

06; 12

© 1992

ОБ АКТИВАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
ПРОВОДИМОСТИ И МЕХАНИЗМЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ КОЖИ ЧЕЛОВЕКАВ.Х. Ш п у н т, Е.И. Ш и ф р и н,  
К.Д. Ц е н д и н

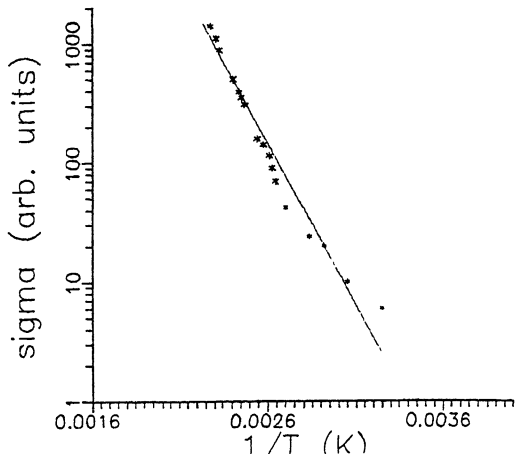
Исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) с отрицательным дифференциальным сопротивлением, обнаруженных на коже человека [1], важно как для развития общих представлений и механизме движения носителей тока в организме человека, так и для целей практической медицины, в которой все большее внимание уделяется методам воздействия электрическим током на кожные покровы и ткани. В настоящей работе обсуждается физический механизм возникновения отрицательного сопротивления  $S$ -типа ( $S$ -образной ВАХ), наблюдавшегося в [2]. В [2] было обнаружено, что  $S$ -образная ВАХ возникала в случае приложения напряжения между неактивной точкой (точкой плацебо) и точкой акупунктуры (ТА)<sup>1</sup>. В [2] отмечалось, что феноменологически кинетика образования  $S$ -образной ВАХ кожи сходна с кинетикой эффекта переключения в халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП) [3]. В обоих случаях при приложении напряжения прямого перехода ( $V_{пр}$ ) после сравнительно длинного времени задержки ( $t_3$ ) следовало быстрое переключение из высокоомного в низкоомное состояние, происходившее за время включения ( $t_{вкл}$ ),  $t_{вкл} \ll t_3$ . Поэтому, пользуясь аналогией с эффектом переключения, можно говорить об эффекте переключения в коже человека.

Относительно механизма эффекта переключения в коже высказывались различные точки зрения. В [2] предполагалось, что он может быть связан с наличием положительной обратной связи по току, возникающей следующим образом. Считалось, что раздражающее действие электрического тока должно приводить к изменению потенциала на мембране и сдвигу электролитического баланса с последующим выходом электролита в межклеточное пространство. Это приводит к расширению канала тока и увеличению тока, что еще больше изменяет мембранный потенциал и т.д.

Одним из фактов, свидетельствующих в пользу предложенного механизма, авторы считали обнаруженное ими расширение канала,

---

<sup>1</sup>ТА – точка, которая используется для лечения методом иглоукальвания. Неактивная точка (точка плацебо) – любой участок кожи на поверхности тела вне ТА.



Температурная зависимость проводимости ногтя.

которое наблюдалось с помощью морфологических исследований участка кожи непосредственно после переключения. Было обнаружено, что после переключения межклеточное пространство под электродом расширяется от  $\sim 16$  нм до  $\sim 100$  нм, что объяснено увеличением проводимости при переключении в  $10^1$ - $10^2$  раз [2]. С другой стороны, в [4] считалось, что эффект переключения в коже инициируется джоулевым разогревом, который затем вызывает появление электронных процессов типа ударной ионизации (электротепловой пробой). Известно, что для развития электротеплового пробоя необходимо существование положительной обратной связи по току. Такая связь возникает, например, в полупроводниках из-за сильной активационной зависимости удельной проводимости ( $\sigma$ ) от температуры:  $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT)$ . Здесь  $\Delta E$  – энергия активации,  $T$  – температура,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\sigma_0$  – предэкспоненциальный множитель. Таким образом, для проверки гипотезы об электротепловом характере эффекта переключения кожи человека необходимо было бы исследовать температурную зависимость  $\sigma$ . Однако на сегодняшний день такие исследования автором неизвестны.

В настоящей работе с целью дальнейшего исследования физического механизма, ответственного за появление S-образной ВАХ кожи человека, была предпринята попытка измерить температурную зависимость проводимости кожи. Очевидно, что такие измерения невозможны на живом объекте. Предварительные результаты наших исследований показали, что кожа человека очень близка по спектральной зависимости пропускания к веществу, из которого состоит ноготь человека. Поэтому, мы предположили, что в первом приближе-

нии проводимость верхнего, самого высокоомного слоя кожи, может считаться равной проводимости ногтя. Поскольку как ноготь, так и верхний слой кожи, вносящий главный вклад в сопротивление всего кожного покрова, состоит из одних и тех же ороговевших клеток.

Исследования температурной зависимости проводимости ногтя выполнялись на образце с геометрией „сэндвич“ толщиной  $\sim 70$  мкм и площадью электродов  $\sim 0.3 \times 0.07$  см<sup>2</sup>. Их результаты приведены на рисунке. Видно, что в достаточно широком интервале по температуре и проводимости наблюдается активационная зависимость проводимости  $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/KT)$  с энергией активации  $\Delta E = 0.54$  эВ.

Из спектральной зависимости можно оценить ширину запрещенной зоны ( $E_g$ ) кожи, которая оказалась по величине не меньше 3 эВ. Сравнивая эту величину с  $\Delta E = 0.54$  эВ, можно видеть, что уровень Ферми в ногте сильно сдвинут из положения в середине запрещенной зоны:  $E_g/2 \approx 1.5$  эВ. Такой сдвиг является характерным признаком примесной проводимости в полупроводниках. Отсюда можно предположить, что тонкий внешний слой кожи, состоящий из ороговевших клеток, похож по своим электрическим свойствам на широкозонный легированный полупроводник.

Известно, что в случае электротеплового пробоя для того, чтобы произошел резкий скачок тока (непосредственное переключение), необходим небольшой разогрев на величину  $\Delta T = kT_0^2/\Delta E$ , происходящий за время задержки (здесь  $T_0$  — температура окружающей среды) [5]. При  $T_0 \approx 300$  К и  $\Delta E \approx 0.54$  эВ эта величина равна  $\Delta T \approx 16$  К. Оценка возможного разогрева для экспериментально наблюдаемых величин  $T_0 \approx 300$  К,  $V_{III} \approx 2-3$  В,  $I_{III} \approx 5 \cdot 10^{-6}$  А дает величину  $\Delta T = 10$  К, считая толщину верхнего слоя равной  $\sim 1$  мкм. Эта величина довольно близка к значению  $\Delta T = 16$  К. Поэтому, можно предположить, что джоулево тепло, выделяющееся при прохождении тока через кожу может внести существенный вклад в процесс появления S-образной ВАХ кожи человека.

В заключение отметим, что главной целью работы является демонстрация удивительного факта — наличие активационной температурной зависимости проводимости ногтя (кожи), аналогичной примесной проводимости в полупроводниках. Что касается связи этой зависимости с эффектом переключения в коже (электротепловой механизм появления S-образной ВАХ), то авторы понимают, что последовательная электротепловая модель должна объяснить зависимость  $V_{III}$  и обратимости переключения от полярности приложенного напряжения, характеристики низкоомного состояния и т.д. Эти вопросы мы надеемся рассмотреть подробно в следующей публикации.

Авторы выражают свою признательность О.А. Луизовой за большую помощь в проведении электрических измерений.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К о л о м и е ц Б.Т., Ш п у н т В.Х., М а р к о в Ю.В.// Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 19. С. 1169-1172.
- [2] К о л о м и е ц Б.Т., Ш п у н т В.Х., М а ш а н - с к и й В.Ф., М а р к о в Ю.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 10. С. 2203-2205.
- [3] К о л о м и е ц Б.Т., Л е б е д е в Э.А., Ш п у н т В.Х.// ФТП. 1969. Т. 3. В. 5. С. 731-735.
- [4] П о р т н о в Ф.Г. // Электростимуляционная рефлексотерапия. Рига: Зинанте, 1988. 352 с.
- [5] W a g n e r K.W. // J. Inst. Electr. Eng. 1922. V. 41. P. 1034.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе,  
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
16 марта 1992 г.