

4. Жигуц, Ю. Ю. Технология производства термитного высокопрочного чугуна [Текст]/ Ю. Ю. Жигуц, В. Ф. Лазар, Л. И. Косюк // Міжн. збірн. наук. праць. «Прогресивні технології і системи машинобудування. «Донецький нац. техн. ун-тет». — 2012. — № 1,2 (43). — С. 142–147.
5. Чернега, Д. Ф. Использование термитных высоколегированных сталей для питания отливок [Текст]/ Д. Ф. Чернега, Й. Й. Лучко, Ю. Ю. Жигуц // «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». Збірник наук. праць. — 2012. — № 9. — С. 279–285.
6. Жигуц, Ю. Ю. Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу [Текст] / Ю. Жигуц, В. Широков // Машинознавство. — 2005. — № 4. — С. 48–50.
7. Жигуц, Ю. Ю. Синтез термітної хромонікелевої сталі X18H9T [Текст] : Materialy IX miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji „Kluczowe aspekty naukowej dzialalnosci”. V. 16. Techniczne nauki.— Przemysł: Nauka i studia, 2013. — С. 3–5.
8. Жигуц, Ю. Ю. Синтез термітних кавітаційностійких сталей [Текст] / Ю. Ю. Жигуц // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика и материаловедение. — 2013. — №1/5 (61). — С. 4–6.
9. Жигуц, Ю. Ю. Синтез термітної сталі 35Л [Текст]/ Ю. Ю. Жигуц // «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». Збірник наук. праць. — 2012. — № 9. — С. 215–221.
10. Жигуц, Ю. Ю. Технология получения термитных суднобудівних сталей [Текст] / Ю. Ю. Жигуц // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Збірник наукових праць. — 2012. — № 3 (28). — С. 283–286.

*В даній роботі досліджено залежності температури кристала кремнієвого фотоперетворювача з урахуванням концентрації світлового потоку і конструкції фоклінного концентратора в залежності від температури навколишнього середовища, кратності коефіцієнта концентрації та умов тепловідводу. Показана можливість збільшення щільності світлового потоку в 1,5-2,8 і необхідність додаткових конструктивних елементів для забезпечення нормального теплового режиму кристала*

*Ключові слова: концентратор, фотоперетворювач, сонячний елемент, коефіцієнт концентрації, щільність світлового потоку*

*В данной работе исследованы зависимости температуры кристалла кремниевого фотопреобразователя с учетом концентрации светового потока и конструкции фоклинного концентратора в зависимости от температуры окружающей среды, кратности коэффициента концентрации и условий теплоотвода. Показана возможность увеличения плотности светового потока в 1,5-2,8 и необходимость дополнительных конструктивных элементов для обеспечения нормального теплового режима кристалла*

*Ключевые слова: концентратор, фотопреобразователь, солнечный элемент, коэффициент концентрации, плотность светового потока*

УДК 621.315.592

## ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ФОКЛИННЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ

**Н. И. Слипченко**

Доктор физико-математических наук, профессор,  
проректор по научной работе\*

E-mail: nslip@kture.kharkov.ua

**В. А. Письменецкий**

Кандидат технических наук, профессор\*

E-mail: Cntm@ukr.net

**Е. С. Глушко**

Стажер-исследователь\*

E-mail: Glushkoolena@gmail.com

**Н. В. Герасименко**

Младший научный сотрудник\*

E-mail: n.v.gerasimenko@mail.ru

\*Кафедра микроэлектронных

приборов и устройств

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

### 1. Введение

В настоящее время солнечная энергетика, базирующаяся на использовании солнечных элементов (СЭ), считается перспективной для создания экологически чистых, ресурсосберегающих и в перспективе

экономичных источников электрической и тепловой энергии. По оценкам экспертов Международного энергетического агентства к 2050г. 20-25% потребности человечества в электричестве будет обеспечиваться за счет солнечной энергии. К этому времени при сохранении темпов распространения передовых технологий

совокупная мощность солнечных фотоэлектрических установок в мире составит около 3000 ГВт [1].

Основной проблемой, препятствующей ускоренному внедрению в наземную энергетику солнечных энергетических установок, является низкий КПД фотопреобразователей (ФЭП) [2]. Очевидным способом повышения эффективности солнечных энергетических систем на основе ФЭП, является использование концентраторов, оснащенных системой слежения за солнцем, что существенно увеличивает коэффициент использования светового потока [3]. Концентрирование солнечного излучения – это один из путей снижения стоимости энергии за счет уменьшения расхода дорогих полупроводниковых материалов пропорционально кратности концентрации светового потока для выработки заданной электрической мощности и увеличения КПД фотопреобразователей при высоких значениях коэффициента концентрации [4].

При достаточных ресурсах и поддержке на концентраторную технологию к 2050 г. будет приходиться 11,3% всей производимой электрической энергии [5].

## 2. Основная часть

В рамках выполнения украинско-российской программы развития сотрудничества в сфере нанотехнологий совместно ГП «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения» выполняются работы по оценке эффективности применения оптических концентраторных систем для повышения энергоотдачи солнечных гетероструктурных элементов с квантово-размерными средами [6].

В результате были разработаны конструкции солнечных модулей с плоскими фоклинными концентраторами типа «усеченной пирамиды» (рис. 1, а) и концентраторами типа «усеченный конус» (рис. 1, б) [7].

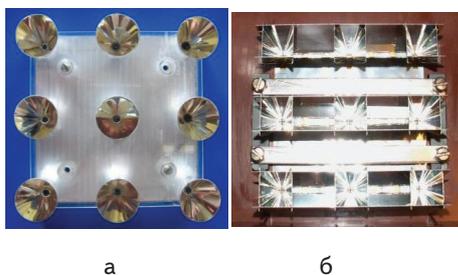


Рис. 1. Солнечные модули с миниконцентраторами:  
а – модули с плоскими фоклинными концентраторами;  
б – модули с концентраторами типа «усеченный конус»

Основным элементом плоского концентратора, представляющего собой линейную конструкцию (фоклин), являются плоские зеркала с селективным или неселективным покрытием, расположенные под определенным углом к нормали (рис. 1, а) [8]. Себестоимость зеркал на порядок ниже себестоимости фотоэлектрических элементов, а увеличение освещенности в 2-3 раза облегчает требования и уменьшает расход кристалла СЭ.

В рассматриваемой нами системе, концентратор солнечного элемента состоит из отражателей солнечного света, установленных по одному с обеих сторон

кристалла (рис. 2, а). Отраженный поток от отражателя падает на кристалл, а размеры отражателя определяются коэффициентом концентрации светового потока  $K_k$ .

На рис. 2, б представлены основные элементы концентратора, в частности: 1 - отражательный концентратор из фольги алюминия толщиной 100 мкм; 2 – кристалл монокремния 20x40 мм и высотой (толщиной) 200 мкм; 3 – алюминий-полиимидный диэлектрик, толщина алюминия 30 мкм, полиимида – 20 мкм; 4 – теплоотводящее основание из алюминия толщиной 300 мкм.

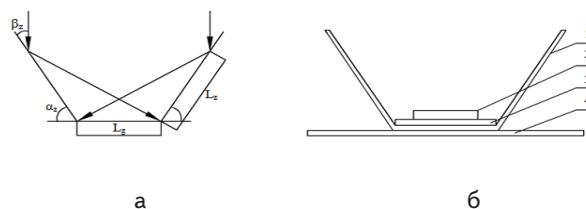


Рис. 2. Схематическое плоского концентратора: а - схема распространения лучей в концентраторе; б - основные элементы фоклинного концентратора

Такая конструкция, представляющая собой фоклин, значительно дешевле и проще, чем известные концентраторы, использующие в своей основе собирательные линзы, либо же собирающие проецированный свет, и только потом отражающие его на поверхность солнечной батареи [9].

Кроме этого, немаловажно, что описанная выше система обеспечивает дополнительный теплоотвод, так как материалы зеркал, из которых изготовлены отражатели представляют тонкие металлические теплопроводящие конструктивные элементы.

Для режима однократного отражения ( $n=1$ ), угол наклона отражающих поверхностей плоского концентратора можно рассчитать по формуле:

$$\alpha_z(K_k) = \frac{1}{2} \cdot a \cos\left(\frac{1-K_k}{2}\right), \quad (1)$$

Используя формулу (1) находим значения угла  $\alpha_z$ , и значение длины отражателя  $L_z$  при заданном коэффициенте концентрации. Результаты расчетов представлены на рис. 3, где показаны наклонными линиями конфигурации боковых отражателей для разных значений параметра  $K_k$  (рис. 2, а) и зависимость их угла наклона  $\alpha_z$  от параметра  $K_k$  (рис. 3, б). Можно сделать вывод, что с ростом параметра  $K_k$  увеличивается длина отражателя и угол его наклона  $\alpha_z$ . В результате увеличиваются габаритные размеры концентраторной системы в целом.

Далее проанализируем температуру ФЭП в зависимости от коэффициента концентрации, температуры окружающей среды и режима освещения АМО. Как известно, оценку температуры ФЭП можно выполнить с помощью соотношения:

$$T_f = \sqrt[4]{T_s^4 + \frac{P_r \cdot K_k \cdot (1-\eta_f)}{2 \cdot \epsilon_s \cdot \sigma}}, \quad (2)$$

$$P_T \cdot K_k \cdot (1 - \eta_f) = 2 \cdot \epsilon_S \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_S^4),$$

где  $\epsilon_S$  - нормативная относительная излучательная способность, равная 1;

$\eta_f$  - нормативный КПД ФЭП, принятый равным 17%;

- $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана;
- $T_f$  - температура фотопреобразователя;
- $T_S$  - температура окружающей среды.

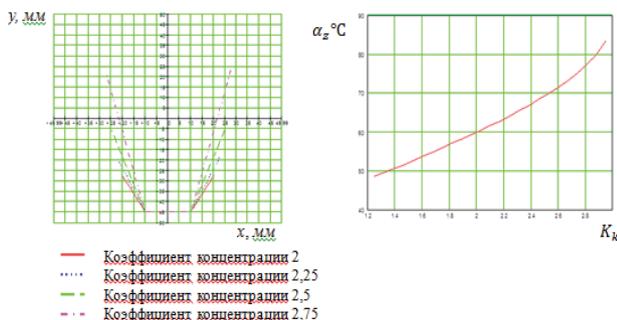


Рис. 3. Зависимость профиля и размеров плоского концентратора от коэффициента концентрации: а - при различных значениях параметра  $K_k$ ; б - зависимость угла наклона  $\alpha_z$  от параметра  $K_k$

При помощи соотношения (2) выполнены расчеты температуры фотопреобразователя с учетом коэффициента концентрации  $K_k$  и температуры окружающей среды  $T_S$ . На рис.4, а представлены зависимости температуры ФЭП от коэффициента концентрации светового излучения при разных температурах окружающей среды. Как и следовало ожидать, с увеличением температуры окружающей среды повышается температура кристалла ФЭП. Соответственно с увеличением концентрации светового потока температура ФЭП также возрастает.

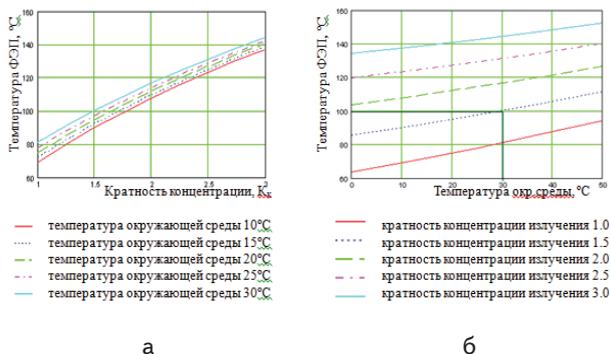


Рис. 4. Зависимость температуры ФЭП: а - от коэффициента концентрации; б - от температуры окружающей среды

На рис. 4, б представлены зависимости температуры ФЭП от температуры окружающей среды при разных кратностях концентрации солнечного излучения. Приведенные температурные зависимости позволяют при заданной максимальной температуре

кристалла (например, 100°C) и температуре окружающей среды (например, 30°C) оценить допустимое значение коэффициента концентрации  $K_k$ , которое составляет 1,5. Таким образом, дальнейшее увеличение параметра  $K_k$  требует обеспечения теплоотвода от кристалла ФЭП.

Для вычисления распределения температуры по кристаллу и боковым поверхностям отражателей – концентраторов используется численное решение теплового дифференциального уравнения вида [10]:

$$\frac{d^2}{dx^2} T(x) = F_{Tga} \cdot T(x) + F_{Tgb}, \tag{3}$$

где  $x$  – текущее значение координаты;  
 $T$  – температура;  
 $F_{Tga}$  и  $F_{Tgb}$  – характеристики режимов теплоотдачи (конвекции и излучения) основания и боковых отражателей соответственно.

На рис. 5, а представлены результаты расчетов температурного распределения в поперечном сечении фоклинного концентратора с наклонными отражателями для коэффициента концентрации  $K_k=2,5$  с разной толщиной теплопроводящего металлического плоского радиатора-основания. Поскольку температурные зависимости симметричны относительно центра фоклина, распределение температуры в пределах ширины кристалла показано на интервале (0-10) мм, а для интервала (10-52) мм – аналогичное температурное распределение по наклонной поверхности бокового концентратора.

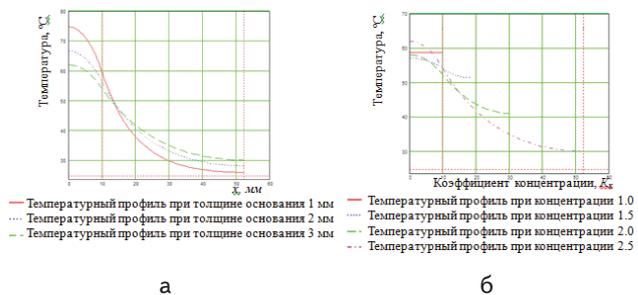


Рис. 5. Температурное распределение в поперечном сечении концентратора: а - при разной толщине теплопроводящего основания; б - при различных значениях параметра  $K_k$

Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что с увеличением толщины радиатора-основания перепад температур в пределах кристалла уменьшается с одновременным уменьшением максимальной температуры. При этом распределение температуры по поверхности отражательного концентратора изменяется менее существенно.

На рис. 5, б иллюстрируется влияние на температурный профиль, при постоянной толщине радиатора 3 мм, в пределах кристалла (интервал 0-10 мм) и по поверхности отражательного концентратора (интервал 10-52 мм) разных значений параметра  $K_k$  (соответственно и разной длине боковых отражателей).

Сплошной линией показана температура кристалла без концентратора и радиатора. Как видим, с уве-

дением радиатора при малых значениях  $K_k=1,5$  температура кристалла уменьшается и при увеличении этого параметра до  $K_k=2$  остается меньшей, чем в исходном состоянии ( $K_k=1$ ). Однако, при значениях  $K_k=2,5$  температура кристалла начинает существенно расти, превышая значения для исходного режима работы с образованием резкого температурного профиля.

*Авторы выражают искреннюю благодарность зам. директора ГП «Научно-исследовательского технологического института приборостроения» проф. Борщову В.Н. за постановку задачи исследований и ряд полезных замечаний по ее реализации.*

### 3. Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Использование фокальных концентраторов с плоскими отражающими поверхностями позволяет относительно просто увеличить плотность светового потока в 1,5 – 2,8 раза и соответственно эффективность фотопреобразования;

- Для обеспечения теплового режима кристалла ФЭП с учетом температуры окружающей среды и заданном коэффициенте концентрации  $K_k \geq 3$  необходимо вводить дополнительные конструктивные элементы, обеспечивающие теплоотвод.

### Литература

1. International Energy Agency [Электронный ресурс] / Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.iea.org/topics/solarpvandcsp/> - 9.02.2013 г. - Загл. с экрана.
2. Стребков, Д. С. Концентраторы солнечного излучения [Текст] / Д. С. Стребков. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.
3. Андреев, В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения [Текст] / В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. – Л. : Наука, 1989. – 310 с.
4. Борщев, В. Н. Исследования тепловых характеристик высокоэффективных приемников солнечного излучения нового поколения [Текст] / В. Н. Борщев, В. А. Антонова и др. // Технология приборостроения. – 2012. - № 1. – С. 3-9.
5. Искрянников, Н. П. Автономные солнечные установки с концентраторами солнечного излучения [Текст] / Н. П. Искрянников, К. Н. Свиридов, В. И. Шадрин // Журн. Интеграл. - 2005. - № 2. – С. 121-138.
6. Борщов, В. Н. Концентраторные солнечные батареи космического применения на сверхлегких объемных углепластиковых каркасах и многопереходных солнечных элементах [Текст] / В. Н. Борщев, А. М. Листратенко и др. // Мат. 5-й Междунар. научной конф. «Функциональная база наноэлектроники». Сб. науч. тр. – Харьков: Изд-во ХНУРЭ, 2012. – С. 9 - 13.
7. Aitken, D. W. Transitioning to a Renewable Energy Future [Text] / D. W. Aitken // White Paper of International Solar Energy Society. - 2003. - 55 pp.
8. Кувшинов, В. В. Некоторые результаты исследования комбинированной установки для фототермопреобразования солнечной энергии [Текст] / В. В. Кувшинов, В. А. Сафонов // Сб. научн. тр.СНУЯЕтаП. – 2009. – Вып. 31. – С. 158-163.
9. Кувшинов, В. В. Разработка концентраторов для фотоэлектрических и комбинированных солнечных установок на основе боковых отражающих поверхностей [Текст] / В. В. Кувшинов // Сб. научн. тр.СНУЯЕтаП. – 2010. – Вып. 32. – С. 174-181.
10. Баранов, В. К. Методы расчета профилей фоконов и фоклинов [Текст] / В. К. Баранов // Гелиотехника. - 1990. - № 1. - С. 19.