

06.3;07;12

СОПОСТАВЛЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

© А.А.Лебедев, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь, В.Х.Шпунт

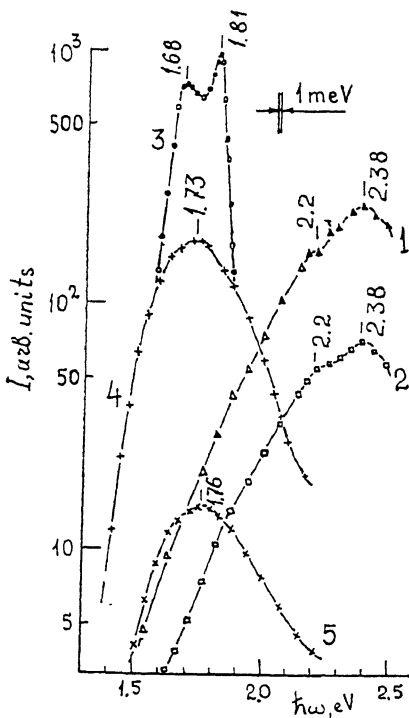
Одним из главных стимулов, побудивших в свое время к расширению круга полупроводниковых материалов, явилась необходимость в управлении фундаментальными параметрами веществ в более широком диапазоне, чем это допускают элементарные и бинарные алмазоподобные полупроводники. В контексте этой тенденции профессором Н.А. Горюновой были предложены критерии образования сложных фаз с тетраэдрической координацией атомов [1-3]. В 60-70-х годах уже были синтезированы многие из них [2] и начались систематические исследования электронных явлений в новых материалах. Сразу стало очевидно, что варьирование атомного состава алмазоподобных фаз позволяет закономерным образом управлять фундаментальными параметрами полупроводников. Однако для реализации потенциала новых материалов требуется решение целого ряда сложных технологических проблем. Это, пожалуй, главный тормоз при внедрении сложных полупроводников, технологические методы получения которых приходится существенно усложнять по отношению к используемым в случае элементарных и бинарных полупроводников. Очевидно, что серьезной альтернативой усложнению атомного состава полупроводников служит выявление новых возможностей реализации потенциала элементарных полупроводников. Иллюстрацией справедливости последнего тезиса явилось обнаружение эффективной видимой фотолюминесценции в кремнии [4]. Это открытие заставило по-новому взглянуть на возможности такого классического объекта, каким является кремний, и сразу вызвало к жизни широкие исследования его люминесцентных свойств при создании наноразмерных структур.

Как нам представляется, не меньший потенциал заключен в объектах биологического происхождения, которые также при соответствующих условиях могут вызвать к жизни новое направление их использования в качестве оптоэлектронных материалов, "синтезируемых" самой природой и безвозмездно даримых человеку. Только незнание потенциала биологических объектов приводит к тому, что этот бесценный дар до сих пор серьезно не "принимается" в

качестве объекта для применений в оптоэлектронике. Излучательные свойства объектов биологического происхождения известны уже достаточно давно [5]. В последнее время круг этих исследований расширился и проводится с использованием современных методик, хорошо зарекомендовавших себя при изучении полупроводниковых материалов [6,7]. В предлагаемой работе предпринята первая попытка сопоставить люминесцентные свойства некоторых представителей биологического мира с широко исследуемым в настоящее время представителем неорганического мира — пористым кремнием.

В качестве объектов биологического мира использованы зеленые листья, кожа и ногти человека. Образцы пористого кремния были получены электрохимическим травлением монокристаллических пластин p -Si с кристаллографической ориентацией (100) и удельным сопротивлением $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Процесс травления, который проводился, соответствовал условиям, описанным в [8]. Измерения стационарной фотолюминесценции (ФЛ) проводились при комнатной температуре. Спектры ФЛ измеряли при возбуждении указанных объектов исследования излучением He-Cd лазера ($\lambda = 0.441 \text{ мкм}$, $P = 50-500 \text{ мВт/см}^2$). Свет ФЛ анализировался с помощью монохроматора МДР-3 и фотоэлектрического умножителя ФЭУ-62. Условия возбуждения ФЛ (энергия фотонов, площадь возбуждения и плотность возбуждения) обеспечивались практически одинаковыми.

На рисунке приведены типичные спектральные зависимости интенсивности ФЛ зеленых листьев, кожи и ногтя человека, а также пористого кремния (ПК) при $T = 300 \text{ К}$. Главный вывод, который следует из приводимого сопоставления ФЛ для объектов столь разной природы, состоит в следующем. Поскольку условия возбуждения ФЛ были стандартизированы, можно считать, что квантовая эффективность излучательной рекомбинации в зеленых листьях растений не только не уступает, но даже превосходит аналогичный параметр для пористого кремния. На рисунке приводятся спектры ФЛ для двух типичных образцов ПК, охватывающих по диапазону эффективности ФЛ возможности широко используемой методики получения ПК. Из этих данных следует, что интенсивность ФЛ в ПК зависит от условий получения, которые к тому же контролируют еще и спектральную форму полосы ФЛ. Наши измерения ФЛ объектов биологического происхождения показывают, что спектральный контур и эффективность ФЛ хорошо воспроизводимы на листьях разных растений и при сканировании возбуждающим зондом их разных участков. Такой вывод справедлив также для ФЛ кожи и ногтя человека. Следовательно, в отличие от объекта неорганического происхожде-



Спектральные зависимости ФЛ ногтя (1), кожи человека (2), зеленых листьев (3) (*Populus nigra* L.) и пористого кремния (4, 5) при $T = 300$ К. Спектральное разрешение установки на основе монохроматора МДР-3 с дифракционной решеткой 600 штрихов/мм составило ≈ 1 мэВ.

ния (ПК) параметры ФЛ листьев, кожи и ногтей с высокой воспроизводимостью определяются самой природой.

Из рисунка можно также видеть, что видимая ФЛ зеленых листьев по своему спектральному составу оказывается близкой с характерной для ПК, тогда как для кожи и ногтей человека максимум ФЛ существенно смещен в коротковолновую спектральную область. Различие в спектральном составе ФЛ биологических объектов (см. рисунок, кривые 1–3) может быть отнесено к изменению их атомного состава, как и в случае сложных алмазоподобных полупроводников.

Главным достоинством обнаруженной яркой ФЛ объектов биологического происхождения является, безусловно, отсутствие проблемы технологического плана. Последнее является серьезным преимуществом таких веществ при условии реализации их потенциала в оптоэлектронике. Не исключено также, что изучение свойств ФЛ биологических объектов может дать новую информацию о метаболических

процессах в них и, возможно, рассмотреть роль люминесценции как вероятного канала связи между самими объектами в природе.

Таким образом, эффективность фотолюминесценции в объектах биологического происхождения не уступает, а в случае зеленых листьев растений даже превосходит аналогичный параметр для типичного представителя кристаллических полупроводников — пористого кремния, что при определенных условиях может стимулировать попытки практического применения объектов биологического происхождения в люминесцентной электронике.

Список литературы

- [1] Горюнова Н.А. Сложные алмазоподобные полупроводники. М.: Сов. радио. 1968. 268 с.
- [2] Полупроводники А В С // Под ред. Н.А. Горюновой и Ю.А. Валова. М.: Сов. радио. 1974. 376 с.
- [3] Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. VI Столетовские чтения. ВГПУ. Владимир, 15 (1994).
- [4] Sanham L.L. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046.
- [5] Рабинович Е. Фотосинтез, 1953. Т. 2. М.: ИИЛ. 651 с.
- [6] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 13. С. 50.
- [7] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 13. С. 56.
- [8] Астрова Е.В., Витман Р.Ф., Емцев В.Е., Лебедев А.А., Полосин Д.С., Ременюк А.Д., Рудь Ю.В. // ФТП. 1996. Т. 30. С. 507.

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

Поступило в Редакцию
20 июня 1996 г.