

К. ф.-м. н. А. Б. ГНИЛЕНКО², к. т. н. Ю. Н. ЛАВРИЧ¹, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН¹

Украина, г. Днепропетровск, ¹Институт транспортных систем и технологий НАН Украины,

²Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: svp@westa-inter.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТАНДЕМНОГО МОНОЛИТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА Si/Ge С БУФЕРНЫМ СЛОЕМ Si_{1-x}Ge_x

Проведено компьютерное моделирование тандемного монокристаллического солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем Si_{1-x}Ge_x, получены вольт-амперные характеристики, рассчитаны фотовольтаические параметры и найдено распределение основных физических величин. Показано, что добавление второго германиевого каскада позволяет существенно повысить коэффициент полезного действия кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, тандемный солнечный элемент, буферный слой, Silvaco TCAD, диффузионно-дрейфовая модель, вольт-амперная характеристика, КПД.

Уже несколько десятилетий кремний является полупроводниковым материалом, наиболее широко используемым в солнечной энергетике. Однако, имея ширину запрещенной зоны приблизительно 1,1 эВ, кремний плохо поглощает фотоны, приходящиеся на «красную» и «инфракрасную» области солнечного спектра. Для эффективного использования длинноволновой части спектра желательным было бы дополнить кремний еще одним полупроводниковым материалом с меньшей шириной запрещенной зоны, применяя принцип разделения спектра, характерный для многопереходных солнечных элементов [1]. Очевидно, что наилучшим выбором здесь является германий. Обладая шириной запрещенной зоны примерно 0,66 эВ, германий способен эффективно поглощать низкоэнергетические фотоны. Коэффициент поглощения Ge больше, чем у Si, причем не только в длинноволновой части спектра. Германий, к тому же, известен как превосходный материал для подложки, на котором успешно выращиваются соединения A^{III}BV по хорошо отработанным технологиям.

Проблема соединения Si и Ge в одной тандемной структуре связана, прежде всего, со значительным отличием постоянных решеток этих полупроводниковых материалов – приблизительно 4,2%. При такой разнице процесс выращивания высококачественного слоя Si на подложке из Ge или наоборот является трудновыполнимым, поскольку при выращивании, например, слоя Si в него неизбежно будут внедряться дислокации, порождаемые несогласованностью кристаллических решеток материалов. Концентрация таких проникающих дислокаций может быть настолько высокой, что фотовольтаические свойства материала будут в значительной степени ухудшены. Например, сни-

зится подвижность носителей заряда, в особенности неосновных, и тем самым будет уменьшена эффективность фотоэлектрического преобразования [2].

Наиболее распространенным способом уменьшения концентрации проникающих дислокаций является выращивание промежуточных буферных слоев с постепенно изменяющейся постоянной решетки. Такие слои снимают напряжение решетки, препятствуя распространению дислокаций. Для тандемного солнечного элемента Si/Ge естественным материалом для буферного слоя является соединение Si_{1-x}Ge_x со ступенчато изменяющейся концентрацией компонентов. Технология выращивания, характеристики и особенности использования Si_{1-x}Ge_x буферных слоев достаточно хорошо изучены благодаря многочисленным попыткам создания каскадных солнечных элементов путем выращивания слоев A^{III}BV на кремниевой подложке [2–4]. Еще одним подходом является использование сверхрешеток из тонких чередующихся слоев Si и Ge [5, 6]. В [5] исследована n⁺–p–p⁺–структура из кремния толщиной 1 мкм, в которую для использования «красной» и ближней «инфракрасной» части солнечного спектра встроена сверхрешетка из чередующихся наноразмерных слоев Si и Ge с собственной концентрацией носителей. Такой солнечный элемент показал при моделировании эффективность на уровне 10,16%. Тандемный солнечный элемент Si/Ge с расположенным между каскадами коммутирующим туннельным диодом, образующим гетеропереход Si–Ge, рассмотрен в [7]. При этом предполагалось, что дислокации, вызванные несогласованностью постоянных кристаллических решеток Si и Ge, локализованы только на гетеропереходе между слоями Si и Ge туннельного дио-

да и не проникают в толщу фотоактивных слоев, что, однако, не отражает реальных физических процессов в подобном устройстве.

В настоящей статье представлены результаты компьютерного исследования характеристик тандемного солнечного элемента Si/Ge, в конструкции которого используется буферный слой $Si_{1-x}Ge_x$, расположенный между кремниевым каскадом и германиевым туннельным диодом.

Метод моделирования

В настоящее время для математического моделирования в микроэлектронике используют программные системы приборно-технологического проектирования TCAD, при помощи которых можно проводить сквозное моделирование полупроводниковых устройств от процесса формирования устройства и до расчета полного набора его характеристик [8]. В данной работе была использована одна из таких систем — программный пакет Silvaco TCAD [9], ориентированный на решение всего комплекса конструкторско-технологических задач, связанных как с моделированием технологического маршрута формирования полупроводникового устройства, так и с анализом электрических характеристик уже готового устройства. Структура программного пакета Silvaco TCAD представлена на рис. 1.

Основой Silvaco TCAD являются два взаимно интегрированных программных компонента: программа для моделирования технологических процессов изготовления полупроводниковых устройств Athena и программа для расчета электрических характеристик Atlas. Совместное использование компонентов Athena и Atlas в едином процессе сквозного моделирования позволяет исследовать влияние параметров и условий технологических процессов формирования полупроводниковых устройств на их выходные электрические характеристики [10]. Поскольку объектами настоящего исследования являлись гото-

вые полупроводниковые устройства, при моделировании использовался только компонент Atlas.

Из возможных моделей переноса выбрана диффузионно-дрейфовая, адекватно описывающая физические процессы, проходящие в полупроводниковых устройствах, и успешно применявшаяся ранее в [11, 12]. Эта модель применима практически ко всем полупроводниковым устройствам, кроме, разве что, структур сверхмалого размера. Диффузионно-дрейфовая математическая модель представляет собой систему фундаментальных уравнений, связывающих электростатический потенциал и концентрацию носителей заряда внутри рассматриваемой области. К этим уравнениям относятся уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и транспортные уравнения. Процессы рекомбинации описываются в рамках рекомбинационной модели Шокли – Рида – Холла, учитывающей уровни легирования. Также принимаются во внимание Оже-рекомбинация и уменьшение ширины запрещенной зоны. Модель подвижности носителей заряда, зависящей от концентрации примеси, основана на собственных эмпирических данных системы Atlas. Для монокристаллических многослойных структур с коммутирующими каскадами туннельными диодами учитываются физические процессы туннелирования на специально подобранных координатных сетках.

Уравнение Пуассона связывает электростатический потенциал Ψ с объемной плотностью заряда ρ :

$$\text{div}(\epsilon \nabla \Psi) = -\rho,$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Электрическое поле определяется как градиент потенциала:

$$\vec{E} = -\nabla \Psi.$$

Уравнения непрерывности для электронов и дырок задаются выражениями

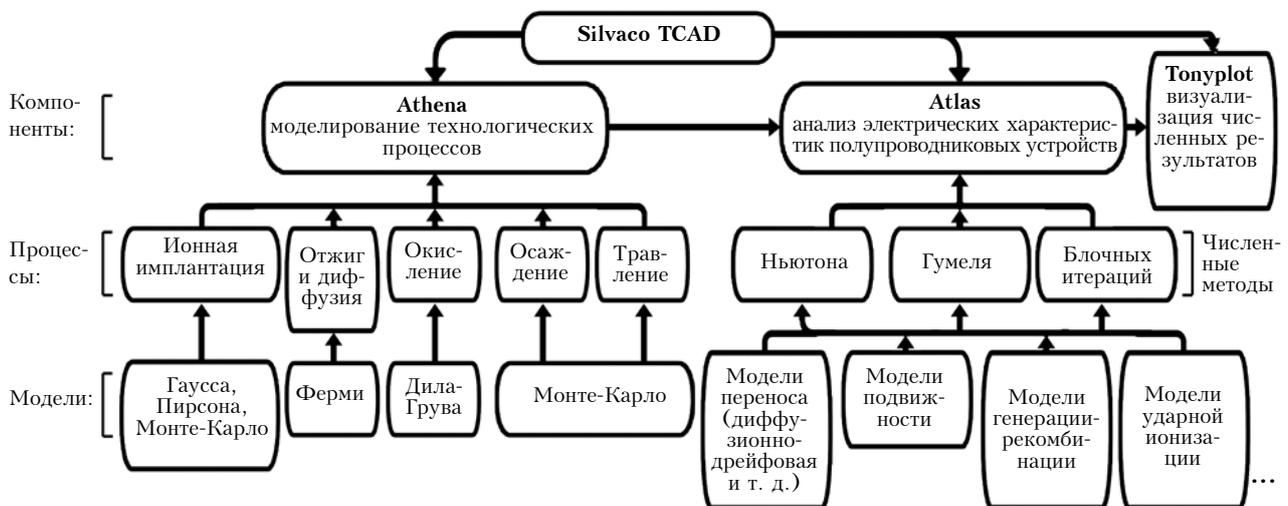


Рис. 1. Взаимосвязь компонентов интегрированной системы моделирования Silvaco TCAD

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

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

где n, p – значения концентрации электронов и дырок, а также индексы в обозначении соответствующих им величин;

$\vec{J}_{n,p}$ – плотность тока;

$G_{n,p}$ – коэффициенты генерации;

$R_{n,p}$ – коэффициенты рекомбинации;

q – заряд электрона.

Вид транспортных уравнений, определяющих значения плотности электронного и дырочного токов, зависит от модели переноса. Преимуществом выбранной диффузионно-дрейфовой модели является то, что кроме Ψ, n и p в ней не используются никакие другие независимые величины. В рамках этой модели транспортные уравнения обычно формулируются в виде уже готовых решений для токов:

$$\vec{J}_n = qn \mu_n \vec{E}_n + qD_n \nabla n;$$

$$\vec{J}_p = qp \mu_p \vec{E}_p - qD_p \nabla p,$$

где $\mu_{n,p}$ – значения подвижности носителей заряда, определяемые в Atlas по эмпирическим данным;

$\vec{E}_{n,p}$ – эффективное электрическое поле;

$D_{n,p}$ – коэффициенты диффузии.

Значения $\vec{E}_{n,p}$ вычисляются по формулам

$$\vec{E}_n = -\nabla \left(\psi + \frac{kT_L}{q} \ln n_{ie} \right);$$

$$\vec{E}_p = -\nabla \left(\psi - \frac{kT_L}{q} \ln n_{ie} \right),$$

где T_L – абсолютная температура решетки;

n_{ie} – эффективная собственная концентрация носителей заряда (определяется из эмпирических формул).

Коэффициенты диффузии определяются из соотношений Эйнштейна в рамках статистики Больцмана в виде

$$D_n = \frac{kT_L}{q} \mu_n; \quad D_p = \frac{kT_L}{q} \mu_p.$$

Процессы рекомбинации описываются согласно рекомбинационной модели Шокли – Рида – Холла, учитывающей уровни легирования, как

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

где $\tau_{n,p}$ – время жизни носителей заряда;

N_Σ – суммарная концентрация доноров и акцепторов [13].

Результаты моделирования

В качестве объекта моделирования был выбран изображенный на **рис. 2** тандемный монокристаллический солнечный элемент Si/Ge, между каскадами которого расположен буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со ступенчато изменяющимся соотношением компонентов. Солнечный элемент состоит из двух каскадов. Верхний каскад образован тонким слоем кремния с гомогенным p – n -переходом, толщина эмиттера и базы, соответственно, 1 и 6 мкм. Нижний каскад образован гомогенным p – n -переходом в слое германия, толщина эмиттера и базы, соответственно, 1 и 90 мкм. Каскады коммутируются туннельным диодом, образованным гомогенным p – n -переходом в высоколегированном слое германия толщиной 0,1 мкм. Между германиевым туннельным диодом и кремниевым верхним каскадом размещен буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, предназначенный для уменьшения рассогласования значений постоянных решетки Si и Ge. Буферный слой состоит из десяти слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со ступенчато изменяющимся от чистого кремния до чистого германия соотношением компонентов. При моделировании электроды считались бесконечно тонкими, фактор затенения контактной сеткой не учитывался.

Для моделирования данного солнечного элемента был составлен командный файл, задающий на языке операторов системы Atlas нерегулярную сетку метода конечных разностей, геометрические параметры областей, заполненных однородным материалом, уровни легирования полупроводников, свойства всех используемых материалов, включая их оптические данные, математические модели, выбранные для численного анализа, свойства источника излучения и т. д. Моделирование было выполнено для нормально

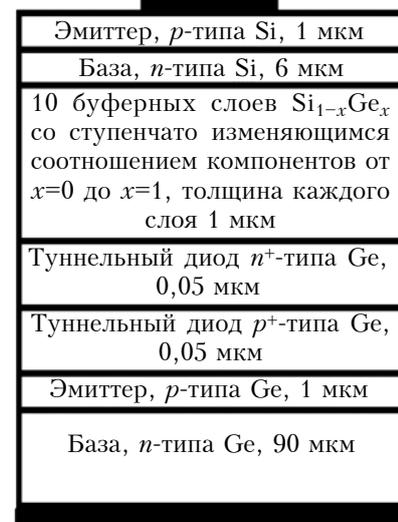


Рис. 2. Схема поперечного сечения тандемного монокристаллического солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

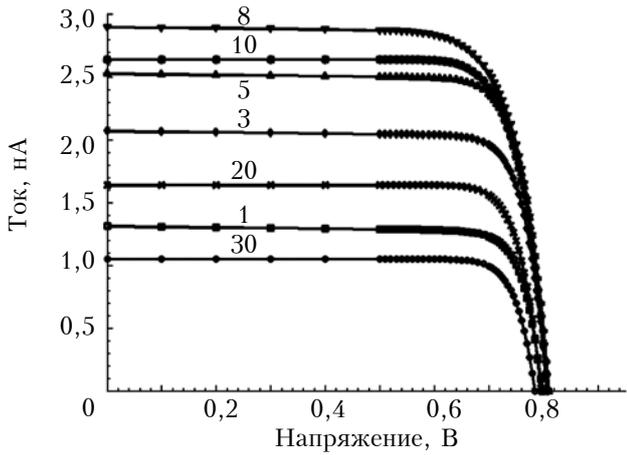


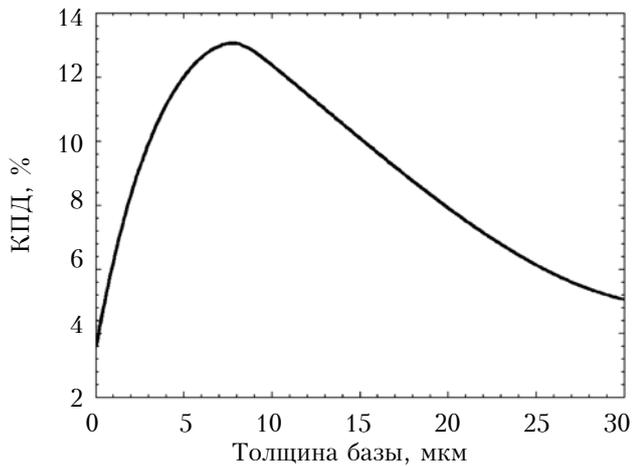
Рис. 3. ВАХ тандемного монокристаллического солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при различной толщине базового слоя верхнего Si каскада (указана в мкм возле кривых)

ориентированного солнечного освещения с интенсивностью 1 солнце при условиях освещенности АМ0.

В данном исследовании проводился анализ поведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и основных фотовольтаических параметров в зависимости от толщины верхнего кремниевого каскада и буферных слоев рассматриваемого солнечного элемента. Из приведенных на рис. 3 ВАХ видно, что изменение толщины этого слоя значительно влияет на ток короткого замыкания и несущественно сказывается на напряжении холостого хода. Ток короткого замыкания достигает наибольшего значения при толщине базового слоя верхнего каскада 8 мкм. Влияние толщины базового слоя верхнего каскада на значение коэффициента полезного действия солнечного элемента показано на рис. 4, а.

При исследовании влияния толщины буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на основные фотовольтаические

а)



б)

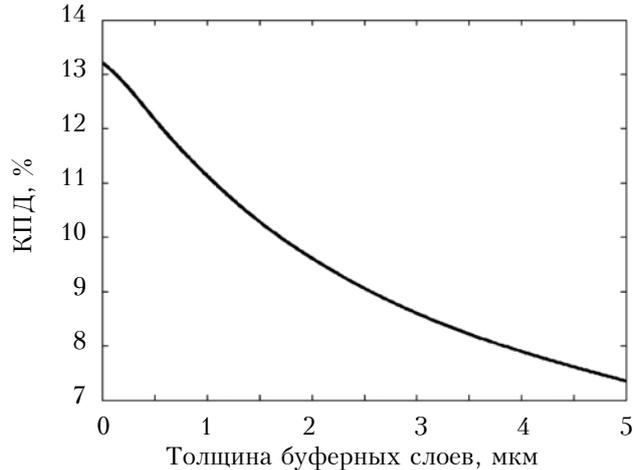
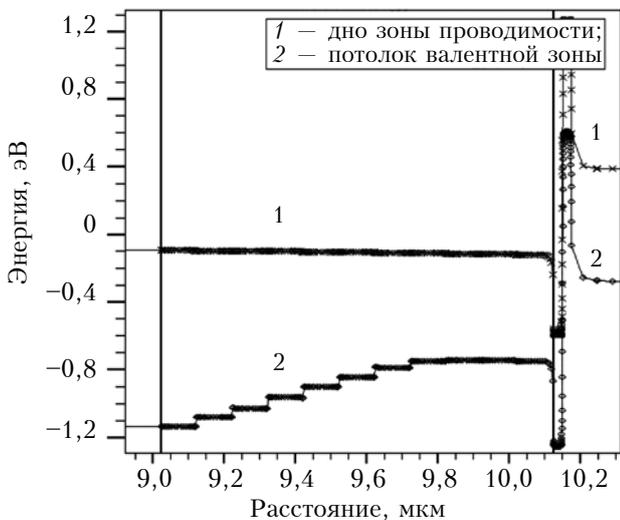


Рис. 4. Зависимость КПД элемента от толщины базового слоя верхнего Si каскада (а) и от толщины буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (б)

а)



б)

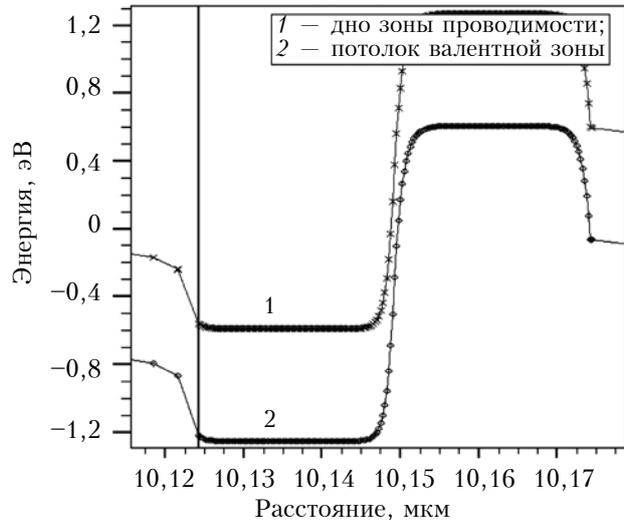


Рис. 5. Энергетическая зонная структура в области буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (а) и в области германиевого туннельного диода (б)

ские параметры солнечного элемента толщина одного слоя варьировалась в пределах от 0,01 до 5,0 мкм. Расчеты проводились для 10 слоев одинаковой толщины, но с разным соотношением входящих в соединение компонентов.

На основании приведенного на рис. 4, б графика можно сделать вывод о том, что уменьшение толщины буферных слоев приводит к увеличению эффективности солнечного элемента. Однако при этом следует заметить, что чем больше толщина буферных слоев, тем лучше снимается напряжение решетки и, соответственно, в большей степени уменьшается плотность дислокаций, отрицательно сказывающихся на фотовольтаических характеристиках. Поскольку плотность дислокаций в используемой модели не учитывается, изменение этого параметра не отражается на поведении фотовольтаических характеристик.

На рис. 5 показана энергетическая структура солнечного элемента, отображающая положение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны в области размещения буферного слоя и туннельного диода. Вертикальные линии отмечают границы раздела между различными полупроводниковыми материалами. На рис. 5, а показан ступенчатый характер изменения ширины запрещенной зоны буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при изменении долевого состава компонентов от чистого Si к чистому Ge. На рис. 5, б более детально показана энергетическая структура германиевого туннельного диода.

Результаты моделирования распределения скорости фотогенерации в тандемном солнечном элементе с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ приведены на рис. 6. Здесь видно, что скорость фотогенерации и в кремнии, и германии экспонен-

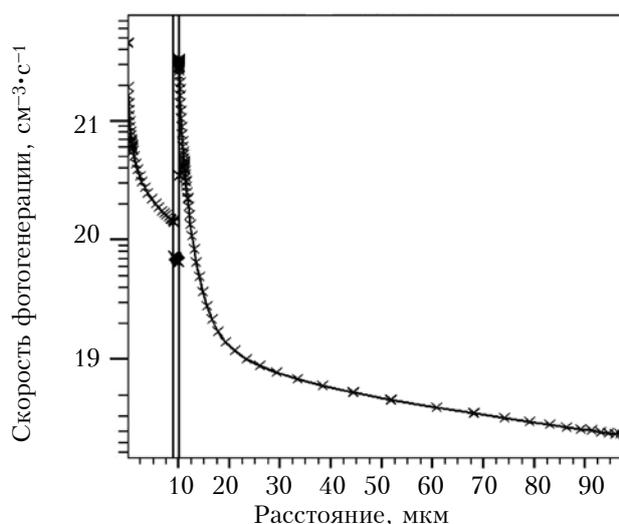


Рис. 6. Распределение скорости фотогенерации в тандемном монокристаллическом солнечном элементе Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

циально уменьшается по мере прохождения излучения вглубь материала. Легко заметить, что уменьшение скорости фотогенерации намного больше при прохождении излучения через нижний, германиевый каскад, чем через верхний, кремниевый (это объясняется различием значений коэффициентов поглощения). В буферном слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ скорость фотогенерации оказывается меньшей, чем в каскадах тандемного солнечного элемента. По этой причине при увеличении толщины буферного слоя эффективность солнечного элемента снижается.

Выводы

На основании проведенного при помощи компьютерного пакета Silvaco TCAD моделирования тандемного монокристаллического солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ было установлено, что его эффективность достигает 13%. Аналогичное моделирование «стандартного» однопереходного кремниевого солнечного элемента тех же размеров и структуры показало, что его эффективность не превышает 10–11%. Таким образом, переход к тандемному солнечному элементу Si/Ge позволяет повысить коэффициент полезного действия кремниевых фотоэлектрических преобразователей как минимум на четверть. При этом немаловажным является и то, что использование буферного слоя между каскадами позволяет снизить напряжение решетки при переходе от Ge к Si и тем самым уменьшить плотность дислокаций до приемлемого уровня, а следовательно, и их влияние на характеристики солнечного элемента.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Luque A., Hegedus S. Handbook of photovoltaic science and engineering. — John Wiley & Sons Ltd, 2003.
2. Ringel S.A., Carlin J.A., Andre C.L. et al. Single-junction InGaP/GaAs solar cells grown on Si substrates with SiGe buffer layers // Progress in photovoltaics: Research and applications. — 2002. — Vol. 10, iss. 6. — P. 417–426. — <http://dx.doi.org/10.1002/pip.448>
3. Пулято М.А., Семягин Б.Р., Емельянов Е.А. и др. Молекулярно-лучевая эпитаксия структур GaAs/Si(001) для высокоэффективных тандемных $A^{III}B^V$ /Si-преобразователей солнечной энергии на активной кремниевой подложке // Изв. Вузов. Физика. — 2010. — № 9. — С. 26–33.
4. Fitzgerald E.A., Currie M.T., Samavedam S.B. et al. Dislocations in relaxed SiGe/Si heterostructures // Phys. Status Solidi (a). — 1999. — No. 171. — P. 227–238. — [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-396X\(199901\)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1521-396X(199901)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y)
5. Zulkefle A.A., Zainon M., Zakaria Z. et al. Numerical modeling of silicon/germanium (Si/Ge) superlattice solar cells // Proc. of the 7-th WSEAS Int. conf. on Renewable energy sources. — Kuala Lumpur, Malaysia. — 2013. — P. 233–237.
6. Varonides A.C. High efficiency solar cells via tuned superlattice structures: Beyond 42,2% // In book: Solar cells — new aspects and solutions / Ed. by L. Kosyachenko. — InTech, 2011. — Chapter 15. — <http://dx.doi.org/10.5772/23510>

7. Sun G., Chang F., Soref R.A. High efficiency thin-film crystalline Si/Ge tandem solar cell // Optics express. — 2010. — Vol. 18, iss. 4. — P. 3746–3753. — <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.003746>

8. Глушко А.А., Родионов И. А., Макаруч В. В. Моделирование технологии изготовления субмикронных КМОП СБИС с помощью систем TCAD // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 4. — С. 32–34.

9. Simulation standard: Simulating solar cell devices using Silvaco TCAD. — 2008. — Vol. 18. — N 2.

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

11. Гниленко А.Б., Дзензерский В.А., Плаксин С.В. и др. Влияние толщины кремниевых пластин на характери-

стики многопереходных солнечных элементов с вертикальными р–п-переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 1. — С. 27–29.

12. Гниленко А.Б., Плаксин С.В., Погорелая Л.М., Дзензерский В.А. Моделирование кремниевого солнечного элемента с вертикальным р–п переходом // Відновлювана енергетика. — 2013. — № 2. — С. 37–44.

13. Польский Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. — Рига: Зинатне, 1986.

Дата поступления рукописи
в редакцию 07.07 2015 г.

О. Б. ГНИЛЕНКО, Ю. М. ЛАВРИЧ, С. В. ПЛАКСИН

Україна, м. Дніпропетровськ, Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: svp@westa-inter.com

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТАНДЕМНОГО МОНОЛІТНОГО СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА Si/Ge З БУФЕРНИМ ШАРОМ Si_{1-x}Ge_x

Проведено комп'ютерне моделювання тандемного монолітного сонячного елемента Si/Ge з буферним шаром Si_{1-x}Ge_x, одержано вольт-амперні характеристики, розраховано фотовольтаїчні параметри і знайдено розподіл основних фізичних величин. Показано, що додатковий германієвий каскад дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії кремнієвих фотоелектричних перетворювачів.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, тандемний сонячний елемент, буферний шар, Silvaco TCAD, дифузійно-дрейфова модель, вольт-амперна характеристика, ККД.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.28
UDC 621.383.51

A. B. GNILENKO², Yu. N. LAVRICH¹, S. V. PLAKSIN¹
Ukraine, Dnipropetrovsk, ¹Institute of Transport Systems
and Technologies of NAS of Ukraine,
²Oles Honchar Dnipropetrovsk National University
E-mail: svp@westa-inter.com

SIMULATING CHARACTERISTICS OF Si/Ge TANDEM MONOLITHIC SOLAR CELL WITH Si_{1-x}Ge_x BUFFER LAYER

In spite of many efforts to propose new semiconductor materials and sophisticated constructions of solar cells, crystalline silicon remains the main photovoltaic material widely used up to now. There are various methods to enhance the efficiency of silicon solar cells. One of them is to combine silicon with an additional semiconductor material with the different bandgap to form a tandem construction. For example, the germanium sub-cell used as the bottom cascade for the silicon sub-cell in the tandem monolithic solar cell makes it possible to utilize the "red" sub-band of solar spectra increasing overall solar cell efficiency. The problem of the 4.2% mismatch in lattice constant between Si and Ge can be resolved in such a case by the use of SiGe buffer layer. In the paper the results of the computer simulation for Si/Ge tandem monolithic solar cell with Si_{1-x}Ge_x buffer layer are presented. In the solar cell under consideration, the step graded Si_{1-x}Ge_x buffer layer is located between the top silicon and the bottom germanium cascades to reduce the threading dislocation density in mismatched materials. The cascades are commutated by the use of the germanium tunnel diode between the bottom sub-cell and the buffer layer. For the solar cell modeling, the physically-based device simulator ATLAS of Silvaco TCAD software is employed to predict the electrical behavior of the semiconductor structure and to provide a deep insight into the internal physical processes. The voltage-current characteristic, photovoltaic parameters and the distribution of basic physical values are obtained for the investigated tandem solar cell. The influence of layer thicknesses on the photovoltaic parameters is studied. The calculated efficiency of the tandem solar cell reaches 13% which is a quarter more than the efficiency of a simple silicon solar cell with the same constructive parameters and under the same illumination conditions.

Keywords: photovoltaic cell, tandem solar cell, buffer layer, Silvaco TCAD, drift-diffusion model, voltage-current characteristics, efficiency.

REFERENCES

1. Luque A., Hegedus S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons Ltd, 2003, 1138 p.
2. Ringel S.A., Carlin J.A., Andre C.L., Hudait M.K., Gonzalez M., Wilt D.M., Clark E.B., Jenkins P., Scheiman D., Allerman A., Fitzgerald E.A., Leitz C.W. Single-junction InGaP/GaAs solar cells grown on Si substrates with SiGe buffer layers. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2002, vol. 10, iss. 6, pp. 417-426. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.448>
3. Putyato M.A., Semyagin B.R., Emel'yanov E.A., Pakhanov N.A., Preobrazhenskii V.V. [GaAs/Si(001) molecular beam epitaxy for high-performance tandem A^{III}B^V/Si sun energy converters on active Si substrate]. *Izvestiya vuzov: Fizika*, 2010, no. 9, pp. 26-33. (Rus)
4. Fitzgerald E.A., Currie M.T., Samavedam S.B., Langdo T.A., Taraschi G., Yang V., Leitz C.W., Bulsara M.T. Dislocations in relaxed SiGe/Si heterostructures. *Phys. Status Solidi (a)*, 1999, no. 171, pp. 227-238. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-396X\(199901\)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1521-396X(199901)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y)
5. Zulkefle A.A., Zainon M., Zakaria Z., Sopian K., Amin N. Numerical modeling of silicon/germanium (Si/Ge) superlattice solar cells. *Proc. of the 7-th WSEAS Int. Conf. on Renewable energy sources*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013, pp. 233-237.
6. Varonides A.C. High Efficiency Solar Cells via Tuned Superlattice Structures: Beyond 42,2%. In book: *Solar cells – new aspects and solutions*, chapter 15, ed. by L. Kosyachenko, InTech, 2011. <http://dx.doi.org/10.5772/23510>
7. Sun G., Chang F., Soref R.A. High efficiency thin-film crystalline Si/Ge tandem solar cell. *Optics express*, 2010, vol. 18, iss. 4, pp. 3746-3753. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.003746>
8. Glushko A.A., Rodionov I.A., Makarchuk V.V. [Simulating submicron КМОП SBIS technology using TCAD]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2007, no. 4, pp. 32-34. (Rus)
9. *Simulation Standard: Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD*. 2008, vol. 18, no.2, pp. 1-3.
10. *ATLAS User's Manual*. Santa Clara, CA, Silvaco, 2004.
11. Gnilenko A.B., Dzenzersky V.A., Plaksin S.V., Pogorelaya L.M. [The investigation of silicon wafer thickness influence on characteristics of multijunction solar cells with vertical p–n junctions]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no. 1. pp. 27-29.
12. Gnilenko A.B., Dzenzersky V.A., Plaksin S.V., Pogorelaya L.M. [Simulating Si Solar Cell with vertical p–n junction]. *Vidnovlyuvana energetyka*, 2013, no. 2, pp. 37-44. (Rus)
13. Pol'skii B.C. *Chislennoe modelirovaniye poluprovodnikovyykh priborov* [Numerical simulating semiconductor devices]. Riga, Zinatne, 1986, 168 p. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Матвійків М. Д., Вус Б. С., Матвійків О. М. Елементи та компоненти електронних пристроїв.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Викладено основні відомості про сучасні та перспективні елементи і компоненти електронних пристроїв, зокрема наведено визначення різних видів елементів та компонентів, розглянуто їх призначення, класифікацію, умовні зображення і позначення, будову, роботу, властивості, застосування.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом “Радіоелектронні апарати”, та фахівців, які проектують, виготовляють або обслуговують різноманітні електронні апарати, зокрема аудіо- та відеотехніку, електронні обчислювальні машини, мікропроцесори та персональні комп’ютери, медичні апарати, засоби зв’язку, контрольно-вимірювальні прилади, робототехніку, автоматизовані системи проектування та управління тощо.

НОВЫЕ КНИГИ



Барішніков Г. В., Волинюк Д. Ю., Гельжинський І. І., Готра З. Ю., Мінаєв Б. П., Стахіра П. Й., Черпак В. В. Органічна електроніка.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Наведено основні постулати квантової механіки для органічної електроніки. Описано базові структури та особливості функціонування нанорозмірних елементів, пристроїв електронної техніки: сонячних фотоелементів, світловопроміньовальних структур, транзисторних структур, сенсорів тощо. Розглянуто фізико-хімічні основи технології створення електронних структур органічної електроніки.

Для студентів та аспірантів, які навчаються за напрямом електроніки.