

В. А. АНТОНОВА, канд. техн. наук, В. Н. БОРЩЕВ, д-р техн. наук, В. А. ЗОЛОТАРЕВ,
А. М. ЛИСТРАТЕНКО, Н. И. СЛИПЧЕНКО, канд. техн. наук

ОПТИМИЗАЦИЯ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ $n^+ - p - p^+$ - СТРУКТУР

Качество фотопреобразователей (ФП) характеризуется удельной выходной мощностью фотогальванического преобразования $P_{уд}$ и КПД η :

$$P_{уд} = AV_{xx}j_{кз}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{уд}}{P_{И}} 100\% = \frac{AV_{xx}j_{кз}}{P_{И}}, \quad (2)$$

где A – коэффициент заполнения ВАХ; V_{xx} – напряжение холостого хода; $j_{кз}$ – плотность тока короткого замыкания; $P_{И}$ – интегральная мощность излучения, падающая на единицу поверхности.

Предельный расчетный КПД кремниевых ФП, равный 23 %, получен без учета потерь при квантовом выходе $\eta_{\Phi} = 1$ [1]. Реальный КПД у кремниевых солнечных элементов (СЭ) с $n^+ - p - p^+$ -структурой при однократной освещенности составляет 17-18 % [1]. В кремниевых фотопреобразователях, предназначенных для концентрированного солнечного излучения, достигнут КПД ~ 20 %.

Как следует из выражения (2), для получения максимального КПД необходимо максимизировать все три множителя в числителе правой части выражения. При этом наряду с проблемами повышения эффективности преобразования и надежности СЭ на первом плане оказывается проблема снижения его стоимости, поскольку необходимо, чтобы СЭ наземного назначения оказались в конце концов конкурентоспособными с другими источниками энергии [2].

Настоящая работа посвящена разработке оптимальных условий фотопреобразования, расчетам оптимальных геометрических размеров токосъемной контактной сетки фронтальной поверхности и расчетам режимов процессов формирования диффузионных слоев на основе жидкорастворной или модифицированной комбинированной технологии.

При проведении исследований были поставлены следующие задачи: а) увеличить составляющие фототока, генерированного как в базовой области, так и в легированном слое; б) уменьшить последовательное сопротивление СЭ, обеспечив при этом возрастание коэффициента заполнения A и воспроизводимость значений этого параметра.

Для увеличения составляющей фототока, генерированного в базовой области, в технологическую цепочку включен процесс внешнего геттерирования примеси [2]. Для увеличения составляющей тока, генерированного в легированном слое, необходимо обеспечить специфический профиль распределения примеси (рис. 1 и рис. 2). Концентрация примеси, достигая максимального значения $\sim 10^{27} \text{ м}^{-3}$ вблизи фотоприемной поверхности, резко снижается при удалении от нее. Благодаря такому профилю распределения примеси уменьшается вклад легированного слоя непосредственно под контактной сеткой в последовательное сопротивление СЭ без возрастания скорости рекомбинации носителей в приповерхностной области, что способствует повышению фоточувствительности СЭ в коротковолновой области солнечного излучения и возрастанию $j_{кз}$.

При формировании фронтального $n^+ - p$ -перехода для того, чтобы получить высокую поверхностную концентрацию фосфора, не вызывая эффектов, связанных с высоким уровнем легирования, использованы следующие варианты получения требуемого концентрационного профиля примеси:

- 1) двухстадийная диффузия P из твердых источников и последующая кратковременная диффузия из стекловидной пленки типа КФК-50-10;
- 2) диффузия фосфора из пленки КФК-15-15 и последующая кратковременная диффузия из пленки КФК-50-10.

Для определения оптимальных параметров процесса проведены расчеты режимов с использованием алгоритмов, изложенных в работах [3-5]. В качестве исходного материала для $n^+ - p - p^+$ -структур использован кремний КДБ-10, имеющий концентрацию легирующей примеси $N_g = 1,345 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ [4, 5].

Исходными данными для расчета режимов процесса двухстадийной диффузии являются следующие:

- исходная концентрация в базовой области $N_0 = 1,345 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$;
- требуемая глубина залегания n^+ - p -перехода $x_i = 1 \text{ мкм}$;
- требуемая поверхностная концентрация после проведения процесса двухстадийной диффузии $N_0 = 1,345 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Расчеты привели к следующим результатам:

- параметр разгонки

$$D_p t_p = \frac{x_i^2}{4 \ln \frac{N_0}{N_0}} = 2,71 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2; \quad (3)$$

- оптимальные режимы проведения процесса разгонки: $T_p = 1000^\circ\text{C}$, при которой коэффициент диффузии фосфора $D_p = D_0 e^{-\frac{E}{kT_p}} = 10^{-17} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ [6], время разгонки $t_p = 45 \text{ мин}$;

- количество примеси Q для разгонки, обеспечивающее требуемые параметры,

$$Q = N_0 \sqrt{\pi D_p t_p} = 3,92 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}; \quad (4)$$

- параметр процесса загонки, определяемый из выражения $Q = 2N_s \sqrt{\frac{D_s t_s}{\pi}}$, рассчитан по формуле

$$D_s t_s = \frac{Q^2 \pi}{4N_s^2} \quad (5)$$

и при $T_s = 800^\circ\text{C}$ и значении предельной растворимости фосфора в кремнии $N_s = 8 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$ [6] составляет $D_s t_s = 4,266 \cdot 10^{-17} \text{ м}^{-2}$;

- коэффициент диффузии $D_s = D_0 e^{-\frac{E}{kT_s}} = 4 \cdot 10^{-20} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ [6] для $T_s = 800^\circ\text{C}$ и времени загонки $t_s = 15 \text{ мин}$.

Распределение концентрации легирующей примеси, рассчитанное по формуле

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_p t_p}} e^{-\frac{x^2}{4 D_p t_p}}, \quad (6)$$

приведено на рис. 1.

Для формирования n^+ - p -фронтального перехода со специфическим концентрационным профилем предусмотрена последующая кратковременная диффузия фосфора из жидкорастворной композиции типа КФК-50-10. Основы технологии диффузии из ЖРК изложены в работах [7-10]. Алгоритм расчета параметров процесса формирования диффузионного слоя заключается в следующем:

- концентрацию атомов примеси в пленке КФК-50-10 определяем, пользуясь соотношением [8]:

$$N_{10} = 8,5 \cdot 10^{17} u \text{ (265-0,25 u)}, \quad (7)$$

где u – весовой процент ангидрида диффузанта; в результате получим

$$N_{10} = 8,5 \cdot 10^{17} \cdot 50(265 - 12,5) = 10^{22} \text{ см}^{-3} = 10^{28} \text{ м}^{-3};$$

- при толщине стекловидной пленки ~ 0,15-0,20 мкм пленку можно считать неограниченным источником диффузанта [7-10] и распределение концентрации примеси в пленке следует рассчитывать по формуле:

$$N(x) = N_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_2 t}}, \quad (8)$$

где N_s – концентрация примеси на границе раздела стекловидная пленка – кристалл (при $x = 0$)

$$N_s = N_{10} \frac{m\sigma}{\sigma + 1}; \quad (9)$$

m – коэффициент сегрегации;

$$\sigma = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}; \quad (10)$$

D_1 и D_2 – соответственно коэффициенты диффузии примеси в SiO_2 и в Si ;

- при использовании данных $D_1 = 10^{-16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $D_2 = 10^{-17} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ и $m = 10^{-1}$ [5] на основании выражений (9) и (10) получим $\sigma = 31,62$; $N_s = 9,962 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$.

Расчет концентрационного профиля легирующей примеси для диффузии при $T = 1000^0 \text{ C}$ в течение 15 минут проведен с использованием выражения

$$N(x) = N_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = 9,962 \cdot 10^{26} \operatorname{erfc} \frac{x \cdot 10^{-6}}{2\sqrt{10^{-17} \cdot 999}} = 9,962 \cdot 10^{26} \operatorname{erfc} 5,25x, \quad (11)$$

где x – расстояние вглубь кристалла, мкм.

Расчетный концентрационный профиль распределения примеси при диффузии из ЖРК приведен на рис. 1.

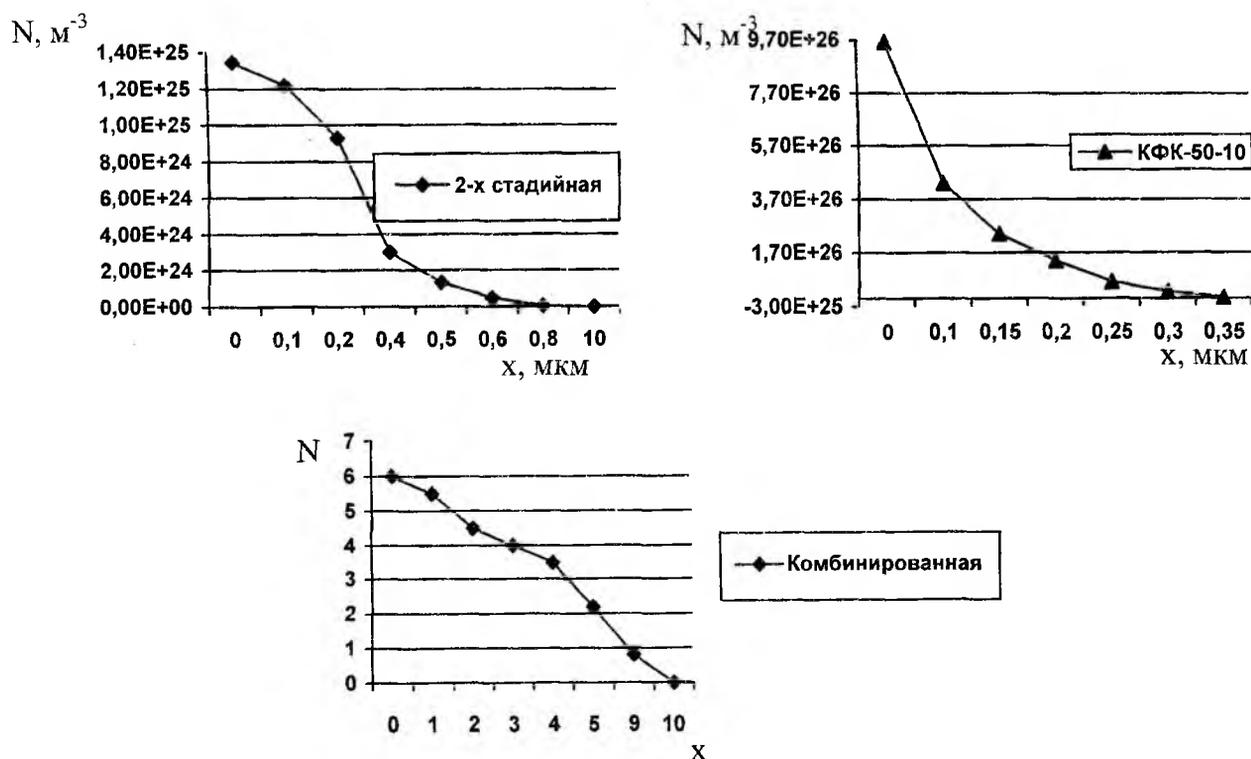


Рис. 1

Второй вариант получения специфического концентрационного профиля легирующей примеси заключается в том, что на первом этапе формирования n^+ - p -перехода проводилась диффузия из КФК-15-15 при $T = 950^0 C$ в течение 60 минут, а на втором этапе – кратковременная диффузия из КФК-50-10 при $T = 1000^0 C$ в течение 10 минут.

Расчет параметров процесса проводили по алгоритму, приведенному выше, с учетом того, что коэффициент диффузии фосфора в кремнии при $T = 950^0 C$ составляет $D_2 = 3 \cdot 10^{-18} \frac{m^2}{c}$ [6], и концентрация примеси в пленке КФК-15-15 рассчитывается на основании выражения [5]:

$$N_{10} = 2,25 \cdot 10^{20} u = 2,25 \cdot 10^{20} \cdot 15 = 3,375 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \approx 3,4 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}. \quad (12)$$

Следовательно, для КФК-15-15 при значении $\frac{m\sigma}{\sigma+1} = 8 \cdot 10^{-2}$ [9] получаем значение концентрации примеси на границе раздела SiO_2-Si

$$N_s = N_{10} \frac{m\sigma}{\sigma+1} = 2,85 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}.$$

Распределение концентрации P в полупроводнике на первом и втором этапах определяем по формуле (8), которая для КФК-15-15 при $N_s = 2,85 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$, $D_2 = 3 \cdot 10^{-18} \frac{m^2}{c}$ и $t = 60$ мин приобретает вид:

$$N(x) = 2,85 \cdot 10^{26} \operatorname{erfc} 4,81x, \quad (13)$$

а для КФК-50-10 при $N_s = 9,62 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$, $D_2 = 10^{-17} \frac{m^2}{c}$ и $t = 10$ мин запишется выражением:

$$N(x) = 9,62 \cdot 10^{26} \operatorname{erfc} 6,45x. \quad (14)$$

Расчетные концентрационные профили для случая получения n^+ - p -фронтального перехода двухэтапной диффузией из ЖРК приведены на рис. 2.

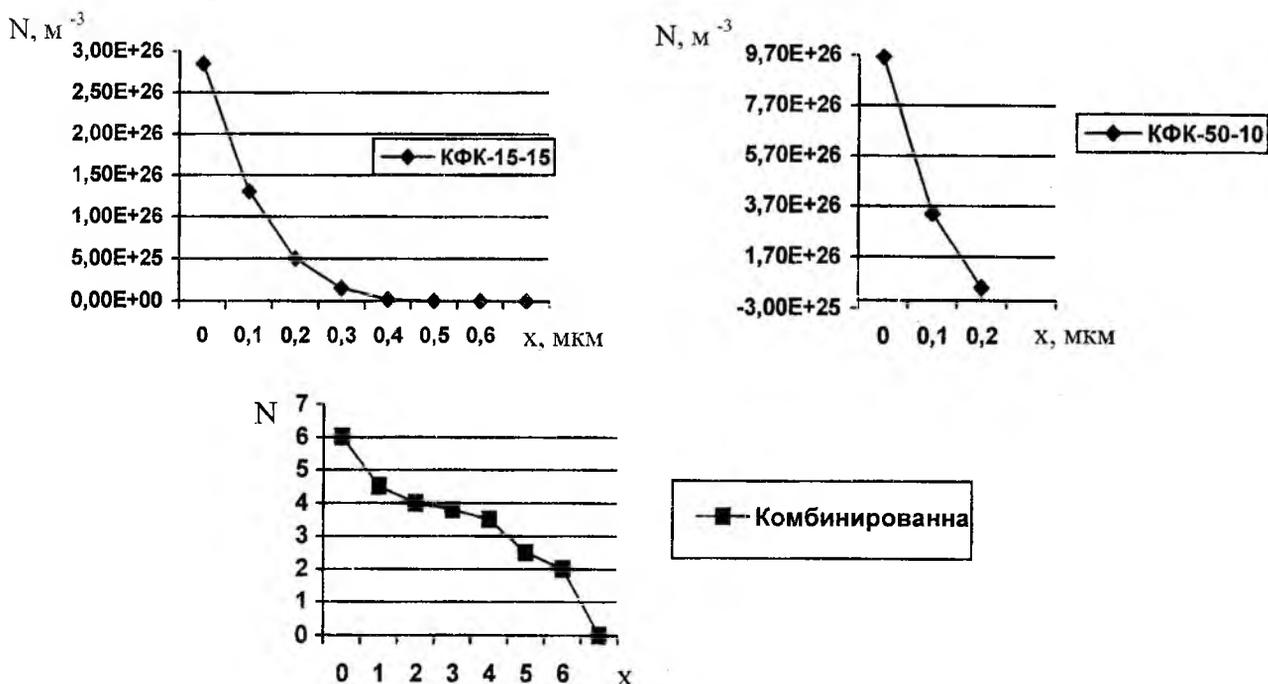


Рис. 2

При разработке конструктивно-технологических решений ФП была также решена задача оптимизации геометрических размеров фронтальной контактной токосъемной сетки.

Операция нанесения контактов к фронтальной и тыльной сторонам ФП является одной из важнейших операций. При этом следует учитывать как электрические характеристики по контактному сопротивлению, так и механическую прочность контакта. Особенно это важно для фотопреобразователей, предназначенных для работы в космосе, так как из-за термоциклирования со значительным перепадом температур возможно разрушение ФП.

Качество и форма контактов влияют на ВАХ фотопреобразователя. Показано [1, 11], что омические потери на последовательном сопротивлении устройства значительно снижают выходную мощность и КПД преобразователя. Последовательное сопротивление фотопреобразователя складывается из сопротивления тыльного контакта R_T и сопротивления фронтального слоя, называемого сопротивлением растекания R_p [1, 11]. Если тыльное сопротивление ФП специальными технологическими методами может быть сделано очень малым (легирование тыльного контакта, применение материалов с высокой электропроводностью и т.п.), то уменьшение R_p возможно лишь за счет уменьшения длины ФП, однако при этом сокращается и полезная (не закрытая контактом) поверхность.

На рис. 3 приведена конструкция контактной сетки для фронтальной поверхности фотопреобразователя, с помощью которой можно оптимизировать условия преобразования для получения максимально высокого КПД.

Сопротивление растекания контактной сетки фронтальной поверхности можно определить, рассматривая его как параллельное сопротивление П-образных контактов [11]:

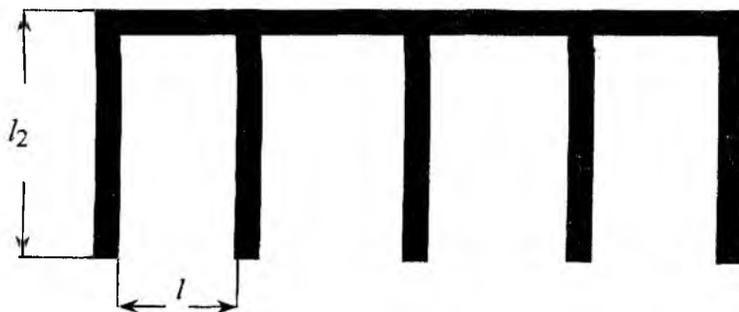


Рис. 3

$$R_p = \frac{1}{\bar{\omega}} \frac{256 \rho}{\pi^2 x_i} \frac{l_1 l_2}{4l_1^2 + l_2^2}, \quad (15)$$

где $\bar{\omega}$ – количество П-образных контактов; ρ – удельное сопротивление фронтального слоя; x_i – глубина залегания n^+ - p -перехода; l_2 – длина токосъемной полосы; l_1 – расстояние между центрами полос.

Увеличивая число токосъемных полос, делая контактную сетку более густой, можно уменьшить последовательное сопротивление, однако при этом уменьшается полезная поверхность фотопреобразователя. Следовательно, необходимо решить задачу о создании контактной сетки с оптимальными размерами.

При разработке конструкции фотопреобразователя важно получить максимальную мощность с единицы его поверхности

$$P_{y\partial} = \frac{IV}{S}, \quad (16)$$

где

$$V = \frac{AkT}{e} \ln \left[\frac{j_{кз}(S - S_k) - I}{j_0 S} + 1 \right] - R_p I, \quad (17)$$

здесь e – заряд электрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); S – площадь ФП; S_k – площадь токосъемных контактов; R_p – последовательное сопротивление фотоприемного слоя; $j_{кз}$ – плотность тока короткого замыкания; I – ток нагрузки; j_0 – плотность обратного тока насыщения.

Если ввести обозначение

$$\frac{I}{I_{\Phi}} = \frac{I}{j_{кз}(S - S_{к})} = \frac{I}{j_{кз}S(1 - S_{к}/S)} = m, \quad (18)$$

то с учетом выражения (17) формулу (16) для удельной мощности можно записать в виде:

$$P_{y\delta} = j_{кз}m(1 - S_{к}/S) \left[\frac{AkT}{e} \ln \left(\frac{j_{кз}(1 - m)(1 - S_{к}/S)}{j_0} + 1 \right) - R_p m j_{кз} (1 - S_{к}/S) \right]. \quad (19)$$

Определим, при каких размерах контактной сетки и каком значении m удельная мощность принимает максимальное значение, считая, что ширина контактных полос t на поверхности ФП задана и делается настолько малой, насколько это допускается технологией. Дифференцируя (19) по m и приравнявая производную нулю, получим уравнение, определяющее оптимальное значение m . Если пренебречь в этом уравнении величиной $S_{к}/S$ по сравнению с единицей и падением напряжения на фронтальном слое по сравнению с напряжением ФП, то получим соотношение:

$$f(m) = \frac{m}{1 - m} - \ln(1 - m) = \ln \frac{j_{кз}}{j_0}. \quad (20)$$

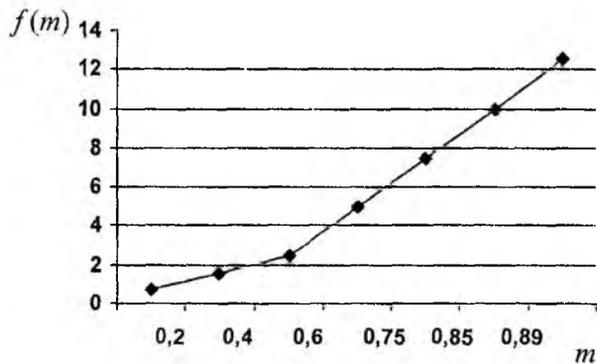


Рис. 4

График функции $f(m)$ представлен на рис. 4. Из приведенной зависимости легко определить значения параметра m , необходимые для дальнейших расчетов.

Подставляя в формулу (19) площадь фотопреобразователя $S = l_1 l_2$ и площадь контакта $S_{к} = l_2 t$ и решая совместно уравнения $\frac{dP_{y\delta}}{dl_1} = 0$ и $\frac{dP_{y\delta}}{dl_2} = 0$, можно доказать, что l_2 не имеет существенного значения для последовательного сопротивления фронтальной поверхности, а l_1 легко определить из следующего выражения:

$$l_1 = \sqrt[3]{t \frac{AkT}{e} \ln \frac{j_{кз}(1 - m) + 1}{j_0} \frac{2 \rho_{n+}}{3 x_i} m^2 j_{кз}}. \quad (21)$$

Для "фиолетового" фотопреобразователя со структурой $n^+ - p - p^+$ можно использовать следующие исходные данные: $x_i = 0,6$ мкм; $N_d = 10^{26}$ м⁻³; $R_{\square} = 15$ Ом/кв;

$$\rho_{\text{баз. слоя}} = 10 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad A = 1; \quad t = 0,1 \text{ мм} = 10^{-4} \text{ м}; \quad \rho_{\text{п+-слоя}} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad j_{кз} = 40 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2} \\ = 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{А}}{\text{см}^2} = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}; \quad j_0 = 10^{-9} \frac{\text{мА}}{\text{см}^2} = 10^{-12} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

Для приведенных данных $\ln \frac{j_{кз}}{j_0} = f(m) = \ln \frac{4 \cdot 10^{-2}}{10^{-12}} = \ln 4 \cdot 10^{10} = 24,4$. Отсюда $m = 0,95$ и $m^2 = 0,9$. Подставляя исходные данные и полученное значение для m в формулу (21), получим:

$$l_1 = \sqrt[3]{\frac{10^{-4} \cdot \frac{1 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{4 \cdot 10^{-2} (1 - 0,95)}{10^{-12}}}{0,67 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-6}}{0,6 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,9 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 10^4}} = \sqrt{15,27 \cdot 10^{-9}} = 2,48 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2,48 \text{ мм.}$$

Если выбрать конструкцию фотопреобразователя прямоугольной формы с размерами сторон 24×15 мм, то общая площадь фотопреобразователя составит 3,6 см². Оптимальным считается затенение фотоприемной поверхности контактной сеткой на уровне 5-6 %. В этом случае оптимальной будет конструкция токосъемной сетки со следующими размерами токосъемного контакта: длина – 15 мм, ширина – 100 мкм (0,1 мм), расстояние между центрами токосъемных контактов – 2,48 мм, количество контактов – 10.

Дальнейшее усовершенствование кремниевых ФП связано с повышением V_{xx} за счет ослабления рекомбинации носителей заряда во всех областях прибора, что предполагается делать путем пассивации лицевой и тыльной поверхности ФП тонкими (~ 20 нм) слоями SiO_2 . Повышение токоотдачи ФП предполагается осуществить за счет замены просветления из ZnS на TiO_2 , получаемый из ЖРК, который позволит расширить спектральную область с низким коэффициентом отражения (< 3 %) до длины волны $\lambda \approx 0,4$ мкм, что позволит повысить V_{xx} также и КПД.

Список литературы: 1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280 с. 2. Антонова В.А., Листратенко А.М., Слипченко Н.И. Высокоэффективные солнечные элементы на основе жидкорастворной технологии // Радиотехника. 2000. Вып. 115. С. 90 – 94. 3. Антонова В.А., Слипченко Н.И. Математическое моделирование параметров диффузионных элементов интегральных схем // Радиотехника. 1998. Вып. 105. С. 158 – 165. 4. Методика расчета номиналов высокоомных резисторов / В.А.Антонова, В.Н.Борщев, Г.И.Яловега и др. // Технология приборостроения / ЦНТИ “Поиск” (Сер. 13). 1988. Вып. 2. С. 100– 111. 5. Исследование процессов фотостимулированной диффузии примесей в кремнии // В.А.Антонова, В.Н.Борщев, С.П.Клембек, И.Н.Филиппченко // Технология приборостроения / ЦНТИ “Поиск” (Сер. 13). 1991. Вып. 2. С. 55 – 61. 6. Курносое А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высш. шк. 1979. 367 с. 7. Новиков В.В. Расчет распределения концентрации примеси при диффузии из окисного слоя в кремний // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТПО. 1970. Вып. 4. С. 8 – 19. 8. Новиков В.В. Исследование зависимости концентрации примеси в стекловидной пленке от содержания ангидрида // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТПО. 1970. Вып. 4. С. 20–25. 9. Диффузия фосфора из стекловидных пленок в кремний / В.В.Новиков, И.М. Митникова, Н.Е.Приходько, Л.Ф.Чепик, А.И.Борисенко, Н.Д.Орлова // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТПО. 1970. Вып. 4. С. 32 –36. 10. Использование растворных композиций при низкотемпературной диффузии фосфора и бора в кремний / В.В.Заддэ, К.В.Зиновьев, Д.С.Скрёбков, Т.И.Сурьянинова // Электронная промышленность. 1980. Вып. 1 (85). С. 53 - 55. 11. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 246 с.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 21.05.2001