

06;07;12

## Фотовольтаические свойства гетероконтакта полупроводник–белок

© В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, В.Х. Шпунт

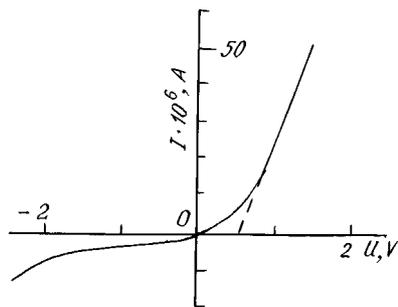
С.-Петербургский технический университет  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 мая 1998 г.

Обнаружено, что гетероконтакты полупроводник (на примере InSe) — естественный белок обладают широкополосным фотовольтаическим эффектом и не обнаруживают выраженного коротковолнового спада в спектральном диапазоне от 1.2 до 3.7 eV. Максимальная фоточувствительность таких структур реализуется при их освещении со стороны белка, достигая 2 mA/W при  $T = 300$  K. Сделано заключение о возможностях применения созданных структур в качестве широкодиапазонных фотосенсоров оптического излучения.

Исследования оптоэлектронных явлений в гетероструктурах, представляющих собой непосредственный контакт между двумя полупроводниками разного атомного состава или полупроводников с другими средами (металл, электролит, живая ткань и т.д.), непрерывно расширяются, обеспечивая тем самым как совершенствование параметров полупроводниковых приборов традиционного назначения, так и обнаружение новых функциональных зависимостей, которые инициируют разработки новых приборов и систем [1–5]. В данной работе сообщается о первом наблюдении фотовольтаического эффекта, который возникает при контакте полупроводника (на примере InSe) с естественным белком.

Исследования фотоэлектрических свойств проводились на структурах, которые создавались нанесением свежего естественного белка на поверхность сколотых пластин слоистого полупроводника InSe с толщинами 10–50  $\mu\text{m}$  и зеркальными плоскостями. Монокристаллы селенида индия были электрически однородными с концентрацией свободных электронов  $n = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  и холловской подвижностью около 70  $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  при  $T = 300$  K. В качестве электрического контакта к белку применялись прозрачные тонкие слои металлов (Ni, Mo), нанесенные вакуумным термическим напылением на поверхность пластин из кварцевого стекла с толщинами 0.1–0.2 mm. В законченном



**Рис. 1.** Стационарная вольт-амперная характеристика структуры  $n\text{-InSe}$ /белок при  $T = 300$  К. (Пропускное направление соответствует отрицательной полярности внешнего напряжения смещения на пластине полупроводника, площадь контакта  $s = 0.1 \text{ cm}^2$ ).

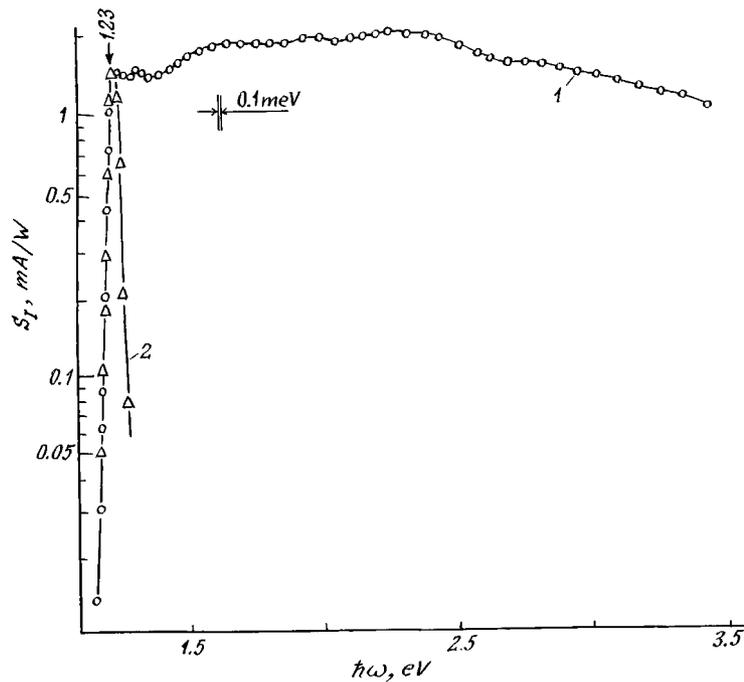
виде структуры представляли собой сандвич полупроводник–жидкий белок–металлизированное стекло. Для фиксации такого соединения по периметру пластины InSe на металлизированную поверхность стекла наносился диэлектрический лак, который фиксировал положение полупроводника относительно металлического контакта, предотвращая процессы усыхания белка и не допуская касания металла с полупроводником. Заполнивший зазор между параллельными плоскостями InSe и металлизированного стекла слой белка имел толщину  $0.05\text{--}0.1 \text{ mm}$ .

Измерения стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) показали, что полученные указанным выше способом структуры обладают четким выпрямляющим свойством. Типичная ВАХ одной из таких структур представлена на рис. 1. Отметим, что электрические параметры полученных структур не обнаруживали выраженных признаков деградации, а направление пропускания всегда отвечало отрицательной полярности внешнего напряжения на полупроводнике.

При освещении полученных структур возникает фотовольтаический эффект, причем его знак не изменяется при изменениях длины волны и локализации светового зонда на поверхности структур, а величина фотоответа преобладает при освещении структур со стороны белка. Фотонапряжение во всех структурах характеризуется отрицательной полярностью полупроводника, что коррелирует с направлением пропус-

кания ВАХ. Как показали измерения, фототок короткого замыкания в структурах InSe/белок течет в направлении пропускания во всей спектральной области fotocувствительности. Это означает, что fotocувствительность структур определяется только процессами на границе полупроводник/белок. Следовательно, фотогенерированные носители заряда разделяются в электрическом поле этого потенциального барьера и, как следствие, возникает фотонапряжение. Для лучших структур максимальная токовая fotocувствительность  $S_I = 2 \text{ mA/W}$ , а вольтовая fotocувствительность  $S_U = 10^4 \text{ V/W}$  при  $T = 300 \text{ K}$ . Можно думать, что оптимизация конструкции структур позволит превзойти приводимые выше параметры, которые уже сейчас можно квалифицировать как достаточно хорошие с учетом начальной стадии первых исследований структур нового поколения.

Типичная спектральная зависимость токовой fotocувствительности, определенной как отношение фототока короткого замыкания к числу падающих фотонов, для одной из полученных структур представлена на рис. 2. Из него следует, что при освещении структуры со стороны белка (рис. 2, кривая 1) реализуется характерный для идеальных гетеропереходов эффект окна в отношении интенсивности естественного излучения [1], тогда как при освещении со стороны полупроводника в спектральной зависимости фототока проявляется еще и резкая коротковолновая граница. Поэтому fotocувствительность при такой геометрии фоторегистрации становится узкоселективной (полуширина спектров на их полувысоте  $\delta_{1/2} = 30\text{--}40 \text{ meV}$ ), что вызвано резким ростом оптического поглощения в пластине InSe при наступлении прямых межзонных переходов и удалением слоя фотогенерированных носителей от активной области структуры на расстояния, которые превышают длину диффузионного смещения фотодырок в InSe. Крутизна длинноволнового экспоненциального края fotocувствительности в полученных структурах  $S_1 = 80 \text{ eV}^{-1}$  соответствует прямым оптическим переходам в полупроводнике, а энергетическое положение излома при энергии фотонов  $\hbar\omega = 1.23 \text{ eV}$  (рис. 2, кривая 1) или максимума при такой же энергии фотонов (кривая 2) согласуется со значением ширины запрещенной зоны InSe и особенностями спектральных зависимостей fotocувствительности в других типах структур из этого же полупроводника [4–7]. Можно считать, что спектральные зависимости fotocувствительности структур *n*-InSe/белок имеют характерный для идеальных полупроводниковых гетероструктур вид [1].



**Рис. 2.** Спектральные зависимости токовой фоточувствительности структуры  $n$ -InSe/белок при  $T = 300$  К (кривая 1 — освещение со стороны белка, 2 — со стороны полупроводника).

При освещении структур со стороны белка в широком спектральном диапазоне фоточувствительность предлагаемых гетероструктур остается на высоком уровне и вплоть до  $3.7$  eV выраженный коротковолновый спад фототока не проявляется (рис. 2, кривая 1). Полная ширина спектров  $S_I$  на полувысоте при этом достигает  $2.2$  eV. Такой широкополосный фотовольтаический эффект позволяет считать, что роль широкозонной компоненты в этих структурах принадлежит белку. Отсутствие выраженных особенностей в спектральных зависимостях фоточувствительности позволяет также считать, что при использованных толщинах прослойки из белка потери на поглощение в широкозонном окне этих структур не препятствуют использованию их в качестве широкополосных фо-

топреобразователей естественного излучения. Отсутствие выраженного коротковолнового спада фоточувствительности в созданных структурах также может служить основанием для заключения о достаточно высоком качестве такой гетерограницы в отношении процессов токопереноса и рекомбинации неравновесных носителей заряда.

В заключение подчеркнем, что фотоэлектрические свойства гетероконтактов полупроводник–белок оказались очень близкими к известным свойствам для контактов полупроводник–электролит [2,8]. Это обстоятельство позволяет считать, что роль белка в фотоэлектрических явлениях таких структур подобна выполняемой классическими электролитами [2]. Более высокая вязкость белка и отсутствие свойственных электролитам коррозионных воздействий на поверхность полупроводников [2] позволяют отдать предпочтение применениям белка при исследованиях фоточувствительности новых материалов посредством экспрессного создания таких контактов и при создании фотосенсоров. К тому же отметим возможности изучения динамики процессов в самих белках на основании наблюдения спектров фотовольтаического эффекта при освещении гетероконтактов со стороны белка.

Таким образом, контакт полупроводников (на примере InSe) с белком, как и в случае других веществ биологической природы [4,5] обнаруживает фотовольтаический эффект, который может использоваться в разработках широкодиапазонных фотосенсоров оптического излучения.

## Список литературы

- [1] Алферов Ж.И. // ФТП. 1998. Т. 32. № 1. С. 3–25.
- [2] Гуревич Ю.А., Плесков Ю.М. Фотоэлектрохимия полупроводников. М.: Наука, 1983.
- [3] Симон Ж., Андре Ж.-Ж. Молекулярные полупроводники. Фотоэлектрические свойства и солнечные элементы. М.: Мир, 1988.
- [4] Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Шпунт В.Х. // ФТП. 1995. Т. 29. № 3. С. 438–445.
- [5] Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Шпунт В.Х. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 3. С. 88–91.
- [6] Бондарь И.В., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // ФТП. 1994. Т. 28. В. 8. С. 2129–2133.
- [7] Vodnar I.V., Rud V.Yu., Rud Yu.V. // Cryst. Res. Technol. 1996. V. 31. S. N 3. P. 261–264.
- [8] Константинова Н.Н., Прочухан В.Д., Рудь Ю.В., Таиров М.А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 9. С. 1699–1701.