

УДК 621.383.51

А.Б.Гниленко, канд.физ.-мат.наук (Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск),
В.А.Дзензерский, докт.техн.наук, **С.В.Плаксин**, докт.физ.-мат.наук, **Л.М.Погорелая**
(Ин-т транспортных систем и технологий НАН Украины "Трансмаг", Днепропетровск)

Моделирование кремниевого солнечного элемента с вертикальным $p-n$ переходом

Проведено компьютерное моделирование кремниевого солнечного элемента с вертикальным $p-n$ переходом при помощи программного пакета Silvaco TCAD. Исследована зависимость основных характеристик солнечного элемента от толщины кремниевой пластины и проведено сравнение с фотоэлектрическим преобразователем традиционной планарной конструкции, который сформирован по аналогичному технологическому процессу.

Проведено комп'ютерне моделювання кремнієвого сонячного елемента з вертикальним $p-n$ переходом за допомогою програмного пакета Silvaco TCAD. Досліджено залежність основних характеристик сонячного елемента від товщини кремнієвої пластини і проведено порівняння з фотоелектричним перетворювачем традиційної планарної конструкції, який сформовано за аналогічним технологічним процесом.

Введение. Солнечная энергетика в последнее время рассматривается как один из самых перспективных элементов в системе энергетической безопасности любой страны. Растет понимание, что солнечная энергия является не просто одним из возобновляемых источников энергии – это, к тому же, действительно неистощимый источник энергии, дающий наименьшее количество загрязнений для планеты. На сегодня солнечная энергетика представляет собой одну из самых динамично развивающихся отраслей в мире с постоянно растущим уровнем инвестиций. Для Украины развитие солнечной энергетике имеет особенное значение, являясь стратегической необходимостью и важнейшим условием для обеспечения как энергетической безопасности, так и энергетической независимости.

Успехи солнечной энергетике как отрасли основаны на последних достижениях в физике и технологии, предлагающих новые, все более эффективные способы преобразования солнечного излучения в электрическую энергию с помощью полупроводниковых солнечных элементов. Над поиском новых конструктивных решений, позволяющих улучшить характеристики фотоэлектрических преобразователей, сделать их применение как можно более привлекательным с экономиче-

ской точки зрения, работает множество исследователей [1]. Одним из перспективных, но мало изученных на сегодняшний день направлений является использование конструкций с вертикальными $p-n$ переходами вместо стандартной планарной схемы построения солнечных элементов [2]. В таких солнечных элементах излучение направлено не по нормали к переходам, как в традиционных планарных конструкциях, а распространяется вдоль $p-n$ переходов. Поскольку поперечный размер этих элементов ограничен длиной пробега носителей заряда, элементарные фотоэлектрические преобразователи, представляющие собой полупроводниковые $n^+ - p - p^+$ структуры, соединяют последовательно, получая так называемые многопереходные солнечные элементы с вертикальными $p-n$ переходами. Многопереходные солнечные элементы с вертикальными $p-n$ переходами исследовались экспериментально в ряде работ [3–5], где были отмечены их преимущества перед традиционной планарной конструкцией, определены основные характеристики и предложены новые конструктивно-технологические решения, касающиеся вопросов изготовления этого класса полупроводниковых устройств. Необходимо отметить, что

очевидным преимуществом вертикального расположения $p-n$ переходов является разделение направления движения носителей заряда и направления переноса фотонов, что дает дополнительные возможности для оптимизации конструкции солнечных элементов и позволяет достичь лучших условий собирания носителей заряда при поддержании оптимальных условий для поглощения солнечного излучения. К другим немаловажным достоинствам солнечных элементов с вертикальными переходами относят отсутствие затеняющей контактной сетки на фронтальной поверхности, лучшую температурную устойчивость и повышенную спектральную чувствительность. В многопереходных солнечных элементах появляется возможность получать высокие напряжения за счет последовательного соединения $n^+ - p - p^+$ структур, а большая площадь контакта между этими структурами позволяет снизить последовательное сопротивление. Дополнительные преимущества можно получить от использования многопереходных структур с вертикальными $p-n$ переходами при создании каскадных солнечных элементов. В этом случае двусторонняя прозрачность многопереходных $n^+ - p - p^+$ структур, формирующих каждый

каскад, и отсутствие необходимости переноса электронов и дырок между каскадами позволяет обойтись без коммутирующих каскады туннельных диодов, обычных для планарной конструкции. Кроме того, между каскадами можно поместить непроводящие частотно-селективные брэгговские структуры, которые дополнительно улучшают условия поглощения солнечного излучения и снижают тепловые потери.

Постановка задачи. Исследование солнечных элементов с вертикальными $p-n$ переходами, в частности, многопереходных $n^+ - p - p^+$ структур в работах [3–5], проводилось путем натурального эксперимента, что, с одной стороны, позволяет достоверно и в полном объеме выявить свойства конкретного устройства, но с другой – накладывает ограничения на возможность изучения влияния как можно более широкого набора входных параметров устройства на его характеристики. Решение задач такого рода предполагает проведение вычислительного эксперимента на основе математических моделей, адекватно описывающих физику изучаемых явлений. Поэтому для исследования солнечного элемента с вертикальным $p-n$ переходом, изображенного на рис. 1, в настоящей работе использован

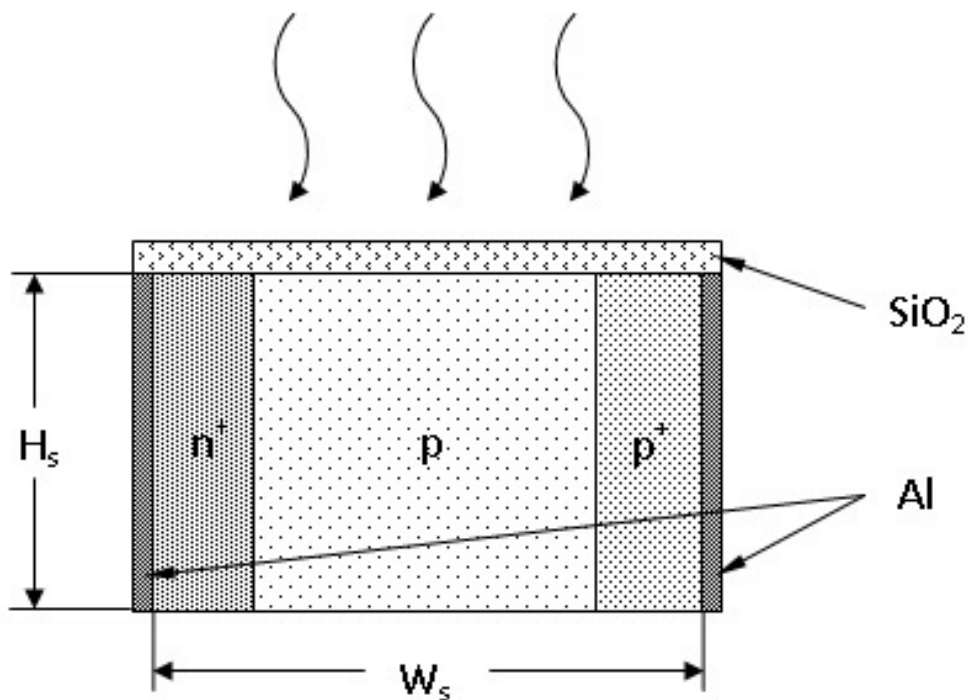


Рис. 1. Солнечный элемент с вертикальным $p-n$ переходом.

программный пакет *Silvaco TCAD*, средства которого позволяют моделировать технологический процесс формирования полупроводниковой структуры, а также определять электрические характеристики полученного устройства. Задачей работы является изучение влияния на основные характеристики солнечного элемента ширины кремниевой пластины, используемой при создании $n^+ - p - p^+$ структуры, а также сравнение характеристик солнечного элемента с вертикальным переходом и традиционного планарного элемента, при формировании которых использованы одни и те же параметры технологического процесса.

Средства моделирования. Математическое моделирование физических процессов в полупроводниковых устройствах начинает играть все более заметную роль, не только дополняя, но и зачастую заменяя традиционные экспериментальные способы исследования. Чем сложнее становятся проектируемые устройства, чем дороже оказывается технология изготовления экспериментальных образцов, тем выгоднее становится применение вычислительного эксперимента вместо традиционного натурального эксперимента, совершаемого часто методом проб и ошибок и не позволяющего эффективно решать задачи оптимизации конструкции полупроводниковых приборов. 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 в одно-, двух- и трех-

мерном приближении [6]. Одной из таких систем является программный пакет *Silvaco TCAD* [7], 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. 2. Основными компонентами *Silvaco TCAD* являются взаимно интегрированные программные средства моделирования технологических процессов изготовления полупроводниковых устройств *Athena* и расчета электрических характеристик *Atlas*. *Athena* позволяет составить технологический маршрут формирования полупроводниковой структуры на основе комбинации таких процессов как ионная имплантация, отжиг, диффузия, осаждение, травление, механическая обработка и т.д. Для моделирования этих процессов используются достаточно строгие математические подходы, такие как, например, аналитические методы на основе функций распределения Гаусса и Пирсона или метод Монте-Карло, при помощи которых формируется имплантационный примесный профиль с заданными характеристиками. В компоненте *Atlas* для анализа электрических характеристик полупроводниковых устройств используются различные модели переноса, в частности, хорошо зарекомендовавшая себя диффузионно-дрейфовая модель, в рамках которой решаются уравнения Пуассона и непрерывности, вместе с моделями подвижности, рекомбинации, ударной ионизации, туннелирования и т.д. Полученные системы уравнений решаются по схеме

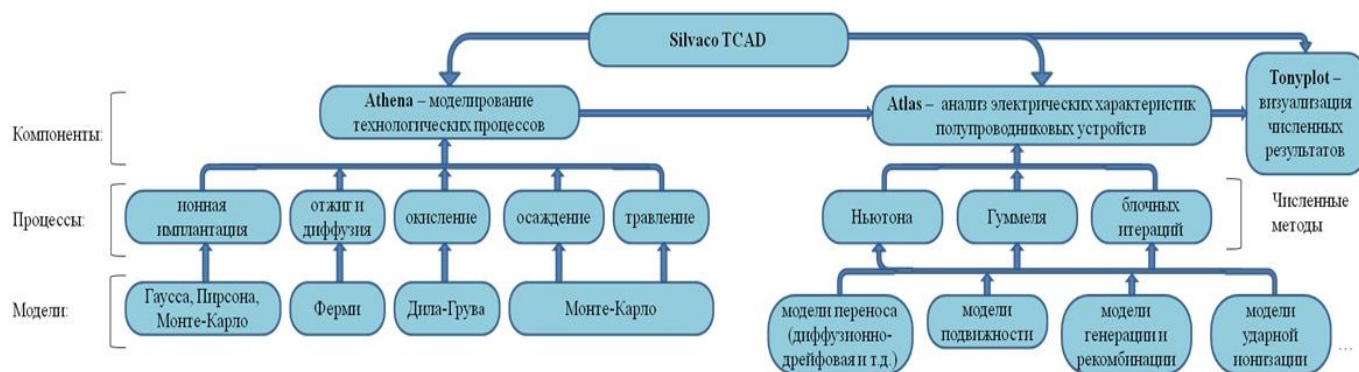


Рис. 2. Схематическое изображение системы моделирования *Silvaco TCAD*.

Гуммеля либо методом Ньютона. При моделировании оптоэлектронных устройств *Atlas* использует соответствующие модели поглощения оптического излучения и фотогенерации. Для решения задач с оптическими источниками могут быть использованы методы геометрической оптики, метод матриц передачи или метод конечных разностей во временной области, учитывающие процессы отражения, преломления, дисперсии и дифракции оптического излучения. 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 [8].

Результаты моделирования. Для создания исследуемой полупроводниковой $n^+ - p - p^+$ структуры был составлен соответствующий технологический маршрут средствами компонента *Athena* программного пакета *Silvaco TCAD*. В качестве исходной структуры использовалась пластина кремния p -типа с концентрацией примеси 10^{14} см^{-3} . На обеих сторонах пластины формировались диффузионные слои методом ионной имплантации. Для создания слоя n^+ -типа использовалась ионная имплантация фосфора с дозой ионов 10^{15} см^{-2} и энергией 100 кэВ; для слоя p^+ -типа – ионная имплантация бора с дозой ионов 10^{15} см^{-2} и энергией 90 кэВ. Далее проводился отжиг полученной структуры при температуре 900°C в течение 30 мин. На торцевую поверхность структуры, являющуюся освещаемой стороной, осаждалось пассивирующее покрытие – слой SiO_2 толщиной 0,01 мкм. Завершалось формирование структуры металлизацией диффузионных слоев алюминием для создания электрических контактов. Полученная $n^+ - p - p^+$ структура освещалась в направлении, параллельном переходам, солнечным светом при условиях освещения AM1,5 и определялись ее основные электрические характеристики средствами компонента *Atlas* программного пакета *Silvaco TCAD*.

Для обычных планарных солнечных элементов возможности оптимизации конструктивных параметров (толщины кремниевой пластины, глубины

залегания диффузионных слоев и т.д.) ограничены только одним направлением, совпадающим с направлением падающего излучения. Это ограничение порождает ряд противоречивых требований к конструкции солнечных элементов, так как, с одной стороны, для улучшения поглощения света в длинноволновой области спектра необходимо увеличивать толщину кремниевой пластины, а с другой – для обеспечения оптимальных условий собирания носителей эту толщину требуется согласовывать с длиной свободного пробега. При создании каскадных солнечных элементов по планарной схеме эти противоречия становятся еще более критичными из-за необходимости обеспечивать свободный переход носителей заряда между каскадами. В то же время солнечные элементы с вертикальными переходами позволяют снять противоречия, разделив направления переноса носителей заряда и фотонов, что дает возможность оптимизировать соответствующие конструктивные параметры независимо друг от друга. При этом изменением толщины W_s кремниевой пластины можно подобрать наилучшие условия собирания носителей заряда, а изменением "высоты" H_s $n^+ - p - p^+$ структуры – найти оптимальные условия для поглощения солнечного излучения.

Для изучения влияния на основные характеристики солнечного элемента с вертикальным $p - n$ переходом толщины кремниевой пластины средствами программного пакета *Silvaco TCAD* (компонент *Atlas*) при различных значениях толщины пластины W_s рассчитывалась вольт-амперная характеристика, из которой определялись ток короткого замыкания и напряжение холостого хода. Поскольку толщина пластины соответствует направлению, в котором происходит перенос носителей заряда, моделирование солнечного элемента проводилось для разных значений времени жизни неосновных носителей, которое является косвенной характеристикой качества кремния и в расчетах обычно варьируется в пределах $10^{-6} - 10^{-4} \text{ с}$ [9]. Результаты расчета представлены на рис. 3 и рис. 4, где отображены зависимости тока короткого замыкания I_{sc} и напряжения холостого хода V_{oc} от толщины кремниевой пластины W_s . Семейства кривых получены для значений времени жизни неосновных

носителей заряда τ_n и τ_p , соответствующих слабому легированию. Как видно из рис. 3, с увеличением толщины кремниевой пластины ток короткого замыкания возрастает, стремясь выйти на некоторый уровень "насыщения", при котором дальнейшее увеличение толщины не приводит к росту количества носителей заряда, участвующих в процессе фотопреобразования солнечного излучения. На величину напряжения холостого хода изменение толщины пластины, как и ожидалось, влияния практически не оказывает, что и демонстрирует рис. 4. На рис. 5 показано влияние толщины кремниевой пластины W_s на коэффициент полезного действия η исследуемой $n^+ - p - p^+$ структуры. Из графика хорошо видно, что коэффициент полезного действия при определенной толщине пластины выходит

на некоторое максимальное значение, соответствующее оптимальным условиям собирания носителей заряда, при которых наибольшее количество носителей заряда способно достичь контактов солнечного элемента. Уменьшение толщины пластины относительно ее оптимального значения уменьшает КПД солнечного элемента за счет сужения эффективной области слаболегированного p -слоя, из которой носители могут достичь перехода. В то же время, увеличение толщины приводит к появлению и расширению области p -слоя, носители из которой не достигают перехода, что и приводит к уменьшению КПД. Улучшение качества материала p -слоя, что отражается в росте времени жизни неосновных носителей заряда, позволяет увеличить значение коэффициента полезного действия.

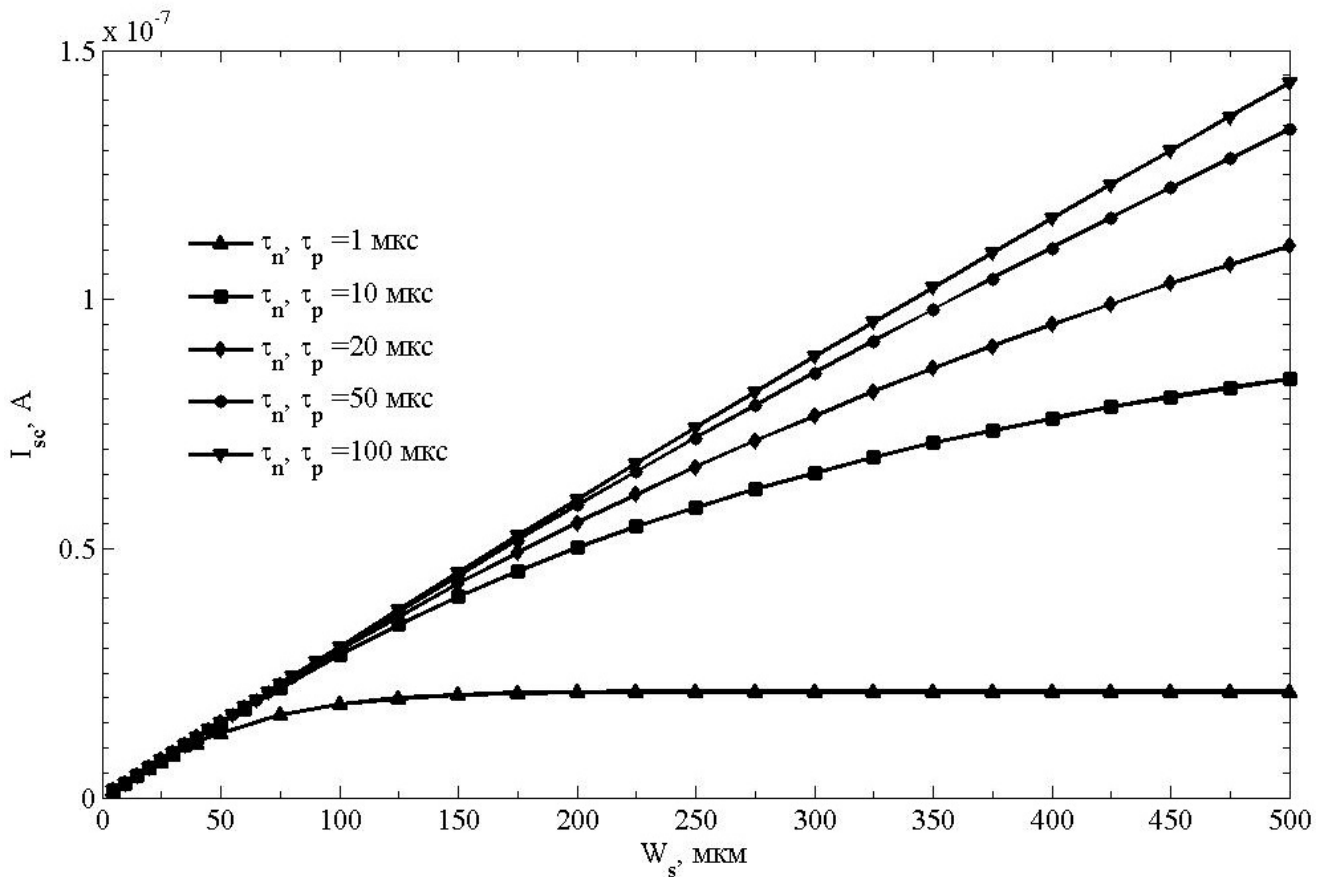


Рис. 3. Зависимость тока короткого замыкания от толщины кремниевой пластины.

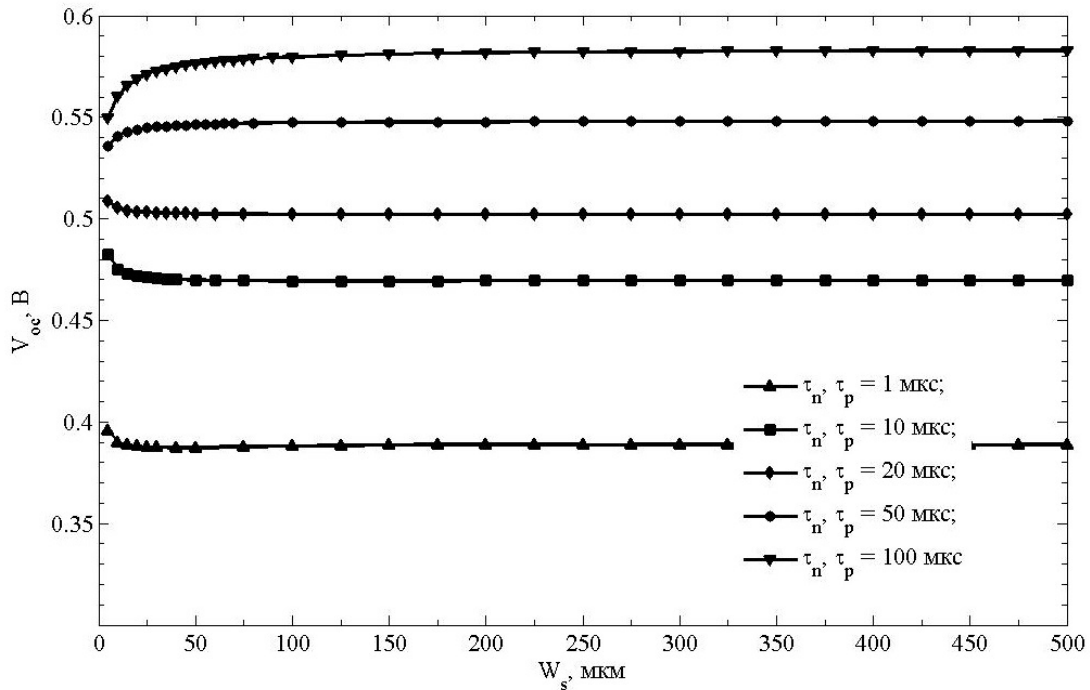


Рис. 4. Зависимость напряжения холостого хода от толщины кремниевой пластины.

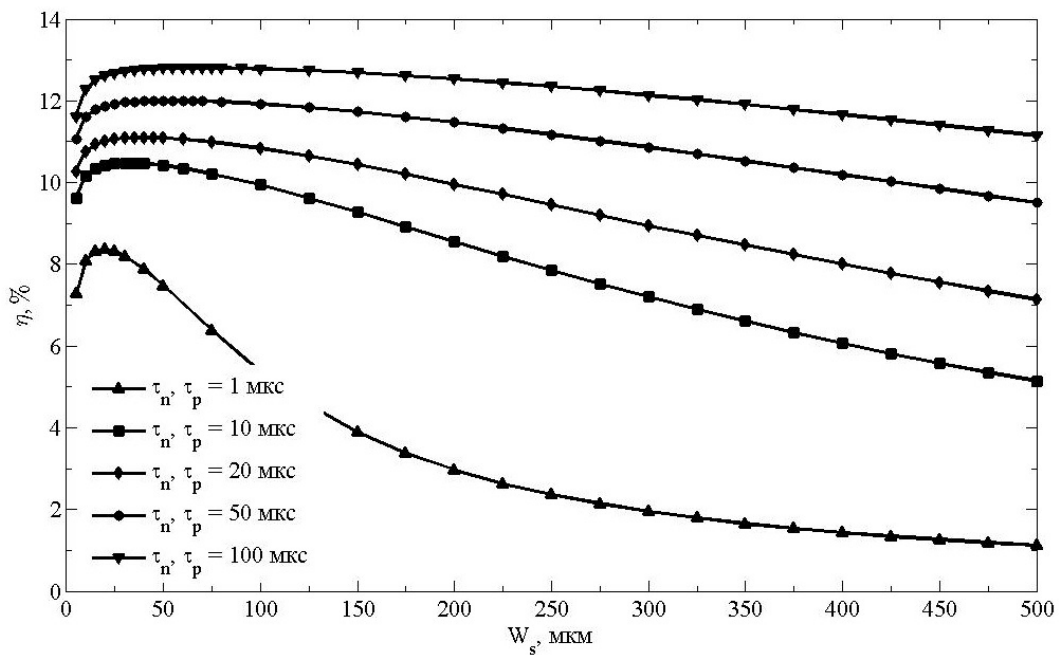


Рис. 5. Зависимость коэффициента полезного действия от толщины кремниевой пластины.

С целью сравнения характеристик солнечного элемента с вертикальным $p-n$ переходом и традиционного планарного солнечного элемента с горизонтальным расположением перехода моделировались вертикальная и планарная $n^+ - p - p^+$ структуры при одинаковых параметрах технологического маршрута в компоненте Athena программного пакета *Silvaco TCAD*. Для Відновлювана енергетика. 2013. № 2

более корректного сравнения в планарном солнечном элементе не учитывалось влияние затенения контактной сеткой, а структура с вертикальным переходом конструировалась с нижним отражающим алюминиевым экраном, изолированным от полупроводника слоем SiO_2 . Толщина кремниевой пластины W_s для планарной структуры определяет ее "вертикальный" размер в на-

правлении солнечного излучения, в то время как для изучаемой структуры с вертикальным переходом этот параметр задает ее размер в поперечном относительно падающего излучения направлении. Время жизни неосновных носителей заряда для обеих структур выбиралось равным 20 нс. Результаты моделирования представлены на рис. 6-8 в виде вольт-амперных характеристик, спектральных характеристик внешней квантовой эффективности и зависимостей коэффициента полезного действия от толщины кремниевой пла-

стины для двух сравниваемых структур. Как видно из графиков, солнечный элемент с вертикальным $p-n$ переходом демонстрирует преимущества перед такой же $n^+ - p - p^+$ структурой, но с планарным расположением перехода, для всех представленных характеристик. Объясняется это возможностью дополнительной оптимизации параметров $n^+ - p - p^+$ структуры с вертикальным $p-n$ переходом за счет разделения направлений переноса зарядов и распространения излучения.

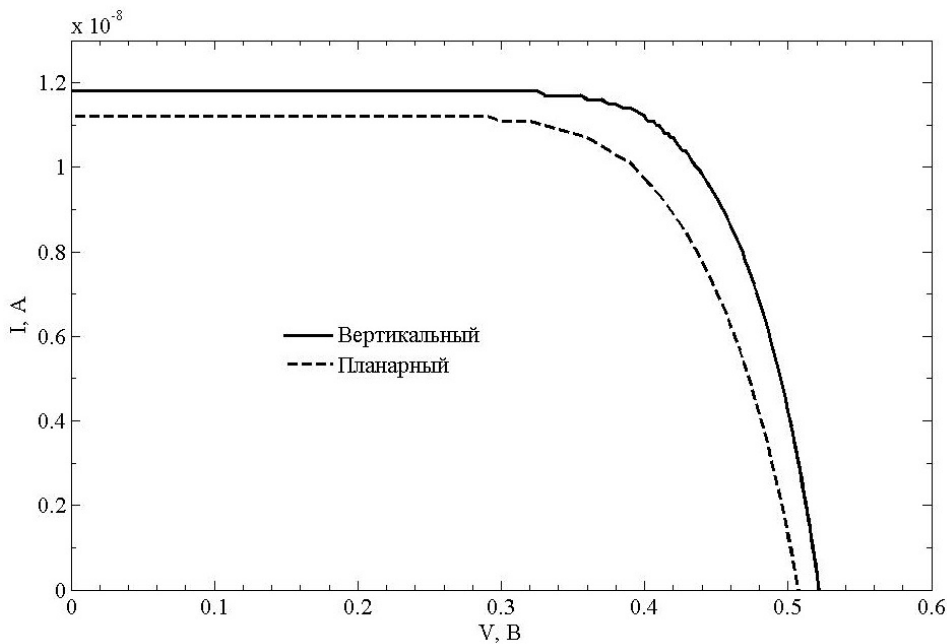


Рис. 6. Сравнение вольт-амперных характеристик солнечных элементов с вертикальным и планарным $p-n$ переходом.

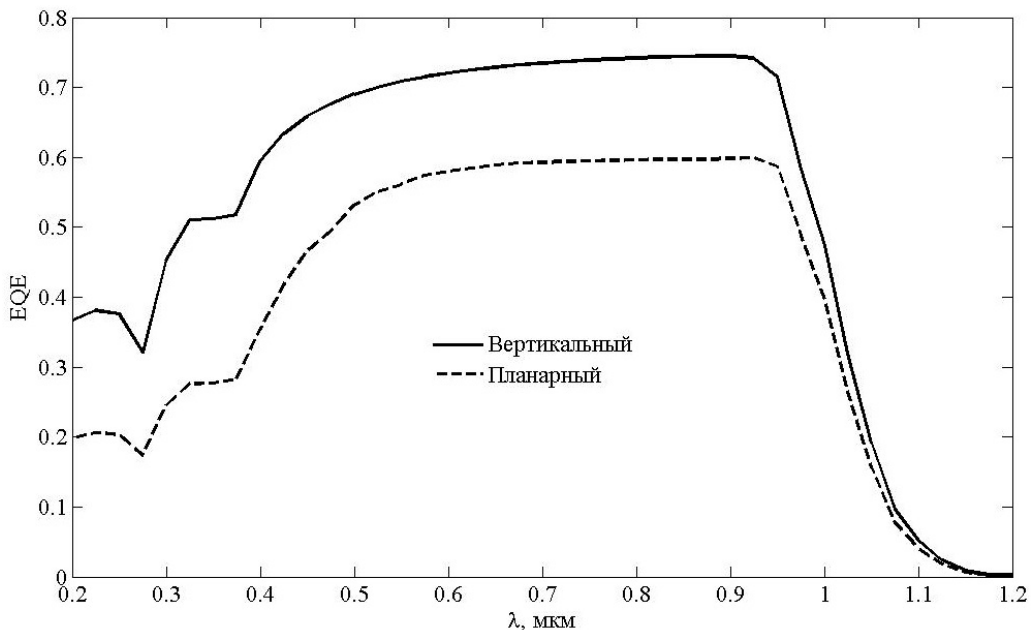


Рис. 7. Сравнение внешней квантовой эффективности солнечных элементов с вертикальным и планарным $p-n$ переходом.

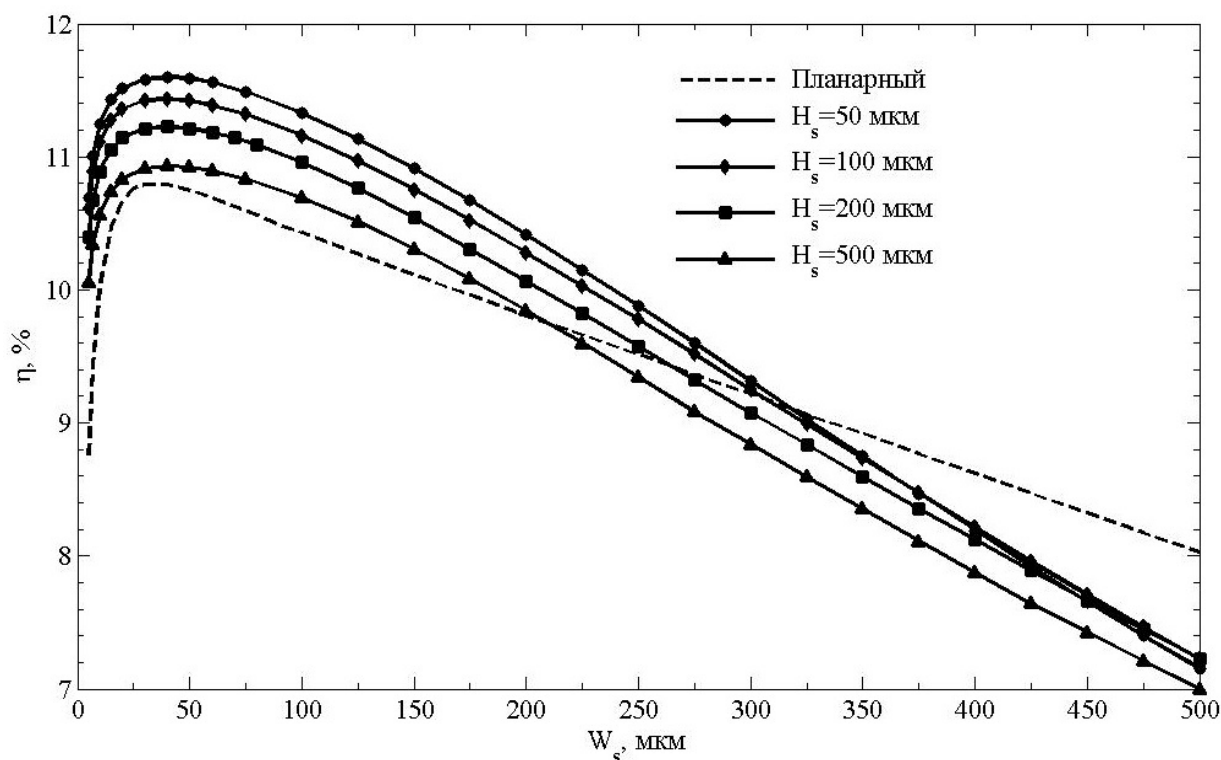


Рис. 8. Сравнение коэффициента полезного действия солнечных элементов с вертикальным и планарным $p-n$ переходом.

Выводы. Компьютерное моделирование солнечного элемента с вертикальным $p-n$ переходом показывает, что такая конструкция обеспечивает дополнительную степень свободы с точки зрения возможности улучшения характеристик. Независимая оптимизация $n^+ - p - p^+$ структуры в направлении излучения и направлении движения носителей заряда позволяет достичь лучших показателей внешней квантовой эффективности и коэффициента полезного действия в сравнении с традиционной планарной конструкцией фотоэлектрического преобразователя.

1. Дзензерский В.А., Плаксин С.В., Шкиль Ю.В. Сравнительный анализ фотоэлектрических преобразователей на основе тонкопленочных аморфных полупроводниковых соединений и кристаллического кремния // Відновлювана енергетика. – 2007. – №3. – С. 16–25.
2. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
3. Гук Е.Г., Налет Т.А., Шварц М.З., Шуман В.Б. Ха-

рактеристики кремниевых многопереходных солнечных элементов с вертикальными $p-n$ переходами // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31. – № 7. – С. 855–857.

4. 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.

5. Корольченко А.С., Ившин П.А. Кремниевые высоковольтные многопереходные солнечные батареи – новые технологии // Журнал НПП "Квант" Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. – 2010. – № 27. – С. 10–13.

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

7. *Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD* // Simulation Standard. – 2008. – Vol. 18. – No.2. – PP. 1–3.

8. A. Lennie, H. Abdullah, S. Shaari, K. Sopian Fabrication of Single Layer SiO₂ and Si₃N₄ as Antireflection Coating on Silicon Solar Cell Using Silvaco Software // American Journal of Applied Sciences. – 2009. – Vol. 6. – No. 12. – pp. 2043–2049.

9. Польский Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. – Рига: Зинатне, 1986. – 168 с.