

05.2;07;12

©1993

## ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЖИ ЧЕЛОВЕКА

*В.Х. Шпунт, Ю.В. Рудь, К.Д. Цэндин*

В последнее время интенсивно обсуждаются вопросы взаимодействия живых организмов с электромагнитным излучением различных длин волн. В частности, важнейшим является вопрос о воздействии на организм человека лазерного облучения, которое используется в терапии, хирургии и т.д. Одним из основных аспектов, определяющих понимание физики воздействия лазерного излучения на живой организм, является изучение фундаментальных оптических свойств кожи человека, являющейся своего рода входным окном, через которое падающее излучение проникает в живую ткань. Пока число исследований такого рода очень невелико, а диапазон использованных длин волн довольно ограничен [1].

В связи с этим в данной работе была поставлена задача исследовать спектральную зависимость оптического пропускания  $T(\lambda)$  тонких внешних слоев кожи человека в широком интервале длин волн  $\lambda = 0.2 \dots 25$  мкм.

Второй задачей работы являлось выяснение хотя бы в первом приближении конкретных микроскопических механизмов, ответственных за поглощение электромагнитных волн в коже человека. Для этого комплекс оптических исследований проводился параллельно с электрическими измерениями, продолжившими серию наших предыдущих работ [2-6].

Измерения спектров  $T(\lambda)$  проводились с использованием спектрофотометров ИКС-24 ( $400-4000$  см<sup>-1</sup>) и Specord ( $4000-40000$  см<sup>-1</sup>). Исследовались образцы с геометрическими размерами: толщина 20-50 мкм, площадь  $\sim 10 \times 10$  мм (кожа человека); толщина 70-150 мкм, площадь  $\sim 5 \times 5$  мм (ногти человека). Измерения проводились при комнатной температуре на широком наборе образцов из различных источников. Изменение толщины достигалось в случае кожи путем микротомирования тонких наружных слоев, которые монтировались на металлической рамке, обеспечивающей равномерное растяжение слоев в виде плоских образцов. Для изготовления плоских образцов из ногтя применялась механическая шлифовка, а затем полировка ногтя. Исследования оптического пропускания на образцах различной толщины, различных способах обработки их поверхности, а также выдержанных различные времена на воздухе (до  $\sim 500$  ч) не обнаружили каких-либо изменений в спектральных особенностях пропускания.

На рис. 1 и 2 показаны типичные спектральные зависимости оптического пропускания кожи (1) и ногтя (2, 3) человека. За исключением области длин волн  $\lambda \approx 0.2 - 0.3$  мкм, наши данные хорошо согласуются с результатами работы [7], где пропускание измерялось в диапазоне  $\lambda = 0.2 - 3$  мкм. В области  $\lambda = 0.2 - 0.3$  мкм

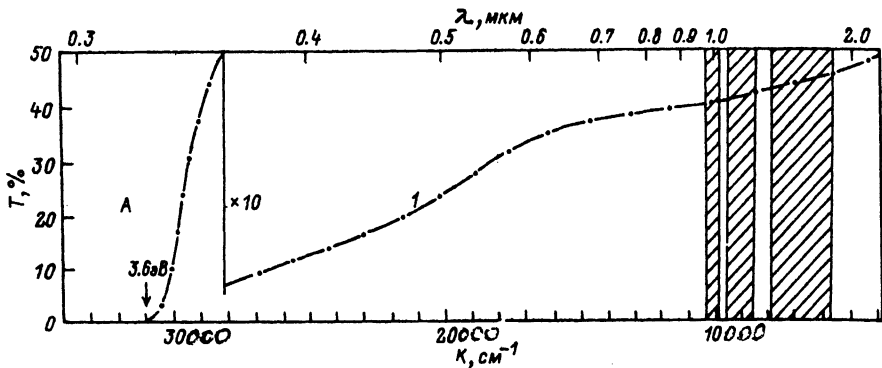


Рис. 1. Спектральная зависимость оптического пропускания тонкого наружного слоя кожи человека при  $T = 300$  К (заштрихованные участки отвечают окнам прозрачности атмосферы [8]).

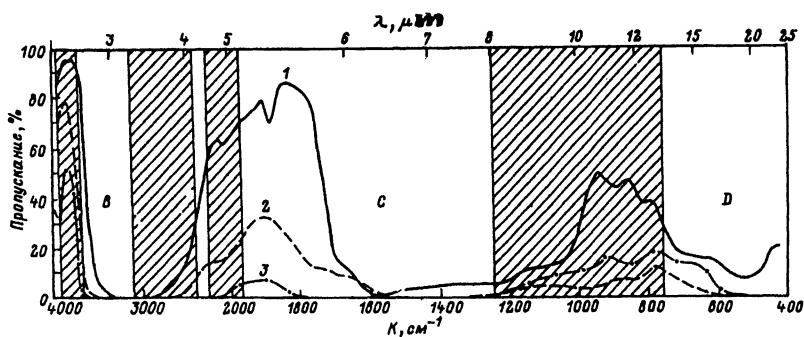


Рис. 2. Спектральная зависимость оптического пропускания тонкого наружного слоя кожи человека (1) и ногтя (2, 3) различной толщины (заштрихованные участки соответствуют полосам прозрачности атмосферы [8]). Толщина образцов  $d$ , мкм: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150.

в [7] наблюдалось пропускание на уровне 10–15%, в то время как наши образцы в этом диапазоне длин волн были практически непрозрачны. Вероятной причиной такого несоответствия результатов может являться разное состояние поверхностей образцов.

Переходя к обсуждению результатов, прежде всего отметим факт детального совпадения спектров оптического пропускания верхнего слоя кожи и ногтя человека (рис. 2).

Следует также отметить, что характеристика пропускания образцов не определяется содержанием в них молекул воды, что видно из рис. 2, где изображены окна прозрачности атмосферы (отмеченные заштрихованными полосами [8]), которые сильно отличаются от окон прозрачности образцов.

Обсудим кратко возможную природу основных полос оптического поглощения кожи и ногтя, обозначенных на рис. 1 и 2 буквами А, В, С, D.

Полоса поглощения А расположена в области коротких длин волн с границей при  $\lambda \approx 0.34$  мкм, которой соответствует энергия

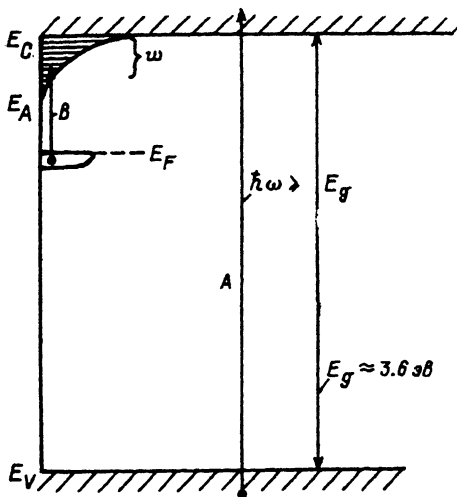


Рис. 3. Схематическое изображение возможной зонной структуры наружного слоя кожи человека и ногтя. Стрелками обозначены оптические межзонные (A) и переходы “уровень — хвост плотности состояний” B.

$\hbar\omega \approx 3.6$  эВ (обозначена стрелкой на рис. 1). Пропускание излучения с  $\hbar\omega < 3.6$  эВ аналогично пропусканию, которое наблюдается в широкозонных полупроводниках и диэлектриках, когда энергия падающего излучения меньше ширины запрещенной зоны  $E_g$ . Это обстоятельство позволяет выдвинуть концепцию о существовании в энергетическом спектре исследованных материалов запрещенной зоны. В этой связи можно предложить следующую энергетическую диаграмму электронного спектра для кожи и ногтя человека. В соответствии с ней полоса поглощения A связывается с переходами “валентная зона — зона проводимости” (обозначенными стрелкой A на рис. 3), происходящими под воздействием квантов с  $\hbar\omega > E_g \approx 3.6$  эВ. Данное значение является нижней оценкой ширины запрещенной зоны  $E_g$ , поскольку в [7] пропускание наблюдалось и при  $\hbar\omega \gtrsim 3.6$  эВ.

Полоса поглощения C находится в диапазоне  $\lambda \approx 6 - 10$  мкм ( $\hbar\omega \approx 0.2 - 0.1$  эВ). Ее характерные энергии  $\sim 0.2 - 0.1$  эВ, возможно, связаны с возбуждением внутримолекулярных колебаний. Известно, например, что оптические колебания двойной связи “углерод-углерод” (C=C) имеют характерные энергии 0.1–0.15 эВ [9].

Полоса поглощения D, расположенная в диапазоне  $\lambda = 15 - 25$  мкм ( $\hbar\omega \sim 0.08 - 0.05$  эВ), имеет энергии, характерные для инфракрасного поглощения, обусловленного, по-видимому, межмолекулярными колебаниями углеродных цепей.

Наиболее интересной, с нашей точки зрения, является полоса поглощения B, расположенная в диапазоне длин волн от 2.5 до 4 мкм ( $\hbar\omega = 0.5 - 0.3$  эВ). Ее довольно высокая энергия не может быть обусловлена оптическими фонами и должна, по-видимому, связываться с электронными переходами. В принципе, такими переходами могли бы быть переходы “уровень — хвост плотности состояний” (стрелка B на рис. 3).

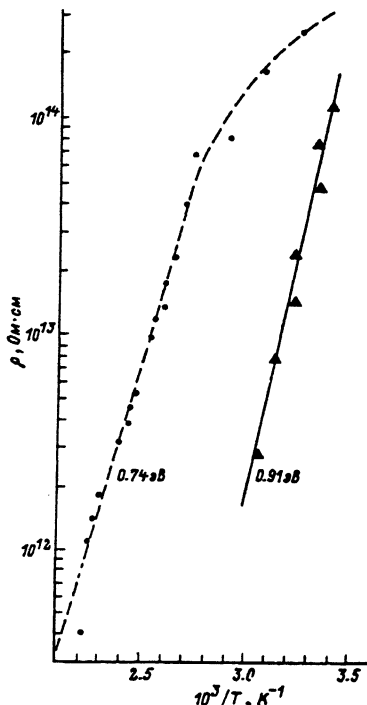


Рис. 4. Температурная зависимость проводимости двух образцов ногтя человека. Цифры у кривых — значения энергий активации.

На наличие в запрещенной зоне материала кожи и ногтя большой концентрации локализованных уровней указывают и данные, полученные при исследовании электрических свойств ногтя. В работе [6] было получено, что температурная зависимость удельного сопротивления ( $\rho$ ) ногтя является активационной с энергией  $\Delta E$ , существенно меньшей, чем половина ширины запрещенной зоны ( $\Delta E < E_g/2$ ). Если предположить, что проводимость в ногте имеет электронный, а не ионный характер, полученный результат свидетельствует о несобственном характере проводимости, т.е. о наличии в запрещенной зоне локализованных состояний.

В настоящей работе также измерялась температурная зависимость удельного сопротивления материала ногтя  $\rho(T)$ . На рис. 4 приведены типичные кривые  $\rho(T)$  для образцов с максимальным и минимальным значениями среди всех исследованных. Удельное сопротивление образцов исследовалось на постоянном токе в планарной геометрии и на образцах в виде "сэндвича". В качестве электрических контактов применялись полимеризующая серебряная паста или чистый индий. Вольт-амперные характеристики образцов, снабженных такими контактами, в области слабых электрических были линейными. Температура образцов контролировалась медь-медь-константовой термопарой. Все приведенные на рис. 4 зависимости  $\rho(T)$  в исследованном интервале температур обнаружили хорошую воспроизводимость и обратимость по температуре.

Главной закономерностью полученных зависимостей  $\rho(T)$  является их экспоненциальный характер  $\rho = \rho \exp(\Delta E/kT)$ , подтверждающий предварительный результат, полученный в [6]. Для образцов с более высоким сопротивлением в области низких температур  $T < 380$  К наблюдается отклонение от экспоненциального закона, которое в легированных и компенсированных полупроводниках обычно связывается с переходом к проводимости по примесным состояниям [10]. Энергии активации, определенные по экспоненциальным участкам, лежат в интервале  $\Delta E = 0.7 - 0.9$  эВ.

Различия в значениях  $\rho$  и  $\Delta E$  для различных образцов связаны, по-видимому, с различной концентрацией дефектов и примесей, определяющих подвижность и положение уровня Ферми ( $E_F$ ).

Полученные значения  $\Delta E$  так же, как в [6], сильно отличаются от  $E_g/2 \gtrsim 1.8$  эВ, что свидетельствует о сильном сдвиге  $E_F$  из положения в середине запрещенной зоны. Этот сдвиг, возможно, обусловлен теми же локализованными состояниями, которые ответственны и за оптическое поглощение в полосе  $B$ . При такой интерпретации величина  $\Delta E$  может быть представлена как сумма двух вкладов: во-первых, расстояния между  $E_F$  и энергии  $E_A$ , при которой начинается хвост плотности локализованных состояний [11] (см. рис. 3). Второй вклад может быть связан с энергией, необходимой для прыжка ( $\omega$ ) при прыжковой проводимости, происходящей по локализованным состояниям, расположенным между энергиями  $E_A$  и  $E_C$ . В пользу такой интерпретации говорит и величина предэкспоненциального фактора  $\rho_0$ , лежащая в интервале  $\rho_0 = 10^1 - 10^4$  Ом·см, типичном для прыжковой проводимости по хвосту плотности локализованных состояний, примыкающих непосредственно к краю зоны по подвижности  $E_C$  [11]. В изложенной интерпретации разница между  $\Delta = 0.7 - 0.9$  эВ и характерной энергией полосы поглощения  $B$  ( $\hbar\omega \approx 0.5 - 0.3$  эВ) связывается с величиной  $\omega$ , которая по порядку величины совпадает с интервалом  $E_C - E_A$ , т.е. дает оценку для протяженности по энергии хвоста плотности локализованных состояний.

Возможна и другая интерпретация, в которой разница между характерными энергиями полосы поглощения  $B$  и энергией активации может свидетельствовать о том, что перенос тока осуществляется ионами, а не электронами. В этом случае надо считать, что оптическое поглощение определяется электронными переходами  $B$  (рис. 3) с  $\hbar\omega = 0.5 - 0.3$  эВ, а величина  $\Delta E = 0.7 - 0.9$  эВ является энергетическим барьером для прыжков ионов. Однако против такой интерпретации свидетельствуют два факта. Во-первых, предэкспоненциальный фактор  $\rho_0$ , имеющий величину, характерную для электронного, а не ионного переноса. Во-вторых, при такой интерпретации становится неясным, почему ионная проводимость малоподвижных ионов с относительно большим барьером, препятствующим прыжку, преобладает над проводимостью более подвижных электронов, расположенных на локализованных уровнях всего на расстоянии  $0.5 - 0.3$  эВ под дном зоны проводимости. Таким образом, причина появления в спектрах  $T(\lambda)$  полосы  $B$  нуждается в дальнейшем исследовании.

Кратко обсудим возможное практическое применение полученных результатов. Прогрев тканей человека лазерным излучением

зависит от степени поглощения последнего. В первом приближении можно считать, что прогрев происходит на глубину  $l$ , равную обратному коэффициенту поглощения  $\alpha$ . Следовательно, полученную в работе спектральную зависимость  $T(\lambda)$  можно, в принципе, использовать при выборе длины волны излучения, которое наиболее эффективно прогреет живую ткань на необходимую, вполне конкретную в каждом индивидуальном случае, глубину.

### Список литературы

- [1] *Березовский В.А., Колотилов Н.Н.* Биофизические характеристики тканей человека. Киев: Наукова думка, 1990. 223 с.
- [2] *Коломиец Б.Т., Шпунт В.Х., Марков Ю.В.* // Письма ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 19. С. 1169-1172.
- [3] *Коломиец Б.Т., Шпунт В.Х., Марков Ю.В.* // Письма ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 19. С. 1173-1175.
- [4] *Коломиец Б.Т., Шпунт В.Х., Машанский В.Ф., Марков Ю.В.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2203-2205.
- [5] *Шпунт В.Х., Шифрин Е.И., Цэндин Л.Д.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 24. С. 91-93.
- [6] *Шпунт В.Х., Шифрин Е.И., Цэндин К.Д.* // Письма ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 4. С. 41-44.
- [7] *Вайль Ю.С., Варановский Я.М.* Инфракрасные лучи в клинической диагностике и медико-биологических исследованиях. Л.: Медицина, 1969. 240 с.
- [8] *Козлякин В.В., Усольцев И.Ф.* Основы инфракрасной техники. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
- [9] *Моррисон, Бойд.* Органическая химия. М.: Мир, 1974. 1132 с.
- [10] *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.
- [11] *Мотт Н., Дэвис Э.* Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. 662 с.

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

Поступило в Редакцию  
4 июня 1993 г.