

07

Особенности высокочастотной вольт-фарадной характеристики фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе кремниевого $p-n$ -перехода с антиотражающим слоем пористого кремния

© В.В. Трегулов

Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина,
390000 Рязань, Россия
e-mail: trww@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 6 марта 2014 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования высокочастотной вольт-фарадной характеристики фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе n^+ - p -перехода с тонкой пленкой пористого кремния на фронтальной поверхности. Показано, что вольт-фарадная характеристика определяется поверхностной МДП-структурой, возникающей в результате формирования слоя пористого кремния методом анодного электрохимического травления. Определена эффективная толщина диэлектрического слоя поверхностной МДП-структуры, концентрация примеси в ее полупроводниковой области и плотность поверхностных состояний.

Применению тонких пленок пористого кремния (por-Si) в качестве антиотражающего покрытия фронтальной поверхности традиционных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии посвящено достаточно много публикаций. Убедительно показано, что применение слоя por-Si позволяет увеличить эффективность преобразования солнечной энергии. В то же время электрофизические свойства таких ФЭП изучены не достаточно.

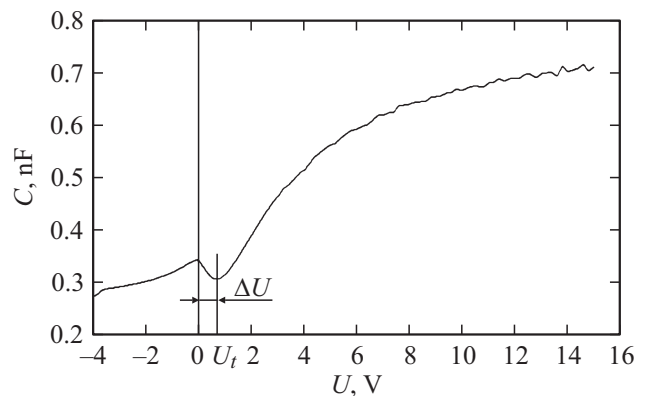
В настоящей работе приведены результаты исследования высокочастотной вольт-фарадной характеристики (ВФХ) кремниевого ФЭП на основе n^+ - p -перехода с тонкой пленкой por-Si на n^+ -поверхности.

Основой исследуемой структуры является n^+ - p -переход, сформированный диффузией фосфора. В качестве подложки использовался монокристаллический кремний солнечного качества p -типа проводимости с ориентацией поверхности (100) и удельным сопротивлением $1 \Omega \cdot \text{cm}$. Глубина залегания n^+ - p -перехода составляет $0.5 \mu\text{m}$. Пленка por-Si выращивалась на поверхности n^+ -слоя методом анодного электрохимического травления. В настоящей работе исследовались ФЭП с пленкой por-Si толщиной $0.4 \mu\text{m}$. Как показано в нашей работе [1], такая толщина слоя por-Si является оптимальной с точки зрения эффективности ФЭП. Для проведения измерений к p -области структуры и поверхности por-Si формировались индиевые контакты.

Измерение ВФХ проводилось с помощью цифрового измерителя иммитанса E7-20 при частоте тестового сигнала 1 MHz и температуре 300 K. Была исследована партия из 10 одинаковых образцов, ВФХ которых имели практически одинаковый вид. Типичная высокочастотная ВФХ для исследуемой серии образцов показана на рисунке. Полярность приложенного к структуре постоянного смещения U определяется знаком напряжения на контакте к por-Si.

Представленная на рисунке характеристика не соответствует ВФХ n^+ - p -диода (исходной структуры), у которого минимум емкости должен наблюдаться в области положительных напряжений смещения.

Полученная ВФХ (рисунок) характерна для структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе полупроводника n -типа проводимости. Режим аккумуляции основных носителей заряда имеет место в области положительных напряжений. Обеднение также начинается при достаточно больших положительных напряжениях (рисунок). При отрицательном смещении наступает глубокое обеднение. Локальный максимум вблизи $U = 0 \text{ V}$ связан с влиянием поверхностных состояний [2]. Измеренная ВФХ существенно растянута по оси напряжений. Данная ситуация объясняется влиянием поверхностных состояний [3]. Напряжение плоских зон сильно смещено в область положительных значений, что может быть объяснено влиянием отрицательного заряда в диэлектрическом слое [3].



Вольт-фарадная характеристика исследуемой структуры при частоте измерительного сигнала 1.

При глубоком обеднении емкость МДП-структуры минимальна [3] и соответствует некоторому значению C_{\min} . При этом ширина области пространственного заряда максимальна и может быть определена следующим соотношением [3]:

$$W_{\max} = \sqrt{\frac{4\epsilon\epsilon_0 kT \ln(N_d/n_i)}{q^2 N_d}}, \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость кремния, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, n_i — собственная концентрация для кремния, q — заряд электрона, N_d — концентрация донорной примеси в полупроводниковом слое МДП-структуры. С другой стороны, величину W_{\max} можно связать с полной емкостью МДП-структуры в режиме обеднения $C_{sc \min}$ следующим образом:

$$W_{\max} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C_{sc \min}}, \quad (2)$$

где S — площадь металлического электрода МДП-структуры,

$$C_{sc \min} = \left[\frac{1}{C_{\min}} - \frac{1}{C_i} \right]^{-1}, \quad (3)$$

C_i — емкость диэлектрического слоя (равна емкости МДП-структуры в режиме аккумуляции) [3]. В нашем случае $C_i = 7.0 \cdot 10^{-10}$ Ф (рисунок).

В результате вычислений по (1)–(3) для значений $C_{\min} = 2.8 \cdot 10^{-10}$ Ф и $C_i = 7.0 \cdot 10^{-10}$ Ф (рисунок) была определена величина N_d , которая составила $8.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Полученное значение N_d существенно меньше концентрации донорной примеси в n^+ -слое исходного ФЭП. Это можно объяснить обеднением n^+ -слоя атомами донорной примеси при электрохимическом травлении. Согласно [4], наиболее вероятной причиной образования обедненных областей является переход примесных атомов в электрически неактивное состояние за счет внедрения водорода в кристаллическую решетку кремния. Водород в ходе анодного электрохимического травления способен проникать из электролита через стенки пор в кристаллическую матрицу por-Si , приводить к электрической пассивации примесных атомов и созданию обедненных областей вокруг каждой поры. Обедненные области могут достаточно далеко распространяться вглубь кремниевой матрицы вследствие высокого коэффициента диффузии водорода [4,5].

Как известно, por-Si представляет собой массив кремниевых кристаллитов, разделенных цилиндрическими порами различного диаметра, но примерно одинаковой длины. Поры содержат в основном окислы кремния, доля оксидной фазы уменьшается по мере удаления вглубь пористого слоя [6]. Наиболее мелкие, наноразмерные кремниевые кристаллиты находятся вблизи поверхности пленки por-Si [7]. Диэлектрическая проницаемость слоя por-Si ϵ_{eff} оценивалась с помощью модели эффективной

среды Бруггемана [8]. При вычислениях принималось, что пористый слой состоит из кремниевых кристаллитов и включений SiO_2 . В результате величина ϵ_{eff} составила 4.8.

Эффективная толщина диэлектрического слоя d_{eff} исследуемой структуры оценивалась по значению емкости C_i на основе соотношения, полученного из [3]:

$$d_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_{\text{eff}} \epsilon_0 S}{C_i}. \quad (4)$$

Вычисленное значение d_{eff} составило $0.03 \mu\text{m}$.

Как отмечалось выше, наличие локального максимума на ВФХ (рисунок) при $U = 0$ В связано с влиянием поверхностных состояний с глубокими энергетическими уровнями. В области обеднения при некотором напряжении U_i вместо дальнейшего снижения емкости структуры несколько возрастает (рисунок). Это объясняется изменением заполнения энергетических уровней поверхностных состояний. При $U = U_i$ поверхностный уровень пересекает уровень Ферми [2]. Изменение заряда поверхностных состояний происходит при изменении напряжения ΔU (рисунок). По величине ΔU может быть определена плотность поверхностных состояний N_{st} из выражения [2]:

$$N_{st} = \frac{\Delta U C_i}{qS}. \quad (5)$$

Для исследуемой структуры величина N_{st} составила $8.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, полученная ВФХ (рисунок) может быть объяснена формированием поверхностной МДП-структуры на n^+ -слое исходного ФЭП в ходе электрохимического травления. В качестве диэлектрического слоя выступает поверхностный слой por-Si , толщиной d_{eff} , содержащий наиболее мелкие кремниевые кристаллиты и включения окислов кремния. Величина концентрации мелких доноров в активном полупроводниковом слое поверхностной МДП-структуры определяется электрической пассивацией примесных атомов исходной n^+ -области за счет внедрения водорода при электрохимическом травлении.

Список литературы

- [1] Трегулов В.В., Скопцова Г.Н. // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 2. С. 44–47.
- [2] Пека Г.П. Физические явления на поверхности полупроводников. Киев: Высшая школа, 1984. 214 с.
- [3] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [4] Зимин С.П. // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 3. С. 359–363.
- [5] Fang J., Pilon L. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. P. 011 909.
- [6] Тутов Е.А., Бормонтов Е.Н., Кашкаров В.М., Павленко М.Н., Домашевская Э.П. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 83–89.
- [7] Горячев Д.Н., Беляков Л.В., Сресели О.М. // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 9. С. 1130–1134.
- [8] Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. // УФН. 2007. Т. 177. Вып. 6. С. 619–638.