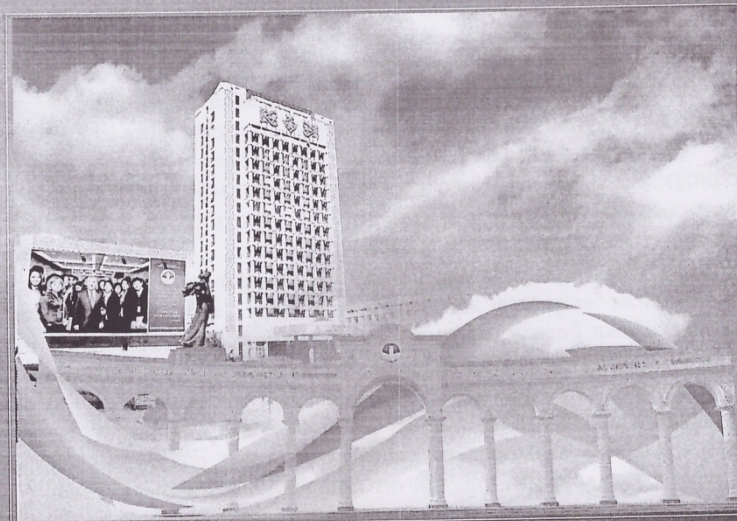


КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
НАЦИОНАЛЬНАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
ОТКРЫТОГО ТИПА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Сборник трудов
IV международной научной конференции
**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ,
НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛОВ**
(Сарсембиновские чтения)
10-12 октября 2016 г.



Алматы 2016

Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби
Физико-технический факультет
Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа (ННЛОТ)
Научно-исследовательский институт экспериментальной и
теоретической физики (НИИЭТФ)

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ,
НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

(Сарсембиновские чтения)

*Сборник трудов
IV Международной научной конференции*

10-12 октября 2016 года

Алматы

Алматы

2016

11. Burnham N.A., Colton R.J. Measuring the nanomechanical properties and surface forces of materials using an atomic force microscope. *J. Vac. Sci. Technol.* 1989. 4(7): 2906.
12. Labardi M., Allegrini M., Salerno M., Fredriani C., Ascoli C. Dynamical friction coefficient map using a scanning force and friction force microscope. *Appl. Phys.* 1994. 59: 3.
13. Overney R., Meyer E. Tribological investigations using friction force microscopy. *MRS Bulletin.* 1993. May: 26.
14. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Karakurkchi A., Yermolenko I. Iron binary and ternary coatings with molybdenum and tungsten. *Applied Surface Science.* 2016. 383: 346. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.04.046

ЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРИСТОГО СЛОЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

З.Ж. Жанабаев, К.К. Диханбаев

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Теоретически и экспериментально показано существование оптимальной толщины пористого слоя солнечного элемента, имеющего антиотражающее назначение. Теория учитывает совместные механизмы генерации и рекомбинации электронов и дырок, образуемых воздействием фотонов.

Пористая поверхность кремния получена электрохимическим травлением. Сканирующая электронная микроскопия, измерения тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, времени травления показали, что при толщине пористого слоя около $2/3$ диффузионной длины электрона эффективность солнечного элемента возрастает на 30% по сравнению с ее значением при отсутствии текстурирования.

Преобразование солнечной энергии в электрическую является важной научно-технической проблемой, связанной с перспективным направлением энергетики будущего. Начиная с середины прошлого века методы разделения электронов и дырок, возникающих под действием фотонов в легированном полупроводнике, в гетероструктурах различных химических соединений интенсивно изучаются и в настоящее время [1-5].

Среди многообразия повышения эффективности солнечных элементов (СЭ) мы выделим текстурирование их поверхности с целью уменьшения отражения света [6-13]. В исследованиях такого типа электрохимическим травлением получают СЭ в виде пленок с пористой поверхностью, например, с пористым кремнием (por-Si). Размеры пор составляют порядка $10-10^3$ нм. Изменения морфологии пленок текстурированием дает антиотражающий эффект порядка 10%, такого же порядка наблюдается повышение коэффициента полезного действия СЭ. Очевидно, что эти показатели среднестатистические. Результирующая фотоэлектродвижущая сила пленок зависит от взаимовлияния многих физических и геометрических факторов: механизмы генерации и рекомбинации электронов и дырок, длина волны эффективной части спектра солнечного излучения, топологические и метрические характеристики пористого слоя. Естественно ожидать, что возможно существование оптимальных наборов параметров, характеризующих указанные факторы. Нам неизвестны целенаправленные исследования такого плана, хотя известно множество экспериментальных фактов о роли отдельных параметров. Универсальные рекомендации по выбору оптимального набора параметров могут быть получены в результате сочетания теории с экспериментом.

Целью настоящей работы является теоретическая оценка толщины пористого слоя кремния над плоскостью $p-n$ -перехода, обеспечивающей максимум генерации электронов под действием падающих фотонов с учетом их рекомбинации с дырками и сопоставление результата с экспериментом.

sing
ig a
993.
ary
doi:

В легированном слое полупроводника n -типа имеются наноразмерные поры, которые уменьшают отражение фотонов, подающих с энергией $\hbar\omega$, длиной волны λ . Диаметр (d), высота пор (x), отсчитываемая от лицевой поверхности, и расстояния между ними (l) одного порядка с λ , поэтому реализуется эффект антиотражения. Толщина пористого слоя L должна быть подобрана примерно равной диффузионной длине носителей зарядов L_d т.е. расстоянию, на котором их концентрация заметно (в e раз) уменьшается. Если $L \ll L_d$, то мало число выбитых фотонами избыточных электронов, если $L \gg L_d$, то много рекомбинированных электронов с дырками. Задача заключается в поиске относительного расстояния x/L_d , на котором эти два эффекта сбалансированы. Диффузионная длина L_d является физическим параметром, обычно его оценивают в виде

$$L_d = \sqrt{Dt}, \quad (1)$$

ны
ия
ок,

где D - коэффициент диффузии носителя заряда в конкретном полупроводнике, t - его время жизни. Более удобной является стандартная оценка L_d в виде радиуса Дебая:

эм.
ия,
юя
зет

$$L_d = V_T / \omega_0 = \sqrt{\frac{kT\varepsilon}{Ne^2}} = 4,9 \sqrt{\frac{\varepsilon T(^{\circ}\text{K})}{N(\text{см}^{-3})}} \text{ см}, \quad (2)$$

ю-
го.
их
ых

где V_T - тепловая скорость носителей заряда, ω_0 - частота собственных колебаний электрона, N - концентрация носителя избыточного заряда, e - заряд электрона, ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды, $T(^{\circ}\text{K})$ - абсолютная температура.

мы
].В

Значение $\varepsilon = 1$ для воздуха внутри пор, для кремния $\varepsilon = 11,8$. Число избыточных электронов и дырок генерируемых каждую секунду в единице объема полупроводника фотоном с энергией $\hbar\omega$, определяется как

к с

$$N = \beta W / \hbar\omega, \quad \hbar\omega \geq E_g, \quad (3)$$

ие
ли

где W - мощность солнечного излучения в объемном слое достаточной толщиной $1/4$ длины волны фотона $\lambda = \omega c / 2\pi\sqrt{\varepsilon}$ для максимального поглощения излучения, E_g - ширина энергетически запрещенной зоны полупроводника, β - квантовый выход.

от
и

Для местоположения и суточного времени эксплуатации СЭ измеряется интенсивность солнечного излучения $I(\text{Вт}/\text{м}^2)$. Значение $W(\text{Вт}/\text{см}^3)$ выражается через I :

юв

$$W\left(\frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}\right) = 10^6 I\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right) \frac{\lambda(\text{м})}{4} \quad (4)$$

юя
ии

(и

Для обычных условий для фотовольтаики: $T = 3 \cdot 10^2 K$, $\varepsilon = 11,8$, $\beta = \frac{\lambda}{4} = 10^{-7} м$, $I = 0,7 \frac{кВт}{м^2}$, $\hbar\omega \geq E_g = 2 \cdot 10^{-19} Дж$, $W = 0,7 \cdot 10^2 \frac{Вт}{см^3}$.

Из формул (2), (3) следует оценка $L_D \approx 10^3 нм$. Диффузионная длина составляет величину порядка микрона, является измеримым физическим параметром и дальнейшая задача стоит в определении $\frac{x_*}{L_D}$, где x_* – оптимальная толщина пористого слоя.

Формула (3) определяет число электронов N в поверхностном слое толщиной $\lambda/4$.

Рассмотрим его изменение $N(x)$ в направлении $p-n$ -перехода. Число сгенерированных электронов под действием фотонов пропорционально высоте пор x :

$$N_g = gpx\hbar\omega, \quad 0 \leq p \leq 1, \quad (4)$$

где g – коэффициент генерации электронов по x , p – коэффициент пористости пленки. Число рекомбинированных пар электрон-дырка пропорционально как росту, так убыванию величин p , x :

$$N_z = zp(1-p)x(L_D - x), \quad (5)$$

где z – коэффициент рекомбинации.

Совместная вероятность реализации двух независимых статистических процессов генерации и рекомбинации

$$P(N_g, N_z) = \frac{gzp^2(1-p)}{N^2} \hbar\omega x^2 (L_D - x) \quad (6)$$

Условие максимумов $P(N_g, N_z)$ по p , x :

$$\frac{\partial P(N_g, N_z)}{\partial x} \Big|_{x=x_*} = 2x_*(L_D - x_*) - x_*^2 = 0, \quad x_* = \frac{2}{3}L_D \quad (7)$$

$$\frac{\partial P(N_g, N_z)}{\partial p} \Big|_{p=p_*} = 2p_*(1-p_*) - p_*^2 = 0, \quad p_* = \frac{2}{3} \quad (8)$$

Оптимальная толщина пористого слоя составляет $\frac{2}{3}$ часть диффузионной длины электронов при коэффициенте пористости $p = p_* = \frac{2}{3}$.

Мы ниже рассмотрим возможность наблюдения в эксперименте закономерности описываемой формулой (8). Измерение пористости наноструктурированных пленок проверка формулы (9) представляет отдельную экспериментальную задачу.

В качестве исходного кремния был использован монокристаллический кремний p типа проводимости, толщиной 350 мкм, с удельным сопротивлением 12 Ом·см, $p-n$ переход сформирован с помощью термодиффузии фосфора. Толщина n^+ -слоя порядка

диффузионной длины электрона от 700-1500 нм, это позволяет выбрать высоту пор, образуемых после травления поверхности, меньше, чем расстояние до $p-n$ -перехода. На рис. 1 показана конструкция солнечного элемента с пористым кремнием.



Рисунок 1 - Конструкция солнечного элемента с пористым кремнием

Контакт серебро-алюминий был получен путем напыления металлического Ag . Пористый кремний получен с помощью электрохимического анодирования поверхности n^+ -слоя при различных плотности тока и времени травления. Электрохимическое анодирование проводилось в электролите HF :этанол в соотношении 1:1 и при плотности тока анодизации $20 \frac{mA}{cm^2}$.

С увеличением плотности тока анодизации и времени травления глубина проникновения пористого покрытия увеличивается в направлении к плоскости $p-n$ -перехода. Для поиска эффективной толщины пористого слоя кремния x_* , при котором ток короткого замыкания солнечного элемента имеет максимальное значение, было проведено травление диффузионного n -слоя СЭ различной длительностью по времени.

Были получены изображения микроструктуры поперечного сечения пористого кремния, охватывающего $p-n$ -переход с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). С целью лучшей визуализации слоев $p-n$ -перехода и пористой структуры использовались раствор высокой концентрации HF и сильное освещение вольфрамовой лампой торца образца.

На рис. 2 а) показано СЭМ-изображение поперечного сечения образца с пористым кремнием при коротком времени травления n -слоя, на рис. 2 б)- при длительном травлении.

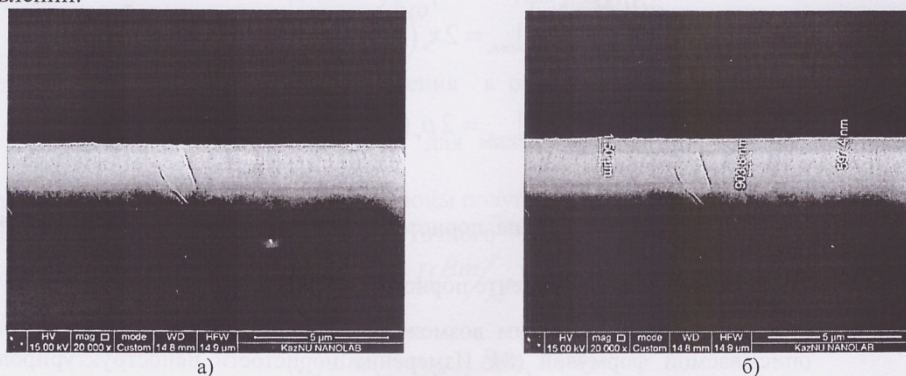


Рисунок 2 - а), б) - СЭМ изображения поперечного сечения СЭ с пористым кремнием

Из СЭМ-изображений видны области $p-n$ -перехода, толщины n -слоя (1,5 мкм) и пористого слоя (903,8 нм) СЭ.

Были измерены токи короткого замыкания $I_{кз}$ образца СЭ с пористым слоем, при освещении вольфрамовой лампой накаливания мощностью $87 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Также измерены напряжения холостого хода и коэффициент заполнения по кривой вольтамперной характеристики солнечного элемента.

Вначале были измерены выходные параметры полированного СЭ без пористого слоя, затем с различной толщины пористого кремния.

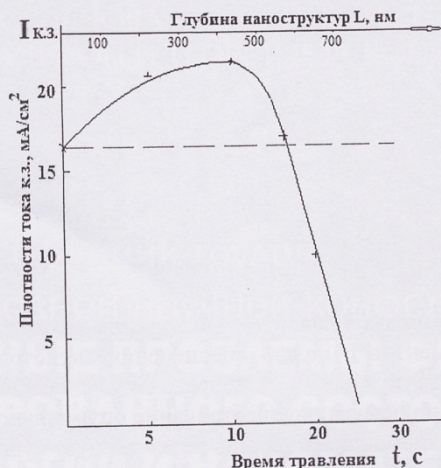


Рисунок 3 - Изменение плотности тока короткого замыкания СЭ с ростом глубины пор (вернее шкала по оси абсцисс), пропорциональной времени травления

Рис. 3 показывает существование эффективной глубины пор, при которой плотность тока короткого замыкания СЭ имеет максимальное значение. Глубина нанопор определялась из СЭМ изображении (рис. 2 а), б)).

Максимум тока короткого замыкания $22,1 \text{ мА}/\text{см}^2$ соответствует времени травления 10 с и 420 нм глубины залегания пористого кремния в n -слое СЭ. Ток короткого замыкания увеличивается на 30% от первоначального значения без пористого кремния.

На рис. 4 показано изменение эффективности СЭ с ростом толщины пористого n -слоя по направлению к $p-n$ -переходу. Эффективность СЭ при глубине залегания пористого слоя 420 нм от поверхности составляет около 35 % по сравнению с первоначальным значением эффективности без пористого слоя.

Из рис. 3, 4 видно, что оптимальная высота пористого слоя СЭ, обеспечивающая максимум тока короткого замыкания ($x_{*,l}$) и коэффициента полезного действия СЭ ($x_{*,w}$) равна, соответственно $x_{*,l} = 0,55$, $x_{*,w} = 0,70$, что ближе к теоретическому значению,

$$x_{*,w} \approx \frac{2}{3} L_d \text{ (если принять } L_d \approx 600 \text{ нм, согласно рис. 4).}$$