

# ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ АКЦИКОНОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. Подлипнов, А.П. Порфирьев, С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

В работе предложено использовать комбинацию солнечного элемента с дифракционными аксиконами для повышения оптической эффективности элемента. Проведено численное моделирование процесса поглощения света в солнечном элементе. Представлены результаты эксперимента с использованием лазера с перестраиваемой длиной волны по измерению эффективности преобразования световой энергии в электрический ток.

**Ключевые слова:** солнечные элементы, дифракционные решётки, аксикон, улавливание солнечного света.

## Введение

В последнее время в солнечной энергетике отмечается рост эффективности и уменьшение удельной стоимости выработки фотоэнергии, что незамедлительно приводит к значительному росту генерирования солнечной электроэнергии и росте промышленного производства солнечных элементов (СЭ) [1, 2]. В связи с этим актуальной является задача дальнейшего повышения эффективности СЭ. Задачи повышения эффективности преобразования света в электричество можно условно разделить на два класса: задачи, связанные с повышением эффективности транспортирования света к полупроводнику (оптической эффективности), и задачи, связанные с повышением эффективности преобразования доставленного света в электричество (квантовой эффективности).

Обзор основных методов, использующихся для повышения оптической эффективности, представлен в работе [3]. Среди них выделяются задачи, связанные с использованием дополнительных оптических элементов, зеркал, вторичной рефракционной или дифракционной оптики для концентрирования и доставки света к СЭ с высокой эффективностью, решение которых позволяет сократить себестоимость генерации электроэнергии за счет использования электрогенерирующих СЭ значительно меньшей площадью [4, 5].

Из анализа методов повышения оптической эффективности, можно сделать вывод, что на данный момент, недорогим и целесообразным для промышленного выпуска СЭ является создание элементов со структурами на основе дифракционных решеток. Данные элементы возможно создавать, используя, например, недорогую наноимпринт литографию [6], и затем последующее плазмохимическое травление, что хорошо сочетается с технологиями микроэлектронного производства и классического кремниевого производства СЭ. Однако, несмотря на значительное количество работ, посвящённых данной тематике, работ посвященных использованию дифракционных линз Френеля и дифракционных аксиконов в СЭ, а, именно, использованию их в качестве

светоудерживающих структур очень мало. В большинстве работ, их применение ограничивается использованием в качестве тонкопленочных элементов вторичной оптики, а именно световых концентраторов [7].

Актуальным в связи с этим видится использование массивов дифракционных микроаксиконных структур, выполненных на передней стороне СЭ, которые будут сочетать в себе преимущества антиотражающих структур, фокусирующих структур, а также структур, дополнительно рассеивающих свет внутри полупроводника, удлиняя тем самым оптический путь лучей и повышая квантовую эффективность преобразования света в электричество. В данной работе представлено исследование возможности применения дифракционных аксиконов для увеличения эффективности СЭ.

### 1. Комбинация аксикона и солнечного элемента

Как известно, дифракционный аксикон позволяет преобразовать падающий на него плоский волновой фронт в конический, который сходится к оси симметрии  $z$  под углом  $\alpha$  (рис. 1). При этом формируется осевой отрезок, ширина по полуспаду интенсивности для которого равна  $0,36\lambda/NA$  ( $\lambda$  - длина волны излучения,  $NA=\sin\alpha$  - числовая апертура аксикона), что существенно меньше, чем размер диска Эйри, формируемого линзой с той же числовой апертурой [8, 9]. При этом глубина фокуса для аксикона даже при высоких значениях числовой апертуры значительно больше, чем может обеспечить линза [10]. Данный факт делает аксиконы привлекательными в системах, где сложно выдержать строго фиксированное расстояние между элементами, что особенно важно в медицинских [11, 12] и метрологических [13, 14] приложениях.

Заметим, что дифракционные аксиконы, периодическая структура которых имеет размер меньше длины волны (аксиконы с субволновым периодом) [15], большую часть падающего на них излучения преобразуют в затухающие волны, распространяющиеся преимущественно перпендикулярно оптической оси, т.е. практически вдоль поверхности оптического элемента.

Таким образом, аксиконы позволяют не только повысить, эффективность удержания света за счёт отклонения лучей нормального падения на СЭ, но также позволяют решить задачу повышения концентрации солнечного света.

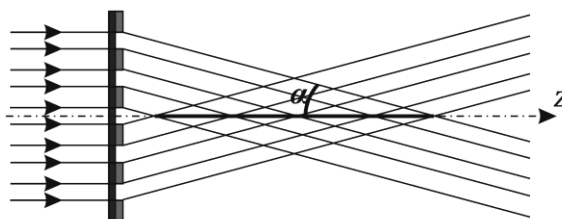


Рис.1. Принцип работы дифракционного аксикона

Один из возможных вариантов комбинации дифракционного аксикона и солнечного элемента показан на рис. 2. В этом случае аксикон находится на передней стороне солнечного элемента, и, таким образом, позволяет изменить углы падения света на солнечный элемент, что в свою очередь должно повышать вероятность удержания света внутри элемента.

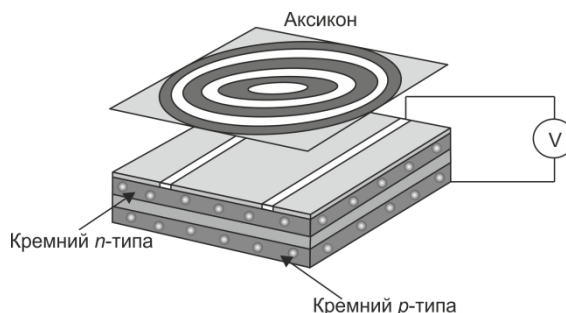


Рис.2. Комбинация солнечного элемента и аксикона

## 2. Численное моделирование

В данной работе произведено моделирование поглощения света солнечным элементом с помощью решения уравнения Гельмгольца методом конечных элементов, реализованном в пакете Comsol Multiphysics. Рассматривался двумерный случай.

Общий вид схемы моделирования показан на рисунке 3. Плоская волна освещает элемент сверху, проходит через верхний стеклянный слой, рабочий кремниевый слой, затем отражается от нижнего серебряного слоя. Толщина слоя кремния – 1 мкм, серебра – 40 нм, стеклянной подложки – 1,8 мкм, высота рельефа дифракционной решетки – 300 нм.

Источник плоской волны задан в верхней грани. Боковые грани подчиняются условию Блоха, что обеспечивает периодичность структуры решетки, так как в качестве вычислительной области выбран один период дифракционной решетки.

На рисунке 3а картина распределения интенсивности соответствует стоячей волне.

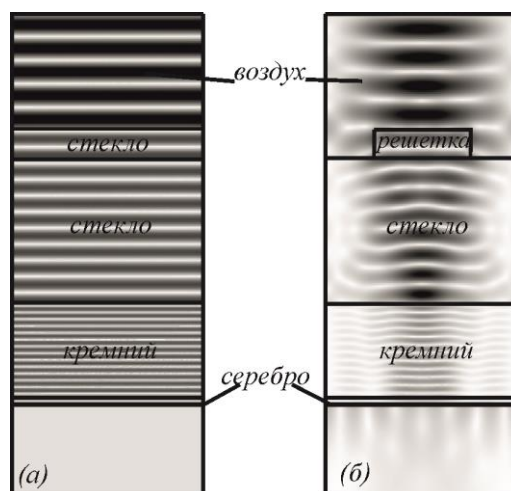


Рис.3. Распределение интенсивности при прохождении плоской волны через элемент, покрытый плоским стеклянным слоем (а) и дифракционной решеткой (б)

Спектр поглощения рассчитывался по следующему методу. Рассчитывалось распределение интенсивности во всей области для набора длин волн в диапазоне от 300 нм до 900 нм с шагом 5 нм. Затем для каждого распределения рассчитывался интеграл по площади рабочего кремниевого слоя. Данное значение и бралось за поглощение.

На рисунке 4 представлены полученные спектры поглощения для элемента, покрытого стеклянной плоскопараллельной пластинкой, а также для элемента, покрытого дифракционной решеткой.

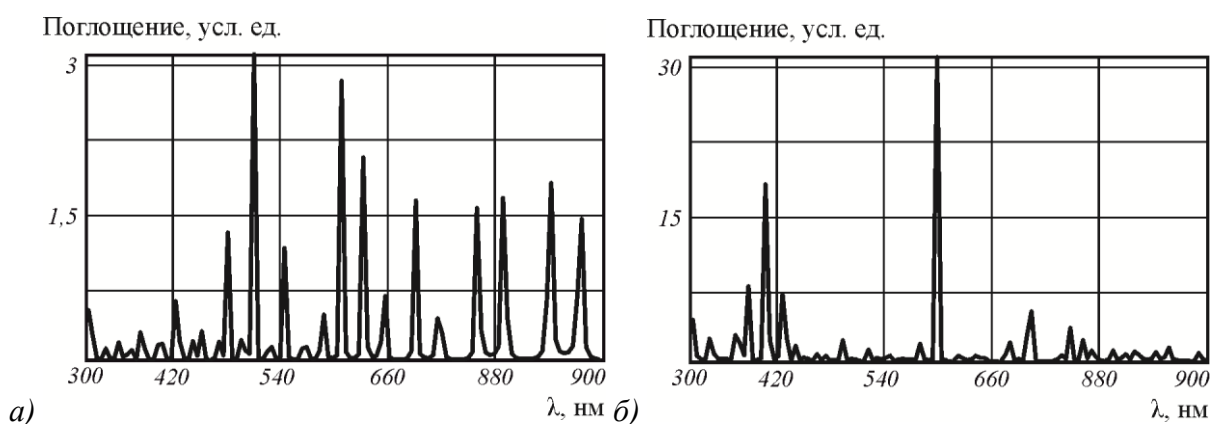


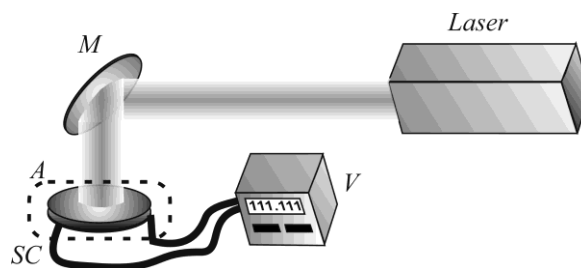
Рис.4. Спектр поглощения элемента без решетки (а) и с решеткой (б)

Можно видеть, что спектры кардинально различаются между собой. Дифракционная решетка на порядок увеличивает поглощение для одной длины волны (585 нм), что может быть использовано для повышения эффективности солнечного элемента.

Стоит иметь в виду, что солнечный элемент, как правило, освещается многокомпонентным светом со сложным профилем спектра. Таким образом, для одной длины волны решетка может приводить к усилению поглощения, а для другой длины волны может и не приводить к существенному увеличению эффективности. Этот факт требует дополнительного исследования.

### 3. Экспериментальные измерения

Для проведения экспериментальных измерений была собрана оптическая схема, показанная на рис. 5. Мы использовали лазер с перестраиваемой длиной волны EKSPLA NT242 в качестве источника излучения. Данный лазер позволяет генерировать излучение с длиной волны от 195 до 2600 нм. С помощью зеркала М лазер сверху направлялся на систему, состоящую из соединённого дифракционного аксикона и солнечной ячейки. При этом аксикон находился на передней поверхности солнечного элемента. Для измерения напряжения был использован мультиметр V.



**Рис.5.** Экспериментальная установка для измерения напряжения в цепи солнечного элемента: Laser – лазер с перестраиваемой длиной волны EKSPILA NT242, M – зеркало, A – дифракционный аксикон, SC – солнечный элемент, V – мультиметр.

В ходе экспериментов мы измеряли напряжение в цепи для комбинации солнечного элемента со стеклянной подложкой, а также аксиконом с периодом 2 мкм. Измеренные значения представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что по сравнению с одиночным солнечным элементом, комбинация солнечного элемента и аксикона даёт увеличение в исследуемом диапазоне от 400 до 800 нм.

**Табл. 1.** Зависимость напряжения в цепи солнечного элемента от длины волны используемого излучения лазера

Длина волны излучения, нм	Напряжение в цепи, В	
	Комбинация солнечного элемента и стеклянной подложки	Комбинация солнечного элемента с дифракционным аксиконом
400	0,35	<b>0,55</b>
450	0,86	<b>1,00</b>
500	0,99	<b>1,03</b>
550	1,06	<b>1,04</b>
600	1,01	<b>1,03</b>
650	0,95	<b>0,94</b>
700	0,44	<b>0,53</b>
750	0,33	<b>0,39</b>
800	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>

## Заключение

Экспериментальные результаты, полученные в этой работе, показали перспективность использования дифракционных аксиконов для повышения эффективности СЭ.

Численные расчеты спектра поглощения света солнечным элементом качественно обосновывают применение дифракционного профиля для усиления поглощения.

В дальнейшем планируется выполнить более детальные исследования по зависимости квантовой эффективности преобразования в видимой части солнечного света для аксиконов с различным периодом, в том числе, субволновым.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-31-00014).

## Литература

1. Алфёров, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, №. 8. – С. 937-948.
2. Козюков, Д. А. Анализ темпов и перспектив развития солнечной фотоэнергетики / Д.А. Козюков, Б.К. Цыганков // Инновационная наука. – 2015. – №. 8-2. - С. 38-41.
3. Wehrspohn, R.B. Photon Management in Solar Cells / R.B. Wehrspohn, U. Rau, A. Gombert. – John Wiley & Sons, 2015. - 376 p.
4. Андреев, В. М. Фотоэлектрические модули с цилиндрическими световодами в системе вторичного концентрирования солнечного излучения / В.М. Андреев, Н.Ю. Давидюк, Е.А. Ионова, В.Д. Румянцев // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, №. 9. - С.84-89.
5. Barnett, A. Very high efficiency solar cell modules / A. Barnett et. al // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2009. – Vol. 17(1). – P. 75-83.
6. Hauser, H. Diffractive backside structures via nanoimprint lithography / H. Hauser, A. Mellor, A. Guttowski, C. Wellens, J. Benick, C. Muller, M. Hermle, and B. Blasi // Energy Procedia. - 2012. - Vol. 27. - P. 337-342.
7. Chemisana, D. Building integrated concentrating photovoltaics: a review / D. Chemisana // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2011. - Vol. 15(1). - P. 603-611..
8. Kalosha, V.P. Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution / V.P. Kalosha and I. Golub // Optics Letters. - 2007. - Vol. 32. - P. 3540-3542.
9. Хонина, С.Н. Фракцион – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. - 2009. - Т. 33, № 4. - С. 401-411.
10. Хонина С.Н., Устинов А.В., Волотовский С.Г., Ковалёв А.А., Расчёт дифракции линейно-поляризованного ограниченного пучка с постоянной интенсивностью на высокоапертурных бинарных микроаксиконах в ближней зоне, Компьютерная оптика, 34(4), 443-460 (2010)
11. R.A. Leitgeb, M. Villiger, A.H. Bachmann, L. Steinmann, and T. Lasser, “Extended focus depth for Fourier domain optical coherence microscopy”, Opt. Lett. vol. 31, iss.16, pp. 2450-2452 (2006).
12. K.-S. Lee and J. P. Rolland, “Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range”, Opt. Lett. vol. 33, iss. 15, pp. 1696-1698 (2008)
13. Котляр В.В., Скиданов Р.В., Хонина С.Н., Бесконтактное прецизионное измерение линейных смещений с использованием ДОЭ, формирующих моды Бесселя, Компьютерная оптика, 21, 102-104 (2001)
14. K. Wang, L. Zeng, and Ch. Yin, “Influence of the incident wave-front on intensity distribution of the nondiffracting beam used in large-scale measurement”, Opt. Commun., vol. 216, pp. 99-103, 2003.
15. Хонина С.Н., Савельев Д.А., Серафимович П.Г., Пустовой И.А., Дифракция на бинарных микроаксиконах в ближней зоне, Оптический журнал, т. 79, №10, с. 22 – 29 (2012)