко изменять и контролировать\*. Помещая пластинку на торцовую или боковую поверхность колеблющегося по длине пьезокварца, можно осуществить соответственно нормальные или тангенциальные относительные смещения соприкасающихся поверхностей.

Периодические изменения расстояния между соприкасающимися поверхностями должны вызвать изменения сопротивления контакта между ними, причем характер этих изменений целиком определяется характером зависимости сопротивления от смещения. Исследуя изменения сопротивления контакта при колебаниях, можно установить зависимость этого сопротивления от относительного смещения соприкасающихся поверхностей. Изменения среднего сопротивления контакта могут быть измерены обычным способом — с помощью мостика или компенсационной схемы. Для измерения же периодических изменений сопротивления контакта был применен следующий прием. Через контакт пропускался ток той же либо двойной частоты, по сравнению с частотой тока, возбуждающего колебания кварца. При этом в цепи контакта должен возникнуть постоянный ток (аналогично тому, как это происходит в синхронном детекторе) и по силе этого тока можно судить об изменениях сопротивления контакта.

В самом деле, положим, что зависимость сопротивления контакта от относительного смещения поверхностей может быть выражена полиномом второй степени

$$R = R_0 + R_1x + R_2x^2. \quad (1)$$

Если вся цепь, в которую входит контакт, обладает сопротивлением  $\rho$  и по ней течет ток  $i = I_0 \cos \omega t$ , а относительное смещение поверхностей происходит по закону  $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ , то в цепи должен возникнуть постоянный ток

$$I_1 = \frac{I_0 R_1 A}{2\rho} \cos \varphi. \quad (2)$$

Если же в цепи протекает переменный ток двойной частоты  $i = I_0 \cos 2\omega t$ , то возникает выпрямленный ток

$$I_2 = -\frac{I_0 R_2 A^2}{4\rho} \sin \varphi. \quad (3)$$

Что же касается изменения среднего сопротивления контакта, то оно выразится следующим образом:

$$\Delta R = \frac{R_2 A^2}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, зная  $A$  и измеряя  $I_1$  и  $I_2$ , можно определить  $R_1$  и  $R_2$  (зависимость  $I_1$  и  $I_2$  от  $\varphi$  позволяет убедиться, что мы наблюдаем именно описываемый эффект синхронного детектирования и что исключается обычный детекторный эффект, который часто возникает между соприкасающимися поверхностями).

Измеряя, кроме того,  $\Delta R$  (в компенсационной схеме), можно независимо определить  $R_2$ . Если значения  $R_2$ , полученные из соотношений (3) и (4), совпадают, то это свидетельствует о том, что никаких других изменений расстояния при колебаниях, кроме изменений по закону  $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ , не происходит. Если же значение  $R_2$ , полученное из выражения (4), отличается от полученного из выражения (3), то это свидетельствует о том, что при колебаниях, помимо гармониче-

\* Для контроля амплитуд колебаний пьезокварца был разработан оптический метод калибровки, позволяющий надежно определять амплитуды от  $3 \cdot 10^{-8}$  см.

ского изменения расстояния, возникают постоянные смещения соприкасающихся поверхностей (эти постоянные смещения при колебаниях могут возникнуть вследствие нелинейности механических сил взаимодействия между соприкасающимися поверхностями).

Исследование электрического контакта описанным методом показало, что, начиная от смещений порядка  $5 \cdot 10^{-8}$  см, сопротивление электрического контакта возрастает регулярно и обратно вплоть до смещений порядка  $5 \cdot 10^{-7}$  —  $5 \cdot 10^{-6}$  см, в зависимости от свойств поверхностей и величины нормального давления. (В наших опытах применялись серебряные и алюминиевые поверхности; нормальные нагрузки изменялись в пределах от 1 до 20 г.) При дальнейшем увеличении смещений изменения сопротивлений становятся нерегулярными и необратимыми.

Изменения сопротивления происходят как при нормальных, так и при тангенциальных смещениях соприкасающихся поверхностей, однако характер этих изменений в обоих случаях различен. При нормальных смещениях сопротивление меняется вначале почти линейно с изменением смещения и лишь при значительных амплитудах обнаруживается квадратичная зависимость сопротивления от смещения. При тангенциальных смещениях в первом приближении сопротивление меняется по квадратичному закону в зависимости от смещения. Этого и следовало ожидать, так как при тангенциальных смещениях, независимо от того, по какой причине изменяется сопротивление контакта, эти изменения в обе стороны должны быть одинаковы.

Таким образом, как с качественной стороны (в отношении характера изменений сопротивления при смещениях), так и с количественной (в отношении порядка величины смещения, при которой происходят изменения сопротивления) описанный метод дает вполне разумные и правдоподобные результаты и, очевидно, позволяет исследовать поведение электрического контакта между соприкасающимися поверхностями при столь малых смещениях, которые до сего времени были совершенно недоступны для экспериментального исследования.

Одним из нас (А. Е. Саломоновичем) описанный метод был применен для одновременного исследования как механического взаимодействия, так и электрического контакта между соприкасающимися поверхностями и позволил не только исследовать поведение электрического контакта, но и установить новые факты относительно характера механического взаимодействия между соприкасающимися поверхностями при их малых относительных смещениях.

Поступило  
3 XII 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> F. Rother, Ann. d. Phys., 44, 1238 (1914). <sup>2</sup> H. Rohman, Phys. Zs., 21, 417 (1920). <sup>3</sup> С. Э. Хайкин, Л. П. Лисовский и А. Е. Саломонович, ДАН, 24, № 2 (1939).