## Моделирование солнечного элемента с регулярным рельефом поверхности структуры в САПР технологического уровня

Е. Плотникова, к.т.н.<sup>1</sup>, А. Арсентьев, к.т.н.<sup>2</sup>, А. Винокуров, к.т.н.<sup>3</sup>

УДК 620.91 | ВАК 2.2.2

Один из перспективных методов повышения выходных характеристик солнечных элементов (СЭ) – текстурирование поверхности. Современные технологии позволяют создавать поверхности с рельефом различной формы, что позволяет улучшить эффективность СЭ. В статье сравниваются СЭ с различной геометрией поверхности, начиная с классического плоского и заканчивая наиболее эффективным СЭ с поверхностью в виде микроскопических пирамид, разделенных плоскими областями. Для каждой структуры в САПР технологического уровня TCAD настраивались специфические параметры материалов, после чего проводилось моделирование вольт-амперных характеристик и рассчитывалась максимальная мощность исследуемых структур.

#### ВВЕДЕНИЕ

Основным материалом, из которого на протяжении многих лет изготавливают СЭ, является кремний [1, 2]. Изначально использовался монокристаллический кремний, впоследствии – поликристаллический и аморфный кремний. Кроме кремния, перспективными признаны GaAs и твердые растворы на его основе, структуры CIS (CuInSe<sub>2</sub>) и CIGS (Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>), прозрачные металлооксиды (ITO), органика и др. [3]. Разрабатываются также твердые и гибкие структуры, пригодные для использования на рельефных поверхностях [4]. Поверхность ячейки в классическом исполнении гладкая, покрытая защитными светопрозрачными пленками. В зависимости от структуры СЭ пленка может быть диэлектрической и проводящей [5].

Для повышения выходной мощности, а следовательно, и эффективности СЭ применяют различные методы изменения его структуры. Один из таких методов – придание поверхности СЭ рельефа [6, 7].

Современные технологии позволяют создавать рельеф поверхности СЭ различной формы. Среди

поликристаллических структур одним из основных методов повышения эффективности служит использование текстурированной поверхности, на которую наносятся рабочие слои материалов. Сравним электрофизические модели плоского СЭ и СЭ с текстурированными поверхностями различных типов. Обычно поверхность СЭ модифицируют следующим образом: создают крупные пики, мелкие пики, прямоугольные выступы и выступы в виде трапеции.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР СЭ

В данной работе рассматривается моделирование солнечного элемента на подложке из кремния, легированного бором (с концентрацией 10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>). С обратной стороны формируется сильнолегированная область для контакта анода (10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>). Нижний контакт напыляется из прозрачного проводящего металлооксида ITO (толщиной 0,5 мкм). В верхней части кристалла методом ионной имплантации фосфора создается область р-типа проводимости (10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup> на поверхности) толщиной порядка 0,5 мкм. На нее наносится тонкий прозрачный проводящий слой катода из ITO (толщиной 0,1 мкм).

Размеры базовой плоской тестовой 2D-структуры составляют 2 мкм по ширине и 6 мкм в высоту (рис. 1). Для моделирования глубина структуры берется равной 2 мкм (рассматривается квадрат поверхности).

Для формирования рельефа на поверхности структуры перед процессом ионной имплантации вытравливаются

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, доцент, katy-tokra@yandex.ru.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет, доцент, aleksej.box@gmail.com.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Воронежский государственный технический университет, доцент, sasha.vinokurov@mail.ru.

# ОБЪЕДИНИТЕЛЬНАЯ КРОСС-ПЛАТА



Объединительные кросс-платы являются основными элементами при создании промышленных вычислительных систем с расширенным функционалом. Соответствует стандартам PICMG Гарантирует максимально надежную высокопроизводительную работу всей системы Поддерживает функцию Hot Swap Обеспечивает подавление высокочастотных помех Температурный режим работы от – 40 °C до 85 °C



### КОНФИГУРАЦИЯ ИСПОЛНЕНИЙ



Питание +3,3 В

Питание +5 В

Системный слот: слева/справа Форм-фактор: 3U/6U Количество слотов: от 2 до 8

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ



подвижной состав

СЕТЕВЫЕ РЕШЕНИЯ



РОБОТОТЕХНИКА

ВОЕННАЯ ТЕХНИКА



Рис. 1. Структура классического СЭ: а – используемые материалы; б – распределение носителей заряда

области правильной геометрической формы — пирамиды и параллелепипеды различной глубины и высоты стенок (табл. 1).

В ходе исследований перспективной признана структура с пиками пирамидальной формы с высотой пика

0,5 мкм, шириной пика 3 мкм и шириной долины 1 мкм (рис. 2).

Для каждой структуры в САПР TCAD настраивались специфические параметры материалов. Для кремния была задана подвижность носителей заряда, типичная для

Тип поверхности СЭ							
Мелкие пики (структура 1)	Крупные пики (структура 2)	Структура в виде трапеции (структура 3)	Зубчатая структура (структура 4)	Плоская поверхность (структура 5)	Прямоуголь- ный рельеф (структура 6)		
75	55	< 75	< 45	-	0		
3	3	< 3	< 2	-	2		
-	-	< 2	-	-	2		
	Мелкие пики (структура 1) 75 3	Мелкие Крупные пики пики (структура 1) (структура 2) 75 55 3 3 3	Мелкие       Крупные       Структура в         пики       пики       виде трапеции         (структура 1)       (структура 2)       (структура 3)         75       55       < 75	Мелкие       Крупные       Структура в       Зубчатая         пики       пики       структура 2)       структура 3)       структура 4)         75       55       < 75	Мелкие пики (структура 1)       Крупные пики (структура 2)       Структура в виде трапеции (структура 3)       Зубчатая структура (структура 4)       Плоская поверхность (структура 5)         75       55       <75		



-0

### Акционерное общество ИРКУТСКИЙ РЕЛЕЙНЫЙ ЗАВОД

-0



-0

Ориентируемся на клиентов 🛛 🛏

Учитываем требования клиентов и предоставляем своим заказчикам образцы изделий.

### 100% гарантия качества

Строго следим за выпускаемой продукцией и проверяем ее на каждом этапе производства.

#### Работаем над продукцией

}æ()

Постоянно работаем над своей продукцией и улучшаем технические характеристики.

#### СОЕДИНИТЕЛИ РАДИОЧАСТОТНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ



Субминиатюрные и микроминиатюрные соединители радиочастотные коаксиальные тип IX вариант 1, тип SMA в соответствии с ГОСТ РВ 51914-2002 и SMP по стандарту MIL-STD-348B, Fig. 326 с рабочим диапазоном частот 18; 26,5 и 40ГГц, а так же СВЧ и НЧ вводы. Предназначены для работы многофункциональных СВЧ-устройств и модулей.

#### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ



Реле слаботочные электромагнитные герметичные РЭС48 и РЭК83 с напряжением питания обмотки от 6 до 100В, и промежуточные РП-Ир2 и РЭК59 на 4 переключения и 1 замыкание с двойным разрывом цепи. Предназначены для коммутации электрических цепей постоянного и переменного тока радиоэлектронной аппаратуры.

#### СВЧ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ



Электромеханические коаксиальные переключатели ПСВЧ-2П2H-N-1-28. Предназначены для замыкания, прерывания или изменения пути прохождения сигналов в диапазоне частот от 0,01 до 12,4 ГГц на два полюса два направления в коаксиальных трактах с волновым сопротивлением 50 Ом в режиме холодного переключения. Тип коаксиального соединителя – тип N, розетка, ГОСТ PB 51914

#### ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ПОВОРОТНЫЕ



Переключатели поворотные низкочастотные малогабаритные одноплатные типа МПН-1, МПН-1М и МПН-2. Переключатели предназначены для ручной коммутации электрических цепей постоянного и переменного тока, с различными электрическими схемами коммутаций. Со степенями защиты IP40, IP47, Ip48.

#### ФИЛЬТРЫ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ



Фильтры помехоподавляющие герметичные ФПГ-01 восьми типономиналов в зависимости от номинальных параметров. Фильтры предназначены для внутреннего монтажа и применения в герметизируемой аппаратуре. Изделия могут быть использованы в авиационной и наземной навигационной аппаратуре систем связи, управления объектами, сбора данных и т.п.

Россия, 664075, г. Иркутск, ул. Байкальская, 239

(3952) 35-23-18

marketing@irzirk.ru 🏼 🍽



КАТАЛОГ ПРОДУКЦИИ: www.irzirk.ru



#### Рис. 2. СЭ с рельефом в виде мелких пиков: а – используемые материалы; б – распределение носителей заряда

поликристаллического материала солнечных элементов (mun = 20, mup = 1,5). Заданы ширина запрещенной зоны (eg300 = 1,9) и концентрация собственных носителей заряда (nc300 = 2,5e20, nv300 = 2,5e20). Для расчета спектральных характеристик ITO к модели прикреплялась таблица из базы Sopra. Полученная структура СЭ сохранялась для дальнейшего анализа.

Далее проводилось моделирование вольт-амперных характеристик построенных структур. Для расчета использовались стандартные модели Шокли – Рида – Холла и рекомбинации Оже. На таких условиях (без освещения) для каждого типа поверхности СЭ была рассчитана темновая ВАХ в диапазоне от 0 до 2 В с шагом 0,1 В, которая бралась за основу для дальнейшего расчета характеристик СЭ при освещении.

Предполагалось, что световой поток соответствовал спектру AM1.5. Источник излучения находился над серединой структуры. Анализировались длины волн от 0,3 до 1,2 мкм. Данные об изменении интенсивности использовались для дальнейшего анализа характеристик СЭ.

После настройки параметров светового излучения был проведен расчет ВАХ СЭ при его освещении (в диапазоне

Параметры поверхности СЭ	Структура поверхности СЭ							
	Мелкие пики (структура 1)	Крупные пики (структура 2)	Структура в виде трапеции (структура 3)	Зубчатая структура (структура 4)	Плоская поверхность (структура 5)	Прямоуголь- ный рельеф (структура 6)		
Ток короткого замыкания, I <sub>sc</sub> ·10 <sup>-9</sup> , А	3,028	2,97	2,98	2,84	2,82	2,33		
Напряжение холостого хода, V <sub>oc</sub> , B	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1		
Максималь- ная мощность, P <sub>max</sub> ·10 <sup>-9</sup> , Вт	2,16	2,15	2,12	2,02	2,01	1,51		

#### Таблица 2. Результаты моделирования структур

### • ЗАО «НПФ «ЛЮМИНОФОР»: РОССИЙСКИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ КОНДЕНСАТОРНЫХ и ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ



Пьезокерамические изделия широко используются в гидроакустике, электронике, дефектоскопии, медицине и в других областях бытовой и специальной техники. Конденсаторные материалы применяются в производстве керамических конденсаторов в любой электронной аппаратуре: в бытовой технике, системах связи, измерительных и научных приборах, в промышленном оборудовании и т.д.

В настоящее время сырье (оксиды циркония, титана, свинца) для синтеза пьезокерамических материалов закупается за пределами России как химические реагенты общетехнического назначения, характеристики которых не оптимизированы для применения в пьезокерамическом производстве, что приводит к недостаточной воспроизводимости функциональных параметров пьезоматериалов и изделий на их основе. Таким образом, разработка технологии получения и организация серийного производства целевых прекурсоров, изготавливаемых из отечественного сырья, и обеспечивающих получение высокоэффективных перспективных пьезоматериалов, отвечает актуальным задачам импортозамещения.

В ЗАО «НПФ «Люминофор» разработана установка синтеза сырьевых прекурсоров пьезокерамических материалов. Проведены испытания опытно-промышленных партий на предприятиях-изготовителях пьезоэлементов. Результаты испытаний выявили соответствие продукции ЗАО «НПФ «Люминофор» требованиям к пьезоматериалам.

#### • В ЗАО «НПФ «Люминофор» выпускаются материалы для пьезокерамики:



Свинец оксид для пьезокерамики ТУ 20.59.59-073-48591565-2020;
Циркония диоксид для пьезокерамики ТУ 20.59.59-074-48591565-2020;
Бария карбонат для пьезокерамики ТУ 20.59.59-075-48591565-2020;
Стронция карбонат для пьезокерамики ТУ 20.59.59-076-48591565-2020.
Титан диоксид для пьезокерамики ТУ 20.59.59-077-48591565-2020;
Цирконат-титанат свинца марки ЦТС-19 (порошок и гранулят).



В связи с общим развитием радиоэлектронной отрасли в РФ значительную актуальность приобретает задача обеспечения промышленности отечественными материалами для конденсаторов и СВЧ-техники.

## Для производителей керамических конденсаторов ЗАО «НПФ «Люминофор» предлагает:

- Титанат бария марок ТБК-1 и ТБК-2 ТУ 20.59.59-057-48591565-2018;
- Алюминат лантана-титанат кальция (твердый раствор АЛТК) составов № 0-9 ТУ 2664-050-48591565-2016









В ЗАО «НПФ «Люминофор» обеспечение высоких электрических характеристик современных конденсаторных материалов осуществляется по технологии химического соосаждения соединений прекурсоров, термообработка которых по специальной методике гарантирует высокий уровень и стабильность диэлектрических свойств материалов.

#### ПРИГЛАШАЕМ К ДОЛГОСРОЧНОМУ И ВЗАИМОВЫГОДНОМУ СОТРУДНИЧЕСТВУ!

355000, РФ, Ставропольский край, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 8. телефон: +7 (8652) 56-02-70 факс: +7 (8652) 56-07-10 e-mail: lumin.stv@mail.ru www.luminophor.ru

-8

-7

-6

-5

-4

-3

-2

-1

0

1

a)

0

MKM

угольных канавок максимальная мощность (Р<sub>тах</sub>), выдаваемая СЭ, ухудшилась по сравнению с плоской структурой (1,51·10<sup>-9</sup> Вт в случае прямоугольного рельефа СЭ и 2,01·10<sup>-9</sup> Вт – на плоском СЭ).



от Одо 2 В с шагом О. 1 В). Результаты моделирования для плоского СЭ и СЭ, показавшего наилучшие характеристи-

СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ки, приведены на рис. 3.

ках солнечных элементов. Были определены ток короткого замыкания (I<sub>cc</sub>) и напряжение холостого хода (V<sub>oc</sub>). Ток короткого замыкания определялся на кривой ВАХ при освещении в точке нулевого значения на оси Х. Напряжение холостого хода определялось при нуле на оси Ү.

Мощность СЭ рассчитывалась на основе данных ВАХ при освещении и являлась определяющим параметром для дальнейшего анализа эффективности СЭ.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Изменение структуры поверхности СЭ (см. рис. 2) увеличивает его эффективную площадь, но оставляет исходные размеры ячейки. При изменении формы рельефа поверхности меняется процент поглощенного и отраженного излучения. Были исследованы пять типов рельефа поверхности (табл. 2). Результаты сравнивались между собой и с исходной плоской пластиной СЭ.

Эксперимент показал, что при формировании прямо-



Δ

Оптическая интенсивность,

0.16

0,12 0,08

0,04 0

-0.04

-0.08

-0,12

-0,16

BT/CM<sup>2</sup>

3

Гок анода, Іанод, А 2.10-5 1.10-5 0 0 0.4 0.8 1.2 1.6 Смещение анода, Vанод, В

#### Рис. 3. Сравнение ВАХ плоского СЭ и СЭ с мелкими пиками

Когда на поверхности формировалась зубчатая структура с различным размером зубцов, максимальная мощность возрастала на 0,1·10<sup>-9</sup> Вт по сравнению с плоским. Аналогичный рост продемонстрировали и другие конфигурации рельефа (структуры 1-3 в табл. 1 и 2).



 $4.10^{-5}$ 

-8

-7

-6

-5

MKM

б)

1

2

мкм

2

🗙 ВАХ СЭ с мелкими пиками

ВАХ плоского СЭ

#### СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ



### **Рис. 5.** Сравнение мощности плоского СЭ и СЭ с мелкими пиками

Наилучший результат из всех построенных структур показал солнечный элемент с мелкими пиками на поверхности структуры (структура 1 в табл. 1 и 2). Подбор угла при вершине пирамиды обеспечил наибольшее поглощение падающего света (рис. 4).

Анализируемыми параметрами для определения наиболее эффективного СЭ служили его мощность (рис. 5), ток короткого замыкания, напряжение холостого хода (см. табл. 2) и ВАХ (см. рис. 3).

Видно, что для всех структур напряжение холостого хода оставалось практически неизменным, тогда как ток короткого замыкания менялся в значительной степени. Следовательно, менялась форма ВАХ и кривая мощности. На рис. 3 и 5 сравниваются исходный плоский СЭ и наиболее оптимизированный СЭ с мелкими пиками. Расхождения значений соответствуют рассчитанным величинам тока короткого замыкания.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лучшие показатели по мощности продемонстрировали СЭ с мелкими и крупными пиками, получив при этом выигрыш в мощности в 7,5 и 7%, соответственно, по сравнению с плоской структурой. Иные варианты поверхности также дают повышение мощности из-за увеличения эффективной площади поверхности на единицу длины СЭ, а также из-за оптимального отражения и поглощения, правда не в столь значительной степени.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Симашкевич А.В., Шербан Д.А., Брук Л.И., Харя Е.Е., Усатый Ю.В. Эффективные солнечные элементы ITO-nSi с текстурированной поверхностью кремния // Электронная обработка материалов. 2011. Т. 47. № 3. С. 79–84.
- Heng J.B., Fu J., Kong B., Chae Y., Weng W., Xie Z., Reddy A., Lam K. et al. High-Efficiency Tunnel Oxide Junction Bifacial Solar Cell With Electroplated Cu Gridlines // IEEE Journal of Photovoltaics, 2015. Vol. 5. No. 1. PP. 82–86.
- Hovel H.J., Willardson R.K., Beer A.C. Semiconductors and Semimetals. Solar cells //Academic Press. New York, 1975. 254 p.
- Green M.A. Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2007. Vol. 18. No. 1. PP. 15–19.
- Chopra K.L., Paulson P.D., Dutta V. Thin-film solar cells: an overview // Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2004. Vol. 12. No. 23. PP. 69–92.
- Haase C., Stiebig H. Thin-film Silicon Solar Cells with Efficient Periodic Light Trapping Texture // Applied Physics Letters, 2007. Vol. 91. No. 6. 061116.
- Shota H., Takashi M., Hideyuki T., Yoshihiro H. Influence of Texture Feature Size on Spherical Silicon Solar Cells // Rare Metals, 2006. Vol. 25. No. 6. PP. 115–120.

#### 000 «АК Микротех»

Комплексные решения в области микроэлектронного и микросборочного производства Поставка, наладка и ремонт технологического оборудования Отработка и постановка технологических процессов Обеспечение материалами и комплектующими

WWW.AKMICROTECH.RU +7 (499) 398 0770 SALES@AKMICROTECH.RU

