

Об электрических и фотоэлектрических характеристиках изотипной гетероструктуры $n\text{-ZnO}-n\text{-Si}$

© С.В. Слободчиков, Х.М. Салихов, Е.В. Руссу

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 11 ноября 1998 г. Принята к печати 23 ноября 1998 г.)

Измерены вольт-амперные и вольт-емкостные характеристики, поперечный и продольный фотоэффект в изотипных гетероструктурах $n\text{-ZnO}-n\text{-Si}$, полученных методом осаждения из металлоорганических соединений. Определены некоторые параметры границы раздела, механизма токопереноса и фотоэлектрические характеристики гетероструктур, представляющие интерес для оценки практического использования.

Тонкие пленки ZnO привлекают к себе внимание исследователей в связи с заманчивыми возможностями применения их в оптоэлектронике. Они были использованы, в частности, в технологии создания газовых сенсоров, варисторов, цветных дисплеев, солнечных элементов. Например, в опытных образцах анизотипной гетероструктуры $n\text{-ZnO}-p\text{-Si}$ коэффициент преобразования солнечного излучения составлял 0.95% [1]. Диодные структуры Pd- $n\text{-ZnO}$ были опробованы как детекторы водорода [2].

В настоящем сообщении приведены некоторые результаты исследования электрических и фотоэлектрических характеристик изотипных гетероструктур $n\text{-ZnO}-n\text{-Si}$ с учетом возможностей практического использования.

Для получения проводящих слоев $n\text{-ZnO}$ нами применен метод осаждения из металлоорганических соединений. В качестве источника использовался ацетилацетат цинка $\text{Zn}(\text{AcAc})_2$.

Процесс проводился в реакторе вертикального типа на подложку Si с ориентацией (100), поддерживаемой при температуре $300 \div 350^\circ\text{C}$. Осаждение выполнялось из смеси Ar, насыщенного парами $\text{Zn}(\text{AcAc})_2$ и кислорода, вводимого в реакционную зону через концентрический инжектор. Процесс осаждения слоев $n\text{-ZnO}$ осуществлялся при температуре источника с ацетилацетонатом цинка, равной 120°C , и в потоке аргона и кислорода 100 мл/мин, так что отношение потоков $\text{Ar}/[\text{Ar} + \text{O}_2] = 0.5$. Отмечено, что с ростом температуры подложки скорость осаждения $n\text{-ZnO}$ возрастала и улучшалась морфологическая структура слоя окиси цинка. Созданные проводящие слои $n\text{-ZnO}$ имели концентрацию электронов $(5-8) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $\sim 50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Металлическими контактами к структуре были Al к $n\text{-Si}$ и Pd к $n\text{-ZnO}$.

На рис. 1 представлены вольт-амперные зависимости типичного образца изотипной гетероструктуры Pd- $n\text{-ZnO}-n\text{-Si}-\text{Al}$. При обеих полярностях наблюдается сублинейная зависимость. Отметим, что пропускное направление структур соответствует отрицательному потенциалу на $n\text{-Si}$. Детальный механизм токопереноса сложен. Если учесть наличие промежуточных состояний на границе раздела, то токоперенос в прямом направлении связан с преодолением меньшего барьера в системе

(промежуточные состояния)- $n\text{-Si}$, нежели в обратном — в системе (промежуточные состояния)- $n\text{-ZnO}$. Процесс токопереноса до некоторой степени напоминает тот, что анализировался для гетероструктур $n\text{-Ge}-n\text{-Si}$ [3]. В этом случае

$$I \sim F_{1,2} \exp(-qV_{D1,2}/kT)(1 - R_{1,2})f(\alpha_1, \alpha_2), \quad (1)$$

где $F_{1,2}$ — эмиссионные потоки носителей из объема к барьерам; $V_{D1,2}$ — диффузионные потенциалы на границах раздела; $R_{1,2}$ — коэффициенты отражения потоков носителей на границах раздела; $f(\alpha_1, \alpha_2)$ — функция коэффициентов пропускания промежуточными состояниями на границе раздела соответствующих эмиссионных потоков; индексы 1,2 обозначают значения параметров при двух полярностях приложенного смещения. На рис. 2 представлены кривые температурной зависимости прямого и обратного токов. Согласно (1), высота барьера, полученная из кривой 2, составляет $V_{D2} = 0.25 \text{ эВ}$ и соответствует барьеру $n\text{-Si}$ -(граница раздела). Слабая температурная зависимость прямого тока (кривая 1) свидетельствует о преобладании туннельного тока на участке $n\text{-ZnO}$ -(граница раздела).

Измерения емкости в зависимости от обратного смещения (рис. 3) дают высоту барьера 0.9 эВ. Общая

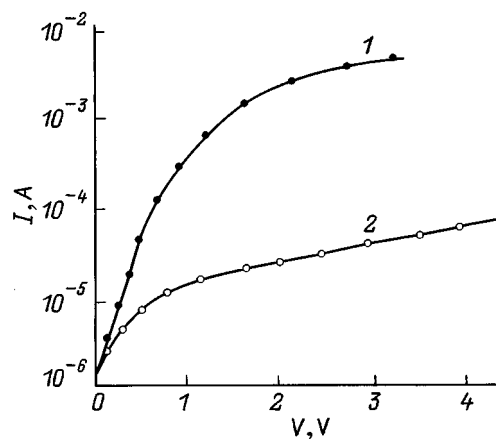


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики изотипной гетероструктуры $n\text{-ZnO}-n\text{-Si}$: 1 — прямая ветвь (отрицательный потенциал на $n\text{-Si}$), 2 — обратная ветвь.

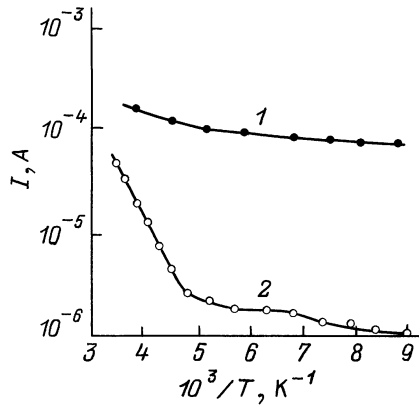


Рис. 2. Температурные зависимости прямого (1) и обратного (2) токов структуры $n\text{-ZnO-n-Si}$.

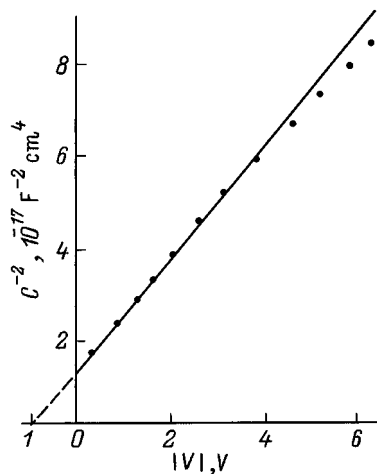


Рис. 3. Зависимость емкости (на единицу площади) от напряжения обратного смещения для структуры $n\text{-ZnO-n-Si}$.

емкость изотипной гетероструктуры может быть представлена в виде

$$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = C, \quad (2)$$

где C_1 — емкость, определяемая промежуточными состояниями перехода (граница раздела) $n\text{-ZnO}$, C_2 — емкость обедненного слоя в $n\text{-Si}$. Если $C_1 \ll C_2$, то измеренная зависимость $C^{-2} = f(V)$, вероятно, дает высоту барьера $n\text{-ZnO}$ -(граница раздела).

Измеренная максимальная фоточувствительность изотипной гетероструктуры соответствовала области спектральной чувствительности кремния. Сравнительная оценка величин тока короткого замыкания, наблюдавшихся при монохроматическом освещении светом с длиной волны $\lambda = 0.64 \mu\text{м}$ изотипной гетероструктуры, с одной стороны, и, например, среднего по чувствительности фотоэлемента на основе кремниевого $p\text{-n}$ -перехода, с другой стороны, показала, что гетеропереход имел величину фототока лишь в 1.8 раза меньше, чем фотоэлемент. Разница, однако, при освещении белым светом

была существенно выше, вследствие меньшего коэффициента собирания неосновных носителей тока в гетероструктуре.

На рис. 4 представлены инверсионные характеристики продольного фотоэффекта в гетероструктуре. Линейность характеристики наблюдается на расстоянии $l \approx 5 \text{ мм}$ между контактами. Согласно [4], условие линейности имеет вид $\alpha l \rightarrow 0$, где

$$\alpha = \sqrt{g \left(\frac{\rho_{n1}}{w_{n1}} + \frac{\rho_{n2}}{w_{n2}} \right)}, \quad (3)$$

g — поперечная проводимость структуры, ρ_{n1} и ρ_{n2} — удельное сопротивление слоев $n\text{-ZnO}$ и $n\text{-Si}$ соответственно, а w_{n1} и w_{n2} — их эффективные толщины.

Расчеты, выполненные в работе [4], показывают, что достаточно большой интервал линейности должен наблюдаться уже при $\alpha l < 1$. При этом условии оценка поперечной проводимости наших структур с учетом электрических и геометрических характеристик слоев $n\text{-ZnO}$ ($w_{n1} \approx 4 \cdot 10^{-6} \text{ см}$) и $n\text{-Si}$ ($n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $w_{n2} = 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$) дает $g \leq 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$. Другими параметрами продольного фотоэлемента являются, в частности, емкость на единицу площади при обратном смещении C_d и постоянная времени при том же смещении βl^2 , где $\beta = C_d \rho_{n2} / w_{n2}$. В измеренных структурах $C_d = 9 \cdot 10^{-9} \text{ Ф см}^{-2}$ ($V = 1 \text{ В}$) и $\beta l^2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Очевидно, что для повышения возможностей практического использования изотипные гетероструктуры $n\text{-ZnO-n-Si}$ должны быть оптимизированы как по технологической конструкции, так и по выбору электрических и фотоэлектрических характеристик слоев $n\text{-ZnO}$ и $n\text{-Si}$. Они, вероятно, не могут быть эффективными солнечными преобразователями, но могут быть практически реализованы как относительно малоинерционные фотодетекторы на основе поперечного или продольного фотоэффекта.

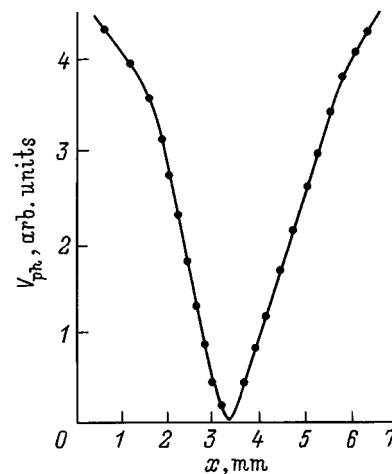


Рис. 4. Инверсионные характеристики продольного фотоэффекта структуры $n\text{-ZnO-n-Si}$.

Список литературы

- [1] M. Shimizu, T. Horii, T. Shiosaki, A. Kawabata. Thin sol. films, **96**, 149 (1982).
- [2] K. Ito. Surf. Sci., **86**, 345 (1979).
- [3] W.G. Oldham, A.G. Milnes. Sol. St. Electron., **7**, 153 (1964).
- [4] U.Nin, T. Matsuda, H. Sadamtzu, M. Takai. J. Appl. Phys., **53**, 457 (1982).

Редактор Т.А. Полянская

About electrical and photoelectrical characteristics of an isotypic $n\text{-ZnO}-n\text{-Si}$ heterostructures

S.V. Slobodchikov, Kh.M. Salikhov, E.V. Russu

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia