## <u>Исследования кафедры в области Si-ФЭП для излучения с К<sub>И</sub> >> 100</u>

Последние 5 лет усилия кафедры ФМЭГ в области разработки высокоэффективных монокристаллических Si-ФЭП направлены на создание многопереходных (МП) Si-ФЭП с вертикальными диодными ячейками (ВДЯ) нового поколения, КТР которых должно обеспечить КПД около 26 % при  $K_{\rm H} = 500 \div 1000$ , что в 1,3 раза превышает КПД известных ранее МП Si-ФЭП.

На Рис. 1.5 схематически изображен МП Si-ФЭП с ВДЯ классической конструкции.



Рисунок 1.5 – Классическая конструкция: *а* - МП Si-ФЭП; *б* - ВДЯ

На Рис. 1.6 *а* показан ФСМ из реальных классических МП Si-ФЭП с ВДЯ, имеющий площадь фотоприемной поверхности 4 см<sup>2</sup> и КПД 20 % при  $K_{\rm H}$  = 1000, способный отдавать в нагрузку  $P_{\rm HM}$  = 80 Вт. На Рис. 1.6 *б*, *г* показаны СФЭУ, состоящие из подобных ФСМ, зеркального фацетного концентратора и автоматически следящего за Солнцем устройства. На Рис. 1.6 *в*, *д* показаны примеры соответствующих облучаемых и охлаждаемых модулей.



Рисунок 1.6 – ФСМ из реальных классических МП Si-ФЭП с ВДЯ без ITO-рефлекторов (*a*); СФЭУ, состоящие из модулей таких МП Si-ФЭП с ВДЯ, зеркального фацетного концентратора и автоматически следящего за Солнцем устройства (*б*, *г*); примеры соответствующих облучаемых и охлаждаемых модулей МП Si-ФЭП с ВДЯ (*в*, *d*)

Согласно результатам выполненных нами теоретических и экспериментальных исследований повышение КПД приборов такого типа до 26 % можно достичь за счет:

1) дополнения конструкции ВДЯ пленочными оптическими рефлекторами из прозрачного проводящего материала – ITO (indium-tin oxide), устраняющими потери энергии солнечного излучения внутри ВДЯ на поглощение металлическими электродами;

2) помещения МП Si-ФЭП с ВДЯ в стационарное магнитное поле постоянных магнитов с индукцией  $B = 0,5 \div 1,0$  Тл для обеспечения добавки к  $I_{K3}$  и  $U_{XX}$  за счет реализации **ф**отоэлектромагнитного (ФЭМ) эффекта Кикоина-Носкова и увеличения времени жизни генерированных светом носителей заряда.

Как показали результаты проведенного анализа, именно ЭТО направление позволяет рассчитывать на получение в ближайшие годы электроэнергии экологически чистой солнечной по цене около 0,5 \$<sub>США</sub>/Вт-пик, что эквивалентно ~ 0,01 \$<sub>США</sub>/кВт·час.

## <u>ВЛИЯНИЕ ІТО-РЕФЛЕКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ МП Si-ФЭП С ВДЯ</u>

На Рис. 1.7 схематически показаны конструктивные особенности реального классического МП Si-ФЭП с ВДЯ без ITO-рефлекторов (*a*) и разработанного нами МП Si-ФЭП с ВДЯ нового поколения, в состав которых входят присутствующие на фрагменте (*б*) ITO-рефлекторы.



Рисунок 1.7 - Конструктивные особенности реального классического МП Si-ФЭП с ВДЯ без ITO-рефлекторов (*a*) и разработанного нами МП Si-ФЭП с ВДЯ нового поколения (*б*):

1 – внешний металлический электрод; 2 – слой кремния *p*<sup>+</sup>-типа проводимости;

3 – слой кремния *p*-типа проводимости; 5 – слой внутренней *Al* металлизации.

*а*: 4 - слой кремния  $n^+$ -типа проводимости; *б*: 4 - слои  $n^+$ -ITO;

**Толщины:**  $800 \le t_{\Phi \ni \Pi} \le 900$  мкм;  $100 \le t_{Si(p)} \le 200$  мкм;  $0, 2 < t_{Si(p+,n+)} < 1,0$  мкм, 8 < tAl < 10 мкм.

**Углы:** <u>падения света на поверхность МП Si-ФЭП</u> -  $0 < \alpha < 90^{\circ}$ ; <u>преломления света в Si</u> -  $\beta = \arcsin[(\sin \alpha)/n_{Si}]$ , при  $n_{Si} \approx 3.6 \Rightarrow 0 < \beta < 16^{\circ}$ ;

падения света на поверхность *Si/Al* или *Si/ITO* -  $\gamma = 90^{\circ}$ - $\beta \Rightarrow 74^{\circ} < \gamma < 90^{\circ}$ ;

Примечание: при  $n_{ITO} \approx 1.9$  предельный угол полного внутреннего отражения (ПВО) света от поверхности *Si/ITO* -  $\gamma_{\min}^{\hat{I},\hat{A}\hat{I}} = \arcsin(n_{ITO}/n_{Si}) \approx 32^{\circ} \Rightarrow 100\%$  ПВО света от *Si/ITO*.

Поэтому использование таких рефлекторов обеспечивает снижение потери фотоэлектрически активной компоненты солнечной энергии внутри ВДЯ из-за предотвращения ее поглощения внутренней металлизацией примерно на 20 %, что эквивалентно повышению КПД МП Si-ФЭП с ВДЯ нового поколения примерно в 1,2 раза.

Наряду с указанным положительным эффектом использование ITO-рефлекторов в составе ВДЯ обеспечивает существенное снижение зависимости КПД от угла α падения света на фотоприемную поверхность приборов рассматриваемого типа (см. Рис. 1.7). Это обусловлено следующим.

Нами впервые было показано, что для МП Si-ФЭП с ВДЯ в общем случае при  $0 < \alpha < \varphi_B = arctgn_{Si}$ 

$$I_{K3}(\alpha) = I_{K3}(0) f(R,\alpha) \cos \alpha , \qquad (1.8)$$

$$U_{XX}(\alpha) = U_{XX}(0) - \frac{AkT}{e} \left| \ln \left[ f(R, \alpha) \cos \alpha \right] \right|, \qquad (1.9)$$

- где  $\phi_{\rm B}$  угол Брюстера;
  - R коэффициент отражения света от границы раздела кремния с проводящим материалом внутри ВДЯ (0 < R ≤ 1);</p>
  - А коэффициент идеальности диода ВДЯ (1 < A < 5);
  - Т температура прибора;
  - k постоянная Больцмана;
  - е абсолютное значение заряда электрона.

$$f(R,\alpha) \approx R \frac{t_{Si}}{t_{\varphi \supset \Pi}} \sqrt{\frac{n_{Si}^2 - 1 + \cos^2 \alpha}{1 - \cos^2 \alpha}} + R^2 \left( 1 - \frac{t_{Si}}{t_{\varphi \supset \Pi}} \sqrt{\frac{n_{Si}^2 - 1 + \cos^2 \alpha}{1 - \cos^2 \alpha}} \right), \quad (1.10)$$

Как видно из соотношений (1.8)-(1.10), величины  $I_{K3}$  и  $U_{XX}$ , являющиеся функциями  $\alpha$  и R, снижаются с ростом  $\alpha$  и уменьшением R. На Рис. 1.8 приведены теоретически и экспериментально установленные нами зависимости нормированных значений  $I_{K3}$  и  $U_{XX}$  от  $\alpha$  и R.

Нормированные значения  $I_{K3}$  и  $U_{XX}$  определяются из соотношений (1.8) и (1.9) следующим образом

$$I_{K3}^{HOPM}(\alpha) = I_{K3}(\alpha) / I_{K3}(0) = f(R,\alpha) \cos \alpha \quad , \qquad (1.11)$$

$$U_{XX}^{HOPM}(\alpha) = U_{XX}(\alpha) / U_{XX}(0) = 1 - \left| \ln \left[ f(R, \alpha) \cos \alpha \right] \right| / \xi, \qquad (1.12)$$

$$\xi = e U_{XX}(0) / (AkT) \tag{1.13}$$

где



Рисунок 1.8 – Экспериментальные (1, 2) и теоретические (3-6) зависимости нормированных значений тока короткого замыкания  $I_{K3}^{\mu opm}$  и напряжения холостого хода  $U_{XX}^{\mu opm}$  (2, 4, 5) от угла  $\alpha$  падения света на фотоприемную поверхность МП Si-ФЭП с 36-ю ВДЯ при коэффициентах отражения света от вертикальных границ кремния с проводящим материалом R = 1 (3, 4) и R<sub>Al</sub> = 0,89 (1, 2, 5, 6). График 3 соответствует тригонометрической функции *соs* $\alpha$  и зависимости  $I_{K3}^{\mu opm}(\alpha)$  при R = 1, так как  $I_{K3}^{\mu opm}(\alpha)_{R=1} = \cos \alpha$ .

В соответствии с формулой (1.7)  $\eta \sim I_{K3}U_{XX}$ , а следовательно КПД приборов рассматриваемого типа также зависит от  $\alpha$  и R, т.е.

$$\eta(\mathbf{R}, \alpha) \sim I_{\mathrm{K3}}(\mathbf{R}, \alpha) U_{\mathrm{XX}}(\mathbf{R}, \alpha) \tag{1.14}$$

и должен изменяться с  $\alpha$  и R подобно тому, как это имеет место для I<sub>к3</sub>. Как следует из формул (1.8) и (1.10), а также из соответствующих графиков (1 и 3) на Рис. 1.8, с ростом R величина  $\eta$  увеличивается при одних и тех же значениях  $\alpha$ .

Нами теоретически и экспериментально впервые был установлен еще один важный для прикладных целей эффект влияния степени структурного совершенства базовых кремниевых кристаллов, лежащих в основе ВДЯ, на зависимость  $U_{XX}$  от  $\alpha$ . Как видно из соотношений (1.12) и (1.13), величина должна тем быстрее уменьшаться с ростом  $\alpha$ , чем меньше величина  $U_{XX}(0)$  и  $U_{XX}^{hopm}$  чем больше величина А. Указанная тенденция изменения этих двух параметров имеет место в случае насыщения кремниевого монокристалла точечными и линейными дефектами, обусловливающими появление в нем рекомбинационных центров для генерированных квантами света электронов и дырок. На Рис. 1.9 приведены экспериментально полученные нами зависимости  $U_{XX}^{\text{норм}}(\alpha)$  для МП Si-ФЭП с ВДЯ на основе сильно насыщенных рекомбинационными центрами монокристаллов кремния (график 1) и на основе значительно более структурно совершенных монокристаллов (график 2).



Рисунок 1.9 - Экспериментальные зависимости  $U_{XX}^{\text{норм}}(\alpha)$ для МП Si-ФЭП с ВДЯ на основе сильно насыщенных рекомбинационными центрами монокристаллов кремния (1) и на основе значительно более структурно совершенных монокристаллов (2)

Как видно из Рис. 1.9, в первом случае (график 1) функция  $U_{OO}^{i\hat{i}\delta\hat{i}}(\alpha)$  изменяется с ростом  $\alpha$  намного быстрее, чем во втором случае (график 2). Расчет скорости убывания указанной функции показывает, что в первом случае

$$\frac{dU_{XX}(\alpha)/d\alpha}{U_{XX}(\alpha=0)} = dU_{XX}^{HOPM}(a)/da \approx -12,5 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед./град.},$$

а во втором случае

$$\frac{dU_{XX}(\alpha)/d\alpha}{U_{XX}(\alpha=0)} = dU_{XX}^{HOPM}(a)/da \approx -8,3\cdot 10^{-4}$$
 отн. ед./град.

Это указывает на то, что МП Si-ФЭП с ВДЯ второго типа наиболее эффективны как фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии в электрическую, в то время, как МП Si-ФЭП с ВДЯ первого типа могут быть наиболее эффективно использованы как энергонезависимые сенсоры угла падения света на их фотоприемную поверхность в системах оптической локации.

## <u>ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КПД МП Si-ФЭП С ВДЯ</u>

Как было впервые обнаружено нами теоретически и экспериментально, помещение МП Si-ФЭП с ВДЯ в стационарное однородное магнитное поле (СОМП) постоянных магнитов с индукцией  $B = 0,5 \div 1,0$  Тл обеспечивает добавки  $I_{\Phi ЭM}$  и  $U_{\Phi ЭM}$  соответственно к  $I_{K3}$  и  $U_{XX}$  за счет реализации ФЭМ-эффекта Кикоина-Носкова и увеличения времени жизни  $\tau$  генерированных светом носителей заряда. Это в свою очередь обусловливает дополнительное возрастание КПД.

Теоретическое обоснование этого концептуально сводится к следующему:

$$I_{K3} = \left\{ J_{\Phi} - J_0 \left[ \exp\left(\frac{eI_{K3}R_{\Pi}}{AkT}\right) - 1 \right] \right\} S_{BAR}, \qquad (1.15)$$

, 
$$U_{XX} \approx \frac{AkT}{e} \ln\left(\frac{J_{\phi}}{J_0}\right)$$
 (1.16)

где  $J_0$  – плотность диодного тока насыщения ( $I_{Д} \sim J_0$  – см. Рис. 1.3);

 $J_{\Phi}$  – плотность фототока ( $I_{\Phi} = J_{\Phi}S_{BДЯ} -$ см. Рис. 1.3);

S<sub>ВДЯ</sub> – площадь, перпендикулярная направлению протекания тока I<sub>K3</sub>;

$$(FF = \left\langle \left\{ \ln \left( J_{\phi} / J_{0} \right) - \ln \left[ \ln \left( J_{\phi} / J_{0} \right) + 0, 72 \right] \right\} / \left[ \ln \left( J_{\phi} / J_{0} \right) + 1 \right] \right\rangle \left( 1 - \frac{I_{K3}}{U_{XX}} R_{II} - \frac{U_{XX}}{I_{K3}} R_{III}^{-1} \right) \quad 1.17)$$

Как легко видеть из соотношений (1.15) – (1.17) и (1.7):

$$I_{K3}\uparrow, U_{XX}\uparrow, FF\uparrow, \eta\uparrow при J_{\Phi}\uparrow, J_{0}\downarrow, R_{\Pi}\downarrow, R_{II}\uparrow$$
(1.18)

С другой стороны, как хорошо известно из результатов предшествующих многочисленных исследований

$$\tau \uparrow \Rightarrow J_{\phi} \uparrow, J_{0} \downarrow, \qquad (1.19)$$

$$\tau \sim N_r^{-1},\tag{1.20}$$

где  $N_r^{-1}$  - объемная концентрация рекомбинационных центров в кремнии.

Нами экспериментально установлено, что под влиянием СОМП величина  $\tau$  возрастает, в частности, из-за снижения  $N_r^{-1}$ . В итоге

 $B\uparrow \Rightarrow N_r \downarrow \Rightarrow \tau \uparrow \Rightarrow J_{\phi}\uparrow, J_{\phi} \downarrow \Rightarrow I_{K3}\uparrow, U_{XX}\uparrow, FF\uparrow \Rightarrow \eta(K\Pi \square)\uparrow (1.21)$ 

Нами впервые теоретически и экспериментально обнаружено, что при В = 0,6 Тл увеличение  $\tau$  составляет примерно 30 % по сравнению с  $\tau$  при В = 0 и это совместно с ФЭМ-эффектом даже в отсутствие ITO-рефлекторов обеспечивает относительный рост J<sub>K3</sub>, U<sub>XX</sub> и FF соответственно примерно на 6 %, 1,5 % и 18 %, а КПД – в 1,1 раза.

Естественно, что при повышении КПД только за счет использования ITO-рефлекторов в 1,2 раза и только за счет использования СОМП – в 1,1 раза интегральный эффект при одновременном использовании ITO-рефлекторов и СОМП с В = 0,5÷1,0 Тл обеспечивает повышении КПД МП Si-ФЭП с ВДЯ примерно в 1,3 раза.