

07

Влияние параметров кристаллической подложки на максимальную мощность кремниевых гетеропереходных солнечных элементов

© И.Е. Панайотти

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: panaiotti@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 июня 2021 г.

В окончательной редакции 13 сентября 2021 г.

Принято к публикации 14 сентября 2021 г.

Исследовано влияние концентрации донорной примеси и времени жизни носителей заряда в кристаллической кремниевой подложке на максимальную мощность гетеропереходных тонкопленочных солнечных элементов. Используемая в расчетах модель учитывает особенности генерации фототока в условиях среднего или высокого уровней инжекции носителей заряда при произвольном соотношении между диффузионной длиной и толщиной полупроводниковой пластины. Предложенная методика позволяет с достаточной для практических целей точностью вычислять допустимые пределы вариаций параметров подложки, обеспечивающие заданные значения рабочих характеристик фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: гетеропереходные солнечные элементы, кристаллические кремниевые подложки, оптимальные параметры, максимальная мощность.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51793.18929

Интенсивное развитие солнечной энергетики диктует необходимость непрерывного совершенствования конструкций фотоэлектрических преобразователей. Одним из наиболее перспективных технологических решений для производства солнечных батарей является использование гетеропереходных тонкопленочных структур с кристаллическими кремниевыми подложками. Эффективность лучших образцов таких фотоэлектрических элементов достигает 26.7% [1].

Для производства высокоэффективных гетеропереходных тонкопленочных солнечных элементов — НИТ-элементов (НИТ — heterojunction with intrinsic thin-layer solar cells) — обычно используют кристаллические подложки c -Si n -типа. Такой параметр, как исходное (равновесное) объемное время жизни свободных носителей заряда τ_0 , является показателем качества пластины (n)- c -Si. В подложках современных НИТ-элементов τ_0 составляет от 1.5–8.0 ms при концентрации доноров $N_d \geq 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Толщина подложки d может меняться в пределах 90–170 μm . Экспериментально установлено, что величина этого параметра слабо влияет на рабочие характеристики НИТ-элементов [2,3]: при уменьшении d на 40% потери выходной мощности не превышают 5%. В настоящее время при производстве фотоэлектрических преобразователей данного типа, как правило, используют подложки толщиной 150–170 μm . Пленки гидрогенизированного аморфного кремния α -Si:H p - и n -типа толщиной 15–20 nm, выращенные поверх тонких ($\sim 5 \text{ nm}$) буферных слоев с собственной проводимостью (i)- α -Si:H, формируют на поверхностях пластины (n)- c -Si гетеропереходы. Современные технологии пассивации позволяют эффективно подавлять поверхностные рекомбинационные процессы с помощью внедрения буферных слоев [4]. В высококачественных образцах НИТ-элементов

рекордные напряжения холостого хода составляют более 0.74 V [5]. Такие высокие показатели были достигнуты в том числе за счет существенного снижения суммарной скорости поверхностной рекомбинации (до десятых долей cm/s), так что результирующие потери оказались близки к уровням рекомбинационных процессов в объеме подложки [4,6]. Успехи современных технологий в обработке поверхностей кристаллического кремния сделали актуальной задачу более детального изучения возможности улучшения рабочих характеристик НИТ-элементов за счет оптимального выбора τ_0 и N_d .

Целью настоящей работы является теоретическое исследование корреляции между максимальной мощностью НИТ-элементов и объемными параметрами пластины (n)- c -Si.

Метод оптимизации структуры НИТ-элементов, предложенный в [7], основывается на анализе рекомбинационных процессов [8] и не учитывает диффузионный перенос зарядов внутри подложки. У модели, описанной в [6], такой недостаток отсутствует, так как она рассматривает совместное влияние рекомбинации и амбиполярной диффузии носителей заряда на распределения их концентраций в подложке с произвольными параметрами. При этом плотность тока короткого замыкания J_{sc} используется в качестве произвольно задаваемого параметра. Метод не только позволяет моделировать процессы в НИТ-элементах при различных уровнях рекомбинационных потерь в объеме и на поверхностях кремниевых пластин, но и дает возможность рассмотреть отдельно объемные и поверхностные факторы, влияющие на вид вольт-амперных характеристик.

С целью решения поставленной задачи в настоящей работе рассматривается идеализированная полупровод-

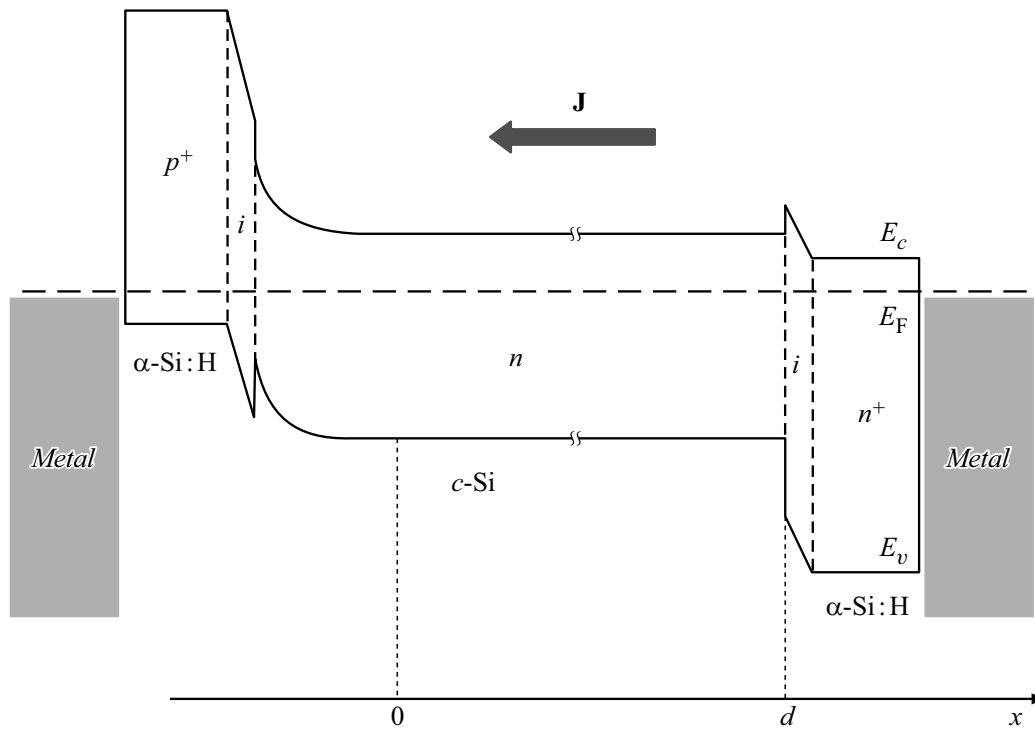


Рис. 1. Модель зонной диаграммы кристаллической подложки НТ-элемента. E_c , E_v — энергетические уровни дна зоны проводимости и потолка валентной зоны; E_F — энергетический уровень Ферми.

никовая структура без поверхностной рекомбинации. Расчеты проводились на основе теоретических зависимостей, полученных в приближении отсутствия загиба энергетических зон подложки со стороны n^+ – n -контакта (рис. 1) [6]:

$$J = -J_{sc} + q\Delta p \sqrt{\frac{D}{\tau}} \tanh\left(\frac{d}{\sqrt{D\tau}}\right), \quad (1)$$

$$U = \frac{kT}{q} \ln\left\{\frac{\Delta p(\Delta p + N_d)}{n_i^2(T)}\right\}. \quad (2)$$

Здесь $J < 0$ — проекция на ось x вектора плотности тока \mathbf{J} ; U — величина прямого смещения p^+ – n -гетероперехода; Δp — концентрация избыточных носителей заряда на правой границе области пространственного заряда p^+ – n -гетероперехода; T — температура, равная 300 К;

$$D = D_p \frac{2b\Delta p + bN_d}{\Delta p(b+1) + bN_d} \quad (3)$$

— коэффициент амбиполярной диффузии [9]; D_p — коэффициент диффузии дырок; $b = 2.8$ — отношение коэффициентов диффузии электронов и дырок в c -Si при $T = 300$ К;

$$\tau = [\tau_0^{-1} + \tau_{Auger}^{-1}]^{-1} \quad (4)$$

— результирующее объемное время жизни носителей заряда;

$$\tau_{Auger} = [C_n(N_d + \Delta p)^2 + C_p(N_d + \Delta p)\Delta p]^{-1} \quad (5)$$

— время жизни носителей заряда при оже-рекомбинации;

$$C_n = [2.8 \cdot 10^{-31} + (2.5 \cdot 10^{-22})/(N_d + \Delta p)^{0.5}] \text{ cm}^6/\text{s},$$

$$C_p = 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s} [6];$$

$n_i(T)$ — собственная равновесная концентрация носителей заряда в подложке при заданной температуре 300 К; k — постоянная Больцмана; q — элементарный заряд. Выражения (1) и (2) представляют собой вольт-амперные характеристики НТ-элемента. Если из (2) найти

$$\Delta p(U) = -\frac{N_d}{2} + \sqrt{\frac{N_d^2}{4} + n_i^2(T) \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)} \quad (6)$$

и подставить в (1), то получится зависимость $J(U)$. Падение напряжения на НТ-элементе в основном определяется величиной прямого смещения p^+ – n -гетероперехода [8]. Последовательное сопротивление, связанное с падениями напряжения на других слоях структуры, в модели не учитывается. Плотность максимальной

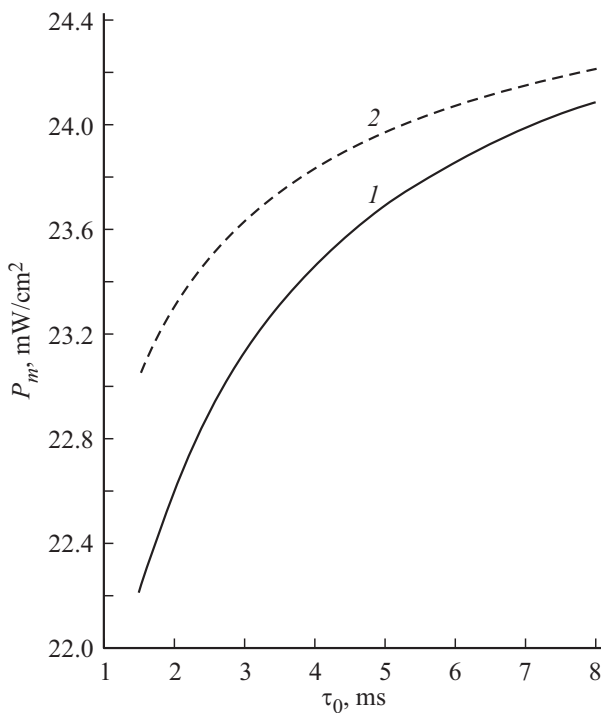


Рис. 2. Зависимость плотности максимальной мощности от величины исходного времени жизни носителей заряда в подложке НИТ-элемента. $J_{sc} = 39 \text{ mA/cm}^2$, $d = 160 \mu\text{m}$. $N_d = 10^{15}$ (1) и $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (2).

Данные промежуточных вычислений к рис. 2 для границ диапазона τ_0

P_m , mW/cm ²	N_d , cm ⁻³	τ_0 , ms	Δp , cm ⁻³	τ , ms	D , cm ² /s
22.22	10^{15}	1.5	$1.33 \cdot 10^{15}$	1.44	15.21
23.06	$5 \cdot 10^{15}$	1.5	$8.59 \cdot 10^{14}$	1.27	12.70
24.09	10^{15}	8.0	$3.42 \cdot 10^{15}$	4.87	16.20
24.21	$5 \cdot 10^{15}$	8.0	$2.08 \cdot 10^{15}$	3.46	13.65

мощности P_m можно численно рассчитать с помощью выражений (1) и (2) из условия $dP/dU = 0$, где $P = JU$. В расчетах теоретических кривых (рис. 2) были использованы типичные значения d , N_d и J_{sc} . Выбранная в качестве произвольного параметра плотность тока короткого замыкания, равная 39 mA/cm^2 , характерна для современных НИТ-элементов, имеющих эффективность $\sim 20\text{--}22\%$ при эталонной солнечной радиации $P_{in} = 100 \text{ mW/cm}^2$ [2,10].

Преобразование солнечной энергии сопровождается интенсивным накоплением избыточных носителей заряда внутри подложки, причем их концентрации напрямую зависят от скорости рекомбинационных процессов. В режиме максимальной мощности Δp становятся сравнимыми или выше концентрации донорной примеси [6]. При этом вследствие влияния процессов оже-рекомбинации результирующее время жизни электронов

и дырок τ оказывается намного меньше τ_0 [11]. Кроме того, наблюдается существенный рост коэффициента амбиполярной диффузии носителей заряда относительно величины D_p . Согласно выражениям (3)–(5), чем выше Δp , тем слабее D и τ зависят от уровня легирования кристаллической подложки. Поэтому по мере увеличения τ_0 происходит как уменьшение разности между плотностями максимальной мощности у НИТ-элементов, изготовленных на низкоомных ($N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) и высокоомных ($N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) подложках, так и существенное замедление роста функции $P_m(\tau_0)$ (рис. 2). Таблица содержит данные промежуточных вычислений к рис. 2 для границ диапазона τ_0 . Таким образом, при использовании пластин *c*-Si с повышенной концентрацией донорной примеси выигрыш в величине максимальной мощности оказывается заметным только при сравнительно небольших значениях исходных времен жизни носителей заряда.

Теоретические кривые плотности максимального тока J_m в целом повторяют ход зависимостей $P_m(\tau_0)$ и также сближаются по мере увеличения исходного времени жизни носителей заряда (рис. 3, а). Однако

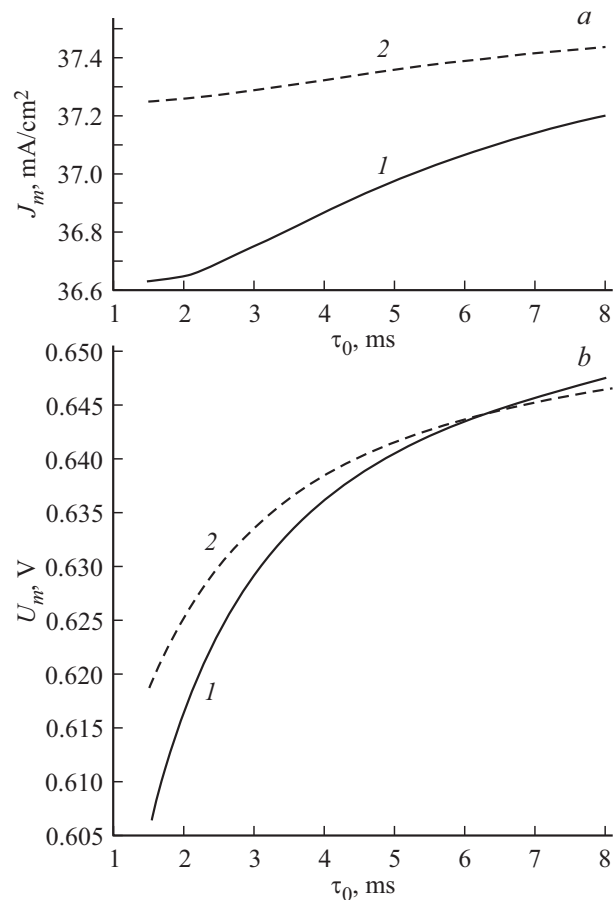


Рис. 3. Зависимости плотности максимального тока (а) и максимального падения напряжения на $p^+ - n$ -гетеропереходе (б) от величины исходного времени жизни носителей заряда в подложке НИТ-элемента. $J_{sc} = 39 \text{ mA/cm}^2$, $d = 160 \mu\text{m}$. $N_d = 10^{15}$ (1) и $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (2).

при $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ функция $J_m(\tau_0)$ растёт заметно медленнее, чем при $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На рис. 3, *b* представлены результаты расчетов максимального напряжения U_m . Вид графиков функций $U_m(\tau_0)$ свидетельствует о том, что преимущество использования низкоомных подложек с целью повышения максимального напряжения исчезает, если исходное время жизни носителей заряда в пластине (*n*)-Si превосходит 6.48 ms. При $\tau_0 > 6.48 \text{ ms}$ рекомбинационные потери таковы, что, как следует из выражения (2), величина произведения $\Delta p(\Delta p + N_d)$ оказывается больше в высокоомных подложках, чем в низкоомных. Согласно оценкам, времена жизни и концентрации носителей заряда в точке пересечения кривых $U_m(\tau_0)$ на рис. 3, *b* соответственно составляют $\tau \approx 4.35 \text{ ms}$, $\Delta p \approx 3.23 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\tau \approx 3.17 \text{ ms}$, $\Delta p \approx 1.96 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Полученные результаты могут быть использованы в исследовательских проектах, направленных на поиск оптимальных параметров подложек для НПТ-элементов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области фундаментальных научных исследований.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, *Nature Energy*, **2**, 17032 (2017). DOI: 10.1038/nenergy.2017.32
- [2] D. Andronikov, A. Abramov, S. Abolmasov, K. Emtsev, G. Ivanov, I. Nyapshaev, D. Orekhov, A. Semenov, G. Shelopin, E. Terukova, E. Terukov, N. Belkova, A. Dubrovskiy, P. Ishmuratov, A. Ivanov, D. Saykin, A. Smirnov, N. Saymurzanov, E. Sokolov, V. Tarasov, in *Proc. 35th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition (EU PVSEC 2018)*, ed. by P. Verlinden, P. Helm, R. Kenny (Curran Associates, Inc., N.Y., 2019), vol. 1, p. 690. <http://toc.proceedings.com/42395webtoc.pdf>
- [3] Е.И. Теруков, А.С. Абрамов, Д.А. Андронников, К.В. Емцев, И.Е. Панайотти, А.С. Титов, Г.Г. Шелопин, ФТП, **52** (7), 792 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.07.46054.8781 [E.I. Terukov, A.S. Abramov, D.A. Andronnikov, K.V. Emtsev, I.E. Panaiotti, A.S. Titov, G.G. Shelopin, *Semiconductors*, **52** (7), 931 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618070230].
- [4] J. Melskens, B.W.H. van de Loo, B. Macco, L.E. Black, S. Smit, W.M.M. Kessels, *IEEE J. Photovolt.*, **8** (2), 373 (2018). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2018.2797106
- [5] A. Danel, S. Harrison, F. Gérenton, A. Moustafa, R. Varache, J. Veirman, C. Roux, in *Proc. 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference Conf. and Exhibition (EU PVSEC 2018)*, ed. by P. Verlinden, P. Helm, R. Kenny (Curran Associates, Inc., N.Y., 2019), vol. 1, p. 444. <http://toc.proceedings.com/42395webtoc.pdf>
- [6] И.Е. Панайотти, Е.И. Теруков, И.С. Шахрай, Письма в ЖТФ, **46** (17), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49883.18377 [I.E. Panaiotti, E.I. Terukov, I.S. Shakhrai, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (9), 835 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020090072].
- [7] А.В. Саченко, Ю.В. Крюченко, В.П. Костылев, И.О. Соколовский, А.С. Абрамов, А.В. Бобыль, И.Е. Панайотти, Е.И. Теруков, ФТП, **50** (2), 259 (2016). [A.V. Sachenko, Yu.V. Kryuchenko, V.P. Kostilyov, I.O. Sokolovskiy, A.S. Abramov, A.V. Bobyl, I.E. Panaiotti, E.I. Terukov, *Semiconductors*, **50** (2), 257 (2016). DOI: 10.1134/S1063782616020226].
- [8] А.В. Саченко, А.И. Шкребий, Р.М. Коркишко, В.П. Костылев, Н.Р. Кулиш, И.О. Соколовский, ФТП, **49** (2), 271 (2015). [A.V. Sachenko, A.I. Shkrebtii, R.M. Korkishko, V.P. Kostilyov, N.R. Kulish, I.O. Sokolovskiy, *Semiconductors*, **49** (2), 264 (2015). DOI: 10.1134/S1063782615020189].
- [9] К.В. Шалимова, *Физика полупроводников* (Энергоатомиздат, М., 1985), с. 249–266.
- [10] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, in *High-efficient low-cost photovoltaics. Recent developments*, 2nd ed. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer Nature, Switzerland, 2020), vol. 140, ch. 7.
- [11] E. Kobayashi, S. De Wolf, J. Levrat, G. Christmann, A. Descoeudres, S. Nicolay, M. Despeisse, Y. Watabe, C. Balif, *Appl. Phys. Lett.*, **109** (15), 153503 (2016). DOI: 10.1063/1.4964835