

УДК: 53.083.8 537.9

РАСПРЕДЕЛЯЮЩАЯ КОММУТАЦИЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ МАССИВОВ ДЛЯ ЗАДАЧ БЕСПРОВОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А. В. Бланк¹, С. Д. Богданов¹, Н. А. Сухарева¹, Б. Л. Эйдельман²

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

²АО «Телеком-СТВ», 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский проспект, д. 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2019 г.

Аннотация. Представленные результаты экспериментальных исследований матричных фотовольтаических преобразователей определяют правила синтеза коммутационных схем, эффективных при работе с мощными коллимированными энергонесущими лазерными пучками. Особенности работы с коллимированным энергонесущим пучком состоят во-первых в ограничении апертуры пучка и необходимости удержания его размера и положения на фотопреобразующем массиве, во-вторых в тепловом действии мощного коллимированного пучка на поверхность массива, сопровождающимся изменением фотовольтаических характеристик "горячих" элементов, в-третьих в неоднородности профиля распределения интенсивности пучка на поверхности массива, снижающей эффективность фотопреобразования относительно пучков с однородным профилем. В ряде случаев принудительная стохастизация распределения интенсивности по поверхности решает задачу повышения эффективности фотопреобразования. Обсуждаются методы парциального и глобального тестирования коммутационных схем массивов фотопреобразователей. Предложены схемы распределяющей коммутации для коллимированных пучков различного профиля.

Ключевые слова: фотовольтаический массив, коллимированный пучок, тепловые режимы, вольт-амперные характеристики, оптимальная коммутация.

Abstract. Results of experimental studies of matrix photovoltaic converters determine the rules for the synthesis of switching circuits that are effective when working with powerful collimated energy-carrying laser beams is presented.

Features of working with a collimated energy-carrying beam consist firstly in limiting the aperture of the beam and the need to keep its size and position on the photoconverting array, secondly, – in the thermal effect of a powerful collimated beam on the surface of the array, accompanied by a change in the photovoltaic characteristics of the "hot" elements and thirdly, – in the heterogeneity of the beam intensity distribution profile on the array surface, which reduces the photoconversion efficiency relative to beams with a uniform profile. In some cases, forced stochastization of the intensity distribution over the surface solves the problem of increasing the efficiency of photoconversion. Partial and global testing methods for switching circuits of photoconverter arrays are discussed. Distribution switching schemes for collimated beams of various profiles are proposed.

Keywords: photovoltaic array, collimated beam, thermal conditions, current-voltage characteristics, optimal switching.

Введение

Массивы фотовольтаических преобразователей с регулярной структурой традиционно используются в наземных и космических приложениях для преобразования стационарных и пространственно однородных потоков солнечного излучения. Изменение пространственного спектра электромагнитного излучения существенно меняет статистику и динамику физических процессов на поверхности и в объеме фотопреобразующих элементов [1; 2]. На уровне электродинамического описания массива элементов необходимо учитывать индуцированную пучком неоднородность распределения генерируемого фототока [3], пропорционального плотности потока падающего излучения. Тепловые свойства массива предполагают контроль температуры как на поверхности массива так и в его объеме [4]. Критическими для конвертации энергии становятся зоны затенения поверхности массива, приводящие к блокировке групп элементов и исключению из генерируемой мощности значимой доли падающего потока энергии [5]. Для обхода эффектов затенения разработаны различные приемы активного и пассивного перераспределения падающего на массив потока, приводящие в итоге к квазиравномерному распределению интенсивности по поверхности массива. Совокупность таких методов получила наименование "фотонный менеджмент" [6]. Примером могут быть фазо-

вые рассеивающие фильтры, размещаемые вблизи поверхности, зеркальные распределительные призмы, концентраторы излучения. Помимо физического выравнивания распределения интенсивности энергонесущего пучка по поверхности массива возможно достичь практически близких результатов выбором специальных схем коммутации [7; 8], действие которых эквивалентно работе диффузоров.

1 Контроль тепловых процессов

Создание термоинтерфейсов для уединенных фотовольтаических элементов и их массивов, обеспечивающих заданный температурный режим, опирается на модели теплопереноса в неоднородной среде и модели пространственно-временного распределения энергонесущего потока [9]. Рассмотрим упрощенную постановку задачи облучения поверхности фотоэлемента падающим по нормали супергауссовым импульсом. Будем считать плотность потока в импульсе постоянной на всем интервале его действия, характерная длительность импульса составляет от 10 до 300 секунд. Определим для рассматриваемого фотопреобразователя коэффициент отражения от поверхности R и коэффициент поглощения α . Пусть на поверхность фотопреобразователя падает коллимированный волновой пучок с распределением интенсивности $I(x, y)$ и проходит в объем образца [10]:

$$P(x, y; 0) = I(x, y)(1 - R). \quad (1)$$

При распространении в объеме вдоль направления распространения z плотность потока будет экспоненциально падать согласно закону Ламберта-Бера:

$$P(x, y; z) = P(x, y; 0)e^{-\alpha z}. \quad (2)$$

Определим локальную мощность тепловыделения $h(z)$ при поглощении волнового пучка следующим образом:

$$h(z) = -\frac{\partial P(x, y; z)}{\partial z} = \alpha P(x, y; z) = \alpha I(x, y)(1 - R)e^{-\alpha z}. \quad (3)$$

Предположим, что теплоемкость, плотность и теплопроводность рассматриваемого материала мало меняются с температурой образца. Ограничим

анализ одномерным распространением теплового потока – только вдоль исходного направления распространения волнового пучка, определим глубину погружения ($0 \leq z \leq L$) и запишем для пространственного-временного распределения температуры $T(x, y; z, t)$ дифференциальное уравнение теплопереноса с учетом процесса диффузии в виде:

$$\rho c_p \frac{\partial T(x, y; z, t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(x, y; z, t)}{\partial z^2} + \alpha P(x, y; z), \quad (4)$$

где k - теплопроводность материала, ρ - плотность материала, и c_p - удельная теплоемкость материала. Определим дополнительный параметр – температуропроводность среды [10]:

$$\eta = \frac{k}{\rho c_p}, \quad (5)$$

и упростим диффузионное уравнение –

$$\frac{\partial^2 T(x, y; z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial T(x, y; z, t)}{\partial t} - \frac{1}{\eta} \frac{\alpha P(x, y; z)}{\rho c_p}. \quad (6)$$

1.1 Поверхностное поглощение

Традиционная технология изготовления кремниевых фотоэлементов предполагает основное поглощение светового потока в поверхностном слое с толщиной не более 50 мкм. Будем рассматривать физическую систему как поверхностную поглощающую пленку на подложке с совпадающими термическими характеристиками (теплоемкостью, теплопроводностью, температуропроводностью) [11]. Определим два режима анализа процесса теплораспределения – в интервале действия импульса и после действия импульса. Пусть длительность импульса составляет τ , распределение температуры по поверхности и по глубине, решение диффузионного уравнения теплопроводности в приближении одномерной термодиффузии имеет вид [12]:

$$T(x, y; z, t < \tau) = \frac{2\alpha I(x, y)(1 - R)}{k} \sqrt{\eta t} \operatorname{ierfc} \left[\frac{z}{2\sqrt{\eta t}} \right], \quad (7)$$

где $ierfc$ интегральная функция ошибки. Используя представление интегральной функции ошибок через функцию ошибок $erfc$:

$$ierfc(Z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-Z^2} - Z * erfc(Z), \quad (8)$$

и выполнив подстановку, получим:

$$ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta t}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-\left[\frac{z}{2\sqrt{\eta t}}\right]^2} - \left(\frac{z}{2\sqrt{\eta t}}\right) erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta t}}\right), \quad (9)$$

После подстановки (9) в (7) и определения диффузионного радиуса $D = 2(\eta t)^{1/2}$, запишем выражение для профиля распределения температуры следующего вида:

$$T(x, y; z, t < \tau) = \frac{2\alpha I(x, y)(1 - R)}{k} D \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-\left[\frac{z}{2D}\right]^2} - \left(\frac{z}{D}\right) erfc\left(\frac{x}{D}\right) \right\}. \quad (10)$$

Приравнявая $z = 0$ определим распределение температуры на поверхности образца:

$$T(x, y; 0, t < \tau) = \frac{2\alpha P(x, y)_0(1 - R)}{k} \frac{D}{\sqrt{\pi}}, \quad (11)$$

Для оценки распределения температуры по окончании импульса можно использовать в модели понятие виртуального поглотителя мощности, подключаемого в момент завершения действия основного энергонесущего пучка. Используя предположение о суперпозиции действия исходного и виртуального носителя и поглотителя и независимости термических характеристик от температуры, запишем для режима при $t \geq \tau$:

$$T(x, y; z, t > \tau) = \frac{2\alpha I(x, y)(1 - R)}{k} \left\{ (\eta t)^2 ierfc\left[\frac{z}{2\sqrt{\eta t}}\right] - \sqrt{\eta(t - \tau)} ierfc\left[\frac{z}{2\sqrt{\eta(t - \tau)}}\right] \right\}. \quad (12)$$

1.2 Поглощение излучения в объеме фотоэлемента

Рассмотрим случай поглощения излучения в объеме, например при облучении лазерным импульсом фотоячеек с вертикальной ориентацией переходов. Волновой вектор энергонесущего пучка теперь ориентирован вдоль границ

переходов фотоэлементов, а пучок проникает на существенную глубину, до нескольких миллиметров при работе на крыльях полосы квантового выхода. Полученное для такой ситуации решение [3] имеет вид:

$$T(x, y; z, t) = \frac{2\alpha I(x, y)(1 - R)}{k} \left\{ 2(\eta t)^2 \operatorname{ierfc} \left[\frac{z}{2\sqrt{\eta t}} \right] - \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha z} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2\alpha} e^{\alpha^2(\eta t)} \left[e^{-\alpha z} \operatorname{erfc} \left[\alpha(\eta t)^{1/2} - \frac{z}{\sqrt{\eta t}} \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + e^{\alpha z} \operatorname{erfc} \left[\alpha\sqrt{\eta t} - \frac{z}{\sqrt{\eta t}} \right] \right] \right\}. \quad (13)$$

При любом режиме нагрева и остывания температура распределена неравномерно по глубине элемента, выравнять или стабилизировать температуру можно добавлением внешних источников или поглотителей, обеспечивающих охлаждение или подогрев его обратной стороны.

1.3 Двухкомпонентный образец с поверхностным поглощением

Пусть облучаемый образец представляет собой двухкомпонентную систему, состоящую из тонкого слоя полупроводника (фотопреобразователя) на толстой подложке термоинтерфейса [13]. Термоинтерфейс может сопрягать тонкую пластину с модулями активного или пассивного охлаждения фотоэлемента, частным случаем термоинтерфейса может быть поток газа или жидкости фиксированной температуры [14]. Характерная толщина пластины в рассматриваемых ниже случаях не превышает 200 мкм, толщина подложки – более 40 мм. Энергия падающего оптического пучка поглощается только поверхностью пластины фотопреобразователя, находящейся в термическом контакте с подложкой. Как и в предыдущих рассуждениях, будем считать теплофизические свойства материалов независимыми от температуры. Последовательная модель нагрева двухкомпонентной системы была предложена в работе [10]. Задача сводится к определению температуры в произвольный момент времени для любой точки слоя или подложки. Если теплопроводности слоя полупроводника и подложки равны η_{SC} и η_L соответственно, диффузионное уравнение теплопереноса параболического типа можно запи-

сать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_{SC}(x, y; z_{SC}, t)}{\partial t} &= D_{SC} \frac{\partial^2 T_{SC}(x, y; z_{SC}, t)}{\partial z_{SC}^2}, 0 \leq z_{SC} \leq Z \\ \frac{\partial T_L(x, y; z_L, t)}{\partial t} &= D_L \frac{\partial^2 T_L(x, y; z_L, t)}{\partial z_L^2}, 0 \leq z_L \leq \infty \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

здесь Z – толщина слоя, z_{SC}, z_L – координаты точки слоя и подложки, с началом отсчета от верхней границы слоя или подложки, D_{SC}, D_L – коэффициенты термической диффузии слоя и подложки. Выполним отображение Лапласа по переменной t и получим новую систему дифференциальных уравнений второго порядка, собственные функции которой имеют вид экспонент. Используя нулевые начальные условия для температуры слоя и подложки, уравнение Фурье для теплопереноса и определим дополнительные дискретные пространственные переменные:

$$\left. \begin{aligned} a_n &= 2Z(1 + n) - z_f, \quad 0 \leq n \leq \infty \\ b_n &= 2nZ + z_f \\ g_n &= (1 + 2n)Z + z_s \sqrt{\frac{D_{SC}}{D_L}} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

Получим выражения для температур слоя полупроводника и подложки:

$$\left. \begin{aligned} T_f(x, y; z_{SC}, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I(x, y) A_{SC}}{k_{SC}} B^{n+1} \left[\frac{L_{SC}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{a_n^2}{L_{SC}^2}\right) - a_n \cdot \operatorname{erfc}\left(-\frac{a_n}{L_{SC}}\right) \right] \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I(x, y) A_{SC}}{k_{SC}} B^n \left[\frac{L_{SC}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{b_n^2}{L_{SC}^2}\right) - b_n \cdot \operatorname{erfc}\left(-\frac{b_n}{L_{SC}}\right) \right] \\ T_s(x, y; z_s, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2I(x, y) A_{SC}}{k_{SC}} \frac{B^n}{1 + \varepsilon} \left[\frac{L_{SC}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{g_n^2}{L_{SC}^2}\right) - g_n \cdot \operatorname{erfc}\left(-\frac{g_n}{L_{SC}}\right) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

здесь $I(x, y)$ – профиль интенсивности падающего на поверхность полупроводника лазерного пучка, A_{SC} – коэффициент поверхностного поглощения полупроводника, k_{SC} – теплопроводность полупроводника, $L_{SC}^2 = 4D_{SC}t$, B и ε безразмерные переменные

$$B = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} < 1, \quad \varepsilon = \frac{k_L}{k_{SC}} \sqrt{\frac{D_{SC}}{D_L}}. \quad (17)$$

Представленные упрощенные модели термодинамических процессов в присутствии непрерывного и импульсного лазерного пучка достаточно удобны

для оценки рассогласования температур в объеме облучаемого образца, определении критического времени облучения для достижения температур плавления и ряда других процессов, чувствительных к пространственно неоднородным температурным распределениям [15].

1.4 Критические тепловые режимы образца

Контроль температурных режимов в описываемых ниже экспериментах проводился с помощью тепловизора с частотой обновления 10 Гц и точностью регистрации температуры 0,1 К. Диапазон регистрации ограничен сверху значением 375°C . Образец кремниевого элемента PERC типа толщиной 200 мкм, длиной 40 мм и шириной 15 мм размещался на толстой дюралевой подложке в плотном тепловом контакте через термопасту. Источник излучения – лазер на полупроводниковых диодах, генерирующий пучок мощностью до 41 Ватта непрерывного излучения. Выходящий из коллиматора пучок падал вертикально на поверхность фотоэлемента вдали от токоведущих шин во избежание их самопроизвольного отпаивания при работе с пучками большой мощности [15]. Время экспозиции фотоэлемента составляло 300 секунд. Целостность внутренней структуры фотоэлемента контролировать с помощью электронного микроскопа в зоне прохождения токосборников контактной сетки.

На блоке Рис.1 представлены полученная зависимость максимальной температуры образца в зоне облучения, геометрия засветки элемента и типичный срез фотоэлемента до и после облучения.

2 Свойства уединенного кремниевого элемента

Описание отдельного кремниевого элемента PERC типа будем проводить на основе пятипараметрической диодной модели (De Soto et al., 2006) [13; 16], представляющей элемент как набор параллельно соединенных источника фотоЭДС, диода, шунтирующего сопротивления и параллельного сопротивления. Направление тока через элемент и падение напряжения на нагрузке соответствуют работе в четвертом квадранте $V - I$ плоскости. Баланс токов определим в виде:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh}, \quad (18)$$

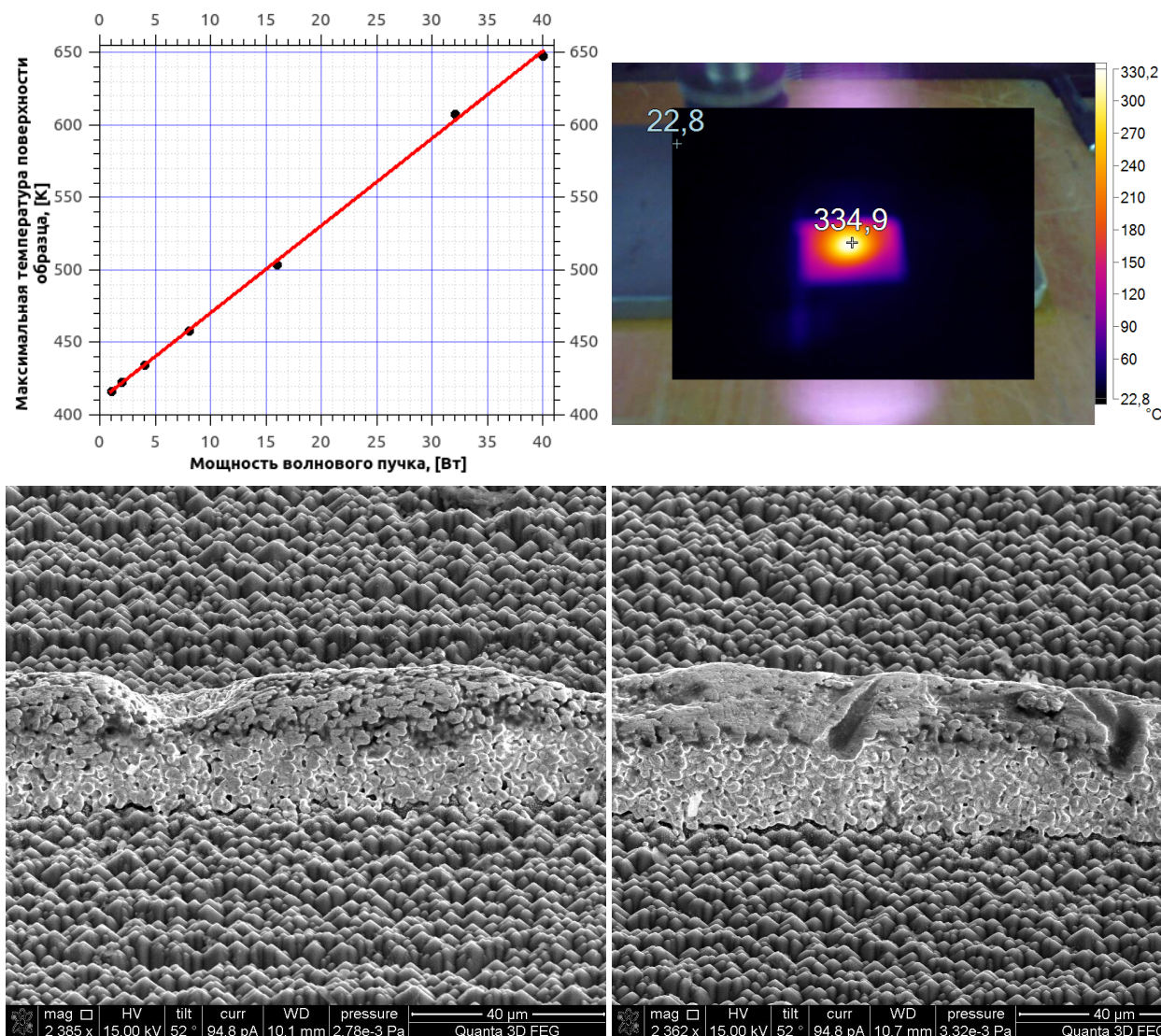


Рис. 1: Зависимость максимальной температуры поверхности образца от мощности (сверху-слева), след пучка (сверху-справа) и срезы образца до и после облучения пучком с плотностью мощности 32 Вт/см² (снизу слева и справа соответственно)

здесь I_{ph} - фототок, обусловленный поглощаемым энергонесущим пучком мощности G , I_D - ток через эквивалентный диод D , а I_{sh} - ток утечки через сопротивление шунта R_{sh} . Падение напряжения на нагрузке составит:

$$V = V_D - IR_s. \quad (19)$$

Определим ток диода модифицированным уравнением диода Шокли:

$$I_D = I_{rs}[\exp(V_D/\kappa V_T) - 1], \quad (20)$$

где (I_{rs}) - обратный ток насыщения, κ - коэффициент идеальности, V_T -

тепловое напряжение:

$$V_T = \frac{kT}{q}. \quad (21)$$

Тепловое напряжением составляет 0,0259 В при температуре ячейки $T = 300\text{K}$.

Запишем уравнение для вольт-амперной характеристики:

$$I = I_{ph}(G) - I_{rs} \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{\kappa V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (22)$$

и определим значение тока короткого замыкания I_{sc} и напряжение холостого хода V_{oc} как функции теплового напряжения или температуры [6; 17]:

$$V = 0 \implies I_{sc} = I_{ph} - I_{rs} \left[\exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{\kappa V_T}\right) - 1 \right] - I_{sc} \frac{R_s}{R_{sh}}, \quad (23)$$

$$0 = I_{ph} - I_{rs} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{\kappa V_T}\right) - 1 \right] - I_{sc} \frac{V_{oc}}{R_{sh}}. \quad (24)$$

При работе фотоэлектрических массивов в условиях пространственно-неоднородного распределения интенсивности энергонесущего пучка перепады температуры могут достигать нескольких десятков градусов вплоть до критических значений, при которых нарушится проводимость между токоотводящими шинами и контактной сеткой. Для рассматриваемых образцов критическая температура стойкости токоотводящих шин составляет 175°C . Экспериментальная оценка вариации параметров вольт-амперной характеристики была проведена в диапазоне температур от 0°C до 160°C при контроле значений температуры на верхней и нижней поверхностях фотоэлектрического элемента. Использовались активные и пассивные термоподложки для обеспечения однородности температурных режимов, значение температуры фронтальной поверхности контролировалось тепловизором с частотой опроса 10 Гц. Температура задней поверхности определялась по показаниям интегрированного пирометра, позволяющего размещать термодатчик в объеме сборки. Верхний нагрев со стороны поверхности фотоэлектрического элемента проводился с помощью ИК полихроматического источника мощностью 250Вт, нижняя граница элемента или подложки нагревалась или остужалась с помощью модуля Пельтье.

Наблюдаемая на Рис.2 немонотонность измеренной зависимости тока ко-

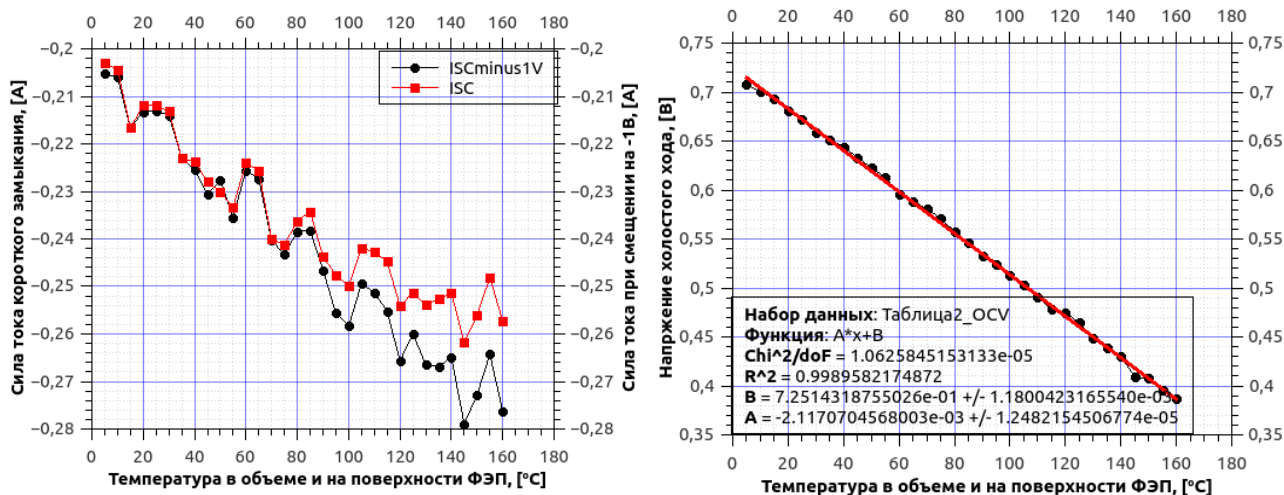


Рис. 2: Зависимость тока короткого замыкания (слева), и напряжения холодного хода (справа) от температуры

Зависимость тока короткого замыкания при вариации температуры связана с огрублением точности измерений для уменьшения интервала регистрации вольт-амперной характеристики, в течение которого надо удерживать термические режимы на поверхностях образца. В грубом приближении можно использовать для обеих характеристик линейную аппроксимацию зависимости от температуры. Помимо указанных двух параметров при анализе производительности фотоэлектрических элементов используются дополнительные параметры, получаемые из семейств вольт-амперных характеристик (ВАХ) – фактор заполнения, напряжение сьема максимальной мощности, эффективность фотопреобразования Рис.3.

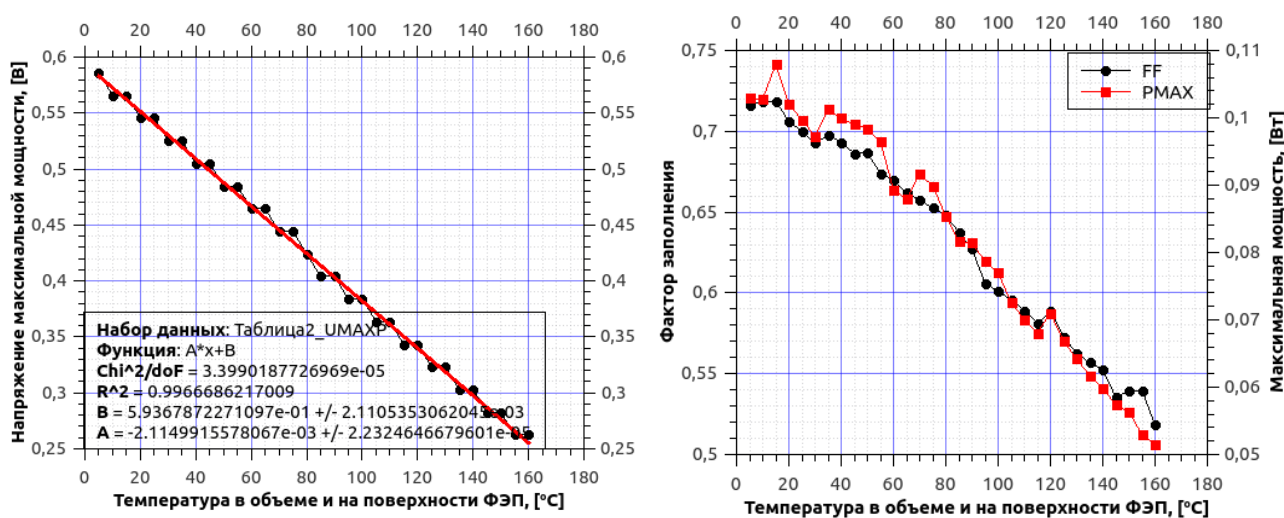


Рис. 3: Зависимость напряжения максимальной мощности (слева), и фактора заполнения (справа) от температуры

Представленные температурные характеристики отдельного элемента за-

висят от профиля спектра излучения источника [18]. Для монохроматических источников при работе на красном крыле полосы квантового выхода возможно возрастание эффективности фотопреобразования при росте температуры. Температурные вариации могут существенно измениться при переходе от поверхностного фотоэлектрического преобразования к объемному, например при работе с блоками ФЭП с вертикальной ориентацией.

3 Сегмент, модуль, массив

При создании фотовольтаических массивов из отдельных чипов принято выделять три промежуточных структуры: сегмент, модуль и собственно массив [7; 19]. Выделение промежуточных структур удобно для проектирования компонентной базы массива, возможности оперативной замены блока элементов, разработке методов тестирования полной сборки. Сегмент, как правило, состоит из последовательно соединенных чипов, расположенных в виде строки, квадрата или более сложных структур [20]. Первичная сегментация массива позволяет уменьшить число последующих соединений элементов, уменьшая резистивные коммутационные потери [7]. Число элементов в первичном модуле определяет его интегральное напряжение холостого хода, размер модуля выбирается из дополнительного согласования со структурой энергонесущего пучка, линейных размеров неоднородностей в распределении интенсивности на фотоплощадке массива. Для сегмента, собранного из N_c последовательно соединенных тождественных чипов профиль вольт-амперной характеристики может быть определен на основе ВАХ одного чипа следующим образом [6]:

$$I = I_{ph} - I_{rs} \left[\exp \left(\frac{qV + IR_s N_c}{N_c k k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s N_c)}{N_c R_{sh}}. \quad (25)$$

При добавлении каждого нового чипа в цепочку сегмента, при однородном освещении всех элементов сегмента, сохраняется величина фототока и пропорционально возрастает значение напряжения холостого хода. Создание сегментов, как правило, обосновывается рядом ограничений:

- сверху на размер концентраторных фотоэлектрических преобразователей, связанными с высокой плотностью генерируемых токов,

- снизу на размер для сборочных единиц фотопанелей,
- снизу на напряжение холостого хода сегмента,
- сверху на силу тока в шинах коммутации и магистральных шинах массива.

3.1 Линейный сегмент фотовольтаических ячеек в условиях неравномерного освещения

Проанализируем распределение потенциалов и токов в последовательной цепочке из 8-ми элементов, освещаемой неоднородным по интенсивности пучком. Центр распределения интенсивности пучка может перемещаться от левого до правого края сегмента.

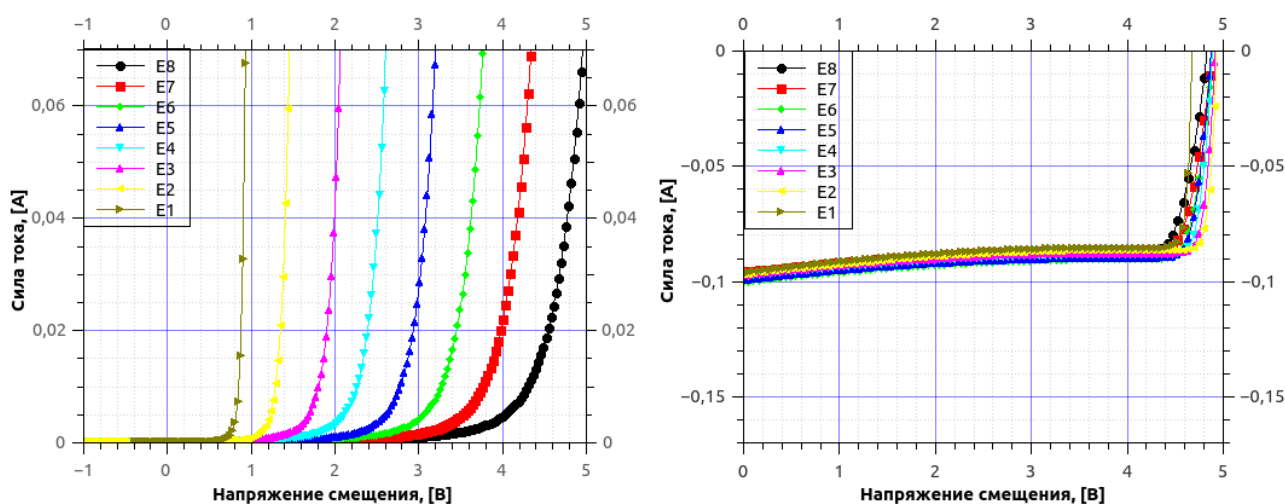


Рис. 4: Темновые парциальные ВАХ (слева) и ВАХ при симметричном освещении последовательности из восьми ФЭП (справа)

Напряжение смещения подается между входом первого элемента и выходом восьмого, отрицательный полюс расположен слева. Регистрация семейства ВАХ для сегмента выполняется со всех выходов от первого до восьмого элементов (E1 ... E8 маркировка на рисунках). Типичные семейства ВАХ для темнового режима, центроориентированного и смещенного на левый и правый края распределений интенсивности представлены на Рис.4 и Рис.5. При тестировании отклика на пространственно-неоднородную засветку максимальная температура поверхности элементов сегмента составляла 40°C и удерживалась с помощью направленного воздушного потока переменной скорости. В последовательной цепочке фотоэлектрических чипов полное значение тока определяется минимальной проводимостью составляющих её чипов,

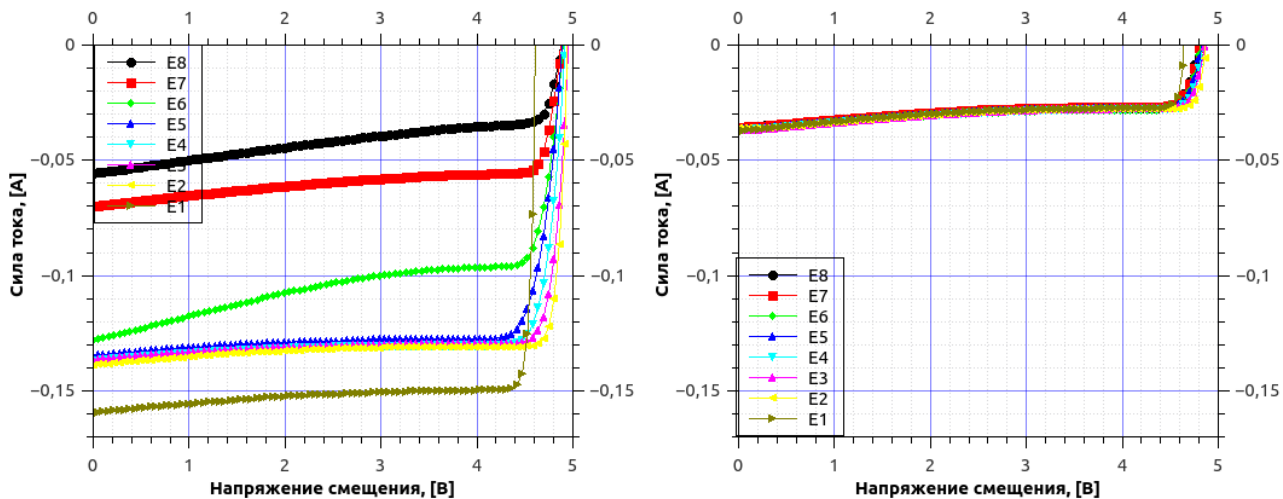


Рис. 5: Парциальные ВАХ при левом (слева) и правом (справа) смещении центра пучка

метод парциальных ВАХ позволяет установить "узкое горло" в отдельном сегменте.

3.2 Последовательно-параллельный модуль фотовольтаических ячеек

Объединим N_s строковых сегментов параллельно и создадим последовательно-параллельный модуль, для которого вольт-амперная характеристика имеет вид:

$$I = N_s I_{ph} - N_s I_{rs} \left[\exp \left(\frac{qV + IR_s N_c / N_s}{N_c k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s N_c / N_s)}{R_{sh} N_c / N_s}. \quad (26)$$

Для сокращения числа тестовых серий 64-х элементного модуля, проанализируем парциальные ВАХ на выходах диагональных элементов, указанных на схеме модуля Рис.6.

Для контроля регулярности распределения токов и потенциалов предложено использовать семейство парциальных вольт-амперных характеристик, получаемых с выходов диагональных элементов, индексируемых по номерам строки и столбца расположения элементов, а именно $E_{i,j}$ – выход элемента, расположенного в строке i и столбце j . Источник напряжения подключается к входу элемента (8, 1) и выходу элемента (1, 8) для контроля распределения токов или выходам элементов диагонали $-(1, 8), (2, 7), (3, 6), (4, 5), (5, 4), (6, 3), (7, 2)$ – при контроле распределения напряжений. Изменение тока, протекающего на изучаемом участке модуля при синхронном переключении позиции каналов измерения тока и канала подачи напряжения смещения определяет

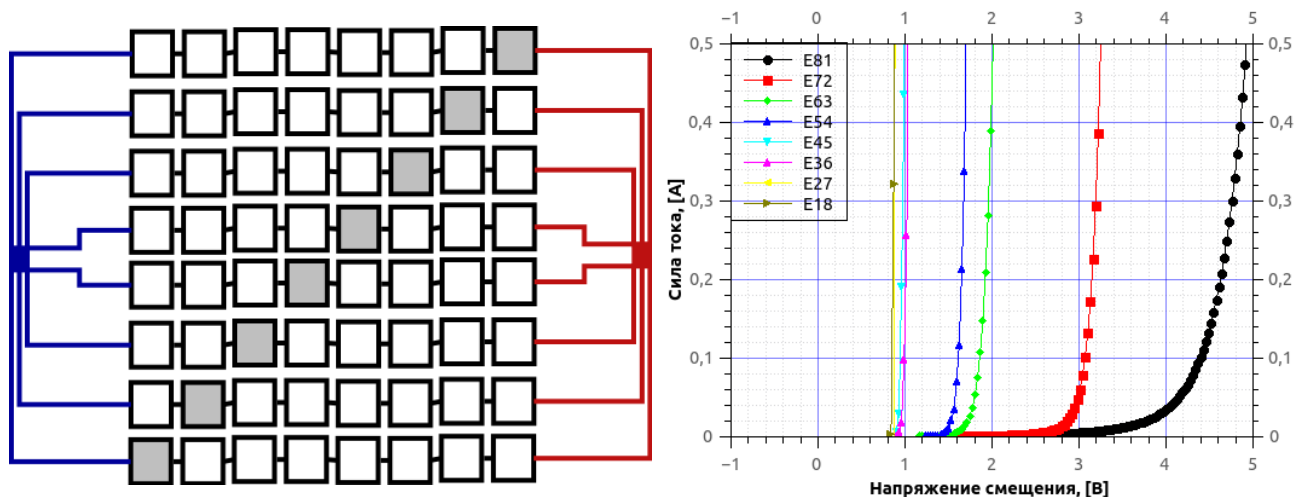


Рис. 6: Структура модуля (слева) и парциальные темновые ВАХ для выходов диагональных элементов(справа)

ся не только на кратчайшем расстоянии между точками подсоединения щупов измерителя, но и совокупностью всех "охватывающих" анализируемый фрагмент модуля "обратных токов".

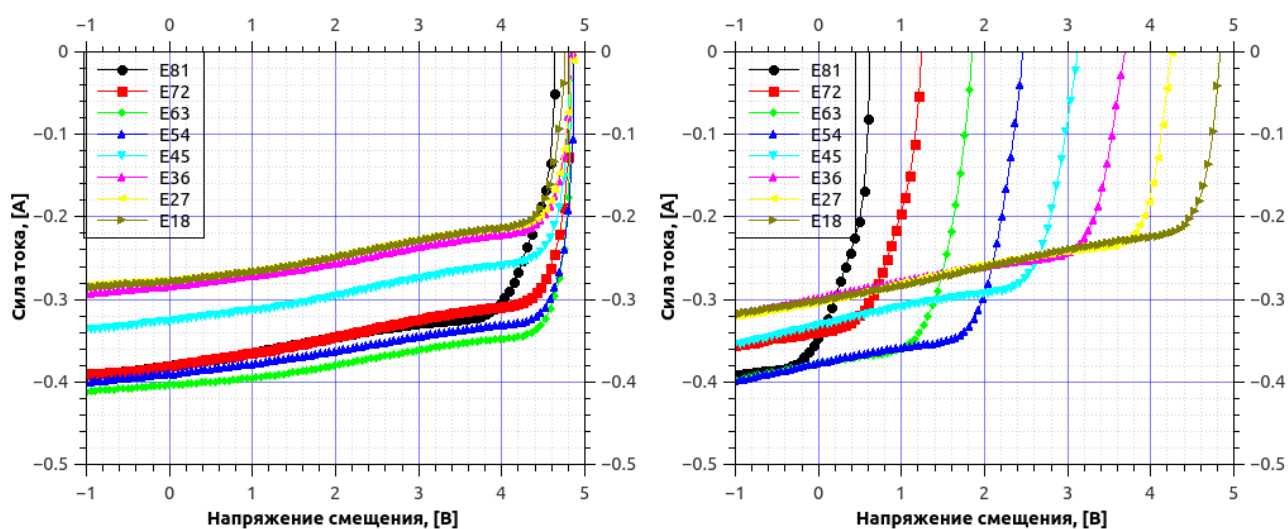


Рис. 7: Семейства парциальных ВАХ для модуля 8x8 при подключении источника напряжения к выходу элемента (8, 1) (слева) и парциальные ВАХ при переключении выхода источника напряжения по всем диагональным элементам(справа). Центр пучка на элементе (8,1)

На Рис.7 и Рис.8 приведены результаты измерения токов и напряжений при двух позициях центра пучка – внизу слева (на элементе (1, 8)) и вверху справа (на элементе (8, 1)). Сохранение значения напряжения холостого хода на левых фрагментах Рис.7 и Рис.8 связано с сохранением точки приложения напряжения от источника-измерителя. При изменении точки приложения напряжения согласованно с точкой регистрации протекающего тока

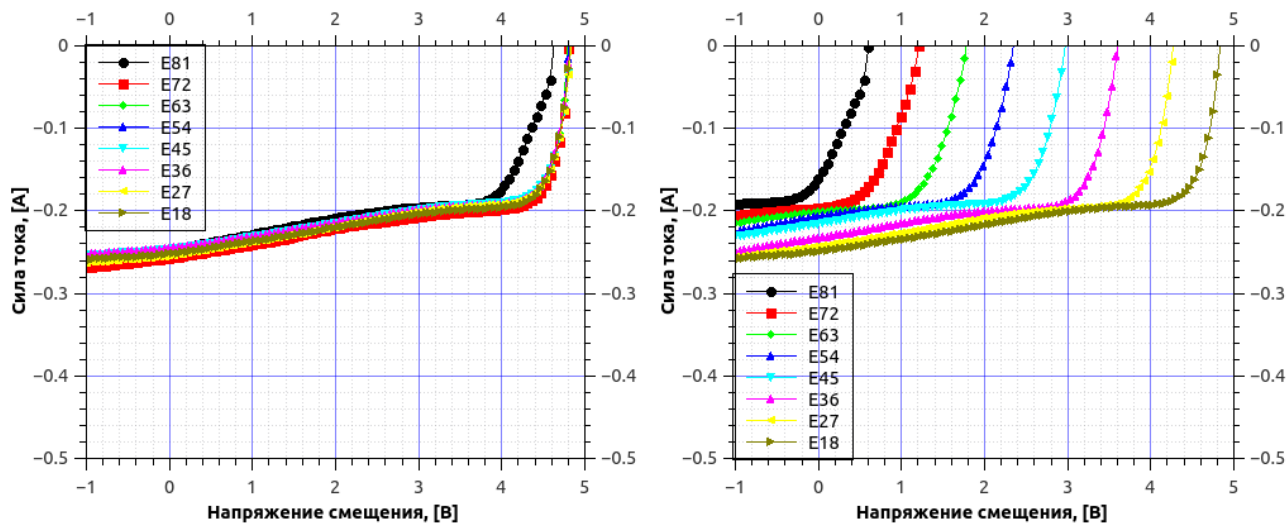


Рис. 8: Семейства парциальных ВАХ для модуля 8x8 при подключении источника напряжения к выходу элемента (8, 1) (слева) и парциальные ВАХ при переключении выхода источника напряжения по всем диагональным элементам(справа). Центр пучка на элементе (1,8)

позволяет отслеживать прирост напряжения холостого хода, создаваемый дополнительно подключаемыми элементами и формированием новых токовых распределений, как это следует из правых фрагментов Рис.7 и Рис.8.

3.3 Регулярный SPS массив фотовольтаических ячеек

Перейдем к анализу наиболее перспективной трехкаскадной коммутации, при которой созданные N_m модулей объединяются в массив элементов. Соответствующая такому соединению вольт-амперная характеристика может быть записана так:

$$I = N_s I_{ph} - N_s I_{rs} \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s N_c N_m / N_s)}{N_c N_m \kappa k_B T_c} \right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s N_c N_m / N_s)}{R_{sh} N_c N_m / N_s}. \quad (27)$$

Выбор геометрии размещения чипов при создании сегмента, размещения сегментов при создании модуля и размещения модулей при создании массива определяется свойствами энергонесущего пучка, такими как профиль распределения интенсивности, размеры отдельных спеклов для пространственно-неоднородной засветки, стационарностью, характерными значениями вектора скорости и частотным спектром дрожания положения энергетического центра пучка. Позиционирование фотовольтаических чипов позволяет частично решить задачи фотонного менеджмента, поскольку при создании удачных подобранных групп параллельно соединенных элементов возможно

построение модулей с близкими суммарными засветками. Последовательное соединение таких модулей в массив позволит избежать провалов проводимости и потери эффективности энергопреобразования.

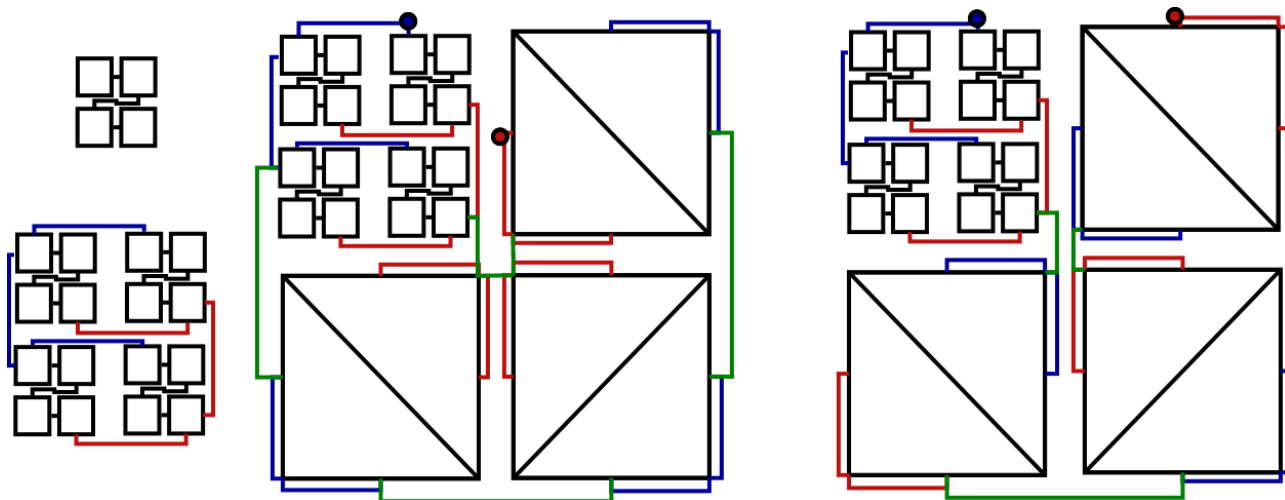


Рис. 9: Сегмент, модуль и варианты массивов SPP и SPS

На Рис.9 представлены варианты четырехчипового сегмента (верхний левый угол), четырехсегментного модуля (левая сторона рисунка) и два варианта четырехмодульных массивов – последовательно-параллельно-параллельного (SPP) и последовательно-параллельно-последовательного (SPS). И сегмент, и модуль и массив имеют форму квадрата с симметричным размещением составляющих их элементов. Удобство фрагментации и дефрагментации технологически оправдано, особенно при работе с адаптивной конфигураций массивов под различные типы энергонесущих пучков или при интеграции дополнительных измерительных функций в чипы сегментов.

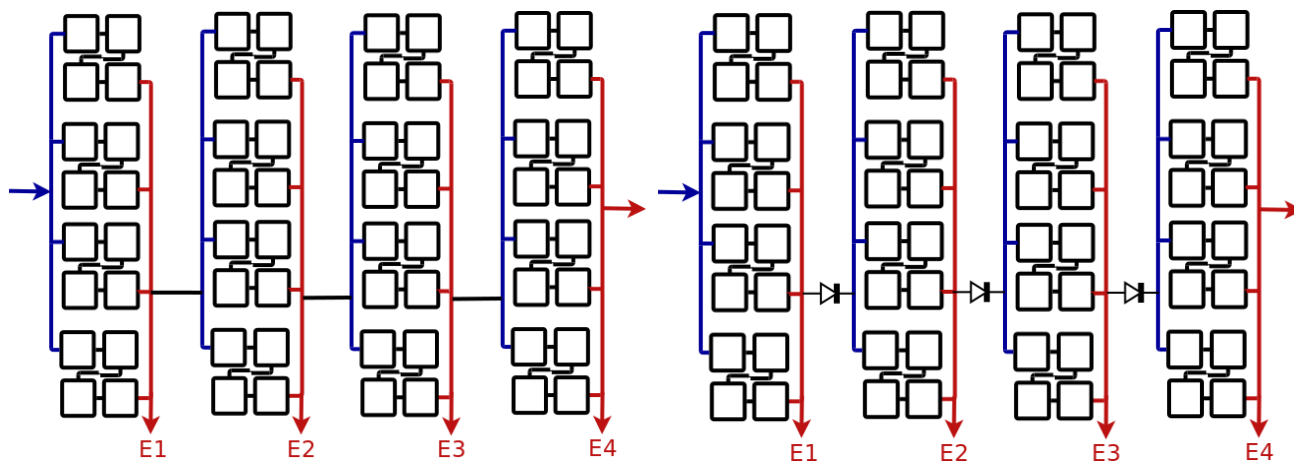


Рис. 10: Схема коммутации исследуемого массива SPS с использованием и без использования блокирующих диодов

Для тестов создадим из 64-х чипов массив с последовательно-параллельно-последовательной коммутацией, как показано на Рис.10. В мощных энергогенерирующих массивах, работающих в условиях регулярного и случайного затенения применяют блокирующие диоды для исключения обратных токов и "горячих точек" на рабочей поверхности массива. Сравнение вольт-амперных и ватт-амперных характеристик для массивов с блокировкой и без блокировки представлены на Рис.11 и Рис.12. Используются блокирующие диоды рассчитанные на напряжение $V = 0.3U_{OC} \approx 3V$ и сопротивлением $R = 0.1\Omega$.

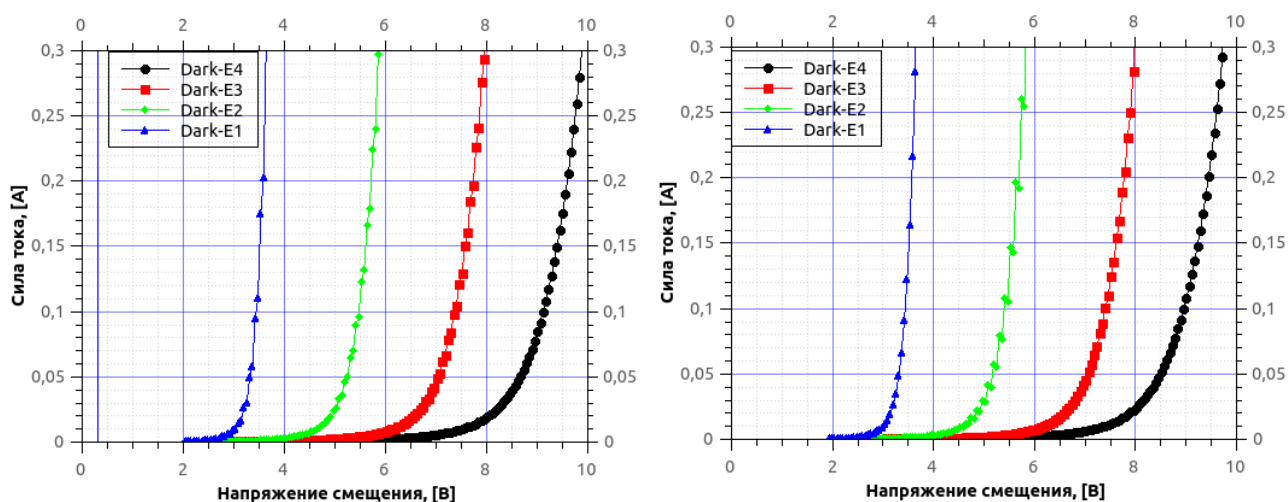


Рис. 11: Характеристики для массивов с блокирующими диодами (слева) и без блокирующих диодов (справа) для темнового режима

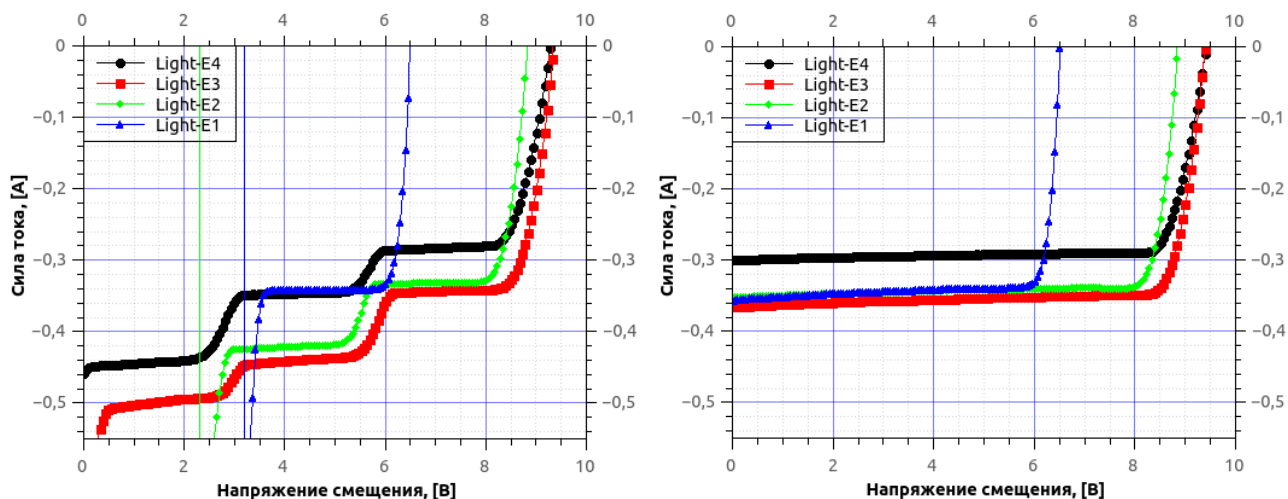


Рис. 12: Характеристики для массивов с блокирующими диодами (слева) и без блокирующих диодов (справа) при засветки массива

Рассмотрим интегральный отклик массива на затенение сегментов, объединенных одной строкой или одним столбцом. Подобный тест позволяет

восстановить структурную симметрию коммутации, проверить целостность сегментов и модулей. Затенение проводится металлическим экраном, не пропускающим поток излучения в пределах чувствительности измерительного стенда.

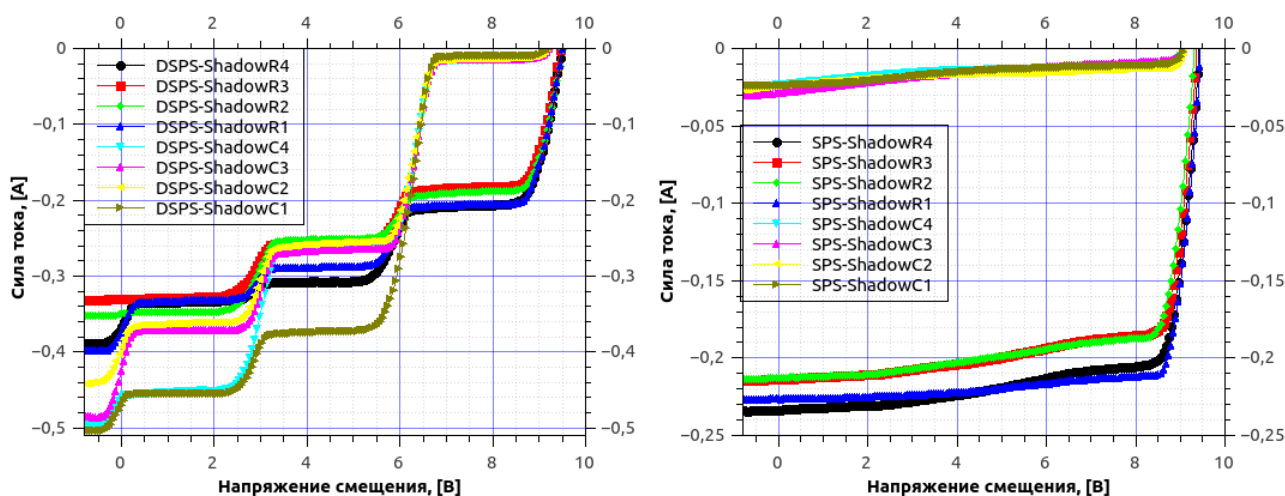


Рис. 13: Затенение столбцов и строк DSPS и SPS массивов

На Рис.13 приведены семейства характеристик рассматриваемых массивов, левые зависимости получены без блокирующих диодов, правые – после подключения диодов. При затенении строки каждый из модулей имеет по одному полностью не освещенному сегменту, при затенении столбца полностью исключается из работы один модуль массива. Именно так можно объяснить порядковое различие токов короткого замыкания двух массивов с совпадающей коммутацией и геометрией и различающихся лишь подключением диодов между парами модулей.

3.4 Распределяющий, SPS массив

Создание изотропных фотоэлектрических массивов принципиально для преобразования нестационарных и пространственно-неоднородных энергоне-сущих пучков. Пространственная неоднородность может появляться при генерации одномодовых пучком с модой, отличной от TEM₀₀ моды свободного пространства или LP₀₁, LP₁₀ оптоволоконных мод [6; 20]. При распространении в оптически прозрачной пространственно-неоднородной среде за счет модуляции профиля волнового фронта на плоскости массива может создаваться сложная нестационарная спекл-структура. При падении пучка на площадку фотопреобразователя, находящегося на борту космического, воздушного

или морского объекта пространственная неоднородность усугубляется относительным дрейфом или дрожанием позиций излучателя и приемника.

Исходная форма регистрирующей площадки фотоэлектрического массива может быть произвольной в зависимости от её размещения. Для задач фотопреобразования коллимированных пучков типичны квадратные и круглые формы массивов, использующие чипы в виде квадрата или охватывающих поверхность массива лепестков. Выберем наиболее технологичный вариант квадратного массива 8×8 элементов для удобства сравнения его характеристик с испытанными ранее формами рабочего сегмента, описанными в разделе 3.3. Объединение сегментов в модули должно обеспечить необходимый тип симметрии, в случае квадрата – формирование оси симметрии четвертого порядка. Помимо максимально возможной изотропии следует выбирать схему с максимально возможной пространственной однородностью размещения элементов сегмента по поверхности массива.

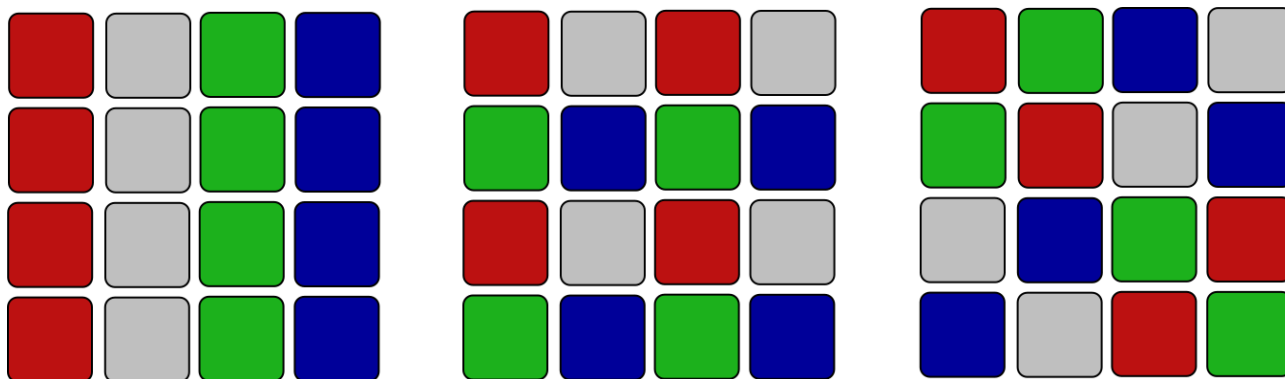


Рис. 14: Возможные объединения сегментов в модули параллельным соединением

На Рис.14 представлены три типа структуры четырехсегментных модулей с параллельным соединением сегментов внутри модуля и последовательным соединением модулей в массив. Цвета маркируют сегменты модуля, все модули могут быть получены трансляцией или вращением базового. Для левого массива базовый модуль – столбец параллельно соединенных сегментов, для среднего массива базовый модуль состоит из четырех элементов, расположенных по вершинам квадрата со стороной $0.75L$, где L – сторона квадрата массива. Три вертикальных поворота на угол $\pi/2$ или три смещения базового модуля порождают полный набор модулей массива и покрывают поверхность массива. Правая схема коммутации сегментов в модуль предложена автором.

ми работы и создана по правилу включения в модуль по одному сегменту из каждого столбца и каждой строки. Порождение элементов массива происходит при вращении базового модуля на $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ вокруг центра квадрата массива чипов.

Количественно оценить распределяющую способность массивов с конкретной коммутацией можно, сопоставив массиву 2-х битовое изображение размером 4×4 и определив энтропию изображения с учетом выполняемых переходов между элементами или выполнив тест компрессии или какой иной, определяющий избыточность в структуре массива.

$$\begin{bmatrix} 00 & 01 & 10 & 11 \\ 00 & 01 & 10 & 11 \\ 00 & 01 & 10 & 11 \\ 00 & 01 & 10 & 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 00 & 01 & 00 & 01 \\ 10 & 11 & 10 & 11 \\ 00 & 01 & 00 & 01 \\ 10 & 11 & 10 & 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 00 & 10 & 11 & 01 \\ 10 & 00 & 01 & 11 \\ 01 & 11 & 10 & 00 \\ 11 & 01 & 00 & 10 \end{bmatrix}$$

Наглядную оценку избыточности можно выполнить, пересчитав допустимые в каждом массиве уникальные переходы между элементами, проводимые по строкам – для левого массива доступны три типа переходов, для среднего четыре типа и для правого восемь типов.

Регистрируемые темновые парциальные вольт-амперные характеристики для рассеивающего и регулярных массивов из раздела 3.3 практически совпадают см. левый фрагмент Рис.15 и Рис.11.

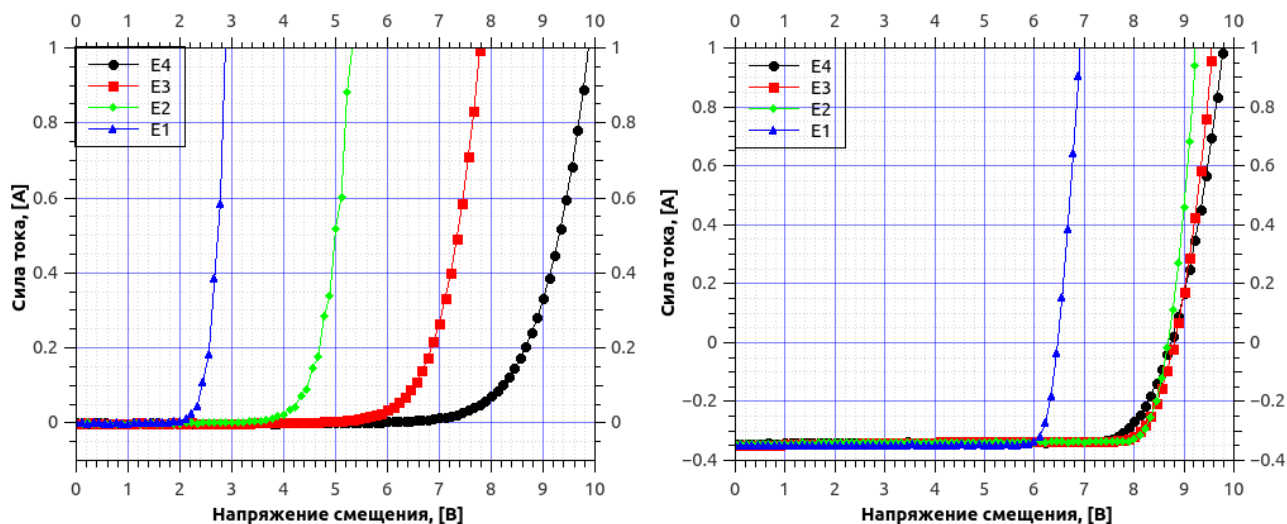


Рис. 15: Семейства парциальных ВАХ рассеивающего массива. Слева темновые, справа в условиях засетки

Отличительная особенность парциальных ВАХ в условиях неоднородной засветки для рассеивающего массива – практическое совпадение значений

токов короткого замыкания по всем четырем выходам – см. правый Рис.15. При частичном затенении ток короткого замыкания, снимаемый с рабочего выхода Е4 зависит от доли проходящего излучения. Именно этим фактором объясняется небольшое различие токов при затенении строк и столбцов, как это представлено на Рис.16. Отметим, что в рассматриваемом рассеивающем массиве не применяются блокирующие диоды или иные технологии управления токами.

Определим парциальные ВАХ, соответствующие затенению строк или столбцов и построим суммарные ВАХ следующим образом:

$$SummVAC_{CShadow} = VAC_{SC1} + VAC_{SC2} + VAC_{SC3} + VAC_{SC4}, \quad (28)$$

$$SummVAC_{RShadow} = VAC_{SR1} + VAC_{SR2} + VAC_{SR3} + VAC_{SR4}. \quad (29)$$

Если верно предположение о рассеивающих свойствах массива, должны быть выполнены с хорошей точностью равенства:

$$SummVAC_{CShadow} = SummVAC_{RShadow} = 3VAC_{Full}, \quad (30)$$

здесь VAC_{Full} – вольт-амперная характеристика снятая без затенения с выхода последнего каскада Е4, представленная на правой части Рис.15.

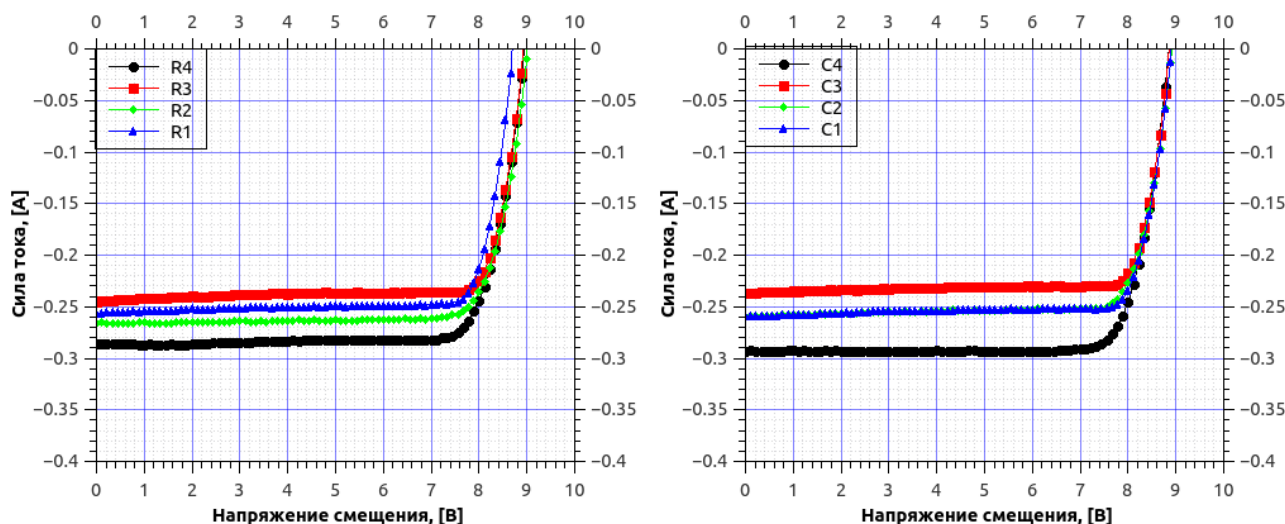


Рис. 16: Семейства парциальных ВАХ рассеивающего массива при затенении строк и столбцов

На левой части Рис.17 представлены нормированные суммарные вольт-амперные характеристики при затенении и собственная характеристика мас-

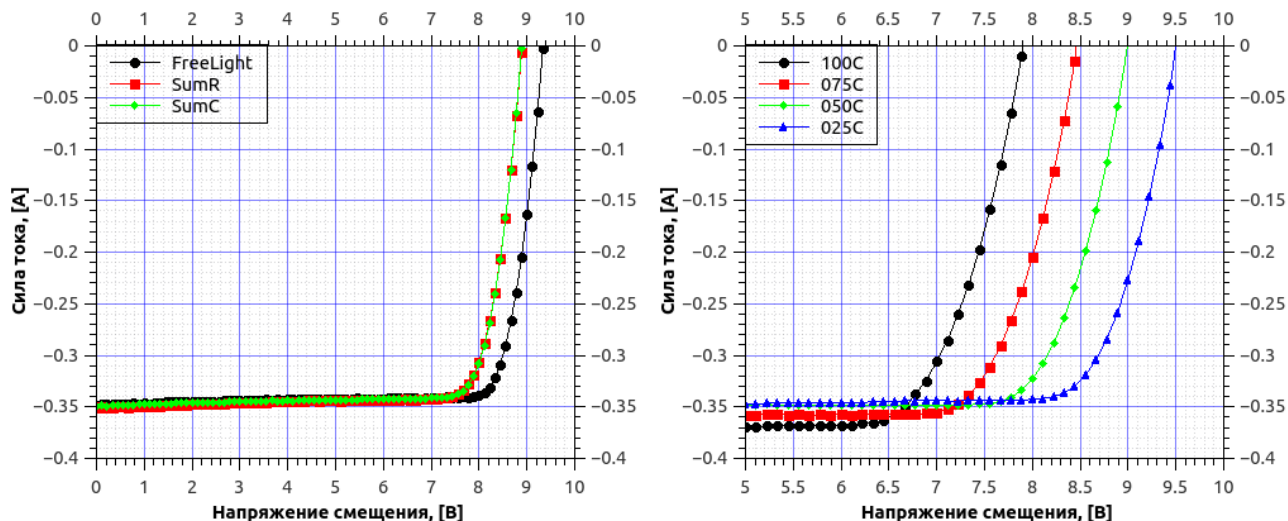


Рис. 17: Тест суперпозиции для затенения строк и столбцов массива (слева) и изменение ВАХ при росте температуры поверхности массива (справа)

сива без затенения. Расхождение значений по напряжению холостого хода составляет не более 0.05В. Величина расхождения может быть связана как с различием температур массива (при затенении воздушный охлаждающий поток не доходит на части поверхности массива). Несколько вольт-амперных характеристик, снятых при различных температурах с шагом 25°C , даны на правой части Рис.17, температурная деградация напряжения холостого хода для массива составляет 0.0023 на 1°C и согласуется с полученным ранее значением для уединенного фотоэлектрического чипа.

Заключение

Представленные результаты экспериментальных и имитационных исследований матричных фотовольтаических преобразователей определяют правила синтеза коммутационных схем, эффективных при работе с мощными коллимированными энергонесущими лазерными пучками. Особенности работы с коллимированным энергонесущим пучком состоят в ограничении 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. В ряде случаев принудительная стохастизация распределения интенсивности по по-

верхности решает задачу повышения эффективности фотопреобразования. Примеры распределяющей коммутации для массивов 8x8 представлены на среднем и правом фрагмента Рис.18.

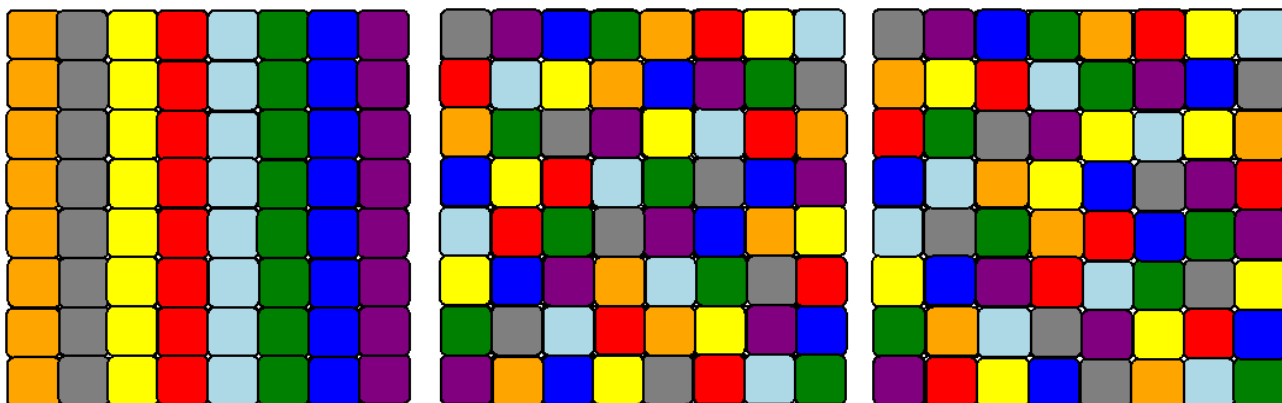


Рис. 18: Возможные объединения сегментов в модули параллельным соединением

Возможность выравнивания распределения интенсивности по поверхности фотопреобразователя коммутационными методами позволяет разделить функционал в системах управления энергонесущим волновым пучком на три последовательных операции:

- формирование профиля волнового пучка выполнять с помощью анаморфной линзовой группы,
- управление наклоном, согласованное с характерными частотами помех в ориентации оси распространения пучка, выполнять зеркальным элементом, не вносящим дополнительных изменений в симметрию оптической системы,
- выравнивание отклика массива фотоэлектрических преобразователей выполнять средствами распределенной коммутации сегментов или чипов ФЭП.

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. — Pp. 388–393.

2. *Krishna G. S., Moger T.* Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art // *Solar Energy*. — 2019. — Vol. 182. — Pp. 429–452.
3. *Allmen M., Blatter A.* Laser-beam interactions with materials: physical principles and applications. — Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. — P. 196.
4. *Gruber M., Jovanov V., Wagner V.* Modeling of photoactive area spreading in unstructured photovoltaic cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2019. — Vol. 200. — Pp. 1–6.
5. *Fahrenbruch A., Bube R.* Photovoltaic Solar Energy Conversion. — 1983. — P. 559.
6. *Ranga S., Kirei B., Topa M.* Numerical modeling of cascaded photovoltaic cells in open source simulation environment // *Acta Technica Napocensis*. — 2017. — Vol. 58. — Pp. 1–6.
7. *Diaz-Dorado E., Cidras J., Carrillo C.* Discretized model for partially shaded PV arrays composed of PV panels with overlapping bypass diodes // *Solar Energy*. — 2017. — Vol. 157. — Pp. 103–115.
8. *Baka M., Manganiello P., Soudris D., et al.* A cost-benefit analysis for reconfigurable PV modules under shading // *Solar Energy*. — 2019. — Vol. 178. — Pp. 69–78.
9. *Zhang Z., Yao M., Li X., et al.* Simultaneous functional and structural imaging for photovoltaic devices // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2019. — Vol. 193. — Pp. 101–106.
10. *Abd El-Hameed A.* Analytical study of pulsed laser irradiation on some materials used for photovoltaic cells on satellites // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. — 2015. — Vol. 4. — Pp. 256–265.
11. *Tatsi E., Griffini G.* Polymeric materials for photon management in photovoltaics // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2019. — Vol. 196. — Pp. 43–56.

12. *Abdin Z., Webb C., Gray E.* Simulation of large photovoltaic arrays // *Solar Energy*. — 2018. — Vol. 161. — Pp. 163–179.
13. *Katsaounis T., Kotsovos K., Gereige I., et al.* 2D simulation and performance evaluation of bifacial rear local contact c-Si solar cells under variable illumination conditions // *Solar Energy*. — 2017. — Vol. 158. — Pp. 34–41.
14. *Wu C., Peng Q., Huang C.* Thermal analysis on multijunction photovoltaic cell under oblique incident laser irradiation // *Energy*. — 2017. — Vol. 134. — Pp. 248–255.
15. *El-Adawi M., Abdel-Naby M., Shalaby S.* Laser heating of a two-layer system with constant surface absorption: an exact solution // *International journal of heat and mass transfer*. — 1995. — Vol. 38. — Pp. 947–952.
16. *Shah N., Patel H.* Maximizing Power Output of a Partially Shaded Total-Cross-Tied Photovoltaic array // *Transactions on Environment and Electrical Engineering*. — 2017. — Vol. 2. — Pp. 10–18.
17. *Rakesh N., Madhavaram T.* Performance enhancement of partially shaded solar PV array using novel shade dispersion technique // *Frontiers in Energy*. — 2016. — Vol. 10. — Pp. 227–239.
18. *Chaibi Y., Salhi M., El-jouni A., et al.* A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel // *Solar Energy*. — 2018. — Vol. 163. — Pp. 376–386.
19. *Fadhel S., Delpha C., Diallo D., et al.* PV shading fault detection and classification based on IV curve using principal component analysis: Application to isolated PV system // *Solar Energy*. — 2019. — Vol. 179. — Pp. 1–10.
20. *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. — Pp. 359–371.

Для цитирования:

Бланк А. В., Богданов С. Д., Сухарева Н. А., Эйдельман Б. Л. Распределяющая коммутация фотовольтаических массивов для задач беспроводной оптической энергетики. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/16/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.16