

УДК 621.383

К. ф.-м. н. А. Б. ГНИЛЕНКО, д. т. н. В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ,
д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ

Украина, г. Днепропетровск, Институт транспортных систем и технологий НАНУ

E-mail: plm@westa-inter.com

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ $p-n$ -ПЕРЕХОДАМИ

Проведено компьютерное моделирование, которое позволило исследовать зависимость основных характеристик солнечного элемента от толщины Si-пластин в широком диапазоне значений.

Ключевые слова: многопереходный солнечный элемент, вертикальный $p-n$ -переход, кремниевая пластина, компьютерное моделирование, программный пакет Silvaco TCAD.

Среди множества различных конструкций фотопреобразователей, пожалуй, наименее изученными остаются солнечные элементы с вертикальными $p-n$ -переходами [1, с. 182]. В таких солнечных элементах излучение направлено вдоль переходов, а не по нормали к ним, как в традиционных планарных конструкциях. Поскольку поперечный размер этих элементов ограничен длиной пробега носителей заряда, элементарные фотопреобразователи соединяют последовательно, получая так называемые многопереходные солнечные элементы с вертикальными $p-n$ -переходами.

Как известно, традиционные планарные солнечные элементы однородны в поперечном направлении, поэтому возможности улучшения их характеристик за счет выбора оптимального набора конструктивных параметров (толщины кремниевой пластины, глубины залегания диффузионных слоев и т. д.) ограничены только одним направлением, совпадающим с направлением падающего излучения. Это порождает ряд противоречивых требований к конструкции солнечных элементов, поскольку для улучшения поглощения света в длинноволновой области спектра необходимо увеличивать толщину элементов, а для обеспечения оптимальных условий сбора носителей эту толщину требуется согласовывать с длиной свободного пробега.

Многопереходные солнечные элементы с вертикальными переходами позволяют снять это противоречие, т. к. в них разделены направления переноса носителей заряда и фотонов, что дает возможность оптимизировать соответствующие конструктивные параметры независимо друг от друга.

К другим немаловажным достоинствам солнечных элементов с вертикальными переходами можно отнести отсутствие затеняющей контактной сетки на фронтальной поверхности, лучшую температурную устойчивость и спектральную чувствительность, возможность получать высо-

кие напряжения за счет последовательного соединения элементов. При создании каскадных солнечных элементов одним из перспективных направлений может стать использование многопереходных структур с вертикальными переходами. Двухсторонняя прозрачность таких элементов и отсутствие необходимости переноса носителей заряда между каскадами позволяет в этом случае обойтись без коммутирующих каскады туннельных диодов, обычных для планарной конструкции.

Известные работы по многопереходным солнечным элементам с вертикальными $p-n$ -переходами посвящены в основном экспериментальным исследованиям, направленным на разработку эффективных технологий изготовления данного класса фотопреобразователей [2–4]. Несмотря на свою первостепенную важность, натурный эксперимент зачастую не позволяет провести оптимизацию устройства, выявить зависимость выходных характеристик от различных конструктивных параметров в широком диапазоне значений. В связи с этим, большое значение приобретает компьютерное моделирование на основе математических моделей, адекватно отображающих реальные физические процессы.

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование многопереходной n^+p-p^+ -структуры с вертикальными переходами при помощи программного пакета Silvaco TCAD [5] (симулятор устройств ATLAS), средствами которого решаются уравнения Пуассона

$$\operatorname{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho$$

и непрерывности

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n;$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p$$

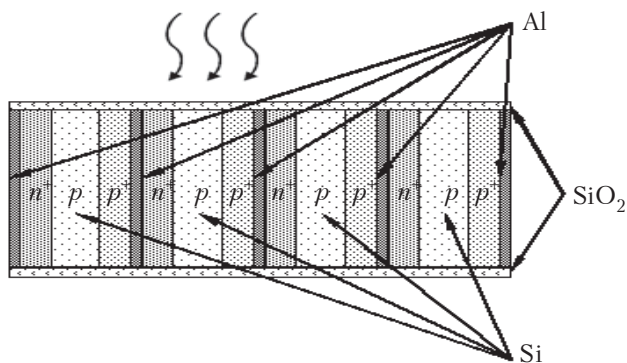


Рис. 1. Многопереходный солнечный элемент с вертикальными $p-n$ -переходами

в рамках диффузионно-дрейфовой модели с учетом механизма рекомбинации Шокли – Рида – Холла

$$R(p, n) = (pn - n_{ie}^2) / (\tau_p (p + n_{ie}) / [1 + N_\Sigma / N_0] + \tau_n (n + n_{ie}) / [1 + N_\Sigma / N_0])$$

и эмпирической модели подвижности, зависящих от концентрации носителей.

В качестве примера выбран многопереходный солнечный элемент из последовательно соединенных четырех $n^+ - p - p^+$ -структур с вертикальными переходами, изображенный на рис. 1. С помощью симулятора устройств ATLAS была создана модель исследуемой структуры, представляющей собой пластину кристаллического кремния p -типа с концентрацией примеси 10^{14} см^{-3} , на боковых поверхностях которой сформированы диффузионные слои n^+ - и p^+ -типов толщиной 1 мкм. Распределение примеси в диффузионных слоях задавалось аналитически по закону Гаусса с пиковой концентрацией 10^{18} см^{-3} . Размер самих кремниевых пластин в вертикальном направлении принимался равным 200 мкм. Расположенные вертикально алюминиевые контакты покрывают всю боковую поверхность пластин. Фронтальная и тыльная поверхности структуры покрыты пассивирующим слоем SiO_2 толщиной 0,05 мкм. Для определения электрических характеристик фотопреобразователя моделировалось освещение последовательно соединенных $n^+ - p - p^+$ -структур солнечным светом при условиях освещения АМ 1,5 в направлении, параллельном переходам.

Для солнечного элемента с вертикальными переходами наиболее значительным представляется влияние на его основные характеристики толщины кремниевых пластин. Поскольку толщина пластины соответствует направлению, в котором происходит перенос носителей заряда, моделирование проводилось для различного времени жизни неосновных носителей (диффузионной длины неосновных носителей), которое является косвенной характеристикой качества кремния и в расчетах обычно варьируется в пределах $10^{-6} - 10^{-4} \text{ с}$ [6, с. 30].

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента полезного действия и тока короткого замы-

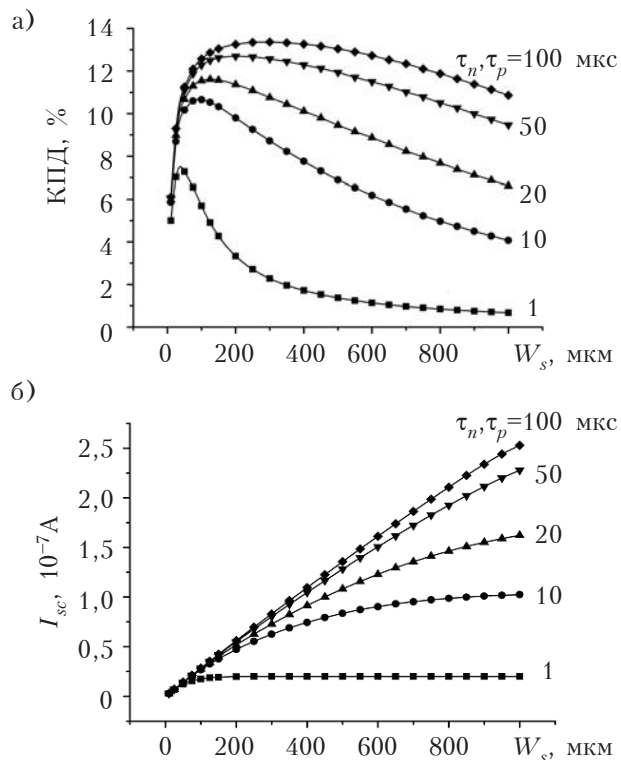


Рис. 2. Зависимость КПД $n^+ - p - p^+$ -структуры (а) и тока короткого замыкания (б) от толщины кремниевых пластин при разных значениях τ_n, τ_p

кания I_{sc} исследуемой структуры от толщины кремниевых пластин W_s , составляющих многопереходный солнечный элемент. Семейство кривых получено для различных значений времени жизни неосновных носителей заряда τ_n и τ_p , соответствующих слабому легированию.

Из рис. 2, а хорошо видно, что при определенной толщине пластин КПД выходит на пиковые значения. Они соответствуют оптимальным условиям сбора носителей, при которых количество носителей заряда, способных достичь контактов солнечного элемента, максимально. Уменьшение толщины пластин относительно ее оптимального значения уменьшает КПД солнечного элемента за счет сужения эффективной области слаболегированного p -слоя, из которой носители могут достичь перехода. Увеличение толщины приводит к появлению и расширению участка p -слоя, носители из которого не достигают перехода, что приводит к уменьшению КПД. С увеличением толщины пластин возрастает ток короткого замыкания (см. рис. 2, б), стремясь выйти на некоторый уровень «насыщения», при котором дальнейшее увеличение толщины не приводит к увеличению количества носителей заряда, участвующих в процессе фотопреобразования солнечного излучения.

Улучшение качества материала p -слоя, что отражается в росте времени жизни неосновных носителей заряда, позволяет увеличить значение оптимальной толщины кремниевых пластин. Так, для времени жизни носителей 20 мкс (согласно спецификациям на промышленно выпускаемые

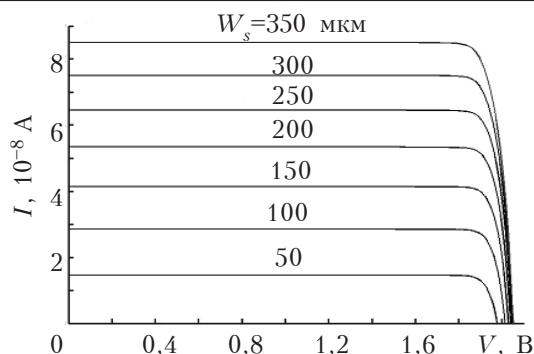


Рис. 3. ВАХ исследуемого многопереходного солнечного элемента для различных значений толщины пластин

пластины кремния, время жизни неосновных носителей заряда должно превышать 10–20 мкс) при толщине кремниевой пластины каждой $n^+ - p - p^+$ -структуры 150 мкм достигаются коэффициент полезного действия 11,9% и плотность тока короткого замыкания 25,8 мА/см².

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) исследуемого многопереходного солнечного элемента представлена на рис. 3. Графики зависимости получены для разных значений толщины $n^+ - p - p^+$ -структур при времени жизни неосновных носителей заряда 20 мкс. ВАХ демонстрирует возможность получения высоких напряжений при применении многопереходных структур с последовательным соединением элементов. Для многопереходной структуры из четырех элементов получено напряжение холостого хода порядка 2 В, в то время как одиночный солнечный элемент на $n^+ - p - p^+$ -структуре дает напряжение холостого хода порядка 0,5 В.

Увеличение толщины кремниевых пластин, как следует из рис. 3, практически не сказывается на величине напряжения холостого хода, при том, что ток короткого замыкания растет (рис. 2, б).

Таким образом, многопереходные солнечные элементы с вертикальными $p - n$ -переходами, в отличие от традиционных планарных конструкций, имеют дополнительную степень свободы с точки зрения возможностей оптимизации характеристик. Проведенное средствами программного пакета Silvaco TCAD моделирование показало, что изменяя толщину кремниевых пластин $n^+ - p - p^+$ -структур, входящих в такой солнечный элемент, можно получить увеличение коэффициента полезного действия фотопреобразователей солнечного излучения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. — М.: Энергоатомиздат, 1987. [Farenbrukh A., B'yub R. Solnechnye elementy. Teoriya i eksperiment. M. Energoatomizdat. 1987]

2. Гук Е. Г., Налет Т. А., Шварц М. З., Шуман В. Б. Характеристики кремниевых многопереходных солнечных элементов с вертикальными $p - n$ -переходами // Физика и техника полупроводников. — 1997. — Т. 31, № 7. — С. 855–857.

[Guk E. G., Nalet T. A., Shvarts M. Z., Shuman V. B. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. Vol. 31, N 7. P. 855]

3. Воронков В. Б., Гук Е. Г., Козлов В. А. и др. Использование твердофазного прямого сращивания кремния для формирования структур солнечных элементов с вертикальными $p - n$ -переходами // Физика и техника полупроводников. — 1998. — Т. 32, № 7. — С. 886–888. [Voronkov V. B., Guk E. G., Kozlov V. A. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1998. Vol. 32, N 7. P. 886]

4. Корольченко А. С., Ившин П. А. Кремниевые высоковольтные многопереходные солнечные батареи – новые технологии // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. — Москва: НИИ «Квант», 2010. — № 27. — С. 10–13. [Korol'chenko A. S., Ivshin P. A. // Avtonomnaya energetika: tekhnicheskii progress i ekonomika. Moskva: NPP «Kvant», 2010. N 27. P. 10]

5. ATLAS User's Manual. — Santa Clara, CA: Silvaco, 2004.

6. Польский Б. С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. — Рига: Зинатне, 1986. [Pol'skii B. S. Chislennoe modelirovanie poluprovodnikovyykh priborov. Riga. Zinatne, 1986]

Дата поступления рукописи
в редакцию 08.09 2011 г.

Gnilenko A. B., Dzenzersky V. A., Plaksin S. V., Pogorelaya L. M. The influence of silicon wafer thickness on characteristics of multijunction solar cells with vertical $p - n$ -junctions.

Keywords: multijunction solar cell, vertical $p - n$ -junction, silicon wafer, computer simulation, Silvaco TCAD software package.

A multijunction silicon solar cell with vertical $p - n$ junctions consisted of four serial $n^+ - p - p^+$ -structures was simulated using Silvaco TCAD software package. The dependence of solar cell characteristics on the silicon wafer thickness is investigated for a wide range of values.

Ukraine, Dnepropetrovsk, Institute of Transport Systems and Technologies of NASU.

Гниленко О. Б., Дзензерський В. О., Плаксін С. В., Погоріла Л. М. Вплив товщини кремнієвих пластин на характеристики багатоперехідних сонячних елементів з вертикальними $p - n$ -переходами.

Ключові слова: багатоперехідний сонячний елемент, вертикальний $p - n$ -перехід, кремнієва пластина, комп'ютерне моделювання, програмний пакет Silvaco TCAD.

Проведено комп'ютерне моделювання багатоперехідного кремнієвого сонячного елементу з вертикальними $p - n$ -переходами, що складається з чотирьох послідовно з'єднаних $n^+ - p - p^+$ -структур. Розрахунки виконано за допомогою програмного пакета Silvaco TCAD. Досліджено залежність основних характеристик сонячного елемента від товщини кремнієвих пластин в широкому діапазоні значень.

Україна, м. Дніпропетровськ, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ.