

УДК: 53.083.8 537.9

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ МАССИВОВ

А. В. Бланк<sup>1</sup>, С. Д. Богданов<sup>1</sup>, Н. А. Сухарева<sup>1</sup>, Г. Г. Унтила<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, НИИЯФ имени Д. В. Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.

**Аннотация.** Обсуждаются результаты имитационного моделирования фотовольтаических массивов, создаваемых для задач беспроводной энергетики. Приоритетными при разработки схем коммутации отдельных элементов стали модульные масштабируемые массивы, позволяющие существенно сократить длину контактных шин и соответствующие им потери. Рассмотрено уменьшение фототока при преобразовании пространственно неоднородных энергонесущих пучков, вариация эффективности массива при смещении центра пучка или затенении части рабочей поверхности массива. Созданы имитационные модели распределяющих массивов с трансляционной и ротационной симметрией, представлены результаты сравнительного анализа вносимых коммутационных потерь.

**Ключевые слова:** фотовольтаический массив, коммутация ФЭП, эффективность фотопреобразования, имитационные модели хcos, рассеивающие схемы коммутации

**Abstract.** The results of simulation modeling for photovoltaic arrays created for the tasks of wireless energy transfer are discussed. Modular scalable arrays, which significantly reduce the length of contact buses and the corresponding losses, have become priorities in the development of switching schemes for individual elements. The losses of the photocurrent during the conversion of spatially inhomogeneous energy-harvesting beams, the variation of the array efficiency with a shift in the center of the beam or the shading of part of the working surface of the array are considered. Simulation models of distributing arrays with translational and rotational symmetry are created, the results of a comparative analysis of the introduced switching losses are presented.

**Key words:** photovoltaic array, PVC commutation, photoconversion efficiency, xcos simulation models, scattering switching schemes

## Введение

Традиционные условия эксплуатации фотопреобразующих систем ориентированы на работу в условиях стационарной и пространственно однородной освещенности активной матрицы ФЭП при постоянном по поверхности значении температуры рабочей панели. В системах беспроводной энергопередачи условия принципиально иные. Это относится и к нестационарности положения и к пространственной неоднородности распределения интенсивности по поверхности матрицы элементов [1–4]. Направление распространения коллимированного энергонесущего пучка случайным образом дрейфует за счет вибрации опор излучателя и вынужденных смещений при работе механизма адаптивной коррекции наклона. Изменение эксплуатационных режимов сопровождается изменением и дополнением правил отбора типа фотопреобразующих элементов, методов коммутации в матрицах элементов, сглаживающих исходную неоднородность и нестационарность положения пятна энергонесущего пучка [5–7].

Рассмотрим наиболее актуальные на 2019 год технологии создания высокоэффективных кремниевых элементов, ориентируясь на работу в диапазоне длин волн от 800нм о 1100нм. Особое внимание необходимо уделять PERC и HIT типам элементов, поскольку на территории России действуют или вводятся в технологический цикл предприятия по их производству. По оценке доступности на российском рынке оптимальное качество панелей можно ожидать у производителей SunPower, LG и Winaico, поставляющих панели высокого качества с гарантиями на 25 лет, высокой эффективностью и минимальным износом в течение всего срока службы [8]. За последние 5 лет эффективность кремниевых солнечных панелей значительно возросла благодаря многим достижениям в технологии фотоэлементов, включая:

- **HIT** – (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer solar cells),
- **PERC** - (Passivated Emitter Rear Cell) элементы с пассивацией задней поверхности кремниевой пластины,
- **Bifacial** - двусторонние панели или ячейки,

- **Multi Busbar** - панели с множественными ленточными и проводными шинами,
- **Split panels** - расщепленные панели, использующие половинные ячейки,
- **Dual Glass** - безрамочные панели на основе двойного стекла,
- **IBC** - (Interdigitated Back Contact cells) переплетенные контакты сзади ячейки.

Вносимые структурные дополнения ФЭП улучшают эффективность, допускают затенения фрагментов и повышают надежность. Большинство технологий пролонгируют гарантию сохранения производителя до 30 лет. Наиболее интересны в условиях развиваемых технологий ячейки, выполненные по технологиям PERC и HJT и IBC.

### **PERC ячейки**

За последние два года ячейки PERC стали технологией премиум-класса для многих производителей как моно-, так и поликристаллических элементов. Фактически PERC использует дополнительные слои на задней стороне ячейки для улучшения квантовой эффективности, это означает, что большее количество фотонов, проходящих через ячейку, поглощается с перебросом электрона через потенциальный барьер. Распространенной технологией PERC является **локальный Al-BSF** или локальное поле алюминиевой задней поверхности, но были разработаны и несколько других вариантов, таких как PERT (Passivated Emitter Rear Totally Diffused) и PERL (Passivated Emitter and Rear Locally-diffused).

### **IBC ячейки**

Кремниевые IBC ячейки являются не только более эффективными, но и намного более прочными, чем обычные ячейки, так как задние слои укрепляют всю ячейку и помогают предотвратить микротрещины. **Sunpower** используют на своих "**Maxeon**" задний IBC слой из высококачественной меди вместе с хорошо отражающей металлической зеркальной поверхностью, чтобы отражать любой свет, который проходит через ячейку. Задняя сторона ячейки IBC «Maxeon» устойчива к нагрузкам и изгибам, в отличие от обычных ячеек, которые относительно хрупки. IBC-ячейки или ячейки с задними контактами имеют сетку из 30 или более проводников, встроенных в заднюю

сторону ячейки, в отличие от стандартных ячеек, которые обычно имеют от 4 до 6 больших видимых шинных лент и несколько контактных линий на лицевой стороне ячейки. Наиболее очевидная проблема распространенной конструкции шинопроводов на передней панели состоит в том, что они частично затеняют ячейку и отражают некоторые световые фотоны, что снижает эффективность, в то время как ячейки ИВС не страдают от этой проблемы и вдобавок выглядят намного «чище» без открытых шин.

### НІТ ячейки

На данный момент технология ячеек с гетеропереходом исследуется многими производителями солнечных панелей. Основой НІТ-ячейки является обычный кристаллический кремний с дополнительными тонкопленочными слоями аморфного кремния по обеим сторонам ячейки, образующими гетеропереход. В отличие от обычной ячейки с Р-Н-переходом, многослойные ячейки с гетеропереходом могут значительно повысить эффективность. В лабораторных условиях достигается значение в 26.5% в сочетании с технологией ИВС для солнечного спектра.

## 1 Оценки эффективности отдельных ФЭП для создания массивов

Проведем сравнительный анализ эффективности фотопреобразования полихроматического и монохроматического излучения чипами ФЭП, созданными по PERC и НІТ технологиям. Параметры полноразмерных элементов ФЭП составляют  $156 \times 156 \text{ мм}^2$  при освещении 1X ( $0.1 \text{ Вт/см}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , спектр ASTM 173 Global)

Таблица 1: Параметры ФЭП  $156 \times 156 \text{ мм}^2$  при освещении 1X ( $0.1 \text{ Вт/см}^2$ ),  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , где <sup>A</sup> заявлено производителем, <sup>B</sup> измерено авторами работы, <sup>C</sup> результат оценки, выполненной авторами

Параметры ФЭП	PERC	НІТ
Эффективность (%)	21.4 <sup>A</sup>	21.35 – 21.64 <sup>A</sup>
$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	~ 39 <sup>C</sup>	37.9–38.2 <sup>A</sup>
$J_{sc}$ без учета площади шин (mA/cm <sup>2</sup> )	40.4–40.6 <sup>B</sup>	
$V_{oc}$ (mV)	~ 660 <sup>B</sup>	712–721 <sup>A</sup>
FF (%)	~ 83 <sup>C</sup>	77.87–79.16 <sup>A</sup>

Если ограничить линейные размеры ФЭП значением  $\sim 20 \times 20$  мм<sup>2</sup> при освещении 1X (0.1 Вт/см<sup>2</sup>, 25 °С, спектр ASTM 173 Global), эффективность уменьшится за счет увеличения удельного влияния торцов, пропорционального отношению периметра к площади фотоэлемента. Ниже в таблице представлены полученные при тестировании значения для таких ФЭП:

Таблица 2: Параметры ФЭП  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup> при освещении 1X (0.1 Вт/см<sup>2</sup>), 25 °С

Параметры ФЭП	PERC	HIT
Эффективность (%)	20.4	19.6
$J_{sc}$ (мА/см <sup>2</sup> )	39	37.7
$V_{oc}$ (mV)	662	703
FF (%)	78.9	74.1
Снижение КПД из-за размера	-5%	-9%

Снижение эффективности HIT сильнее, поскольку используемый при их изготовлении n-кремний имеет качество выше, нежели p-кремний у PERCов.

Представленные оценки эффективности относятся к солнечному спектру, при работе с лазерными пучками следует учитывать спектральный множитель, зависящий от длины волны излучения и формы полосы квантового выхода элементов. Рассмотрим соответствующие характеристики элементов для актуального набора длин волн в ближнем ИК диапазоне, для которых имеются высокоэффективные источники излучения:

Таблица 3: Параметры ФЭП  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup> при лазерном облучении (0.1 Вт/см<sup>2</sup>), 25 °С

$\lambda$ (nm)	808		1064		1070		1083		980	
	PERC	HIT	PERC	HIT	PERC	HIT	PERC	HIT	PERC	HIT
$J_{sc}$ (мА/см <sup>2</sup> )	62,7	61,7	60,4	54,2	56,8	49,9	53,2	45,9	72,9	71,3
Эквивалент по солнцу $k_c$ (Suns)	1.6	1.62	1.55	1.42	1.46	1.31	1.36	1.2	1.87	1.87
КПД (%)	32.6	31.7	31.6	27.8	29.8	25.7	27.7	23.5	38.1	36.6

При использовании представленных оценок для конкретных образцов следует проявить аккуратность.

## 2 Выбор коммутационной схемы массива ФЭП

Особенность фотовольтаического преобразования излучения коллимированного волнового пучка, прошедшего протяженную трассу, заключена в его нестационарности и возможной пространственной неоднородности в зоне расположения матрицы ФЭП. Нестационарность присутствует во многих факторах космического эксперимента:

- механических свойствах фиксаторов положения излучателя и приемника, собственных частотах и характерных амплитудах малых вибраций опор,
- механизме генерации энергонесущего пучка, типе драйвера термостабилизации полупроводникового элемента и связанной с ним модуляцией диаграммы направленности,
- рефракционных отклонениях направления распространения энергонесущего пучка за счет термической конвекции в зонах высокой плотности излучения, при размещении лазерного источника внутри МКС.

Для наземного базирования научного оборудования ведущим фактором становится рефракционная модуляция в турбулентной атмосфере. При выборе типа объединения фотоэлементов в матрицу необходимо добиться максимальной эффективности коллективной работы всех подключаемых элементов [9; 10]. Однако, среди требований максимальной интенсивности есть практически не выполнимые:

- требование пространственной однородности распределения плотности мощности на фотоматрице невыполнимо для пучка конечных размеров,
- требование стационарности температуры фотоматрицы соблюдается в зависимости от используемой теплоаккумулирующей системы, мощности падающего энергонесущего пучка и времени сеанса энергопередачи.

На эффективность общей конструкции влияют эффективность отдельной ячейки, тип соединения этих ячеек, а также параметры контактной сетки, на-

несенной на поверхность панели. Также стоит учесть, что в условиях прохождения монохроматического пучка через атмосферу на поверхности массива возникает частичное затенение, что существенно влияет на общую производительность [11–14].

Рассмотрим геометрию самой панели. Так как лазерный пучок чаще всего имеет круглую форму, то можно было бы подумать, что круглая геометрия матрицы будет обеспечивать наиболее полную засветку и следовательно высокую эффективность. Однако из-за влияния обратных токов соседних элементов, мы будем наблюдать заметные спады в эффективности. Оптимальной является прямоугольная форма матрицы. Такая матрица наиболее проста в конструкции, а так же позволяет использовать много различных типов соединений. В наших конструкциях будут использованы именно прямоугольные или квадратные геометрии матриц.

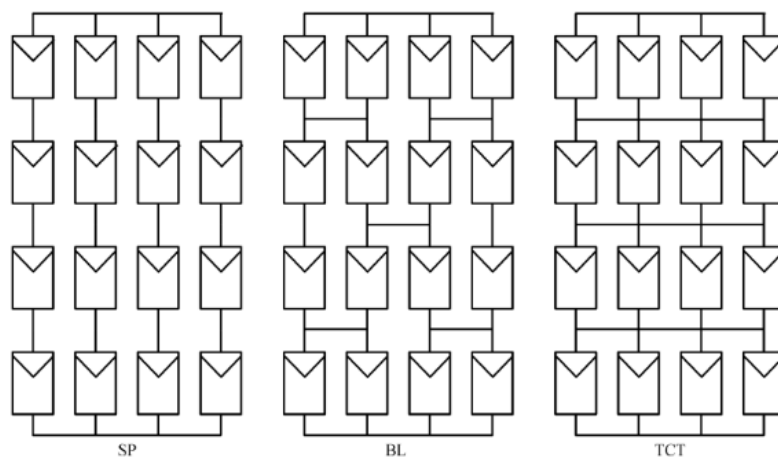


Рис. 1: Различные типы соединения ячеек в матрицу

Разработано несколько основных типов соединения элементов:

- последовательно-параллельное (SP) - несколько ячеек соединены в ряд последовательно, и несколько рядов ячеек соединены между собой параллельно;
- мостовое соединение (BL) - основа взята с последовательно-параллельного соединения, и в некоторых местах наложены дополнительные мостовые линии;
- параллельно-последовательное (TCT) - между ячейками созданы как последовательные, так и параллельные соединения.

Установлено, что из трех указанных видов коммутации при неоднородной засветке наиболее эффективным является параллельно-последовательная. Именно такой тип соединения элементов взят его за основу для сравнения разрабатываемых структур. В условиях частичной засветки в стандартных регулярных схемах коммутации эффективность матрицы будет значительно падать.

### 3 Имитатор фотовольтаического массива

Процесс фотовольтаического преобразования для отдельного чипа опишем одно- или двухдиодной моделью, в зависимости от типа выбранного чипа:

$$I = I_{ph} - I_{o1} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right) - I_{o2} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_s}, \quad (1)$$

где:

$I_{ph}$  - ток фотогенерации,

$I_{o1}$  - рекомбинационный ток на поверхности и внутри элемента,

$I_{o2}$  - рекомбинационный ток в переходах между элементами,

$n_1, n_2$  - диодные факторы идеальности,

$R_s$  - последовательное сопротивление элемента,

$R_{sh}$  - шунтирующее сопротивление элемента.

На эффективность одиночного элемента влияет рабочая температура поверхности и объема элемента, мощность падающего излучения, материал элемента, его размеры, тип подключенной нагрузки. При объединении нескольких элементов в массив фактически формируется новый электродинамический объект, соответствующие резистивные характеристики, фотогенерируемые токи, резистивные характеристики характерные напряжения холостого хода могут быть определены из системы уравнений Кирхгофа для квазистатического режима. Если массив может быть расщеплен на последовательно-параллельные каскады, содержащие  $N_s$  последовательных и  $N_p$  параллельных фрагментов, можно определить вспомогательную функцию:

$$f(I) = I - N_p I_{ph} + N_p I_o e^{\frac{V + I \frac{R_s}{N_p}}{n V_T}} + I_{sh}, \quad (2)$$

и рассчитывать интегральную вольт-амперную характеристику массива че-



рез итеративное уравнение, решаемое методом Ньютона:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)}. \quad (3)$$

Такой подход был заложен в сценарий имитационного моделирования, работающий в XCos приложении Scilab. В качестве прототипа были использованы предоставленные авторами работ [14–17] апробированные модели для расчета регулярной коммутации.

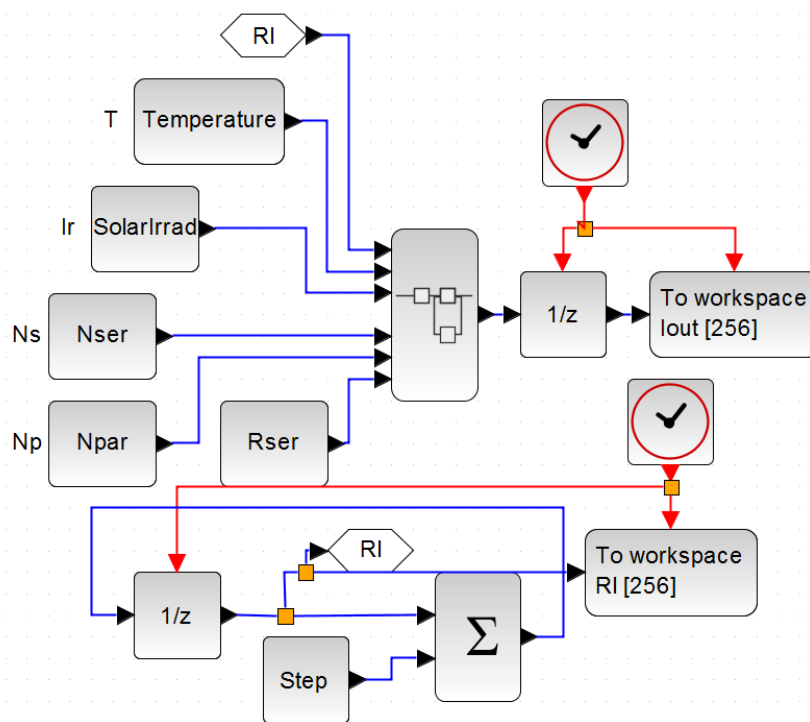


Рис. 2: Блок-схема сценария имитатора в среде Xcos

Интерфейс имитатора позволяет выставлять необходимые параметры для каждого из элементов и групп элементов:

- тип отдельного элемента,
- температуру каждого отдельного элемента,
- мощность излучения, падающего на каждый элемент,
- количество элементов в массиве,
- последовательное и шунтирующее сопротивления,
- определять сегментацию и модульность массива,

- типы соединений внутри сегмента, между сегментами элементов и между модулями.

На выходе имитатора можно в табличной или графической форме получить профиль вольт-амперной характеристики и профиль снимаемой мощности как функции напряжения смещения [18–22].

Для моделирования фотоэлектрического отклика массива ФЭП на пучки различного типа и положения разработан интерфейс синтеза профиля пучка, позволяющий имитировать однородную засветку массива, засветку пучком произвольного профиля и случайную засветку с заданным радиусом корреляции случайного распределения. После определения профиля пучка допускается его перемещение в ортогональных направлениях с шагом, соответствующим линейным размерам отдельного чипа ФЭП.

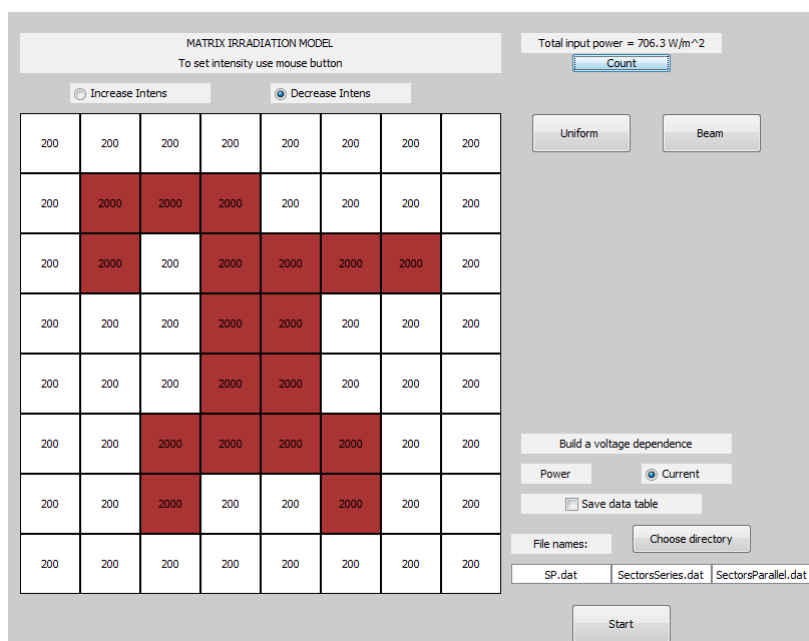


Рис. 3: Интерфейс синтеза профиля энергонесущего пучка

Интерфейс управления имитатора представлен на Рис.3, форматы возвращаемых результатов – на Рис.4, а структурная схема имитатора, реализованная на Xcos – на Рис.2. Предусмотрена возможность одновременной работы с различными схемами коммутации, упрощающая сравнение результатов. Градация плотности потока излучения, падающего на отдельный чип ФЭП варьируется в фтзически значимом диапазоне от  $0.01X$  до  $10X$ . Для произвольно заданного пучка может быть вычислена усредненная плотность потока и получены опорные значения мощности и положения точки генерации максимальной мощности.

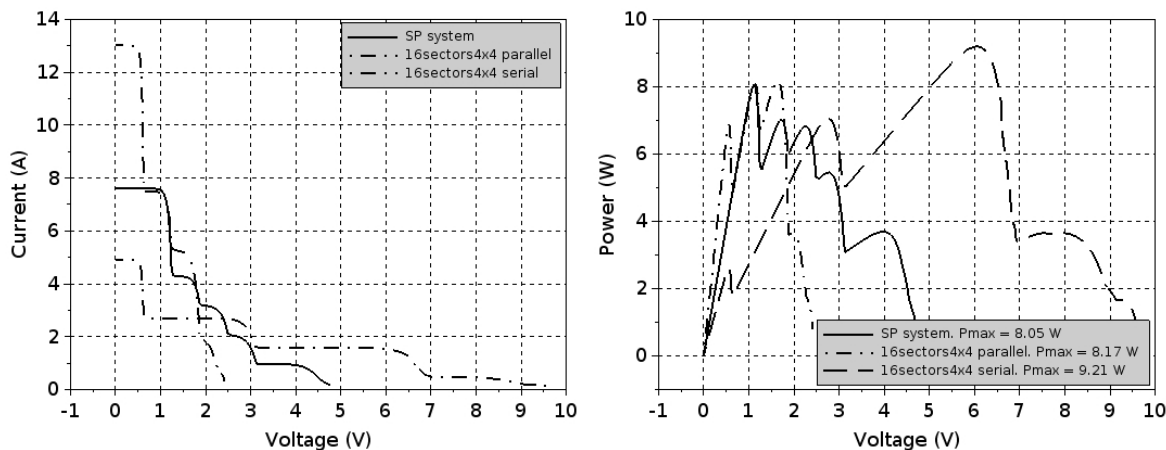


Рис. 4: Результаты моделирования зависимости силы тока и снимаемой мощности с массива ФЭП от напряжения смещения для трех сравниваемых структур

#### 4 Температурный отклик отдельного элемента ФЭП на облучение

Влияние температуры на работу фотоэлемента объясняются процессами рекомбинации и движения носителей заряда в полупроводниковом р-п-переходе. С ростом температуры плотность электронов внутри элемента нарастает, что вызывает увеличение силы фототока и падение напряжения холостого хода. Для описания этих процессов рассмотрим модель, в которой ток фотогенерации и обратный ток смещения диода описываются следующими уравнениями (нужна ссылка на первоисточник):

$$I_{ph} = [I_{sc,STC} + K_i(T - T_{STC})] \frac{G}{G_{STC}}, \quad (4)$$

где  $T_{STC}$  – температура стандартных тестовых условий ( $25^{\circ}C$ ),  $G$  – плотность мощности падающего излучения,  $G_{STC}$  – плотность мощности падающего излучения в стандартных тестовых условиях ( $1000 \frac{W}{m^2}$ ),  $I_{sc,STC}$  – ток короткого замыкания при стандартных тестовых условиях,  $K_i$  – температурный коэффициент по току.

$$I_O = I_{O,STC} \left( \frac{T}{T_{STC}} \right)^3 \exp \left[ qE_{g0} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{STC}} \right) \frac{1}{nk} \right], \quad (5)$$

где  $I_{O,STC}$  – обратный ток при стандартных тестовых условиях,  $q$  – заряд электрона,  $E_{g0}$  – энергия запрещенной зоны полупроводника,  $n$  – фактор идеальности диода,  $k$  – постоянная Больцмана.

Экспериментально установлено, что температурный коэффициент по току  $K_i$  для кремниевого фотоэлемента зависит от длины волны излучения [23]. При работе на коротковолновом крыле полосы квантового выхода кремниевого элемента ( $\lambda = 808 \text{ nm}$ ) коэффициент стремится к нулю, соответственно сила тока короткого замыкания почти не изменяется с температурой, в то время как напряжение холостого хода падает, следовательно падает и эффективность фотопреобразования. При работе же на длинноволновом крыле полосы квантового выхода ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) наблюдаем иные эффекты в р-п-переходе, и  $K_i$  уже имеет ненулевое значение. Вследствие этого ток короткого замыкания начинает расти с температурой, но напряжение холостого хода так же падает, однако общая эффективность фотопреобразования растёт линейно с температурой.

При работе с массивом фотоэлементов температура по поверхности распределяется в соответствии с профилем энергонесущего волнового пучка. В общем случае данная задача является термически нестационарной – температура поверхности массива фотоэлементов будет расти со временем излучения, протекание тока по контактной сетке может как увеличивать, так и уменьшать температуру в зависимости от направления тока и значений потенциалов. При наличии теплоотвода температура в определенный момент времени выйдет на стационарный уровень и установится квазистационарный профиль распределения температуры. Профиль распределения температуры может отличаться от профиля распределения интенсивности. Нахождение этого профиля представляет собой задачу теплопроводности с обратной связью и может иметь решения автоколебательного типа, предсказывающие вариацию температуры поверхности во времени даже при фотопреобразовании пучка постоянной интенсивности. Для упрощения имитационной модели положим, что температура одного фотоэлемента в массиве не зависит от температуры соседних фотоэлементов, а определяется только плотностью мощности ( $G$ ) падающего на данный элемент излучения. Зададим эту зависимость следующим образом:

$$T = \alpha G + T_0, \quad (6)$$

при моделировании использованы значения  $\alpha = 0,05 \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ K})$ ,  $T_0 = 273 \text{ K}$ .

## 5 Имитационные тесты затенения поверхности массивов

Для верификации имитационной модели синтезируем массив на основе кремниевых чипов PERC типа размером  $2 \times 2 \text{ см}^2$ . Физические характеристики такой ячейки при преобразовании стандартного солнечного излучения и лазерных пучков различных для различных длин волн описаны в Разделе 2. Температурные свойства были ранее исследованы и описаны в работе [23]. Определим понятия эффективности фотопреобразования массива как отношение максимальной вырабатываемой мощности к мощности падающего излучения. Относительную эффективность массива введем как отношение эффективности преобразования матрицы к эффективности преобразования чипа в нормальных условиях.

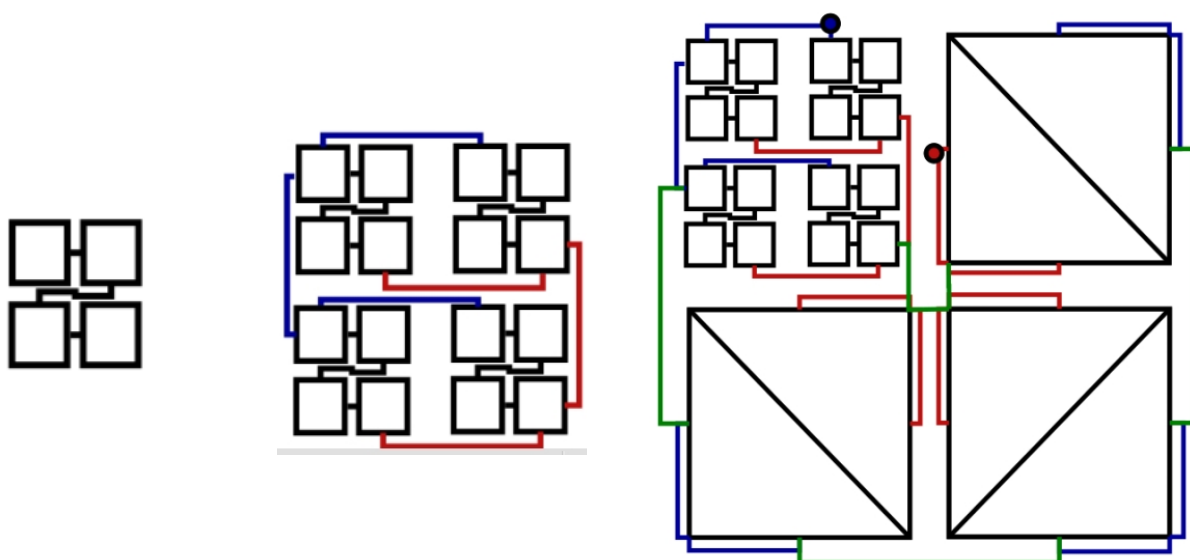


Рис. 5: Сектор массива (слева), модуль массива (в центре) и массив (справа)

Создадим сегмент массива, объединив 4 ячейки последовательно и разместив их внутри квадрата. Подобное объединение позволяеткратно увеличить напряжение холостого хода, компактная группировка уменьшает вероятность частичной засветки одного сегмента. На втором этапе выполним сборку модуля из четырех параллельно соединенных сегментов. Размещение сегментов одного модуля на поверхности массива может быть регулярным или квазислучайным, пример компактной группировки сегментов в массиве приведен на Рис.5.

Рассмотрим три типа коммутации объединения сегментов в модули и модулей в массив:

- линейную параллельно-последовательную (LPS) – левый фрагмент Рис.6,
- смешанную трансляционную параллельно-последовательную (TPS) – центральный фрагмент Рис.6,
- смешанную ротационную параллельно-последовательную (RPS) – правый фрагмент Рис.6.

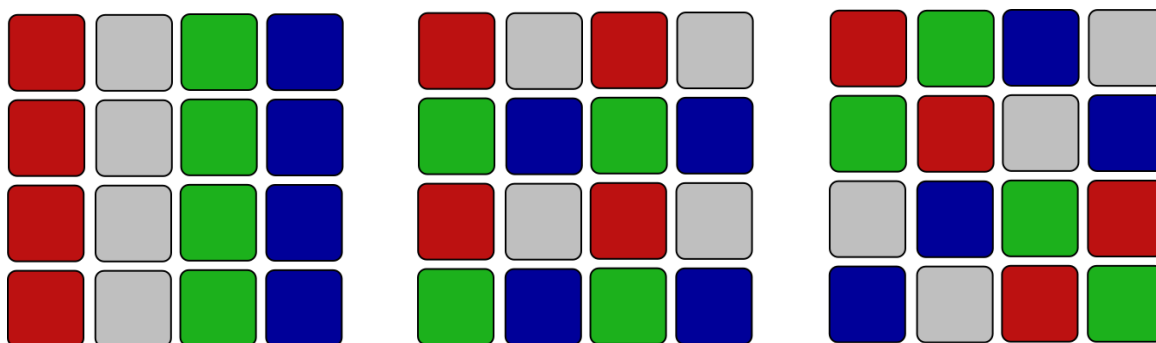


Рис. 6: LPS, TPS и RPS – анализируемые варианты объединения сегментов в модули. Одним цветом выделяются сегменты модуля

Фрагмент текста сценария синтеза сегментов и модулей массива представлен ниже:

```
//Последовательное соединение элементов в группы из 4-х элементов
[Im1,Vm1] = serial_wd([I(:,1),V(:,1),I(:,2),V(:,2),I(:,9),V(:,9),I(:,10),V(:,10)]]);
[Im2,Vm2] = serial_wd([I(:,3),V(:,3),I(:,4),V(:,4),I(:,11),V(:,11),I(:,12),V(:,12)]]);
[Im3,Vm3] = serial_wd([I(:,5),V(:,5),I(:,6),V(:,6),I(:,13),V(:,13),I(:,14),V(:,14)]]);
[Im4,Vm4] = serial_wd([I(:,7),V(:,7),I(:,8),V(:,8),I(:,15),V(:,15),I(:,16),V(:,16)]]);
[Im5,Vm5] = serial_wd([I(:,17),V(:,17),I(:,18),V(:,18),I(:,25),V(:,25),I(:,26),V(:,26)]]);
[Im6,Vm6] = serial_wd([I(:,19),V(:,19),I(:,20),V(:,20),I(:,27),V(:,27),I(:,28),V(:,28)]]);
[Im7,Vm7] = serial_wd([I(:,21),V(:,21),I(:,22),V(:,22),I(:,29),V(:,29),I(:,30),V(:,30)]]);
[Im8,Vm8] = serial_wd([I(:,23),V(:,23),I(:,24),V(:,24),I(:,31),V(:,31),I(:,32),V(:,32)]]);
[Im9,Vm9] = serial_wd([I(:,33),V(:,33),I(:,34),V(:,34),I(:,41),V(:,41),I(:,42),V(:,42)]]);
[Im10,Vm10] = serial_wd([I(:,35),V(:,35),I(:,36),V(:,36),I(:,43),V(:,43),I(:,44),V(:,44)]]);
[Im11,Vm11] = serial_wd([I(:,37),V(:,37),I(:,38),V(:,38),I(:,45),V(:,45),I(:,46),V(:,46)]]);
[Im12,Vm12] = serial_wd([I(:,39),V(:,39),I(:,40),V(:,40),I(:,47),V(:,47),I(:,48),V(:,48)]]);
[Im13,Vm13] = serial_wd([I(:,49),V(:,49),I(:,50),V(:,50),I(:,57),V(:,57),I(:,58),V(:,58)]]);
[Im14,Vm14] = serial_wd([I(:,51),V(:,51),I(:,52),V(:,52),I(:,59),V(:,59),I(:,60),V(:,60)]]);
[Im15,Vm15] = serial_wd([I(:,53),V(:,53),I(:,54),V(:,54),I(:,61),V(:,61),I(:,62),V(:,62)]]);
[Im16,Vm16] = serial_wd([I(:,55),V(:,55),I(:,56),V(:,56),I(:,63),V(:,63),I(:,64),V(:,64)]]);

//Коммутация сегментов в модуль LPS

[Ipar1,Vpar1]=parall([Im1,Vm1,Im2,Vm2,Im3, Vm3,Im4, Vm4])
[Ipar2,Vpar2]=parall([Im5,Vm5,Im6,Vm6,Im7,Vm7,Im8, Vm8])
[Ipar3,Vpar3]=parall([Im9,Vm9,Im10,Vm10,Im11,Vm11,Im12 ,Vm12])
```

```

[IPar4,Vpar4]=parall([Im13,Vm13,Im14,Vm14,Im15,Vm15,Im16 ,Vm16])

//Коммутация сегментов в модуль TPS
/*
[IPar1,Vpar1]=parall([Im1,Vm1,Im5,Vm5,Im9,Vm9,Im13, Vm13])
[IPar2,Vpar2]=parall([Im2,Vm2,Im6,Vm6,Im10,Vm10,Im14, Vm14])
[IPar3,Vpar3]=parall([Im3,Vm3,Im7,Vm7,Im11,Vm11,Im15 ,Vm15])
[IPar4,Vpar4]=parall([Im4,Vm4,Im8,Vm8,Im12,Vm12,Im16 ,Vm16])
*/
//Коммутация сегментов в модуль RPS
/*
[IPar1,Vpar1]=parall([Im2,Vm2,Im5,Vm5,Im11,Vm11,Im16, Vm16])
[IPar2,Vpar2]=parall([Im1,Vm1,Im6,Vm6,Im12,Vm12,Im15, Vm15])
[IPar3,Vpar3]=parall([Im4,Vm4,Im7,Vm7,Im9,Vm9,Im14 ,Vm14])
[IPar4,Vpar4]=parall([Im3,Vm3,Im8,Vm8,Im13,Vm13,Im10 ,Vm10])
*/

```

Протестируем отклик массивов с коммутациями LPS и RPS на однородный пучок с затенением части массива. Зададим равномерную засветку матрицы BBS с мощностью  $500 \text{ W}/\text{m}^2$  и последовательно проведем полосовое затенение по строкам и столбцам Рис.7.

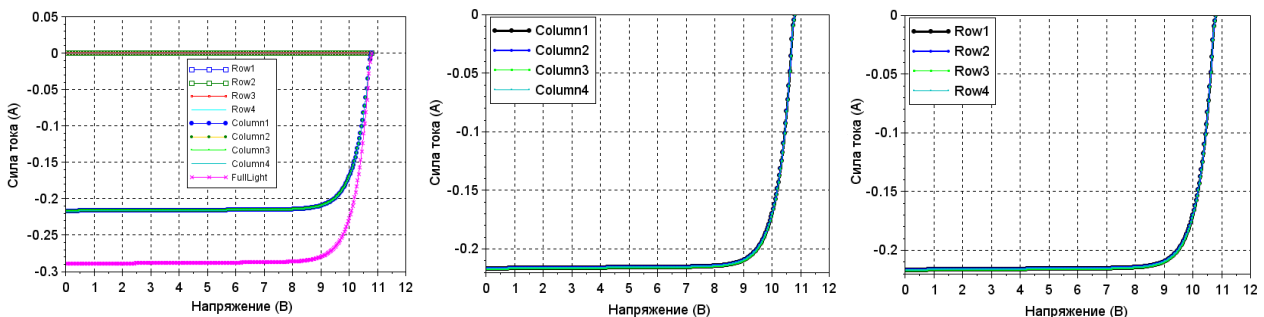


Рис. 7: Вольт-амперные характеристики при затенении столбцов и строк LPS массива (слева) и RTS массива (в центре и справа)

Затенение любого столбца LPS массива полностью размыкает последовательность модулей, при затенении строк ток короткого замыкания уменьшается более чем на четверть от исходного значения. При работе с RTS массивом ситуация иная: при затенении любой строки или любого столбца ток короткого замыкания пропорционален суммарной освещенности незатененных участков. Фактически можно говорить об анизотропии отклика LTS массива и изотропности RTS.

Перейдем к анализу фотопреобразования гауссова пучка диаметра  $0.9L$  ( $L$  – сторона массива) и длиной волны  $808 \text{ нм}$ . Температуру чипов массива

будем полагать пропорциональной падающей интенсивности пучка с указанным ранее коэффициентом. Полосовое затенение строк и столбцов захватывает блоки сегментов, как это показано на Рис.8, 9.

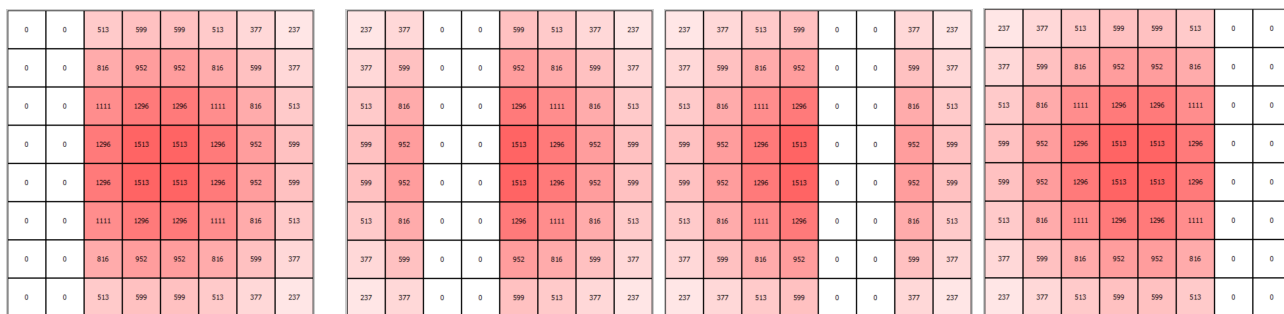


Рис. 8: Затенение массива по столбцам

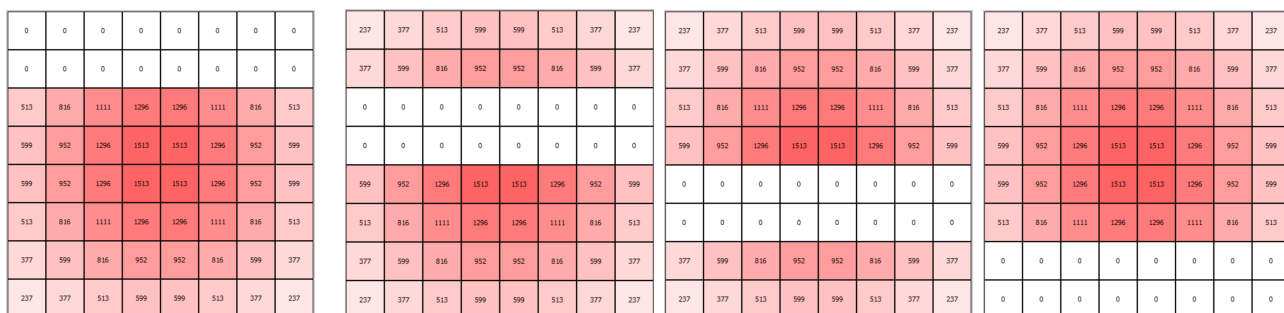


Рис. 9: Затенение массива по строкам

Полученные зависимости представлены на Рис.10. В зависимости от положения строки или столбца меняется затеняемая мощность, соответственно меняется сила тока короткого замыкания. При неравномерном распределении интенсивности по поверхности массива возникают коммутационные потери в сегментах, связанные с пространственным шагом дискретизации сегмента и соотношением линейных размеров чипа и сегмента. При расчетах ВАХ учитываются "геометрические потери" мощности, связанные с выпадением части пучка за поверхность массива. Фактически сила тока, генерируемая сегментом, ограничена сверху током минимально засвеченного чипа. Величина "внутренних потерь" на каждом из сегментов  $Lost_{ij}$  пропорциональна модулю градиента интенсивности:

$$Lost_{ij} = L_S \frac{|grad(I_{ij})|}{I_{ij}}, \quad (7)$$

где  $L_S$  – длина сегмента.



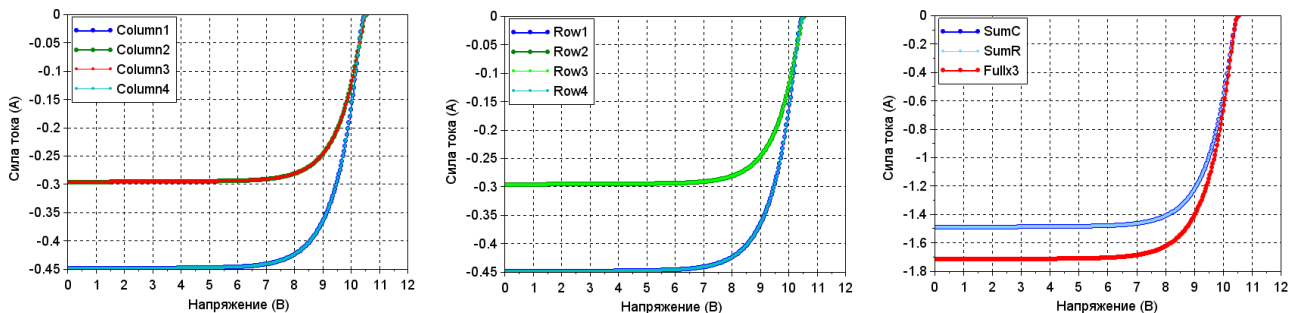


Рис. 10: ВАХ RTS матрицы при затенении столбцов (слева), строк (центр) и определение величины "дефекта тока" для выбранного пучка (справа)

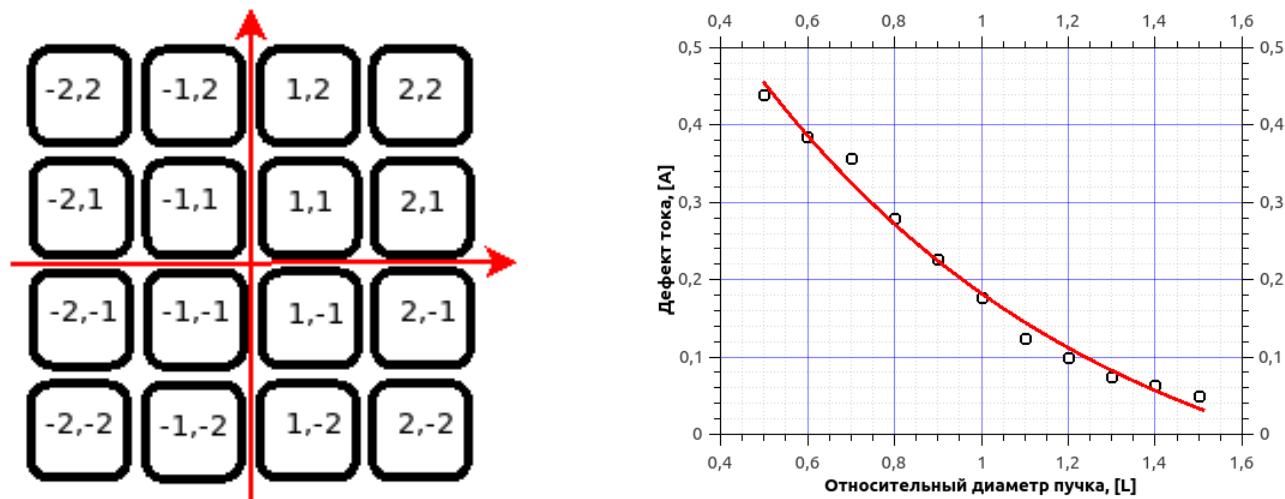


Рис. 11: Разметка элементов массива (слева) и дефект тока в зависимости от диаметра пучка

Определим понятие "дефект тока" как разность токов, вырабатываемых при утроенной полной засветке поверхности массива и суперпозиции всех вариантов парциального затенения:

$$DI_{Columns} = 3I_{Array} - \sum_{i=1}^4 I(Colum_iShadow), \tag{8}$$

$$DI_{Rows} = 3I_{Array} - \sum_{j=1}^4 I(Row_jShadow)$$

Введем координатную сетку для сегментов массива с началом отсчета в его центре. Генерируемые фототоки при преобразовании неоднородного центрального пучка LPS, TPS и RPS массивами разделим на три группы с совпадающими значениями:

$$I_0 = I_{1,1} = I_{-1,1} = I_{1,-1} = I_{-1,-1}, \tag{9}$$

$$I_1 = I_{1,2} = I_{2,1} = I_{-1,2} = I_{-2,1} = I_{1,-2} = I_{-1,-2} = I_{-2,-1} = I_{2,-1} \tag{10}$$

$$I_2 = I_{2,2} = I_{-2,2} = I_{2,-2} = I_{-2,-2}, \tag{11}$$

$$I_0 \geq I_1 \geq I_2. \quad (12)$$

Генерируемые модулями TPS и RPS массивов фототоки составляют в незатененном состоянии:

$$I_{Mod} = I_0 + 2I_1 + I_2. \quad (13)$$

При объединении незатененных модулей в массив кратно возрастает напряжение холостого тока, значение силы тока наследуется у модуля –  $I_{Array} = I_{Mod}$ . При затенении строк или столбцов ситуация меняется, поскольку фототок массива будет ограничен сверху минимальным фототоком модуля после затенения. Затенение центральных элементов ограничивает фототок RPS массива значением  $(2I_1 + I_2)$ , затенение периферийных –  $(I_0 + I_1 + I_2)$ . Для TPS массива ситуация иная –  $(I_0 + I_1)$  при затенении периферийных строк и столбцов и  $(I_1 + I_2)$  при затенении центральных. Различие связано в правилами коммутации, запрещающими в RPS массиве объединение в модуль сегментов совпадающих строк и столбцов. Соответственно, строковое или столбцовое затенение затрагивают не более одного сегмента в любом модуле. Дефект тока для RPS массива составит:

$$DI_{Columns}^{RPS} = DI_{Rows}^{RPS} = I_0 - I_2, \quad (14)$$

и убывает пропорционально градиенту интенсивности вдоль диагонали поверхности массива. Зависимость, полученная при имитационном моделировании представлена на Рис.11. В рассматриваемом случае "дефект тока" меняется от 0.44 А узкого пучка ( $D_{beam} = 0.5L$ ) до 0.05 А для уширенного ( $D_{beam} = 1.5L$ ).

Использование метода дефекта тока, образующегося при затенении групп элементов, наиболее эффективно при равномерном освещении. Вычислим относительный дефект тока для всех трех массивов, полагая  $I_0 = I_1 = I_2$  и нормируя итоговое значение на  $3I_{Array}$ :

$$NormDI_{Columns}^{RPS} = NormDI_{Rows}^{RPS} = 0, \quad (15)$$

$$NormDI_{Columns}^{TPS} = NormDI_{Rows}^{TPS} = \frac{1}{3}, \quad (16)$$

$$NormDI_{Columns}^{LPS} = 1, \quad NormDI_{Rows}^{TPS} = 0. \quad (17)$$

Нулевое значение дефекта тока означает отсутствие коммутационных бло-

кировок затененными элементами, единичное нормированное значение соответствует прекращению фотопреобразования, любое иное значение в диапазоне  $(0, 1)$  указывает на среднюю долю потерь при парциальном затенении. Совпадение значений дефекта тока при затенении или строк или столбцов возможно при совпадении типа симметрии размещения сегментов в модуле относительно поворота на  $\pi/2$ .

## 6 Эффективность фотопреобразования смещенных пучков

Положение энергонесущего пучка на поверхности массива может меняться в результате рефракционных действий атмосферы или относительного движения бортов, на которых зафиксированы передатчик и приемник излучения. Для анализа глубины модуляции вырабатываемой мощности при дрейфе пучка по поверхности, выполним имитационное моделирование процесса фотопреобразования монохроматического гауссова пучка с длиной волны 808 нм. Для расчетов используем характеристики уединенного фотоэлектрического элемента PERC типа размером  $2 \times 2 \text{ см}^2$ , представленные в Таблице 3. Эффективность фотопреобразования (далее - эффективность) определим как отношение максимальной вырабатываемой мощности к мощности достигающего поверхность поверхности излучения, а относительную эффективность массива при конкретной конфигурации пучка введем через отношение эффективности преобразования массива к эффективности преобразования ячейки в нормальных условиях.

Диаметр пучка определим по уровню спада интенсивности в  $1/e$  раз относительно максимума в масштабе линейного размера массива. Рассмотрены четыре значения диаметра пучка –  $0.5L$ ,  $0.75L$ ,  $0.9L$  и  $L$  (здесь  $L$  сторона квадратного массива). Усредненная мощность падающего излучения составляет  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , при этом величина плотности мощности в центре пучка не превышала  $5\text{SUN}$ . Ниже представлены диаграммы эффективности в зависимости от положения центра пучка на сетке элементов массива, а также зависимость эффективности фотовольтаического преобразования при перемещении центра энергонесущего пучка по диагональным элементам матрицы.

Все наблюдаемые на Рис.12 – Рис.15 различия относительной эффективно-

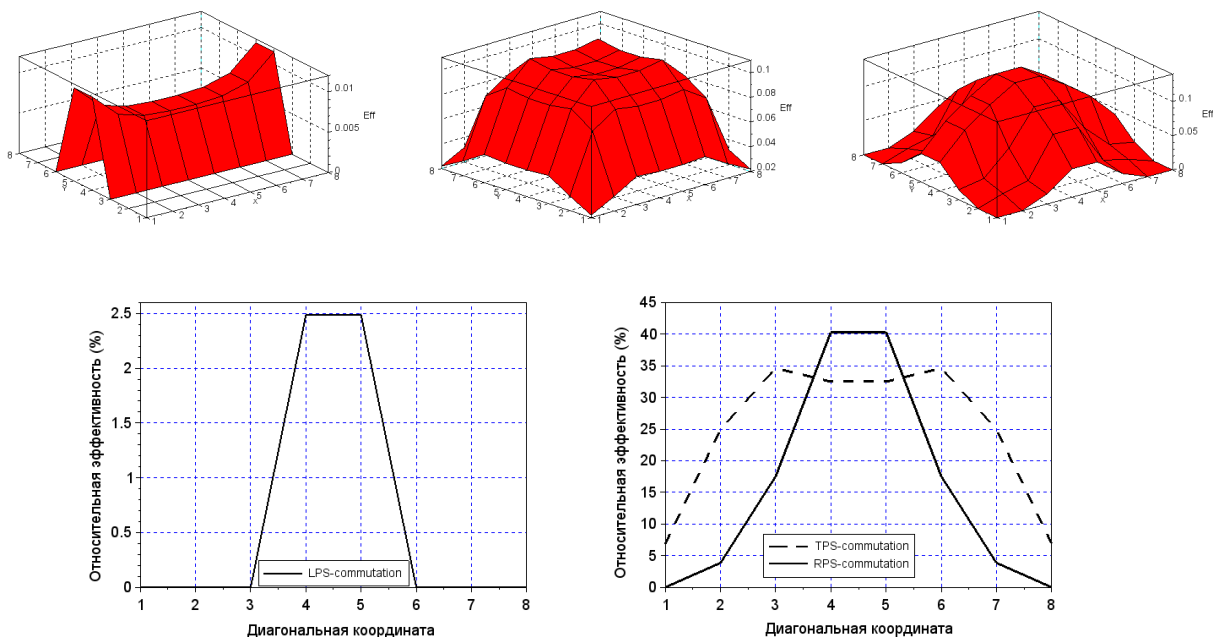


Рис. 12: Ширина пучка  $0.5L$ . Диаграмма эффективности LPS-коммутации(слева), TPS-коммутации (центр) и RPS-коммутации (справа), зависимость относительной эффективности от положения центра пучка на диагонали массивов (снизу)

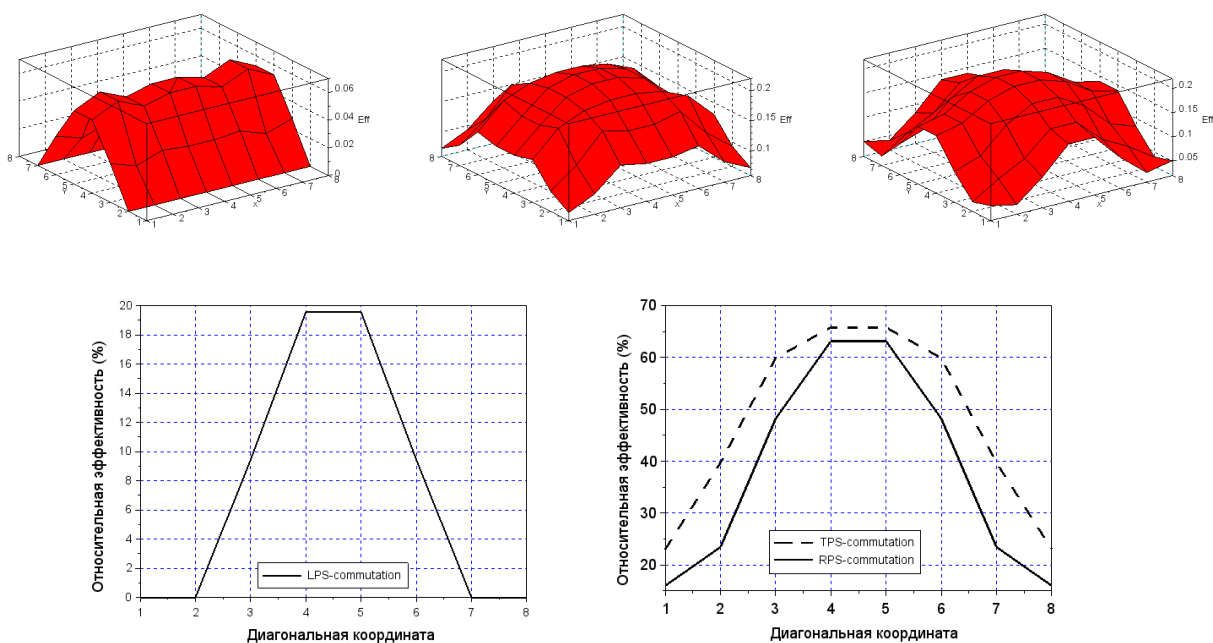


Рис. 13: Ширина пучка  $0.75L$ . Диаграмма эффективности LPS-коммутации(слева), TPS-коммутации (центр) и RPS-коммутации (справа), зависимость относительной эффективности от положения центра пучка на диагонали массивов (снизу)

сти между массивами с трансляционным и ротационным методами создания

модулей связаны с исходными требованиями к распределяющей коммутации – оптимальный сбор энергии при центрованном расположении пучка на массиве и сглаживание периферийных провалов при отклонении центра пучка от центра массива. Как следует из результатов моделирования, эффективность фотопреобразования монотонно возрастает с ростом ширины пучка и выравнивании распределения интенсивности на поверхности массива.

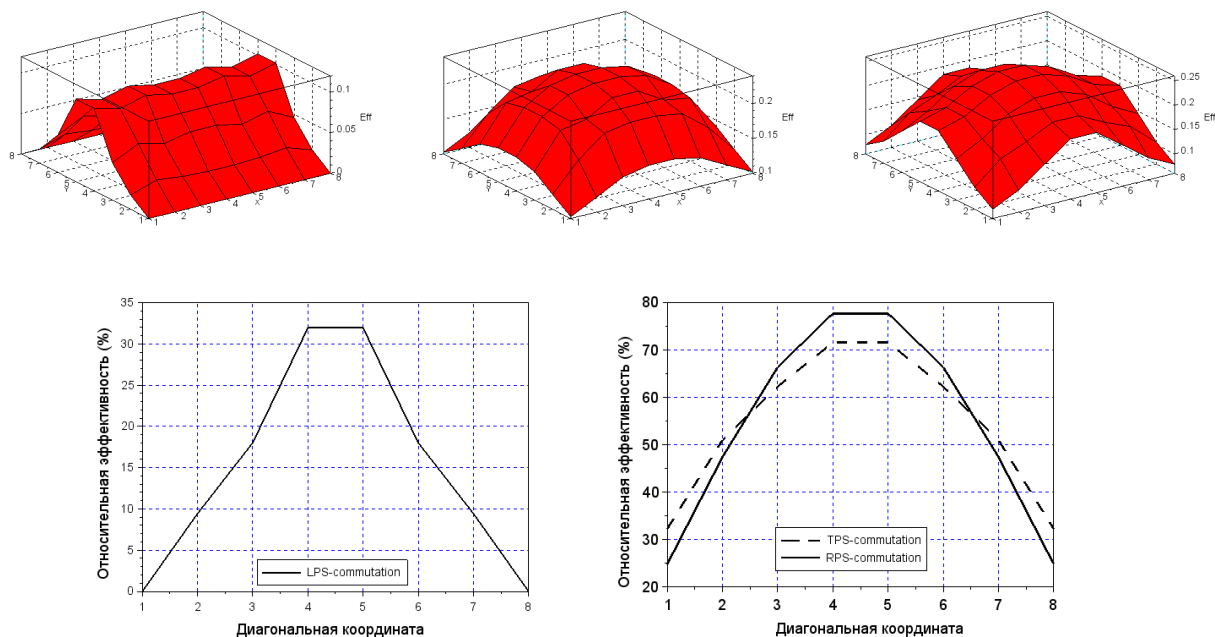


Рис. 14: Ширина пучка  $0.9L$ . Диаграмма эффективности LPS-коммутации(слева), TPS-коммутации (центр) и RPS-коммутации (справа), зависимость относительной эффективности от положения центра пучка на диагонали массивов (снизу)

Но в лучшем случае потери, связанные с неравномерной засветкой будут составлять не менее 0.15. Что же касается выбора оптимального типа коммутации, то в данном случае более эффективной будет RPS коммутация. Изменение структуры отдельного сегмента, увеличение числа сегментов в модуле и числа модулей в массиве можеткратно уменьшить коммутационные потери как по току, так и по мощности.

Предварительные оценки для массива  $8 \times 8$  с рассеивающей коммутацией, выполненной по "мягкому правилу" – 8 модулей по одному сегменту из каждой строки и каждого столбца массива – дают верхнее значение для коммутационных потерь на уровне 0.09.

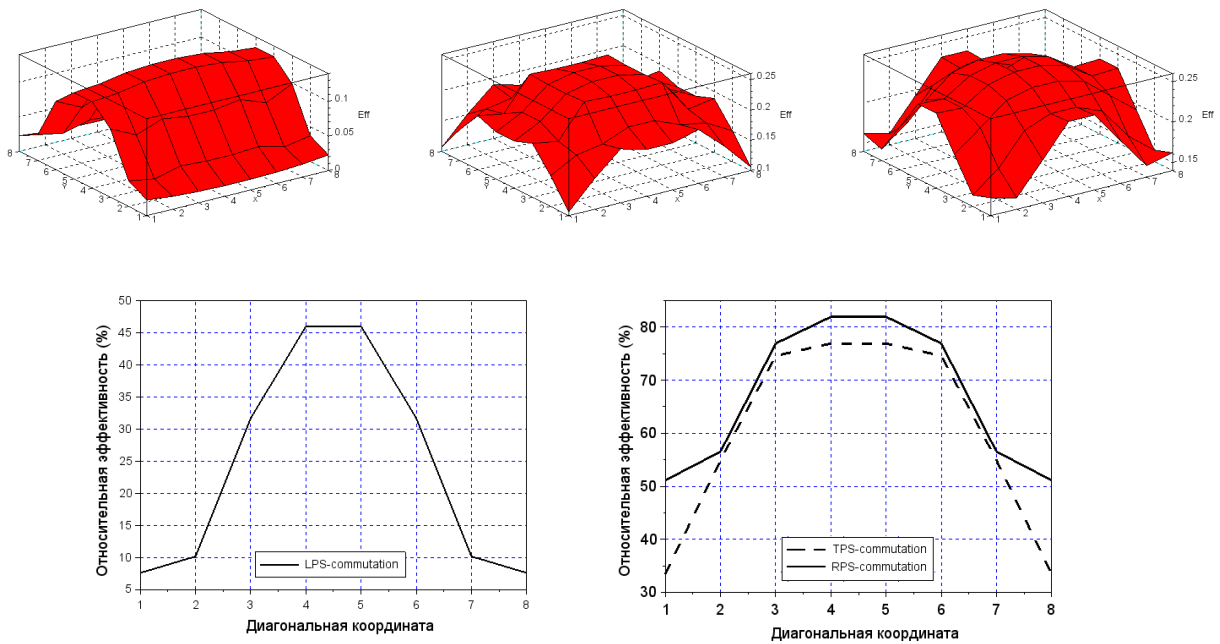


Рис. 15: Ширина пучка  $L$ . Диаграмма эффективности LPS-коммутации(слева), TPS-коммутации (центр) и RPS-коммутации (справа), зависимость относительной эффективности от положения центра пучка на диагонали массивов (снизу)

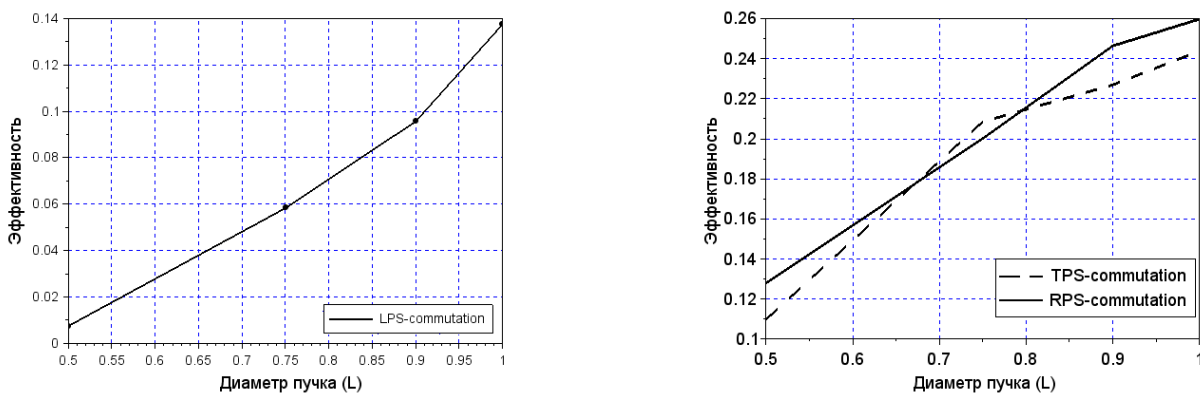


Рис. 16: Зависимость максимальной эффективности матрицы от размера пучка для трех типов коммутации – LPS (слева), TPS и RPS (справа).

## Заключение

Результаты имитационных исследований фотовольтаических преобразователей определяют правила синтеза коммутационных схем, эффективных при работе с мощными коллимированными энергонесущими лазерными пучками. Особенности работы с коллимированным энергонесущим пучком состоят в:

- ограниченности апертуры пучка и необходимости удержания его размера и положения на фотопреобразующем массиве;

- тепловом действии мощного коллимированного пучка на поверхность массива, сопровождающимся изменением фотовольтаических характеристик "горячих" элементов;
- неоднородности профиля распределения интенсивности пучка на поверхности массива, снижающей эффективность фотопреобразования относительно пучков с однородным профилем.

Предложенная схема имитационного моделирования интегральных фотовольтаических характеристик массива позволяет оптимизировать процесс синтеза фотопреобразователя пучка [24–30]. Возможность перебора различных типов элементов, учет температурных характеристик, вариация топологических решений коммутируемых сегментов и модулей в полной мере удовлетворяют задачам создания преобразователей для квазистатических режимов падающего энергонесущего пучка.

### Литература

1. Deep residual network based fault detection and diagnosis of photovoltaic arrays using current-voltage curves and ambient conditions / Zhicong Chen, Yixiang Chen, Lijun Wu et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2019. — Vol. 198. — P. 111793.
2. Madeti Siva Ramakrishna, Singh SN. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system // *Solar Energy*. — 2017. — Vol. 158. — Pp. 161–185.
3. Analysis of current and voltage indicators in grid connected PV (photovoltaic) systems working in faulty and partial shading conditions / Santiago Silvestre, Sofiane Kichou, Aissa Chouder et al. // *Energy*. — 2015. — Vol. 86. — Pp. 42–50.
4. Dhoke Amit, Sharma Rahul, Saha Tapan Kumar. PV module degradation analysis and impact on settings of overcurrent protection devices // *Solar Energy*. — 2018. — Vol. 160. — Pp. 360–367.

5. Blank A., Bogdanov S., Suhareva N., et al. Distribution commutation of photovoltaic arrays for tasks of wireless optical energy // *Journal of Radio Electronics*. — 2019. — Vol. 11. — Pp. 1–27.
6. Blank A., Bogdanov S., Suhareva N. Optimal commutation topology of photovoltaic cells for wireless power applications // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. — 2019. — Pp. 1–19.
7. Blank A., Bogdanov S., Suhareva N., et al. Topology Communication Photoconverters Matrix of High-power Coherent Monochromatic Radiation // *Progress In Electromagnetics Research Symposium*. — 2019. — Pp. 1–10.
8. Revisiting Thin Silicon for Photovoltaics: A Technoeconomic Perspective / Zhe Liu, Sarah E Sofia, Hannu S Laine et al. // *arXiv preprint arXiv:1906.06770*. — 2019.
9. Akram Mohd Nafis, Lotfifard Saeed. Modeling and health monitoring of DC side of photovoltaic array // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. — 2015. — Vol. 6, no. 4. — Pp. 1245–1253.
10. Arc fault detection and localization in photovoltaic systems using feature distribution maps of parallel capacitor currents / Qing Xiong, Xiaojun Liu, Xianyong Feng et al. // *IEEE Journal of Photovoltaics*. — 2018. — Vol. 8, no. 4. — Pp. 1090–1097.
11. Enhanced simulation of total cross tied photovoltaic arrays / ML Orozco-Gutierrez, Giovanni Spagnuolo, Carlos Andrés Ramos-Paja et al. // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 49–64.
12. Belhachat F, Larbes C. Modeling, analysis and comparison of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions // *Solar Energy*. — 2015. — Vol. 120. — Pp. 399–418.
13. Bingöl Okan, Özkaya Burçin. Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions // *Solar Energy*. — 2018. — Vol. 160. — Pp. 336–343.
14. El-Dein MZ Shams, Kazerani Mehrdad, Salama MMA. An optimal total cross tied interconnection for reducing mismatch losses in photovoltaic arrays //



- IEEE transactions on sustainable energy*. — 2012. — Vol. 4, no. 1. — Pp. 99–107.
15. A technique for mismatched PV array simulation / ML Orozco-Gutierrez, JM Ramirez-Scarpetta, G Spagnuolo, CA Ramos-Paja // *Renewable Energy*. — 2013. — Vol. 55. — Pp. 417–427.
  16. Photovoltaic sources modeling / Giovanni Petrone, Carlos Andrés Ramos-Paja, Giovanni Spagnuolo, Weidong Xiao. — Wiley Online Library, 2017.
  17. *Ranga Sergiu-Alex, Kirei Botond Sandor, Topa Marina Dana*. Numerical modeling of cascaded photovoltaic cells in open source simulation environment // *Acta Technica Napocensis*. — 2017. — Vol. 58, no. 3. — P. 1.
  18. New procedure for fault detection in grid connected PV systems based on the evaluation of current and voltage indicators / Santiago Silvestre, Mário Aires da Silva, Aissa Chouder et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2014. — Vol. 86. — Pp. 241–249.
  19. Simple and efficient approach to detect and diagnose electrical faults and partial shading in photovoltaic systems / Y Chaibi, M Malvoni, A Chouder et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2019. — Vol. 196. — Pp. 330–343.
  20. Fault diagnosis of photovoltaic panels using dynamic current–voltage characteristics / Wenguan Wang, Alex Chun-For Liu, Henry Shu-Hung Chung et al. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. — 2015. — Vol. 31, no. 2. — Pp. 1588–1599.
  21. A shadow fault detection method based on the standard error analysis of IV curves / Mickael Bressan, Youssef El Basri, AG Galeano, Corinne Alonso // *Renewable energy*. — 2016. — Vol. 99. — Pp. 1181–1190.
  22. Statistical fault detection in photovoltaic systems / Elyes Garoudja, Fouzi Harrou, Ying Sun et al. // *Solar Energy*. — 2017. — Vol. 150. — Pp. 485–499.
  23. *Blank A., Razuvaev A., Suhareva N., et al.* Quasistatic thermal and nonlinear processes of photoconversion of high-density optical radiation by multilayer structures // *EPJ Web of Conferences*. — 2017. — Vol. 161. — Pp. 1–2.

24. A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: types, detection, and mitigation techniques / Mohammed Khorshed Alam, Faisal Khan, Jay Johnson, Jack Flicker // *IEEE Journal of Photovoltaics*. — 2015. — Vol. 5, no. 3. — Pp. 982–997.
25. Mellit Adel, Tina Giuseppe Marco, Kalogirou Soteris A. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2018. — Vol. 91. — Pp. 1–17.
26. Triki-Lahiani Asma, Abdelghani Afef Bennani-Ben, Slama-Belkhodja Ilhem. Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2018. — Vol. 82. — Pp. 2680–2692.
27. Experimental studies of fault location in PV module strings / Takumi Takashima, Junji Yamaguchi, Kenji Otani et al. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2009. — Vol. 93, no. 6-7. — Pp. 1079–1082.
28. Pillai Dhanup S, Blaabjerg Frede, Rajasekar Natarajan. A comparative evaluation of advanced fault detection approaches for PV systems // *IEEE Journal of Photovoltaics*. — 2019. — Vol. 9, no. 2. — Pp. 513–527.
29. Krishna G Sai, Moger Tukaram. Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art // *Solar Energy*. — 2019. — Vol. 182. — Pp. 429–452.
30. Wang Yaw-Juen, Hsu Po-Chun. An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells // *Energy*. — 2011. — Vol. 36, no. 5. — Pp. 3069–3078.

#### Для цитирования:

Бланк А.В., С.Д. Богданов, Сухарева Н.А., Унтила Г.Г. Имитационное моделирование фотовольтаических массивов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/3/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.3