Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i3.448

Особенности структур *p*-por-Si/*p*-c-Si и механизм токопереноса

У.С. Бобохожаев[*], М.А. Усманов[*]

Наманганский государственный университет, ул. Бобуршох. 161, 160107, Наманган, Узбекистан

Получена 20.04.2023, revised 28.09. 2023

* Corresponding author: e-mailu_boboxujayev1960@mail.ru; m_usmanov95@mail.ru, Phone+998 93 277 11 19

Как известно, если por-Si осаждается на подложку из кристаллического кремния *p*-типа, в por-Si образуются глубокие уровни и поверхностные состояния. Это приводит к сдвигу уровня Ферми (E_F) в сторону зоны проводимости, за счет сдвига возникает потенциальный барьер между слоями por-Si и c-Si. Кроме того, вследствие увеличения концентрации глубоких уровней в por-Si уменьшается концентрация дырок и между слоями por-Si и c-Si образуется p–p^+ переход. Из-за разной концентрации дырок с обеих сторон перехода возникает диффузионный ток. На основе диффузионной теории нами получено аналитическое выражение температурной зависимости диффузионного тока.

Ключевые слова: por-Si, глубокий уровень поверхностных состояний, диффузионный ток, захват дырок в ловушках, температурная зависимость.

As we know if por-Si/c-Si is deposited on a *p*-type crystalline silicon substrate, the deep levels and surface states are formed in por-Si. Due to the formation of these levels and states in por-Si, the shift of the Fermi level (E_F) to the side of conduction band is observed. As a result, a potential barrier arises between the layers of por-Si and c-Si. Also the p–p^+ junction is formed because of the difference of hole concentration in por-Si and c-Si. Due to the different concentration of holes in both sides of the junction, a diffusive current appears. In this article, analytical expression for the temperature dependence of the diffusive current is proposed based on the diffusion theory.

Keywords: por-Si, deep level of surface states, diffusive current, capture of holes in traps, temperature dependence.

I. Введение

Значительный интерес к исследованиям свойств пористого кремния (por-Si), микрокристаллического гидрированного (μ-cSi:H) и нанокристаллического гидрированного (*n*-cSi:H) кремния наблюдается с целью их применения в различных областях полупроводниковых приборов, в том числе, многослойных фотопреобразователей на их основе [1-3].

Кристаллический,микрокристаллический и нанокристалический гидрогенизированный кремний являются широкозонными полупроводниками. Если тонкий слой μ-cSi:H или *n*-cSi:H осаждается на тыльной поверхности структуры фотопреобразователя, из-за меньшей подвижности дырок в осажденных пленках уменьшается скорость поверхностной рекомбинации между слоемс-Si и омическим контактом. За счет этого увеличивается эффективность фотопреобразователей.

Плёнка пористого кремния обладает антиотражающим свойством, поэтому она используется для покрытия поверхности кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии, и за счет этого увеличивается эффективность фотопреобразователя.

При осаждении на тыльной поверхности фотопреобразователя на основе кристаллического

кремния тонкого (μ-cSi:H) или (*n*-cSi:H) слоя из-за различия ширины их запрещенных зон образуется гетеропереход между этими слоями.

В данной работе представлены результаты исследования особенностей перехода и механизма токопереноса в структурах por-Si/c-Si; Данные сопоставлены с экспериментальными результатами, полученными в работе [4].

II. Методы исследования и постановка задачи

Пористый Si получают несколькими методами, н-р, метод металл-стимулированного травления, метод анодного электрохимического травления и другие. Травление кремния протекает непосредственно под частицами металла в растворах, где формируется пленка por-Si, состоящая из нитеобразных кремниевых кристаллитов [5, 6].

Как известно, при формировании кристаллитов por-Si возникает растягивающее механическое напряжение [7] и рост пленки por-Si приводит к расширению кристаллической решетки кремния [8, 9]. Поэтому при образовании кристаллитов и деформации решетки может нарушаться дальний и ближний порядок кристаллической решетки. Если использовать в качестве подложки c-Si *p*-типа, из-за нарушения дальнего и ближнего порядка между уровнями Ферми (E_F) и потолком валентной зоны E_V образуются новые зарядовые состояния, которые являются ловушками для дырок. Поэтому при формировании пленки por-Si, в зависимости от технологии получения, возникает область с высокой концентрацией дефектов, сравнимая с концентрацией легирующей примеси в исходной пластине *p*-Si, используемой в качестве подложки. Между слоями por-Si и *p*-Si происходит изгиб зон и возникает область пространственного заряда (ОПЗ). Особенностью этого перехода является существование избыточных дырок по обе стороны перехода, но с разными концентрациями, поэтому модель зонной диаграммы перехода между слоями por-Si и *p*-Si можно представить в виде, показанном на рис. 1 [4].

Таким образом, эта полупроводниковая структура имеет выпрямляющее свойство. Этому свидетельствуют полученные вольтамперные характеристики этих структур, которые показаны на рис. 2 [4].

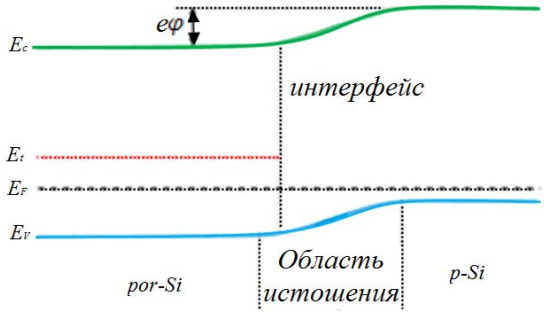


Рисунок 1. Модель зонной диаграммы выпрямляющего перехода por-Si/*p*-Si.

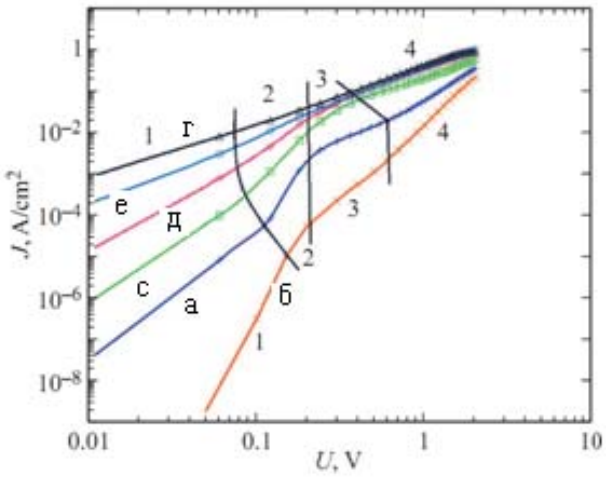


Рисунок 2. Прямые ветви ВАХ при температуре *T*, К: а – 70, б – 140, с – 200, д – 250, е – 300, г – 370.

Кроме этого, за счет неравномерного распределения дырок и вследствие высокой плотности поверхностных состояний возникает ток при *U*=0 (рис. 3) [4], образовавшийся за счет травления в por-Si этих структур. Основной задачей данной работы является объяснение возникновения тока в отсутствие внешнего напряжения и получение выражения для диффузионного тока.

III. Результаты и их обсуждение

Допустим, что диффузионный ток состоит только из неравновесных дырок, потому что пленки por-Si и c-Si являются *p*-типа, а существующие глубокие уровни и поверхностные состояния в por-Si являются ловушками для дырок. При захвате дырок на этих ловушках для диффузионного тока получим

$$j_p = |e| S \Delta p , \qquad (1)$$

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

где Δp – концентрация избыточных дырок в *p*-Si, *S* – скорость захвата дырок на ловушках и в поверхностных состояниях.

В стационарном состоянии $(\delta\Delta p / \delta t = 0)$ уравнение непрерывности для дырок имеет вид:

$$-\frac{1}{e}\mathrm{div} j_p = G - \frac{\Delta p}{\tau_p}, \qquad (2)$$

где *G* – скорость термической генерации, τ_p – время жизни дырок.

Рассмотрим ситуацию, когда скоростью термической генерации *G* можно пренебречь.

Если учесть, что

$$j_p = -eD_p \frac{dp}{dx}, \qquad (3)$$

то уравнение диффузии запишем в виде

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{\tau_p}. \qquad (4)$$

С учетом скорости захвата дырок решение этого уравнения имеет следующий вид[10]:

$$\Delta p(x) = \Delta p_0(0) \frac{\mathrm{ch}\left(\frac{x-d}{L}\right) - \frac{L}{L_{S_d}}\mathrm{sh}\left(\frac{x-d}{L}\right)}{\left(1+\frac{L^2}{L_{S_d}L_{S_0}}\right)\mathrm{sh}\left(\frac{d}{L}\right) + \left(\frac{L}{L_{S_0}}+\frac{L}{L_{S_d}}\right)\mathrm{ch}\left(\frac{d}{L}\right)}. \qquad (5)$$

Здесь $L = \sqrt{D_p \tau_p}$ – диффузионная длина дырок, $L_{S_0} = D/S_0$ и $L_{S_d} = D/S_d$ характеризуют ловушечные и рекомбинационные механизмы на поверхностях соответственно c-Si и por-Si, *d* – ширина перехода. Из-за разности концентраций дырок в областях c-Si и por-Si можно считать, что $S_0 << S_d$, тогда $L_{S_0} \gg L_{S_d}$. Если учесть эти соотношения, выражение (5) примет следующий вид:

$$\Delta p(x) = \Delta p_0(0) \frac{\mathrm{ch}\left(\frac{x-d}{L}\right) - \frac{L}{L_{S_d}}\mathrm{sh}\left(\frac{x-d}{L}\right)}{\mathrm{sh}\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{L}{L_{S_d}}\mathrm{ch}\left(\frac{d}{L}\right)}. \qquad (6)$$

При разомкнутой цепи плотность тока равна нулю, учитывая это условие получаем:

$$\sigma E - |e| D_p \frac{d(\Delta p)}{dx} = 0 \text{ или } \sigma \frac{dV}{dx} = eD_p \frac{d(\Delta p)}{dx}.$$

После интегрирования этого выражения получим

$$V = \frac{eD_p}{\sigma}[\Delta p(0) - \Delta p(d)]. \qquad (7)$$

Таким образом мы определили ЭДС, возникшую между двумя внешними поверхностями структур por-Si и c-Si. Выражение $\Delta p(d)$ и $\Delta p(0)$ определяется из (6).

$$V = \frac{eD_p}{\sigma} \frac{\Delta p_0\left[\mathrm{sh}\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{L}{L_{S_d}}\mathrm{ch}\left(\frac{d}{L}\right)\right] - 1}{\mathrm{sh}\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{L}{L_{S_d}}\mathrm{ch}\left(\frac{d}{L}\right)} = \frac{eD_p \Delta p_0}{\sigma}\left[1 - \frac{1}{\mathrm{sh}\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{L}{L_{S_d}}\mathrm{ch}\left(\frac{d}{L}\right)}\right]. \qquad (8)$$

Если выполняются условие $d >> L$, тогда $\exp(-d/L) \to 0$ и последнее выражение примет следующий вид

$$V = \frac{eD_p \Delta p_0}{\sigma}\left[1 - \frac{1}{\frac{1}{2}\exp\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{L}{L_{S_d}}\exp\left(\frac{d}{L}\right)}\right] = \frac{eD_p \Delta p_0}{\sigma}\left[1 - \frac{2}{\exp\left(\frac{d}{L}\right)\left(1+\frac{L}{L_{S_d}}\right)}\right] = \frac{eD_p \Delta p_0}{\sigma}\left[1 - \frac{2\exp\left(-\frac{d}{L}\right)}{1+\frac{L}{L_{S_d}}}\right] \qquad (9)$$

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Учитывая соотношения $L=\sqrt{D_p\tau}$ и $L_{S_d}=D_p/S$, окончательно получим

$$V=\frac{eD_p\Delta p_0}{\sigma}\left(1-\frac{2}{\sqrt{\frac{D}{\tau}}+S}\sqrt{\frac{D_p}{\tau}}\exp\left(-\frac{d}{L}\right)\right). \quad (10)$$

Выражение (1) преобразуем следующим образом:

$$j_p=|e|S\Delta p=S\frac{e\Delta p\mu_p}{\mu_p}=S\frac{\sigma}{\mu_p}. \quad (11)$$

Отсюда найдем удельную проводимость σ и подставим в (10), в результате чего получим

$$V=\frac{eD_p\Delta p_0 S}{j_p\mu}\left(1-\frac{2}{\sqrt{\frac{D}{\tau}}+S}\sqrt{\frac{D_p}{\tau}}\exp\left(-\frac{d}{L}\right)\right).$$

$$j_p=\frac{eD_p\Delta p_0 S}{\mu V}\left(1-\frac{2}{\sqrt{\frac{D}{\tau}}+S}\sqrt{\frac{D_p}{\tau}}\exp\left(-\frac{d}{L}\right)\right). \quad (12)$$

Как известно, все физические параметры структуры por-Si/c-Si, входящие в формулу (12), зависят от T. Среди них больше всего от T зависят концентрация избыточных дырок Δp_0 и коэффициент диффузии. Зависимости остальных параметров от T будем использовать как подгоночные параметры.

Учитывая экспоненциальную зависимость избыточных концентраций дырок от T, имеем следующую формулу для j:

$$j_p=\frac{eD_p}{\mu_p V}\Delta p_{00}S\left(\exp\left(\frac{d}{L}\right)-\frac{2}{\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}+S}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\right)\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}-\frac{d}{L}\right), \quad (13)$$

где Δp_{00} – концентрация легирующей примеси в c-Si, ΔE – термическая энергия активации дырок.

На рис. 3 представлен график температурной зависимости тока при U=0 В. Как видно из графика, энергия активации для ловушек непрерывно меняется в пределах 0.077–0.212 эВ [4].

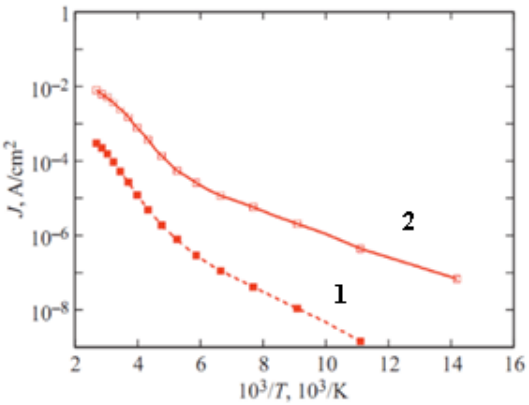


Рисунок 3. Зависимость плотности тока от температуры при U=0 В (1), а также при прямом смешении для значений U=0.1 В (2).

При этом мы учли зависимость диффузионной длины от температуры, т.е.

$$L=\sqrt{D_p\tau_p}=\sqrt{\mu_p\frac{kT}{e}\tau_p}.$$

Учитывая это соотношение, мы получим следующую формулу

$$j=k\frac{S\Delta p_{00}}{V}T\left(\exp\left(\frac{d}{L}\right)-\frac{2}{\sqrt{\frac{\mu_p kT/e}{\tau_p}}+S}\sqrt{\frac{\mu_p kT/e}{\tau_p}}\right)\times$$

$$\times\exp\left(\frac{\Delta E\sqrt{\frac{\mu_p\tau_p}{e}}+d\sqrt{kT}}{\sqrt{\frac{\mu_p\tau_p}{e}}kT}\right). \quad (14)$$

Как видно из этого выражения, числитель дроби, который находится под экспонентой, является термической энергией активации дырок и зависит от T. Теоретически рассчитанная

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

зависимость*j* от *T* представлена на рис.3 в виде сплошной линии.

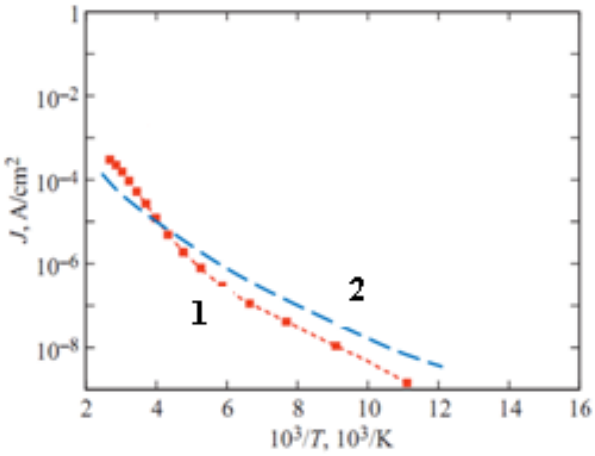


Рисунок 4. Зависимость плотности тока от температуры при *U*=0 В (1– эксперимент [4], расчет (2).

При расчетах для por-Si и c-Si были использованы данные, приведенные в работах [4, 10]. Полученный нами график совпадает с графиком в работе [4] (рис. 4). Расхождение графиков при высоких температурах, по-нашему мнению, связано с неучтенной температурной зависимостью параметров *S* и μ от *T*. Но это требует дополнительного исследования.

IV. Заключение

Таким образом, в работе получено выражение для температурной зависимости плотности тока при отсутствии внешнего напряжения (*U*=0) для структур por-Si/c-Si.

Показано, что в структуре por-Si/c-Si возникает диффузионный ток при *U*=0. Причиной возникновения тока является разница концентраций дырок в por-Si и c-Si.

Установлено, что неравномерное распределение избыточных дырок возникает вследствие захвата дырок поверхностными и глубокими зарядовыми состояниями в слое por-Si.

Метаданные

Peculiarities of *p*-por-Si/*p*-c-Si structures and mechanism of current transfer

U.S. Bobokhojaev, M.A. Usmanov

Namangan State University, Boburshokh str., 161, 160107 Namangan, Uzbekistan

As we know if por-Si/c-Si is deposited on a *p*-type crystalline silicon substrate, the deep levels and surface states are formed in por-Si. Due to the formation of these levels and states in por-Si, the shift of the Fermi level (E_F) to the side of conduction band is observed. As a result, a potential barrier arises between the layers of por-Si and c-Si. Also the p–p^+ junction is formed because of the difference of hole concentration in por-Si and c-Si. Due to the different concentration of holes in both sides of the junction, a diffusive current appears. In this article, analytical expression for the temperature dependence of the diffusive current is proposed based on the diffusion theory.

Keywords: por-Si, deep level of surface states, diffusive current, capture of holes in traps, temperature dependence

Литература (References)

[1] T. Dzhafarov, A. Bayramov. In: Handbook of Porous Silicon. Ed. by L.Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018).
[2] X. Liu, P.R. Coxon, M. Peters, B. Hoex, J.M. Cole, D.J. Fray. Energy Environ. Sci. **7**, 3223 (2014).
[3] A.A. Sherchenkov, B.G. Budagyan, A.V. Mazurov. Phizika i Tekhnika Poluprovodnikov **39**, No.8 (2005).
[4] N.N. Melnik, V.V. Tregulov, V.G. Litvinov, A.V. Ermachikhin, E.P. Trusov, G.N. Skoptsova, A.I. Ivanov. Physika i Tekhnika Poluprovodnikov **56**, No.4 (2022).
[5] K.W. Kolasinski. In: Porous Silicon: From Formation to Application. Formation and Properties, ed. by G. Korotcenkov (London, N.Y., Taylor and Francis Group, LLC, **1**, 291, 2016).
[6] Yu.A. Zharova, V.A. Tolmachev, S.I. Pavlov. Phizika i Tekhnika Poluprovodnikov **53**, No.4, 576 (2019).
[7] Qiu Li, Wei Qiu, Haoyun Tan, Jiangang Guo, Yilan Kang. Opt. Lasers Eng., **48**, No.11, 1119 (2010).
[8] M. Ivanda. In: Handbook of Porous Silicon. Ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 611, 2018).
[9] G. Amato. In: Porous Silicon: From Formation to Application. Formation and Properties, Ed. by G. Korotcenkov (London, N.Y., Taylor and Francis Group, LLC, **1**, 156, 2016).
[10] K. Zeeger. Physika Poluprovodnikov (Mir, Moscow, 1977).

P-por-Si/*p*-c-Si тузилмаларининг хусусиятлари ва ток узатиш механизми

У.С. Бобохўжаев, М.А.Усманов

Наманган давлат университети, Бобуршох кўча 161, 161107, Наманган, Ўзбекистон

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Маълумки, агар por-Si/c-Si типдаги кристалл кремний тагликка ўтказилса, por-Si да чуқур сатҳлар ва сиртий холатларни хосил қилади. Бу эса Ферми (E_F) сатҳининг ўтказувчанлик зонаси томонга силжишига олиб келади, силжиш туфайли por-Si ва c-Si қатламлари ўртасида потенциал тўсиқ пайдо бўлади. Бундан ташқари, por-Si да чуқур холатлар концентрация-сининг ортиши туфайли por-Si даги ковакларнинг концентрацияси камаяди ва por-Si ва c-Si қатламлари ўртасида p–p^+ ўтиш хосил бўлади. Ўтишнинг хар икки томонидаги ковакларнинг хар хил концентрацияси туфайли диффузион ток юзага келади. Диффузия назариясига асосан биз диффузион токнинг хароратга боғлиқлигининг аналитик ифодасини олдик.

Калит сўзлар. por-Si, чуқур сатхли сирт холатлари, диффузион ток, ковакларни тутилиши, хароратга боғлиқлик.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.