

А.В. Симашкевич*, Д.А. Шербан*, Л.И. Брук*, В.М.Фёдоров**,
А. Коваль**, Ю.В. Усатый*

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ ИЗОТИПНУЮ СТРУКТУРУ ITO/nSI

*Институт прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, leonid.bruc@phys.asm.md

**Государственный университет Молдовы,
ул. А. Матеевича, 60, г. Кишинев, MD-2012, Республика Молдова

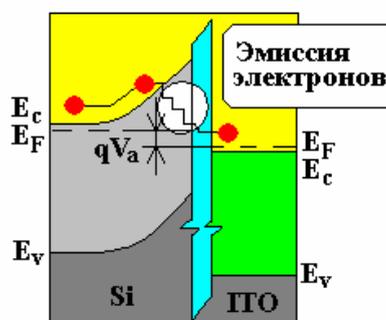
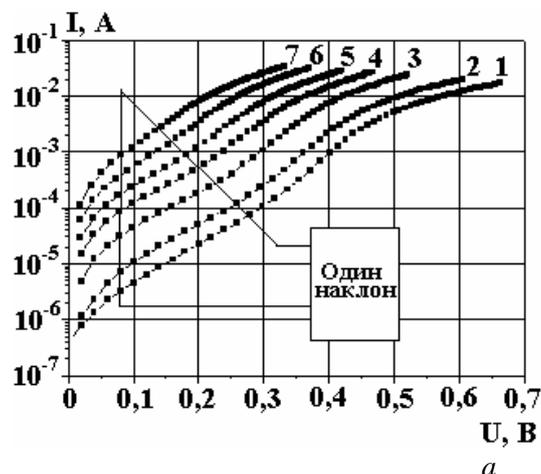
Введение

До настоящего времени кремний остается основным полупроводниковым материалом для изготовления солнечных элементов (СЭ) и солнечных батарей, причем производство кремниевых фотовольтаических преобразователей стремительно растет во всем мире. Большим препятствием в использовании СЭ, в особенности в развивающихся странах, является их относительно высокая стоимость. Сделать СЭ дешевле можно, разработав эффективные и простые технологии их производства. Изготовление фотовольтаических приборов с ПДП структурой методом пиролитической пульверизации химических растворов – пример такой технологии. Данные структуры изготавливались нанесением тонких прозрачных проводящих слоев оксидов индия и олова на поверхность кремния [1-4]. При этом нет необходимости в создании близких к освещаемой поверхности p-n переходов в кремнии, так как такие переходы образуются автоматически из-за малой толщины слоя ITO. Разделение носителей заряда, генерированных солнечным излучением, происходит электрическим полем на границе поверхностно-барьерной структуры ITO/SiO₂/Si. Такие структуры можно считать диодами Шоттки с тонким диэлектрическим слоем SiO₂, образующимся в процессе нанесения пленки ITO. Были получены односторонние и двусторонние СЭ с эффективностью преобразования солнечной энергии в электрическую 10% [5] и 13% [6] соответственно.

Исследование электрических и фотоэлектрических свойств ПДП структур на основе кремния показывает, что энергетические состояния на границе раздела кремний–ITO играют важную роль в процессе разделения генерированных светом носителей заряда и, следовательно, в эффективности конверсии солнечного излучения. Информация об энергетических состояниях на границе раздела полупроводник–проводящий окисел может быть получена при изучении температурных зависимостей вольт-амперных характеристик (I–V). Это даёт возможность определить механизм переноса заряда через границу раздела, что и является целью настоящей работы.

Результаты и их обсуждение

Изучались вольт-амперные характеристики структур ITO/SiO₂/Si в интервале температур (293–413)К. Вид прямых ветвей вольт-амперных характеристик представлен на рис. 1. Видно, что зависимость ток–напряжение характеризуется наличием двух прямых участков с различными наклонами.



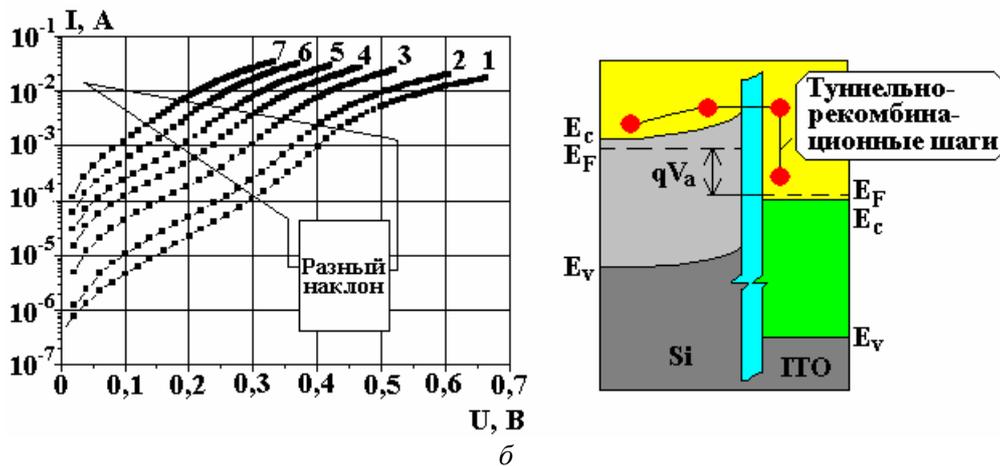


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики при различных температурах фотовольтаических структур $n^+ITO/SiO_2/nSi$ и соответствующие зонные энергетические диаграммы, иллюстрирующие механизм переноса носителей заряда при прямом смещении менее 0,3В (а) и более 0,3В (б)

На первом участке при внешних приложенных напряжениях до 0,3В I-V характеристики параллельны, то есть угол наклона к оси напряжений постоянен (см. рис. 1,а). В этом случае согласно [7] перенос носителей заряда сквозь потенциальный барьер осуществляется туннельно-рекомбинационными переходами в области объемного заряда, и вольт-амперная характеристика может быть описана следующим соотношением:

$$I = I_0 \exp(AV) \exp(BT), \quad (1)$$

где A и B – константы, не зависящие от напряжения и температуры соответственно. Численная величина константы A , определенная из зависимости, представленной на рис. 1,а, равна $15 V^{-1}$. Значение константы B , которая составляет $0,045 K^{-1}$, было вычислено из зависимости $\ln I = f(T)$, полученной из

рис. 1 при $V = \text{const}$. В работе [7] константа A определяется выражением $A = \frac{8\pi}{3h} \left(\frac{m_e^* \epsilon_s S}{N_d} \right)^{1/2}$, где

m_e^* – эффективная масса электрона, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость кремния и S – относительное изменение энергии электрона после каждой ступени процесса туннелирования. Следовательно, $1/S$ представляет собой количество ступеней туннелирования. Численное значение S легко рассчитывается, так как остальные параметры в соответствующем соотношении представляют собой экспериментальные результаты, фундаментальные константы или физические параметры кремния.

Таким образом, механизм переноса носителей заряда при прямых смещениях менее 0,3В определяется многоступенчатыми туннельно-рекомбинационными переходами электронов из зоны проводимости кремния в зону проводимости ИТО (см. зонную энергетическую диаграмму на рис. 1,а). Число ступеней туннелирования – порядка 100.

На втором участке механизм переноса носителей заряда через структуру ИТО/n-Si меняется, на что указывают различные наклоны вольт-амперных характеристик (см. рис. 1,б). Наклоны I-V характеристик становятся зависимыми от температуры и дают значение параметра $n \sim 1,6$, который входит в соотношение

$$I = I_0 \exp(qV/nkT), \quad (2)$$

где ток насыщения

$$I_0 = C \exp(-\phi_B/kT), \quad (3)$$

C – константа, зависящая от модели протекания тока (эмиссия или диффузия) [8].

Зависимости, выраженные соотношениями (2) и (3), являются типичными для эмиссионного механизма прохождения электронов через потенциальный барьер (рис. 1,б). Таким образом, при приложенных прямых смещениях более 0,3В в интервале температур (293–413)К наблюдается эмиссия электронов из Si в ИТО через потенциальный барьер ϕ_B на границе раздела Si/ИТО исследуемой структуры. Соотношения (2) и (3) позволяют определить и значение величины потенциального барьера ϕ_B .

Из зависимостей $\ln I_0 = f(1/kT)$ (рис. 2,а) и $\ln I = f(1/kT)$ (рис. 2,б) можно определить высоту потенциального барьера ϕ_B на границе раздела структуры ИТО/n-Si. Тангенс угла наклона зависимости $\ln I_0 = f(1/kT)$, где I_0 – ток насыщения, определяемый экстраполяцией второго участка ВАХ до пересечения с осью ординат, равняется ϕ_B . Тангенс угла наклона зависимости $\ln I = f(1/kT) - \phi_B - qV_a$, где V_a – приложенное напряжение смещения. Расчет величины ϕ_B из зависимостей (2) и (3) дал величины для потенциального барьера, соответственно равные 0,65 и 0,68 эВ.

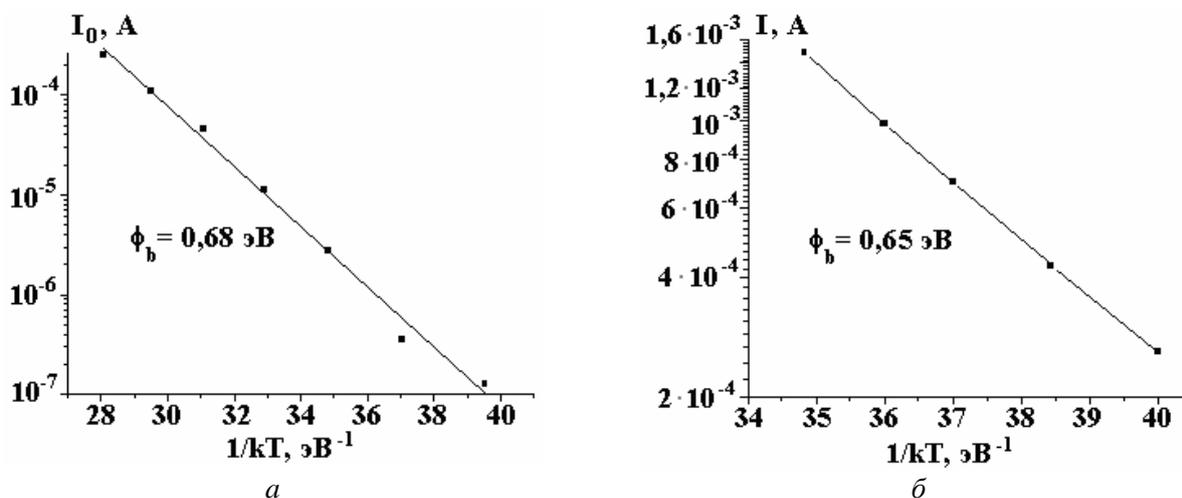


Рис. 2. Зависимости $I_0 = f(1/kT)$ (а) и $I = f(1/kT)$ при 0,3 В (б) для СЭ n⁺ИТО/SiO₂/nSi

Выводы

Изучение вольт-амперных характеристик фотовольтаической структуры n⁺ИТО/SiO₂/nSi показало наличие двух механизмов прохождения тока в прямом направлении: туннельно-рекомбинационного при прямых смещениях менее 0,3 В и надбарьерно-эмиссионного при больших смещениях.

В первом случае перенос носителей заряда может быть интерпретирован как многоступенчатые туннельно-рекомбинационные переходы электронов из зоны проводимости кремния через поверхностные состояния в зону проводимости ИТО с числом ступеней туннелирования порядка 100. В случае фотовольтаических приборов очевидно, что этот механизм токопереноса является нежелательным, так как он уменьшает эффективность разделения неравновесных носителей заряда на ПДП переходе. Уменьшение концентрации поверхностных энергетических состояний на границе раздела фотовольтаической структуры ИТО/SiO₂/Si путем пассивации этой границы может привести к уменьшению туннельно-рекомбинационных процессов и увеличению эффективности таких СЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shewchun J., Dubow G., Myszkowsky A., Singh R. The operation of the semiconductor-insulator-semiconductor (SIS) solar cells: Theory // J. Appl. Phys., 1978. Vol. 49. P. 855–864.
2. Gagara L., Gorcheac L., Radu C., Radu S., Simashkevich A., Sherban D. Photovoltaic converters of solar energy on the base of SIS structures // Proceedings of the Int. Conf. Euro-Sun 96. 1996. Vol. 2. P. 665–667.
3. Simashkevich A., Quoc Hung Do, Bobeico E., Gorcheac L., Sherban D. Solar cells based on SIS structures. // Proc. of the 3rd Int. Workshop on Material Sciences. Hanoi. 1999. Part 1. P. 56–59.
4. Vasu V., Subrahmanyam A. Photovoltaic properties of ITO/Si junctions prepared by spray pyrolysis. dependence on oxidation time // Semicond. Sci. and Tech. 1992. Vol. 7. P. 320–323.
5. Simashkevich A., Sherban D., Bruc L., Coval A., Fedorov V., Bobeico E., Usaty Iu. “Spray-deposited ITO-nSi solar cells with enlarged area” // Proc. 20th European PV Solar Energy Conference, Barcelona. 2005. P. 980–982.
6. Bruk L., Fedorov V., Sherban D., Simashkevich A., Usatii I., Bobeico E., Morvillo P. Isotype bifacial silicon solar cells obtained by ITO spray pyrolysis // Materials Science and Engineering B. 2009. Vol. 159–160. P. 282–285.
7. Riben A.R., Feucht D.L. Electrical transport in nGe-pGaAs heterojunctions // Int. J. Electr. 1966. Vol. 20. P. 583–587.

8. *Milnes A.G., Feucht D.L.* Heterojunctions and Metal–Semiconductor Junctions. Academic Press. New-York and London. 1972. 441p.

Поступила 29.09.09

Summary

Solar cells fabricated on the basis of semiconductor-insulator-semiconductor (SIS) structures were obtained by deposition of transparent conductive ITO films onto silicon crystal substrates by spray pyrolysis technique. The obtained in such a way structures may be considered as Schottky diodes with a thin insulating SiO₂ layer at the interface formed during the ITO layer deposition. The investigation of I-V characteristics shows that in n⁺ITO/SiO₂/nSi structures two mechanisms of the direct current flow are presented: (i) tunneling-recombination at direct voltages of less than 0.3 V and (ii) over-barrier emission at voltages higher than 0.3 V. In the first case the direct current flow could be interpreted as multi-steps tunnel-recombination transitions of electrons from the silicon conduction band into ITO conduction band, the number of steps being about 100. In the second case the calculated from I-V characteristics height of the potential barrier at the ITO-Si interface is about 0.65-0.68eV.
