

07;12
©1994

ВИДИМЫЙ СВЕТ ПРИ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ ЖИВОЙ ТКАНИ (КОЖИ) ЧЕЛОВЕКА

В.Х.Шпунт, Ю.В.Рудь

В настоящее время внимание исследователей обращено на поиск материалов с высокой квантовой эффективностью фотолюминесценции в видимой области спектра. Именно в этой связи огромный интерес проявляется, в частности, к пористому кремнию, требующему привлечения специальных технологий его изготовления и диагностики.

Основной целью данной работы являлась попытка существенным образом расширить круг материалов, на которых может наблюдаться аналогичный, а может быть, и более существенный эффект. К таким материалам относится, как будет показано ниже, кожа человека (и, по-видимому, животных). Систематические исследования электрических, оптических и фотоиндуцированных явлений в живой ткани человека привело к заключению о возможности объяснить установленные в этих работах закономерности с позиций предполагаемой модели электронного энергетического спектра, характерного для неорганических алмазоподобных полупроводников [1,2]. Настоящая работа является логическим продолжением этого цикла и посвящена изучению фотолюминесценции, возникающей в живой ткани человека. В общем сам факт проявления фотолюминесценции кожи человека известен [3-6], однако эти данные носят сугубо описательный характер, что не позволяет высказать какие-либо суждения о природе и закономерностях этого весьма интересного и информативного явления. Данная работа посвящена первому систематическому исследованию фотолюминесценции живой ткани при возбуждении оптическим излучением лазера.

Для исследований были взяты, наряду с отторгнутыми от организма образцами кожи и ногтей, также кожа и ногти живого человека. В качестве источников фотовозбуждения люминесцентного излучения использовались аргоновый лазер ПА-120-1 с энергиями фотонов 2.41, 2.50, 2.54, 2.60 и 2.71 эВ, а также импульсный азотный лазер ЛГИ-21 с энергией 3.7 эВ. В ряде случаев фотовозбуждение осуществлялось также выделенной интерференционным фильтром линией 369 нм от ртутной лампы. Плотность падающего на

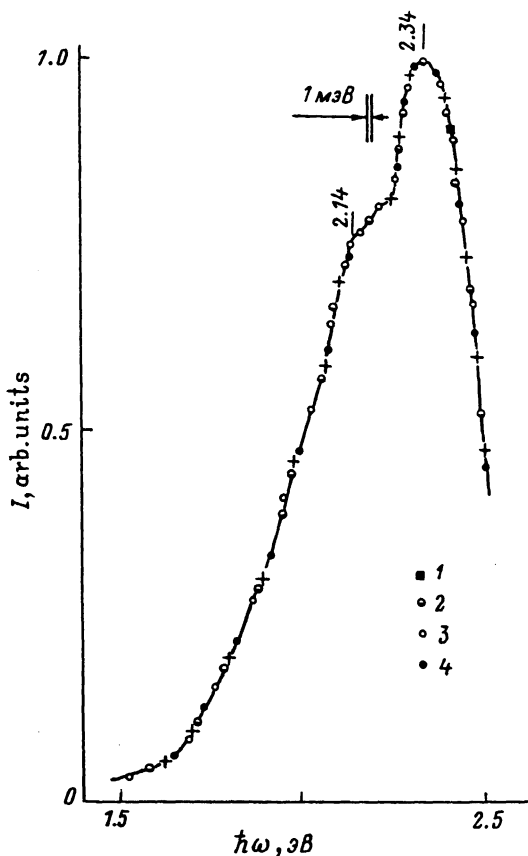


Рис. 1. Спектральные зависимости интенсивности фотолюминесценции кожи (1,2) и ногтей (3,4) человека ($T = 300$ К, $\hbar\omega_B = 2.705$ эВ): 1, 3 — живое, 2,4 — отторгнутое состояние ($L/L_0 = 1$).

биологические объекты излучения варьировалась посредством поляризатора или набора нейтральных фильтров и не превышала 0.5 Вт/см². Температура отторгнутых от живого организма образцов при исследованиях фотолюминесценции составляла 77 и 300 К, а кожи и ногтей живого человека — около 310 К. Свет люминесценции анализировался решеточным монохроматором (МРД-3 с решетками 600 и 1200 штрихов на мм) и детектировался фотоэлектронным умножителем. Фотолюминесценция регистрировалась как при постоянном, так и при модулированном с частотой 20 кГц возбуждающем оптическом излучении. Основные результаты этих исследований представлены на рис. 1 и 2, а

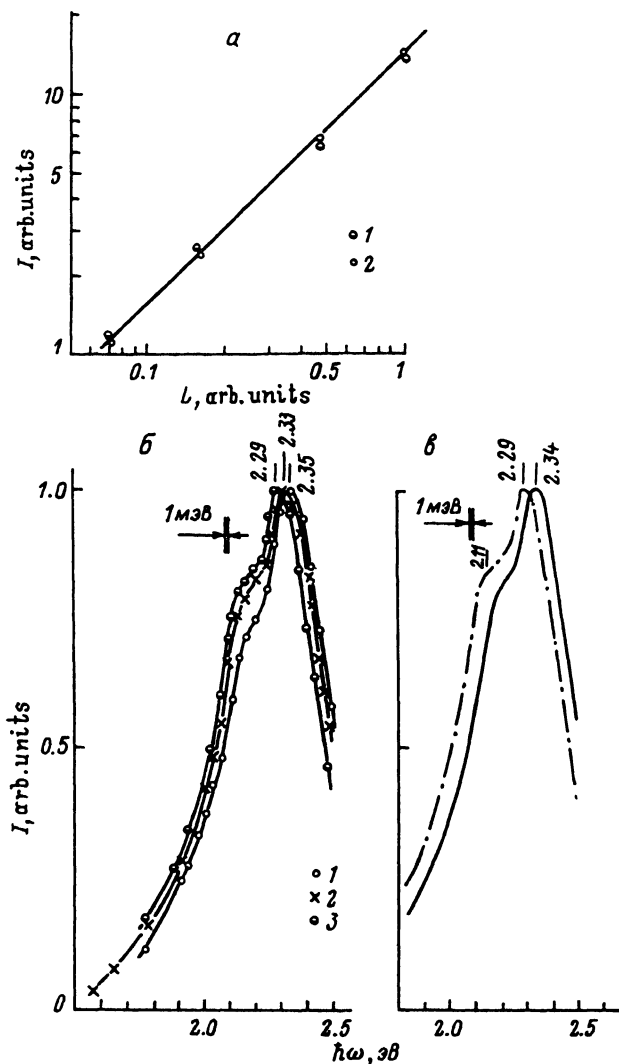


Рис. 2. а — зависимость интенсивности фотолюминесценции отторгнутой кожи человека от плотности потока возбуждающего излучения ($T = 300$ К, $\hbar\omega_B$, эВ: 1 — 2.705, 2 — 2.410).

б — спектральные зависимости интенсивности фотолюминесценции отторгнутого ногтя человека в зависимости от интенсивности возбуждения ($T = 300$ К. L/L_0 : 1 — 1, 2 — 05, 3 — 0.07; $\hbar\omega_B = 2.705$ эВ).

в — спектральные зависимости интенсивности фотолюминесценции отторгнутого ногтя человека в зависимости от температуры (T , К: 1 — 300, 2 — 77; $\hbar\omega_B = 2.705$ эВ; $L/L_0 = 0.07$).

Параметры фотолюминесценции кожи и ногтей человека при $T = 300 \text{ K}$

Типы образцов	$h\omega_B, \text{эВ}$	$h\omega_1, \text{эВ}^1$	$\delta_1^{KB}, \text{мэВ}^2$	$h\omega_2, \text{эВ}$	$\delta_2^{ДВ}, \text{мэВ}^2$
Отторгнутая кожа	2.705	2.34	150	2.14	200
Отторгнутый ноготь	2.705	2.34	40	2.14	200
Кожа на живом организме	2.705	2.34	140	2.14	190
Ноготь на живом организме	2.705	2.34	150	2.14	200

¹ Плотность потока возбуждающего излучения при получении приведенных параметров была фиксированной.

² δ_1^{KB} и $\delta_2^{ДВ}$ ширина полос люминесценции на полувысоте, соответственно с коротковолновой и длинноволновой стороны.

также в таблице. Главные закономерности излучаемого живой тканью света состоят в следующем.

1. При фотовозбуждении живой ткани человека (кожа и ногти), а также отторгнутых образцов кожи и ногтей, мы визуально наблюдали яркую фотолюминесценцию желто-зеленого цвета. Эффективность видимой люминесценции оказывается близкой у исследованных видов образцов и ее оценка дает значение на уровне нескольких процентов, что, вообще говоря, типично для алмазоподобных полупроводников III-V и широко изученного в настоящее время пористого кремния [8-9]. При использовании указанных выше видов фотовозбуждения каких-либо признаков деградации люминесценции не было обнаружено. Образцы при этом не нуждаются в какой-либо специальной обработке поверхности. Зондирование различных точек образцов сфокусированным возбуждающим лучом (диаметр 0.1-0.2 мм) не обнаруживает какой-либо неоднородности люминесцентного излучения в таких объектах.

При погружении образцов отторгнутой кожи и ногтей в жидкий азот, а также многократном термоциклировании в диапазоне 77-300 K с различными скоростями, также не удалось выявить какие-либо признаки деградации излучаемого света. Охлаждение образцов до 77 K сопровождалось возрастанием интенсивности излучения приблизительно на порядок величины, но визуально цвет люминесценции после охлаждения практически не изменялся.

2. Типичные спектральные зависимости фотолюминесценции различных видов образцов при идентичных условиях возбуждения излучением аргонового лазера ($\hbar\omega_B = 2.705$ эВ) при $T = 300$ К представлены на рис. 1, параметры полос приведены в таблице. Видно, что спектральный контур люминесценции исследуемых образцов не обнаруживает зависимости от состояния образцов. Он оказался одинаковым для живой и отторгнутой ткани, что согласуется с данными по оптическому поглощению [1]. Полоса фотолюминесценции живой ткани (рис. 1) сложная и включает по крайней мере два пика, энергетическое положение которых оказывается существенно меньше оцененного в [1] значения ширины запрещенной зоны кожи человека E_g . Следовательно, наблюдаемая яркая люминесценция живой ткани не может быть связана с межзонными переходами, о чем свидетельствует и большая полуширина обнаруженных пиков на полувысоте δ . При возбуждении фотолюминесценции излучением азотного лазера, энергия квантов которого превышает E_g кожи, максимум люминесценции смещается в коротковолновую область, однако остается меньше ширины запрещенной зоны. Следует подчеркнуть, что видимый свет люминесценции оказался нечувствительным к изменениям $\hbar\omega_B$. Следовательно, для использованных видов фотовозбуждения видимая люминесценция живой ткани человека не может быть объяснена межзонными переходами. По спектральному распределению излучения эта люминесценция (рис. 1) сходна с характерной для излучательных переходов с участием глубоких уровней [7,10].

Интенсивность фотолюминесценции исследованных образцов I в области $\hbar\omega_1$ с возрастанием плотности возбуждающего излучения L подчиняется линейному закону $I \sim L$ (рис. 2, а) при использованном диапазоне значений $\hbar\omega_B$. При всех изменениях L спектральный контур интенсивности фотолюминесценции оставался неизменным, но смещался в коротковолновую область с увеличением плотности возбуждения (рис. 2, б). Одновременно со смещением энергии максимумов $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$ в коротковолновую область отмечается также и увеличение интенсивности коротковолновой компоненты фотолюминесценции с максимумом $\hbar\omega_1$. Последнее может быть связано с тем, что интенсивность длинноволновой компоненты с ростом L подчиняется сублинейному закону. Обнаруженная зависимость фотолюминесценции живой ткани от плотности возбуждаемого излучения также указывает на несобственный механизм рекомбинации.

С понижением температуры от 300 до 77 К, как следует из рис. 2, в, спектральные контуры фотолюминесценции не претерпевают изменений и поэтому происходит их параллель-

ное перемещение в коротковолновую область. Соотношение интенсивностей в области максимумов I_2/I_1 также не претерпевает изменений. Смещение полос можно характеризовать температурным коэффициентом $\alpha = -2.3 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, что находится на уровне значений температурного изменения ширины запрещенной зоны алмазоподобных неорганических полупроводников [10].

Таким образом, живая ткань человека обнаруживает яркую видимую фотолюминесценцию, которую на основании полученных данных можно связывать с несобственными излучательными переходами на расположенные в "запрещенной зоне" уровни. В пользу этого вывода свидетельствуют энергетическое положение максимумов полос и зависимость спектров от условий возбуждения (энергия фотонов, плотность возбуждения и т.д.).

В заключение авторы обращают внимание не только на высокую квантовую эффективность фотолюминесценции кожи человека, но и на соответствие ее спектральной характеристики области максимального восприятия глазом человека. Это обстоятельство может сыграть важную роль в использовании данного эффекта на практике.

Список литературы

- [1] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В., Цендин К.Д. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 13. С. 41.
- [2] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 20. С. 37.
- [3] Березовский В.Х., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. Киев, 1990. 224 с.
- [4] Вилли К., Детье В. Биология. М., 1975. 822 с.
- [5] Медицинская биофизика / Под ред. В.О.Самойлова, Л., 1986. 479 с.
- [6] Журавлев А.И. Сверхслабые свечения в медицине и сельском хозяйстве. М., 1974.
- [7] Pankove J.I. Optical processes in semiconductors, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1971. 456 p.
- [8] Caham L.T. Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046.
- [9] Murayama K., Miyazaki Z., Hirose N. // Jap. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. P. 2. N 9B. P. L.1358.
- [10] Aven M., Prence J. Physics and chemistry of II-VI compounds. North-Holland Publ. Co., Amstrdam, 1967. 625 p.

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

Поступило в Редакцию
25 апреля 1994 г.