

07;12  
©1993

## ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ЖИВОЙ ТКАНИ (КОЖИ) ЧЕЛОВЕКА

*В.Х.Шпунт, Ю.В.Рудь*

В последние годы все большее внимание в медицине уделяется методам светового облучения тела человека как в диагностических, так и в терапевтических целях. Однако физические закономерности взаимодействия света с кожей человека до сих пор практически не выявлены. Именно это обстоятельство и обусловило основную задачу поставленной работы.

Результаты работ, выполненных нами ранее, ярко продемонстрировали тот факт, что кожа человека обладает типичными для полупроводников и диэлектриков свойствами. В частности:

1. Наличие вольтамперных характеристик (ВАХ)  $S$ - и  $N$ -типа [1];
2. Экспоненциальный закон в температурной зависимости электропроводности [2,3];
3. Четко выраженный край оптического поглощения и характерные полосы пропускания в инфракрасной области [3].

На основании полученных данных была предложена модель энергетических состояний в запрещенной зоне для кожи человека [3].

В этой связи следует ожидать, что при облучении кожи человека в области поглощения будут обнаружены эффекты, характерные для полупроводниковых материалов. Выявление таких эффектов имеет не только фундаментальное, но и практическое значение.

Насколько нам известно, такие работы практически не проводились и исключение составляют [4,5], где описывается "фотоэффект" кожи человека при облучении ртутной лампой. Однако из работы неясно, каким образом в поставленном эксперименте учитывалась ионизация молекул газа в воздушном промежутке.

В данной работе представлены первые результаты исследований влияния лазерного облучения на электрические свойства кожи человека.

Эксперименты проводились на большом количестве людей и на различных участках поверхности кожи человека.

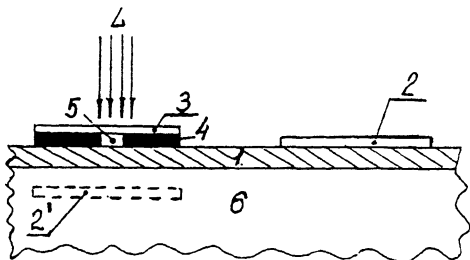


Рис. 1. Схема наложения электродов на тело человека при изучении фотостимулированных эффектов.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. На кожу человека 1 накладывались два электрода (2,3). Электрод 2 изготовлялся большой площади (5–10 см<sup>2</sup>) так, чтобы общее сопротивление объема кожи под электродом не превышало 5–10 кОм. Расстояние между электродами 2 и 3 не сказывалось на результатах эксперимента и находилось в пределах 1–10 см. Прозрачный для света в исследуемой области спектра электрод 3 накладывался на тело человека через черную бумагу 4 с отверстием 5, которое и определяло площадь соприкосновения его с телом человека (1–5 мм<sup>2</sup>). При этом темновое сопротивление объема кожи под электродом находилось в пределах 5–10 мОм. Одновременно черная бумага ограничивала поверхность облучения кожи светом. Электрод 3 изготовлялся из слоя высокопроводящего широкозонного окисла  $\text{In}_2\text{O}_3$  ( $d = 0.1$  мкм, оптическое пропускание слоя в измеряемом диапазоне  $T_c \approx 98\%$ ). Учитывая относительно малое сопротивление подкожного пространства и кожи в области электрода 2, с некоторым приближением можно считать, что изучаемая область кожи человека находится между электродами 3 и 2'. Следовательно, измеряемый "образец" имел конструкцию типа "сэндвич". Измерения стационарной проводимости осуществлялись по обычной методике при напряжениях смещения до 5 В и сопротивлениях нагрузки, близких к темновому сопротивлению "образца". Для освещения использовалось излучение перестраиваемого аргонового лазера типа ПЛА-120-1 фирмы "Карл Цейс". Диапазон изменения энергии фотонов излучения лежал в пределах от 2.4 до 2.7 эВ, мощность на различных линиях генерации составила 20–250 мВт и контролировалась с помощью набора нейтральных оптических фильтров.

Результаты исследований иллюстрируются рис. 2 и 3. Видно, что под действием света проводимость кожи увеличивается  $[(\Delta\sigma/\sigma_T) > 0]$ . С ростом энергии фотонов наблюдается плавное увеличение проводимости кожи. При прекра-

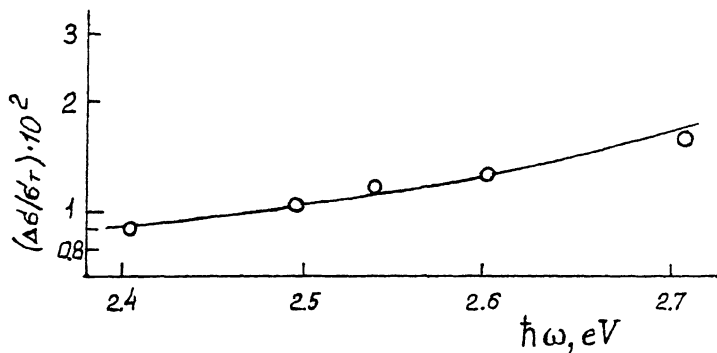


Рис. 2. Зависимость фотостимулированной проводимости кожи человека от энергии падающих фотонов.  $T = 36.6^\circ\text{C}$ , величина  $(\Delta\sigma/\sigma_T)$  нормирована на равное число падающих фотонов.

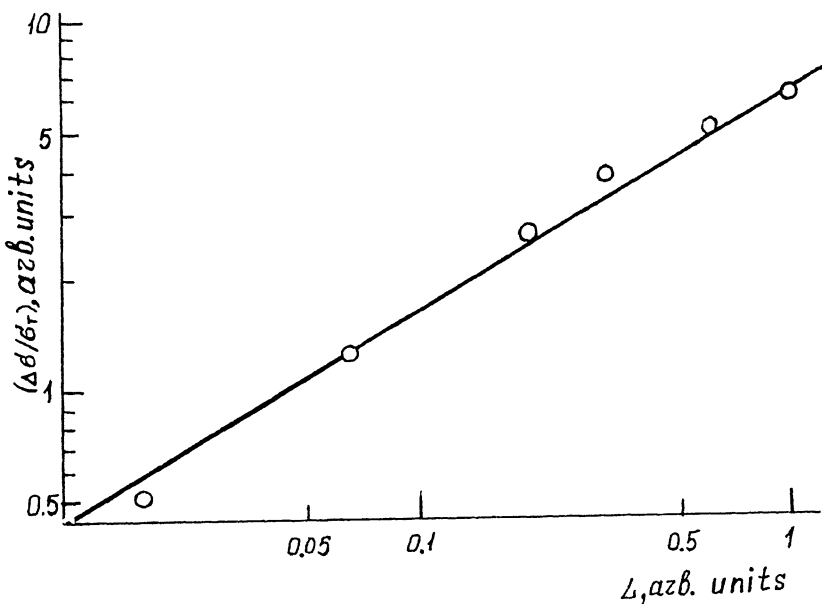


Рис. 3. Зависимость фотостимулированной проводимости кожи человека от плотности потока падающего лазерного излучения.  $T = 36.6^\circ\text{C}$ ,  $\hbar\omega = 2.54$  эВ.

щении освещения проводимость кожи полностью восстанавливалась до исходного значения  $\sigma_T$ .

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость проводимости кожи  $\Delta\sigma/\sigma_T$  при освещении фиксированной энергией фотонов  $\hbar\omega = 2.539$  эВ от мощности излучения. Видно, что эта зависимость имеет вид  $(\Delta\sigma/\sigma_T) \sim L^{0.6}$ . Та-

кой характер зависимости  $\Delta\sigma/\sigma_T(L)$  сохраняется во всем изученном спектральном диапазоне.

Следует отметить, что полученные зависимости являются типичными и практически не зависят от индивидуумов и исследуемых участков тела человека.

Весьма интересным является еще один экспериментальный факт, а именно появление фотостимулированной ЭДС (до 3 мВ). При этом освещаемый электрод заряжался положительно.

Таким образом, нами обнаружены фотостимулированные эффекты в коже человека:

1. Увеличение проводимости под действием света.
2. Появления ЭДС при облучении кожи светом.

К сожалению, на данном этапе работы сложно определить физические механизмы этих явлений. Мы считаем, что возможны две версии: 1) разогрев кожи под действием света; 2) фотогенерация неравновесных носителей заряда с уровней в запрещенной зоне [3].

По-видимому, как это часто бывает на практике, в обсуждаемые эффекты вносят вклад оба отмеченных механизма и их дальнейшие исследования могут позволить определить величины относительного вклада каждого из них.

В заключение, обсуждая возможности практических применений установленных фотоиндуцированных эффектов, укажем на их некоторую аналогию с обнаруженными нами ранее эффектами изменения проводимости кожи человека под действием импульсов электрического тока [6-8]. Эти эффекты названы нами эффектами памяти кожи человека на прохождение в ней электрического тока. Они заключались в том, что при прохождении импульса тока через тело человека проводимость кожи увеличивалась. Очень важно отметить, что такой эффект сопровождался анестезирующим (обезболивающим) воздействием [9]. Кроме того, нами отмечалось, что эффект памяти может быть использован при диагностике сердечно-сосудистых заболеваний [7,9], таких, как атеросклероз, гипертоническая болезнь, ревматизм и т.д. Можно ожидать, что увеличение проводимости кожи человека под действием света оказывает аналогичный эффект.

Таким образом, обнаруженные нами фотоиндуцированные процессы непосредственно на живой ткани имеют, на наш взгляд, не только научное, но и практическое значение.

## Список литературы

- [1] Коломиец Б.Т., Шпунт В.Х., Марков Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 19. С. 1169–1172.
- [2] Шпунт В.Х., Шифрин Е.И., Цендин К.Д. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 24. С. 41–44.
- [3] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В., Цендин К.Д. // Письма в ЖТФ. Т. 19. В. 12. С.
- [4] Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. Киев: Наукова думка, 1990. 224 с.
- [5] Ефимов В.В. Бофизика для врачей. М.: Медгиз, 1952. 342 с.
- [6] Коломиец Б.Т., Шпунт В.Х., Марков Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 19. С. 1172–1175.
- [7] Шпунт В.Х. Дис. на соиск. уч. степени д.ф.- м.н. СПб: ФТИ РАН, 1992. 45 с.
- [8] Шпунт В.Х., Шифрин Е.И., Цендин К.Д. // Письма в ЖТФ. 1991. Т.17. В. 24. С. 91–93.
- [9] Гембицкий Е.В., Коломиец Б.Т., Марков Ю.В., Шпунт В.Х. // Матер. научно-практической конф. врачей. Владивосток, 1980. С. 154–156.

Физико-технический  
институт им.А.Ф.Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
17 августа 1993 г.