

DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.1

УДК: 53.083.8 537.9

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО МАССИВА

А. В. Бланк, С. Д. Богданов, Н. А. Сухарева

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

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2020 г.

Аннотация. Обсуждается отклик регулярного и распределяющего фотовольтаических массивов на действие непрерывного мощного энергонесущего пучка различного размера и позиционирования. Учтена вариация температуры сегментов массива в зависимости от интенсивности падающего излучения. Рассмотрены режимы "жесткой" и "адаптивной" термостабилизации, – в первом случае все сегменты массива поддерживаются при постоянной температуре, во втором – выставляется ограничение по максимальной температуре поверхности, а профиль температуры поверхности в квазистационарном режиме повторяет распределение интенсивности энергонесущего пучка. Введено понятие обобщенной эффективности фотопреобразования при работе с пучком, размеры которого меньше линейных размеров массива. Представлен сравнительный анализ основных фотовольтаических характеристик полных и усеченных массивов, оптимизированных для преобразования осесимметричных пучков.

Ключевые слова: фотовольтаический массив, температурные режимы, обобщенная эффективность, регулярная и распределяющая коммутация

Abstract. The response of the regular and distributing photovoltaic arrays to the action of a continuous powerful energy-carrying beam of various positions and sizes is discussed. The temperature variation of the segments of the array is taken into account depending on the intensity of the incident radiation. The modes of "hard" and "adaptive" thermal stabilization are considered - in the first case, all segments of the array are maintained at a constant temperature, in the second - a restriction on the maximum surface temperature is set, and the surface temperature profile in the quasi-stationary mode repeats the distribution of the energy-carrying intensity beam. The concept of generalized photoconversion efficiency is introduced when working with a beam whose dimensions are smaller than the linear dimensions

of the array. A comparative analysis of the main photovoltaic characteristics of complete and truncated arrays optimized for the transformation of axisymmetric beams is presented.

Key words: photovoltaic array, temperature conditions, generalized efficiency, regular and distributive switching

Введение

Процесс фотовольтаического преобразования коллимированных энергонесущих волновых пучков сопровождается множеством физических явлений, среди которых температурное самовоздействие падающего на поверхность фотовольтаического массива пучка, процессы термодиффузии, теплопроводности с участием подложки крепления элементов массива, переходные процессы перераспределения токов при смещениях пучка [1; 2]. Неоднородность, нестационарность и неравновесность распределения интенсивности падающего пучка, относительно большие значения собственной емкости (до нескольких десятков микрофарад на сегмент массива) приводят к развитию сложных процессов токораспределения, компенсировать которые возможно специальными схемами коммутации [3–5]. В работах [6–8] рассмотрены методы синтеза коммутационных схем с трансляционной и ротационной симметрией для малоразмерных массивов 4×4 . В данной работе анализируются квазистационарные процессы для распределяющей коммутации в массиве 8×8 . Используемые габариты, фотовольтаические характеристики и термические режимы соответствуют макету разрабатываемого прототипа фотоприемника-преобразователя для систем беспроводной оптической энергопередачи [9; 10].

1 Регулярный и распределяющий массивы

Рассмотрим модель рабочего массива с активным полем диаметром не менее 300 мм. Создадим массив требуемой геометрии из 64 полных сегментов размером 37.5×37.5 мм², каждый из сегментов состоит из двух последовательно соединенных чипов размером 13.75×37.5 мм² с центральным контактом. Геометрия отдельного чипа определяется ограничениями резистивных потерь при работе в концентраторном режиме. Выберем для сравнительного анализа две коммутационные схемы, состоящие из 64-х сегментов, объединяемых на

первом этапе параллельно в 8 модулей и на втором этапе последовательно – в рабочий массив. Напряжение холостого хода подобного массива достигает значения $16 \cdot U_{OC}$, где U_{OC} – напряжение холостого хода отдельного чипа. На Рис.1 в условных цветах представлены группировки модулей из сегментов.

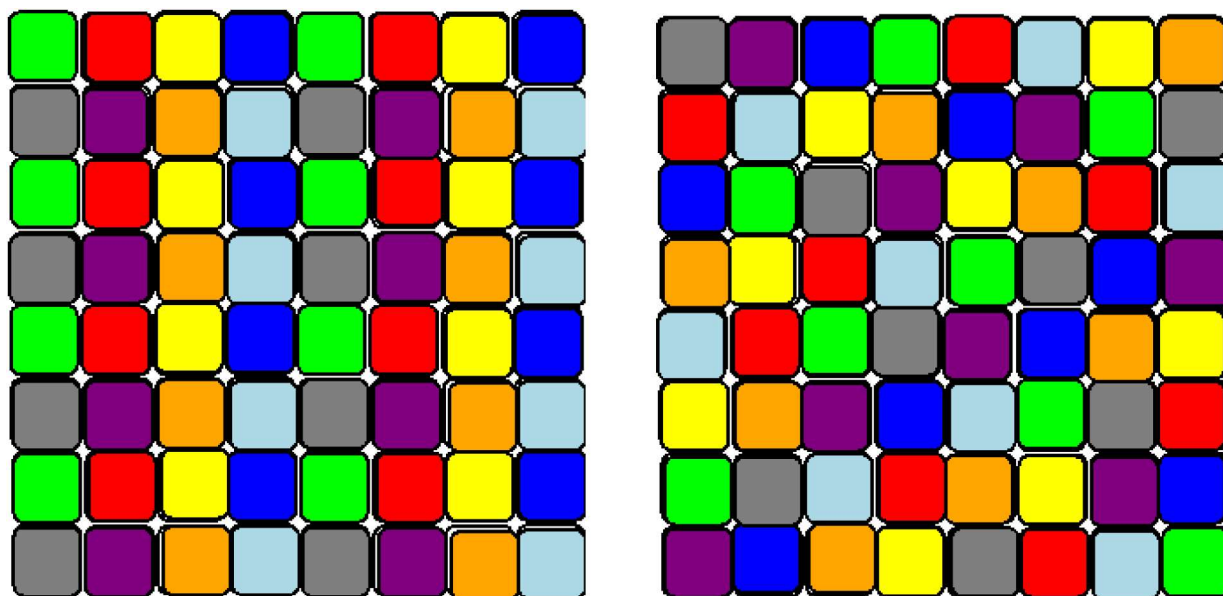


Рис. 1: Массив 8x8 с трансляционной параллельно-последовательной коммутацией (TPS) - слева и массив 8x8 с выравнивающей параллельно-последовательной коммутацией (RndPS) - справа.

Эффективность "перегруппировки" падающего потока распределяющим массивом определяется по величине энтропии бинарной последовательности, соответствующей конкретной коммутационной схеме. Для сегмента каждого цвета в 3-х битовой нотации определим значение от 001 до 111, значение 000 означает отсутствие элемента в данной позиции или разрыв последовательной цепочки. Первая строка индексируется 24-х битной случайной последовательностью и разделяется на 8 трехбитных фрагментов. Информационная энтропия схемы TPS составляет 2.0, схемы RndPS – 2.8. Отметим, что для распределяющего массива на каждой стороне квадрата есть доступ к любому из 8 модулей, что упрощает диагностические задачи и задачи масштабирования размеров рабочей поверхности.

Важной пространственной характеристикой массивов, количественно задающей структуру коммутации, является период следования сегментов различных модулей на поверхности в ортогональных направления. Например, для рассматриваемых массивов периоды составляют:

- регулярный – 4 по горизонтали, 2 по вертикали,

- распределяющий – 1 по горизонтали и вертикали.

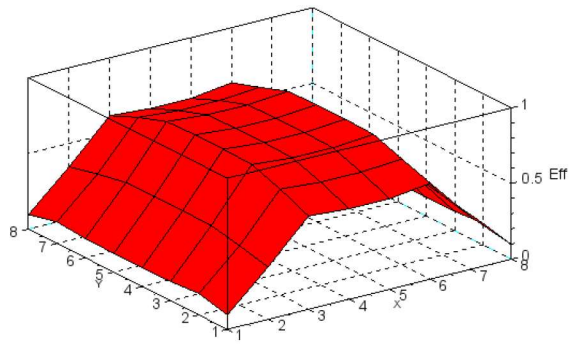
2 Эффективность массива ФЭП при преобразовании осесимметричных пучков различных размеров

Рассмотрим ряд масштабируемых характеристик фотовольтаических массивов, вычисляя их с помощью комплекса имитационного моделирования, описанного в [6]. В качестве контрольного чипа был выбран элемент из монокристаллического кремния PERC типа [11–13] с фотоэлектрическими и термическими параметрами, представленными в [8].

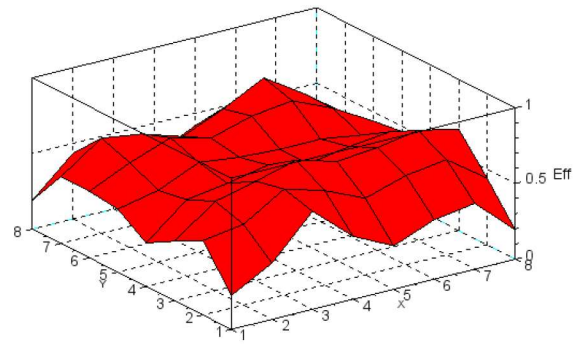
Учитывались температурные зависимости тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от температуры для набора длин волн в ближнем ИК диапазоне от 1083 нм до 808 нм. Квазистационарное распределение температуры по поверхности массива полагалось пропорциональным падающей интенсивности, но не превышающим пороговое значение температуры в 323°K. В качестве опорного значения эффективности фотопреобразования использовались значения, получаемые в приближении равномерного распределения интенсивности по поверхности этого-же массива при условии сохранения полной мощности и удержании температуры поверхности на значении 273°K.

На рисунках ниже представлены зависимости эффективности фотопреобразования от размера и положения гауссова энергонесущего пучка при условии адаптивной (пропорциональной падающей мощности) термостабилизации поверхности массивов. Размер пучка определялся диаметром отсечки по уровню 0.9 от полной падающей мощности. Для массива с регулярной коммутацией и принудительно введенным различием периода компоновочной ячейки в ортогональных направлениях хорошо проявляется различие градиента эффективности вдоль горизонтального и вертикального направлений массива.

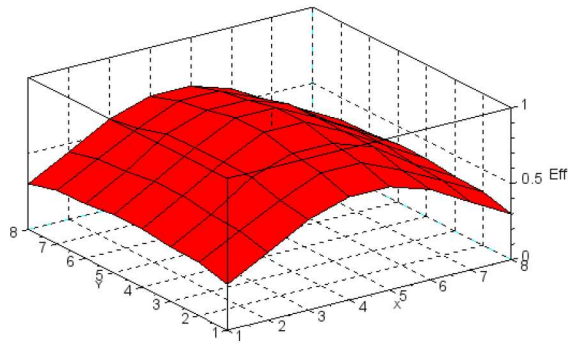
Количественные значения относительной эффективности фотопреобразования при перемещении энергетического центра пучка по центрам сегментов массива представлены на Рис.2.



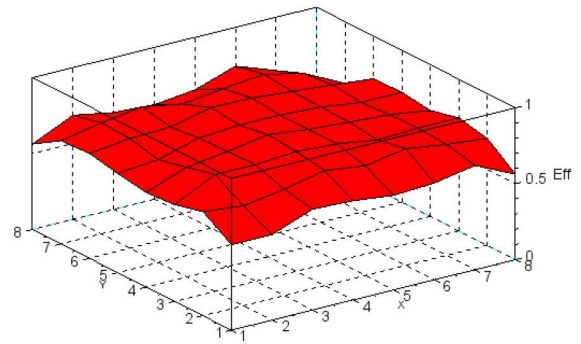
D=100 мм



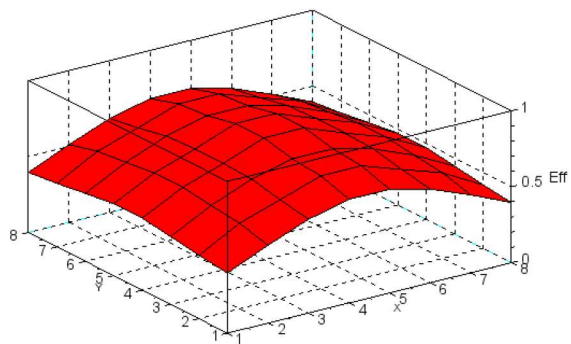
D=100 мм



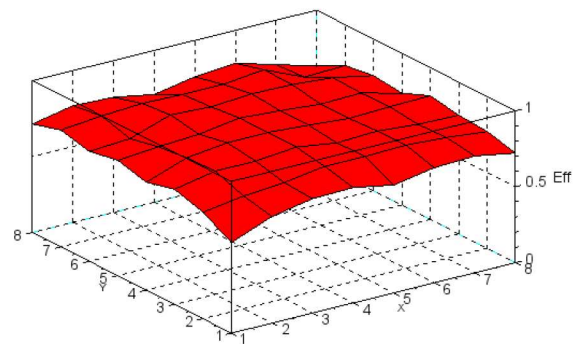
D=200 мм



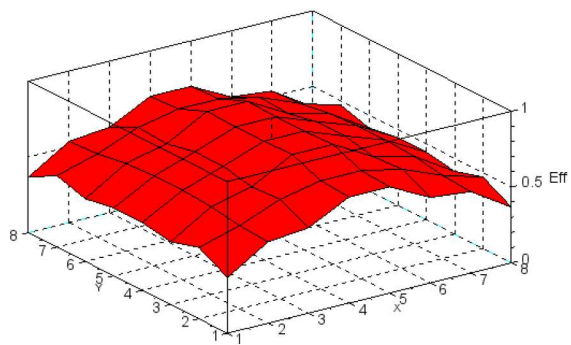
D=200 мм



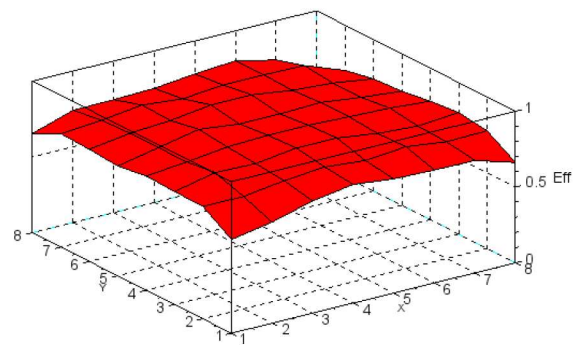
D=250 мм



D=250 мм



D=300 мм



D=300 мм

Рис. 2: Профили эффективности фотовольтаического преобразования гауссовых пучков различного диаметра для регулярного массива - слева и распределяющего массива - справа.

Для массива с регулярной коммутацией практически для всех радиусов пучка наблюдается монотонный спад относительной эффективности при уходе центра пучка от оси массива. Градиент спада пропорционален пространственному периоду массива вдоль анализируемого направления смещений пучка. Для массива с распределяющей коммутацией увеличение диаметра пучка "расправляет" складки на поверхности относительной эффективности. Регулярный и случайный дрейф центра порождает локальные вариации фототока, которые гасятся на интервале времени, определяемом емкостными и резистивными характеристиками сегментов массива.

Эффективность фотовольтаического преобразования на основе профиля вольт-амперной характеристики может быть оценена по значению фактора заполнения, вычисляемого из отношения максимальной мощности фотопреобразования к произведению тока короткого замыкания и напряжения холостого хода:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC}V_{OC}}. \quad (1)$$

В левом столбце Рис.5 представлены зависимости фактора заполнения от размера энергонесущего пучка и положения его центра на диагонали массива. Относительно малая вариация значений фактора заполнения, не превосходящая 0.03 от среднего значения как для регулярного, так и распределяющего массивов позволяет принимать фактор заполнения как постоянную величину для осесимметричных пучков различного положения и размеров.

Проанализируем структуру вольт-амперных Рис.3 и ватт-амперных Рис.4 характеристик регулярного и распределяющего массивов при перемещении оси энергонесущего пучка по диагонали массива. Симметрия размещения сегментов регулярного массива отображается в разделении семейств вольт-амперных характеристик на четыре подгруппы, соответствующие попаданию центра пучка на сегменты (1,1) и (8,8), (2,2) и (7,7), (3,3) и (6,6), (4,4) и (5,5). В распределяющем массиве каждая из позиций уникальна по отклику, порождает большее значение фототока за исключением центральных позиций для узкого пучка.

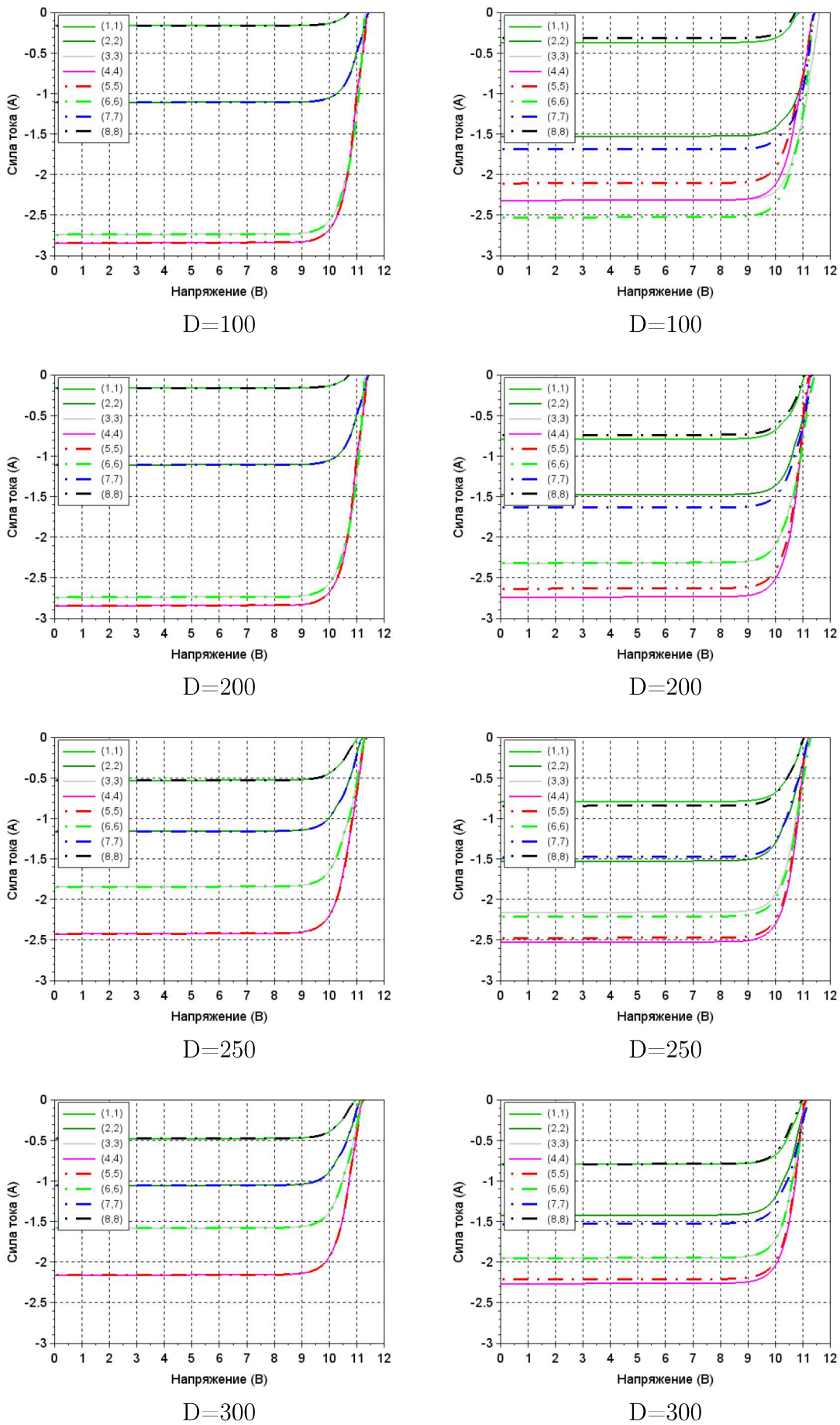


Рис. 3: Вольт-амперные характеристики при диагональном перемещении центра пучка по сегментам регулярного массива - слева, и распределяющего массива - справа.

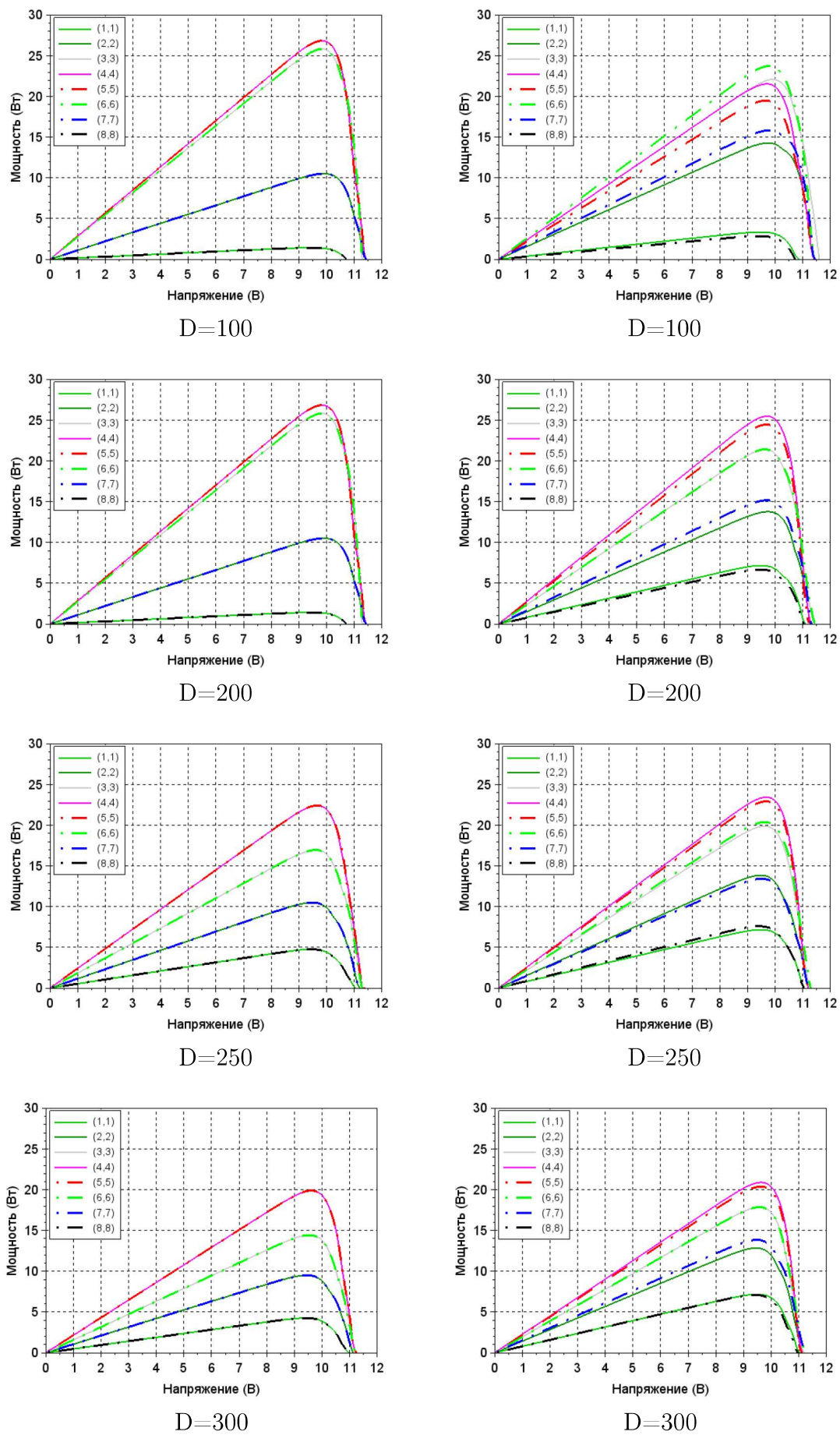


Рис. 4: Ватт-амперные характеристики при диагональном перемещении центра пучка для регулярного массива - слева, и распределяющего массива - справа.

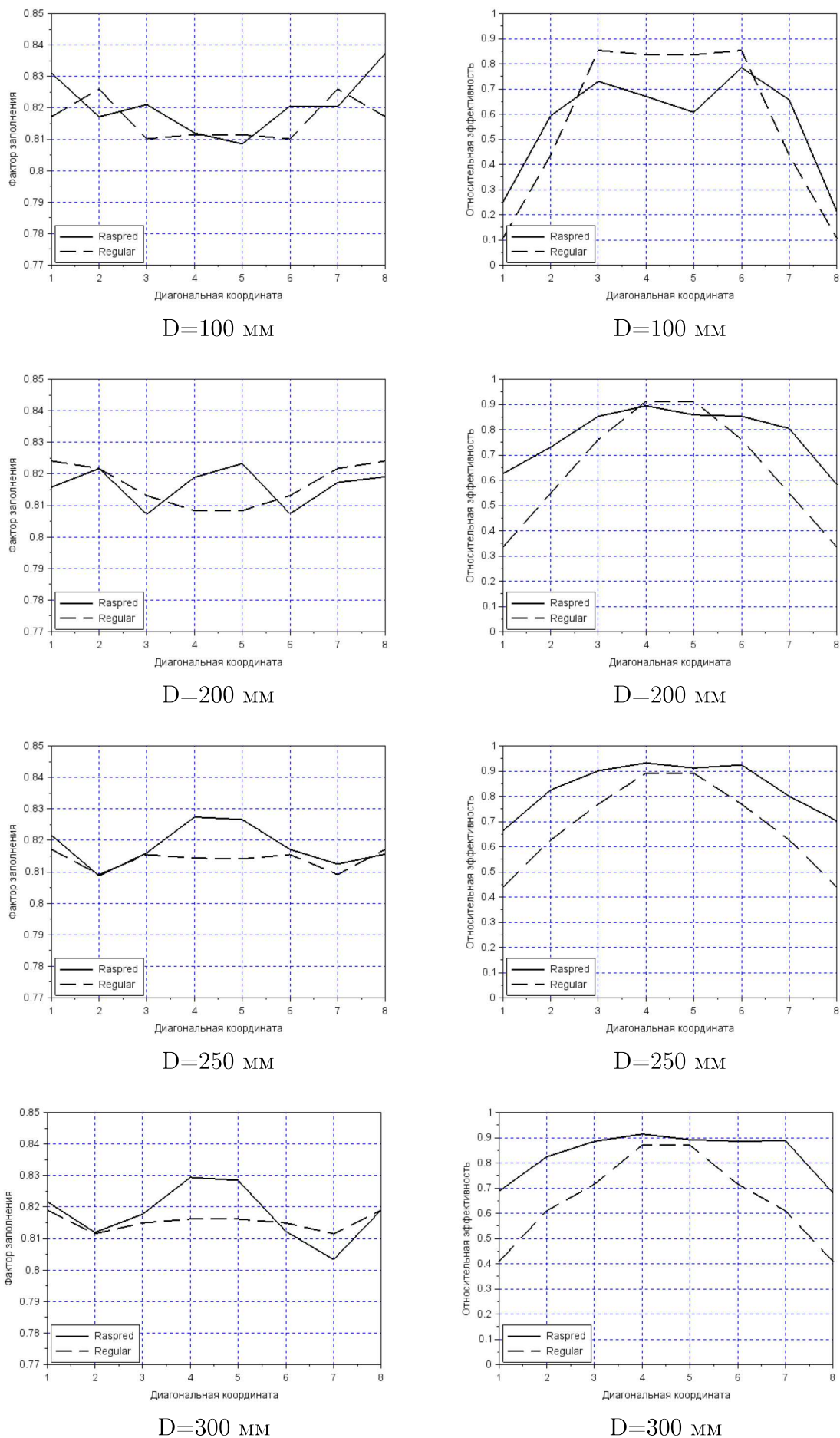


Рис. 5: Фактор заполнения и профили относительной эффективности фото-вольтаического преобразования пучков различного диаметра.

Используемая при сравнении различных коммутационных схем относительная эффективность определяется иначе:

$$\gamma(i, j) = \frac{P_{max}^{AI}}{P_{max}^{UI}}, \quad (2)$$

здесь P_{max}^{UI} – максимальная мощность, генерируемая при равномерном распределении интенсивности и фиксированной падающей мощности (Uniform Intensity), P_{max}^{AI} – максимальная мощность, генерируемая при падении произвольного осесимметричного пучка (Arbitrary Intensity), (i, j) – координата центра пучка на поверхности массива. Зависимости относительной эффективности от положения и размера пучка для двух схем коммутации представлены на правой части Рис.5.

Поскольку эффективность фотопреобразования чувствительна к изменению позиции центра пучка, определим новую характеристику – обобщенную эффективность, как среднее по допустимому ансамблю позиций центра энергонесущего пучка:

$$\Gamma_S = \frac{1}{64} \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 \gamma(i, j), \quad (3)$$

здесь $\gamma(i, j)$ – эффективность преобразования энергии пучка при положении его энергетического центра в сегменте (i, j) . Несмотря на математическую корректность выражения (3), предложенная форма обобщенной эффективности соответствует регистрируемой только при равновероятном обнаружении центра пучка в любом сегменте массива. Как правило, такое предположение некорректно и ведет к заниженным значениям. Строгое решение задачи возможно при условии трассировки положения пучка либо при априорном определении функции распределения вероятности энергетического центра пучка. Один из частных случаев такого распределения – равновероятное присутствие пучка на сегментах диагонали, для которой обобщенная эффективность фотовольтаического преобразования составит:

$$\Gamma_D = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \gamma(j, j), \quad (4)$$

именно эта характеристика будет далее использована для сравнения массивов и режимов их функционирования.

3 Режим принудительной термостабилизации

Неоднородность температурного распределения на поверхности фотовольтаического массива, вариация его профиля при дрейфе и эмиттере энергетического центра пучка описываются стохастическим кинетическим уравнением с учетом скорости дрейфа, термодиффузии, теплопроводности как массива, так и теплоотводящего объема. Помимо этого следует учитывать изменение температуры поверхности за счет фото-термоэлектрических процессов. Один из вариантов решения всех перечисленных задач – "жесткая" термостабилизация фотопреобразующей поверхности на заданном значении температуры.

Пусть температура поверхности массива постоянна и может быть зафиксирована в диапазоне от 0°C до 100°C . Влияние температуры на фотовольтаические свойства зависит от структуры полосы квантового выхода, длины волны и коэффициента поглощения падающего излучения. Например, для одного и того-же образца кремниевого чипа при облучении пучками с длинами волн 808 нм и 1070 нм температурные коэффициенты фотовольтаического преобразования существенно различаются [7; 14], что объясняется изменением коэффициента поглощения с длиной волны. Прогнозируемое изменение эффективности при облучении гауссовым пучком диаметра 200 мм и вариацией температуры представлено на Рис.6.

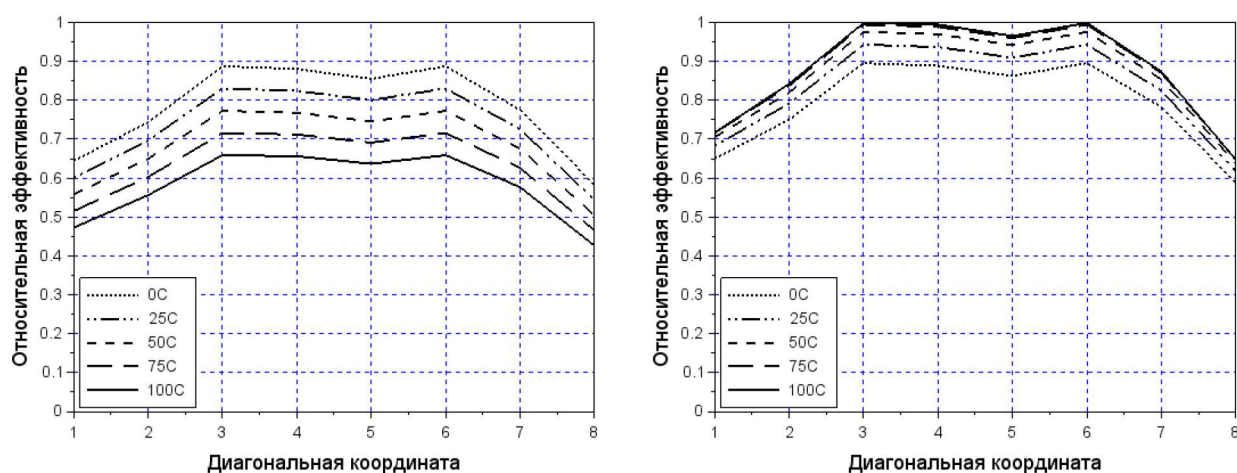


Рис. 6: Графики эффективности при диагональном смещении центра пучка и вариации температуры (слева - 808нм, справа - 1070нм), $P=300\text{W}$, $D=200\text{ мм}$.

Разнонаправленные изменения эффективности фотопреобразования для

однотипных образцов на различных длинах волн связаны с быстрым ростом концентрации носителей и их подвижности при облучении кремниевого образца на длинноволновом (красном) крыле квантового выхода. Фактически при росте температуры от 0°C до 100°C коэффициент поглощения на длине волны 1070 нм увеличивается более чем в 4 раза [15; 16].

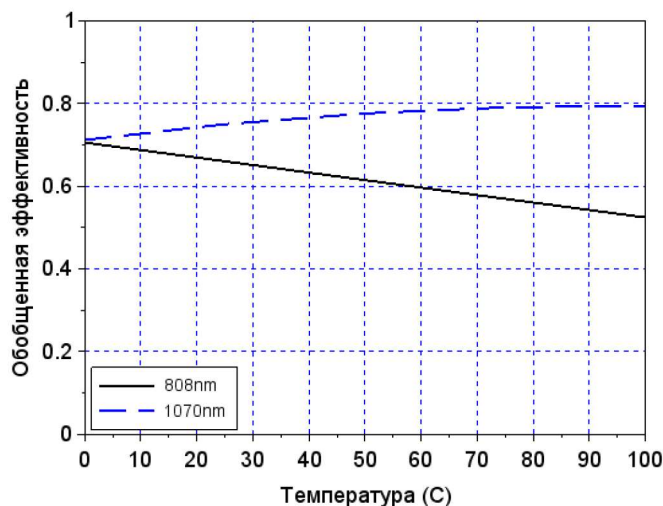


Рис. 7: Обобщенная эффективность как функция температуры.

Относительная эффективность, нормируемая на нижнюю границу температуры в 0°C может превысить единичное значение на верхней границе температуры, как это наблюдается на правой части Рис.6. На длине волны 808 нм наблюдается обратный процесс – эффективность фотопреобразования падает с температурой. Сравнение температурного хода обобщенной эффективности для распределяющего массива при двух различных длинах волн представлено на Рис.7

Если при изменении температуры ток короткого замыкания меняется сильнее значения напряжения холостого хода, возможно рассмотреть фотовольтаический отклик жестко термостабилизированного массива на падающий пучок в заданном распределением интенсивности как фотопреобразование пучка с пропорционально меньшей интенсивностью. В такой ситуации обобщенная эффективность будет линейно падать с ростом температуры для любых типов коммутации массивов, как это показано на Рис.8.

Формально изменение тока короткого замыкания при вариации температуры можно учесть, определив "действующую" интенсивность энергонесущего пучка, пропорциональную величине порождаемого фототока. Фактически

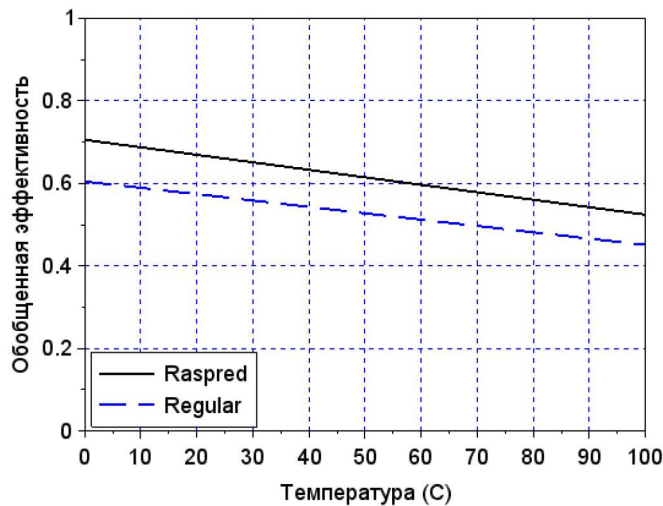


Рис. 8: Обобщенная эффективность как функция температуры для регулярного и распределяющего массивов.

вводится коррекция в профиль падающего пучка, уменьшающая относительный вклад "горячих" сегментов массива:

$$I_{Corr}(i, j) = I(i, j)(1 - \alpha\zeta I(i, j)), \quad (5)$$

здесь α – коэффициент температурной коррекции тока короткого замыкания, ζ – коэффициент пропорциональности между локальной температурой сегмента и падающей интенсивностью. В работе [8] были представлены методы оценки указанных коэффициентов.

4 Усеченные фотовольтаические массивы

При преобразовании осесимметричных пучков массивы квадратной формы могут быть оптимизированы по рабочей площади исключением периферийных угловых сегментов.

После усечения 12-ти сегментов из 64-х остаются 4 модуля по 7 сегментов и 4 модуля по 6 сегментов для каждой из коммутационных схем. Усечение разрушает исходную возможность доступа к модулям с любой из четырех сторон квадрата, исключает эквивалентность модулей, теперь они содержат разное число сегментов – 7 или 6. Как следует из диаграмм Рис.10, выполненное усечение нарушило достигнутое "выравнивание" для зависимостей относительной эффективности от положения центра энергонесущего пучка.

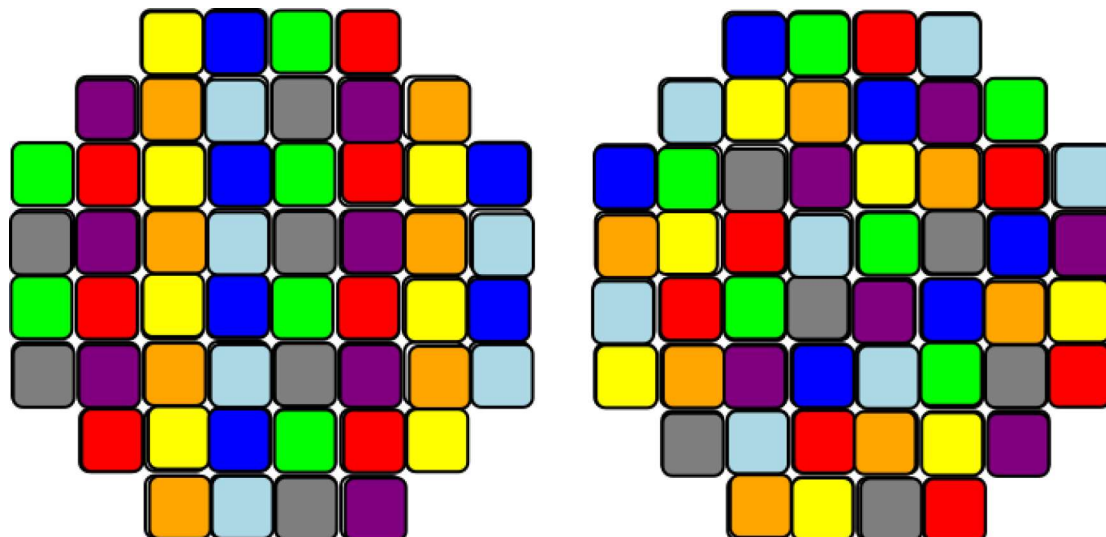
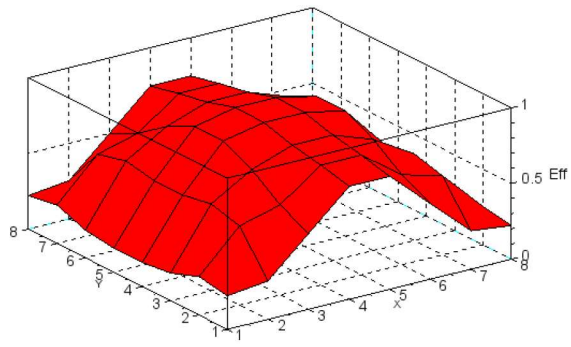


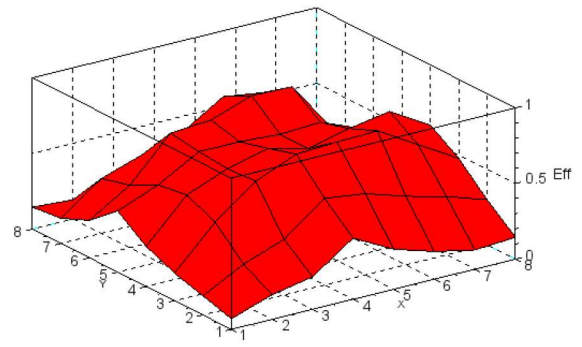
Рис. 9: Усеченные массивы для работы с гауссовым и супергауссовым пучками. Регулярный массив - слева, распределяющий массив - справа.

В семействах вольт-амперных и ватт-амперных характеристик уменьшилось число групп – с четырех до трех для всех размеров пучков, уменьшились полосы расщепления уровней групп – Рис.11 и Рис.12. Несмотря на искажение структуры диаграмм относительной эффективности, пиковые значения сохранились, более того, – уменьшилось различие в зависимостях относительной эффективности для пучков диаметрами $D \geq 200$ мм.

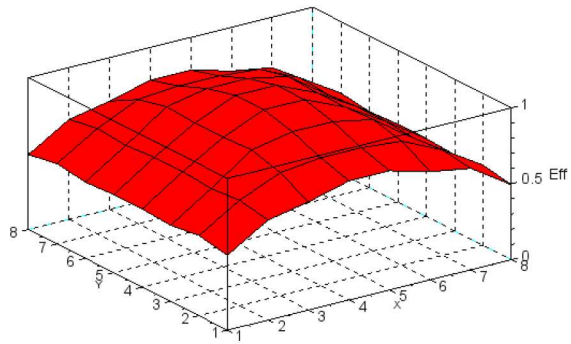
Как и для полных массивов, фактор заполнения практически постоянен при перемещении центра пучка в применяемом диапазоне размеров пучка, относительная эффективность превышает 0.8 для позиций кроме периферийных, где отсутствуют элементы.



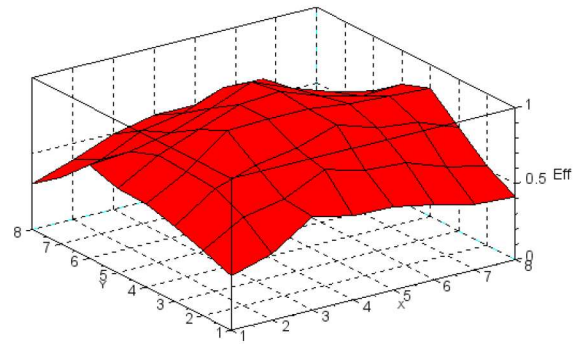
D=100 мм



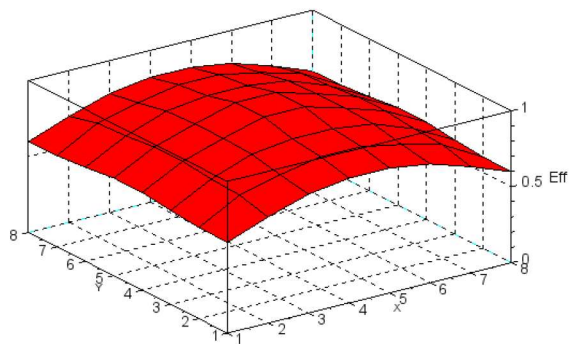
D=100 мм



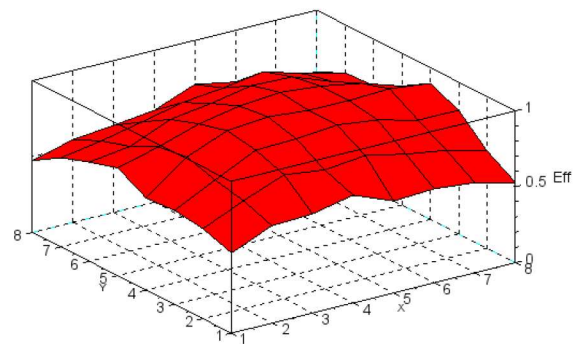
D=200 мм



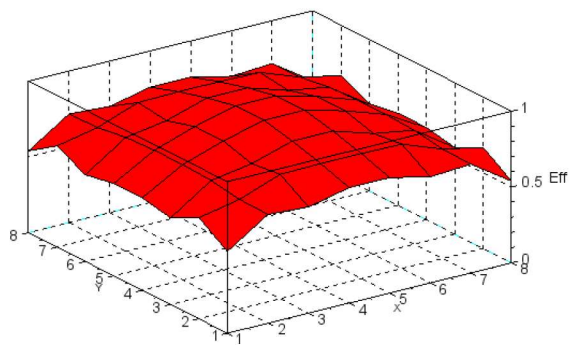
D=200 мм



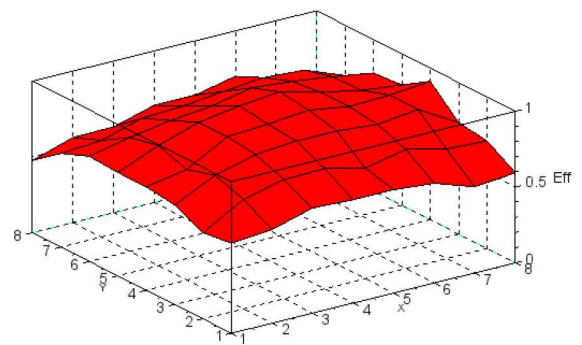
D=250 мм



D=250 мм



D=300 мм



D=300 мм

Рис. 10: Профили эффективности фотовольтаического преобразования гауссовых пучков различного диаметра для регулярного массива - слева и распределяющего массива - справа.

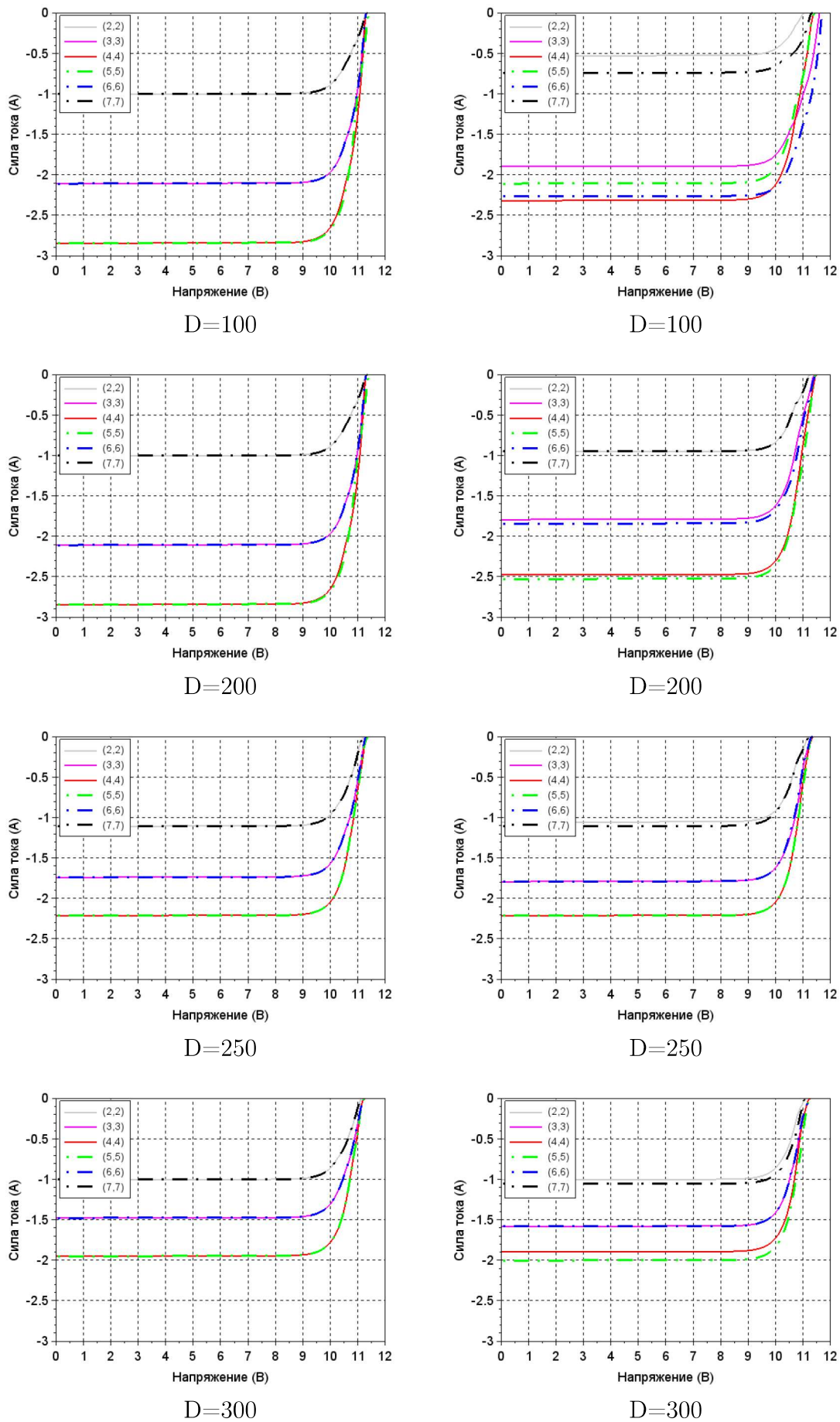


Рис. 11: Вольт-амперные характеристики регулярного массива (слева) и распределяющего массива (справа).

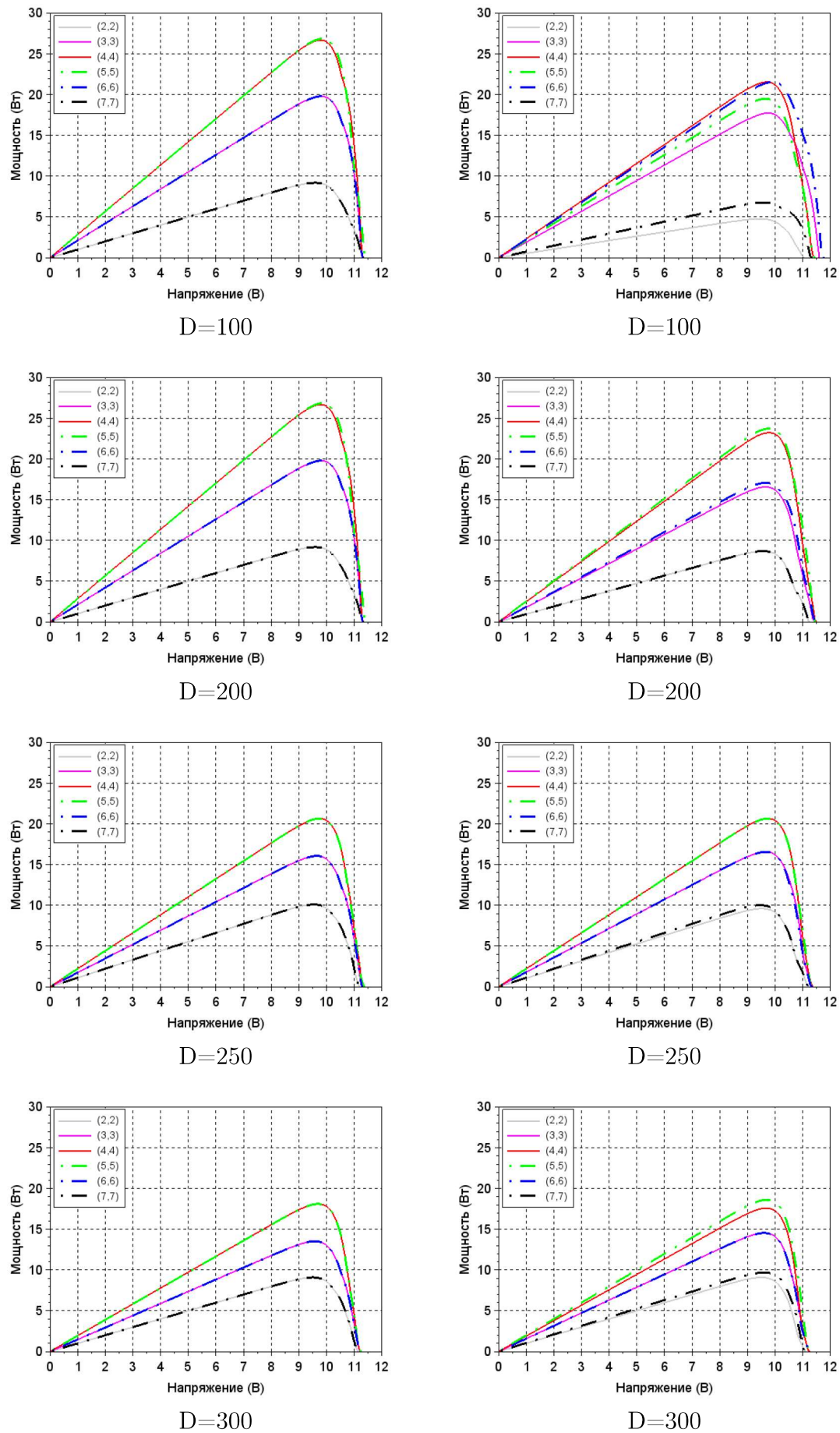
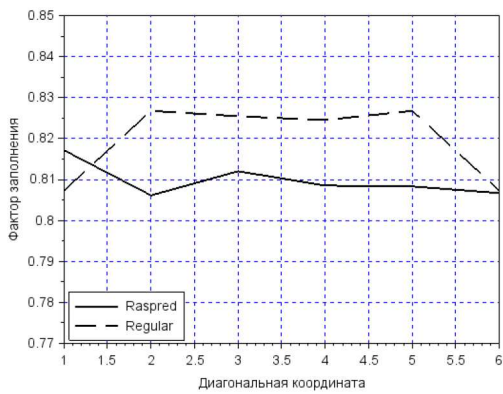
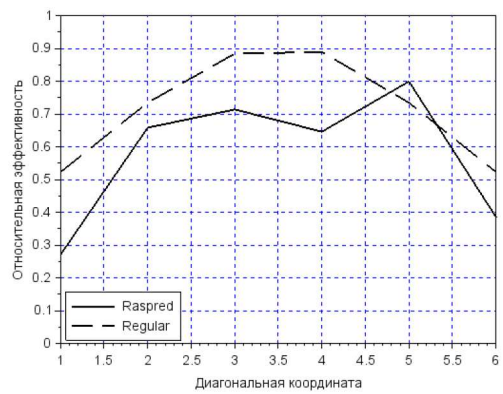


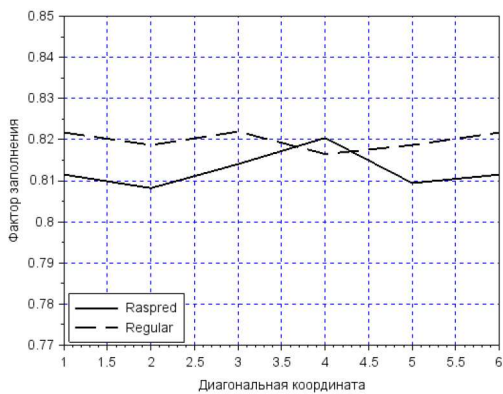
Рис. 12: Ватт-амперные характеристики регулярного массива (слева) и распределяющего массива (справа).



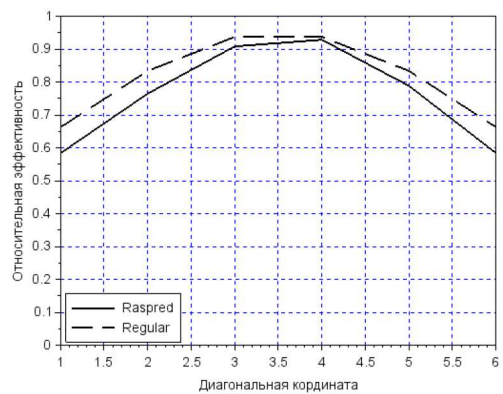
D=100 мм



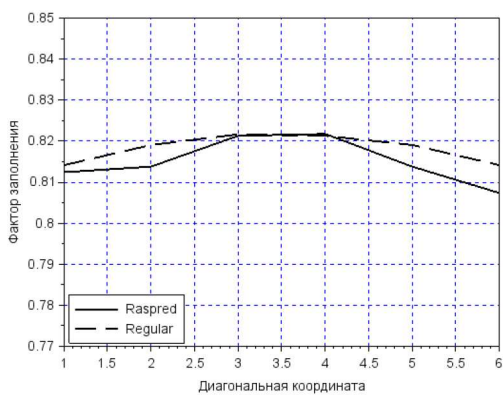
D=100 мм



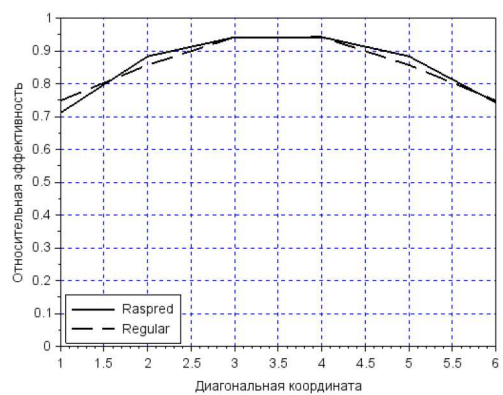
D=200 мм



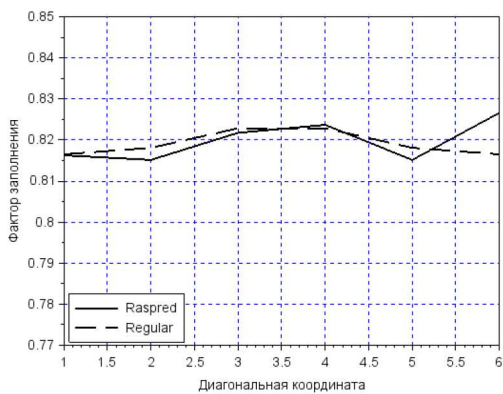
D=200 мм



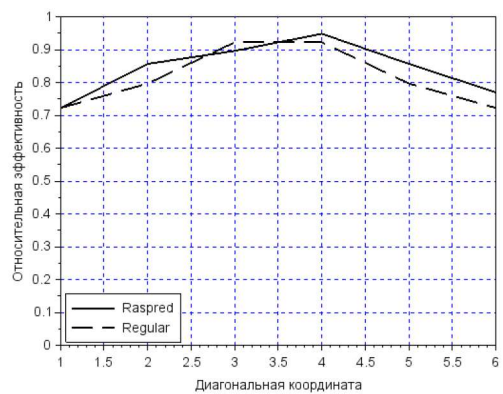
D=250 мм



D=250 мм



D=300 мм



D=300 мм

Рис. 13: Фактор заполнения для двух массивов от диагональной координаты центра пучка (слева) и профили коммутационной эффективности фотовольтаического преобразования гауссовых пучков различного диаметра (справа).

Сравним значения обобщенной эффективности (4) полных и усеченных массивов в диапазоне изменения диаметра от 100 мм до 420 мм. На Рис.14 представлены пары соответствующих характеристик:

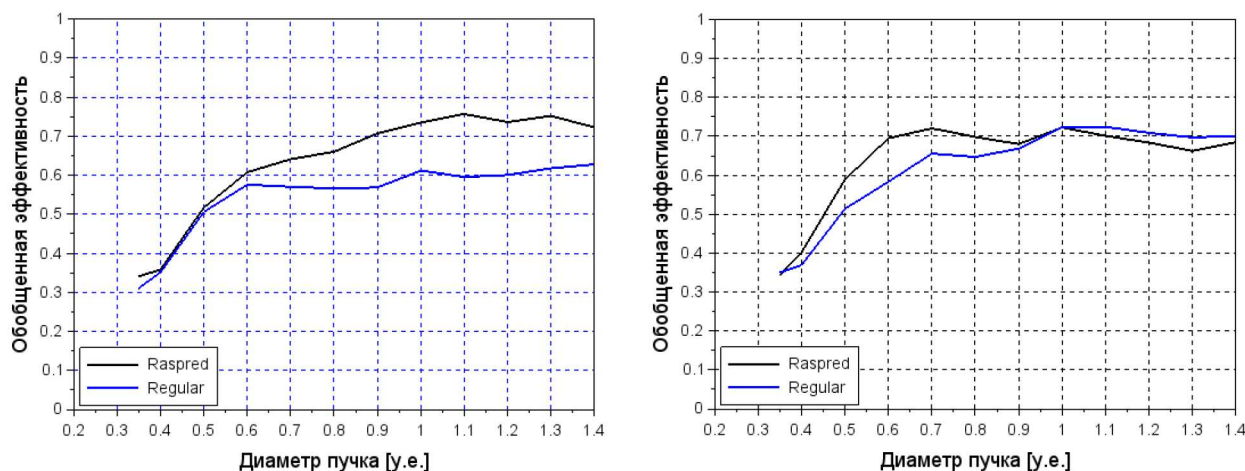


Рис. 14: Обобщенная эффективность фотовольтаического преобразования пучков различных диаметров для полных (слева) и усеченных (справа) массивов.

Использование в расчетах диаметров, превосходящих линейные размеры поверхности массива требуется для анализа асимптотики при переходе к равномерному освещению. Усечение регулярного и рассеивающего массивов сопровождается уменьшением обобщенной эффективности для распределяющего массива (потеря пятой части элементов по площади и более чем третьей части по периферии, нарушение однородности распределения вероятности для сегментов различных модулей) и увеличением для регулярного массива (уменьшение регулярности при усечении).

5 Формфактор пучка и формфактор коммутационной матрицы фотовольтаического массива

Определим профиль энергонесущего пучка матрицей значений интенсивности в центрах сегментов $\hat{\mathbf{I}}$, коммутационные схемы модулей определим компонентными матрицами вида:

$$\widehat{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \widehat{M}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\widehat{M}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \widehat{M}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\widehat{M}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \widehat{M}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\widehat{\mathbf{M}}_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \widehat{\mathbf{M}}_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Представленные матрицы взаимно ортогональны, прямое скалярное произведение любой пары равно нулю.

Введем декартову систему координат с началом отсчета в геометрическом центре массива, оси которой направлены вдоль строк и столбцов массива. Определим дискретизацию на плоскости размещения массива и зададим положение энергетического центра пучка в связанной с матрицей системой координат как (x_E, y_E) . Суммарный ток на выходе модулей пропорционален суммарной интенсивности, падающей на сегменты модуля а после соединения модулей в последовательную цепочку ток на выходе массива будет ограничен минимальным током, генерируемым модулями:

$$J_k = \min(\widehat{\mathbf{I}} \cdot \widehat{\mathbf{M}}_k). \quad (10)$$

Для оценки значения минимального тока и его зависимости от положения центра пучка и его профиля определим ряд вспомогательных статистических характеристик. Для каждой из коммутационных матриц модуля среднее значение координаты центра сегментов составляет $(0,0)$, а дисперсия по обоим направлениям – $(2.3, 2.3)$, при расчетах положения центров сегментов учитывался сдвиг на половину пространственного периода (т.е. координаты центров сегментов составляли $\vec{R}(i, j) = (i*l+0.5, j*l+0.5)$, l – шаг пространственной дискретизации). Набор коммутационных матриц можно рассматривать как ортонормированный базис случайных пространственных фильтров, сумма которых полностью покрывает сегменты массива. Изменение эффективности фотопреобразования при движении энергонесущего пучка по поверхности массива пропорционально значению операции дискретной свертки коммутационных матриц модулей фотovoltaического массива и дискретной

матрицы на плоскости регистрации энергонесущего пучка. Статистическая однородность и полнота используемого базиса позволяют выполнить усреднение по ансамблю коммутационных матриц $M_k(i, j)$:

$$\Omega(x_E, y_E; M) \sim \overline{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 \hat{\mathbf{I}}(x_E - x_{Mk}^{(i)}, y_E - y_{Mk}^{(j)}) \cdot M_k(i, j)}. \quad (11)$$

Грубую сравнительную оценку зависимости эффективности фотовольтаического преобразования для пучков различных стартовых профилей любой сложности можно выполнить в предположении пространственной однородности коммутационной схемы, заменив двойную сумму двойным интегралом по области перекрытия пучка и поверхности массива.

Блокировка фотовольтаического преобразования рассматриваемого RndPS массива может возникнуть при последовательном соединении модуля, у которого не засвечен ни один сегмент. Оценим вероятность такого события, определив линейные размеры падающего пучка. Для упрощения рассуждений зададим профиль супергауссова пучка прямоугольной формы со стороной, закрывающей d сегментов. Блокировка возможна, если отлична от нуля вероятность отсутствия подключаемых сегментов в квадрате размером $d \times d$. Для оценки вероятности события используем два условия:

- число ненулевых элементов в каждом столбце и строке составляет 1;
- доступные положения ненулевых элементов равновероятны.

Возможность существования полностью нулевого фрагмента коммутационной схемы допускается на любой позиции, существует $(8 - d + 1)^2$ уникальных фрагментов анализируемого размера. Фактически необходимо исключить попадание единичных элементов из 3-х столбцов и 3-х строк, принадлежащих фрагменту на позиции фрагмента. Вероятность такого события составляет 0.344 для квадрата 2×2 , 0.090 для квадрата 3×3 и 0.014 для квадрата 4×4 .

Заключение

Определенные относительные и обобщенные эффективности фотовольтаического преобразования распределяющими массивами необходимо рассматривать как безразмерные масштабируемые характеристики построенных по

предложенным топологиям структур. При известной эффективности работы отдельного сегмента, температурного режима, длины волны профиль относительной эффективности позволяет выбрать оптимальный размер пучка, а профиль обобщенной интенсивности – прогнозировать отклик массива при сильном однородном дрейфе пучка, закрывающего доступное множество позиций на поверхности массива.

При необходимости расширения базы массива, работающего при высоких плотностях падающего оптического излучения (в концентраторном режиме), до 16×16 или 32×32 допустимо использование рассмотренного типа распределяющего массива как модуля. Стыковка модулей может выполняться через периферийные контактные группы, полный набор которых выведен на каждую из четырех сторон модуля 8×8 . Создание дополнительных модулей возможно как выстраиванием по ранее определенному правилу размещения сегментов и их коммутации дополнительных модулей 8×8 , а также при отражении первичного модуля 8×8 относительно горизонтальной, вертикальной и диагональной осей. Стохастические свойства массива, содержащего модули-клоны, будут хуже из-за внесенного подобия и скрытой периодичности размещения сегментов, но технологически такой подход оправдан простотой конструкции и компонентной базы модулей. Пример подобной конструкции представлен на Рис.15.

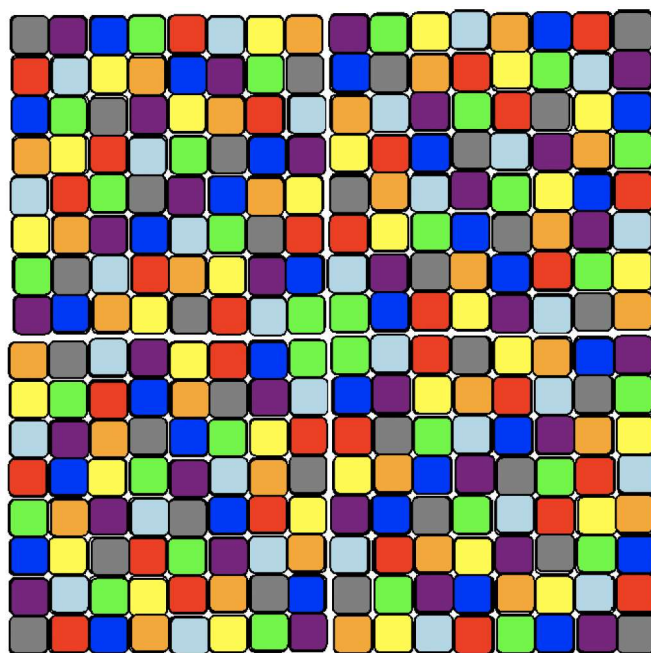


Рис. 15: Пример массива-клона 16×16 , собранного из однотипных модулей 8×8 .

Литература

1. Ju X., Pan X., Xu C. Multi-physics effects on the performance of Dense-array Concentrator Photovoltaic System. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. P. 388–393.
2. Abdin Z., Webb C., Gray E. Simulation of large photovoltaic arrays. *Solar Energy*. 2018. Vol. 161. P. 163–179.
3. Krishna G Sai, Moger Tukaram. Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art. *Solar Energy*. 2019. Vol. 182. P. 429–452.
4. Xinyu P., Xing J., Chao X., et al. A novel rotational symmetry (RS) connection approach for dense-array concentrator photovoltaic (DA-CPV) modules. *Energy conversion and management*. 2019. Vol. 181. P. 359 – 371.
5. Yousri Dalia, Allam Dalia, Eteiba Magdy B. Optimal photovoltaic array reconfiguration for alleviating the partial shading influence based on a modified harris hawks optimizer. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 206. P.112470.
6. Blank A., Bogdanov S., Suhareva N., et al. Simulation modeling of photovoltaic arrays. *Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*. 2019. Vol. 12. P. 1–26.
7. Blank A.V., Chebotareva A.B., Kost T.N., et al. Conversion characteristics of silicon photovoltaic cells for optical beaming. *Photonics for Solar Energy Systems VII*. 2018. Vol. 10688. P. 1–11.
8. Blank A., Bogdanov S., Suhareva N., et al. Distribution commutation of photovoltaic arrays for tasks of wireless optical energy. *Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*. 2019. Vol. 11. P. 1–27.
9. Kapranov V.V., Matsak I.S., Blank A.V., et al. Atmospheric turbulence effects on the performance of the laser wireless power transfer system. *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX*. 2017. Vol. 10096. P. 1–13.

10. Babanin E.A., Blank A.V., Kononenko V.S., et al. Chaos and order of the wave beams positional parameters at the output of long atmospheric path. *24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2018. Vol. 10833. P. 1–9.
11. Lee Y., Park Ch., Balaji N. et al. High-efficiency silicon solar cells: A review. *Israel Journal of Chemistry*. 2015. Vol. 55. P. 1050–1063.
12. Blakers A. Development of the PERC solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2019. Vol. 9. P. 629–635.
13. Altermatt P.P., Xiong Zh., He Q. et al. High-performance p-type multicrystalline silicon (mc-Si): Its characterization and projected performance in PERC solar cells. *Solar Energy*. 2018. Vol. 175. P. 68–74.
14. 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. P. 1–2.
15. Sands D. Pulsed laser heating and melting. *Heat Transfer-Engineering Applications*. 2011. P. 47–70.
16. El-Hameed Afaf M Abd. Analytical study of pulsed laser irradiation on some materials used for photovoltaic cells on satellites. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2015. Vol. 4. P. 256–265.

Для цитирования:

Бланк А.В., Богданов С.Д., Сухарева Н.А. Многофакторный анализ эффективности фотовольтаического массива. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/1/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.1