

КОНЦЕНТРАТОРНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

(Научно-популярные материалы)

Краткое описание – фотоэлектрический метод преобразования концентрированного солнечного излучения, его практическое применение. Особенности создания и использования фотоэлектрических преобразователей.

Главный недостаток фотоэлектрического метода связан с низкой плотностью солнечного излучения у поверхности Земли. Плотность его потока в свободном пространстве на расстоянии, равном среднему расстоянию между землей и Солнцем, составляет 136 мВт/см^2 . Один из путей повышения эффективности преобразования солнечной энергии и снижения стоимости получаемой электроэнергии связан с концентрированием солнечного излучения (рис. 1). В этом случае основная часть светочувствительной поверхности фотоэлемента заменяется линзами или зеркалами концентратора. Пропорционально кратности концентрирования излучения K_c уменьшается размер элемента, расход полупроводниковых материалов, габариты (рис. 2) и вес фотоэлектрического модуля.

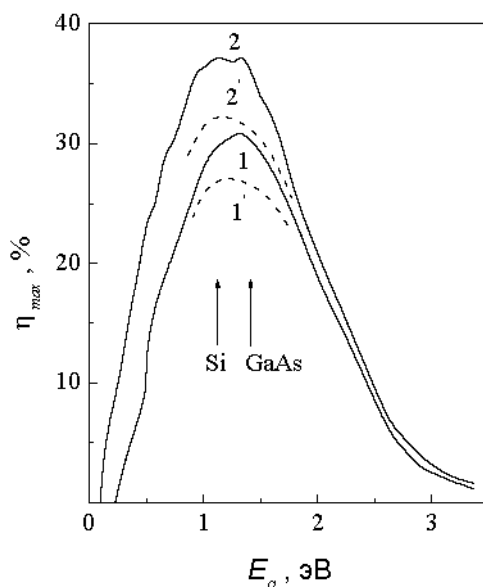


Рис. 1. Расчетные значения максимального термодинамического КПД фотоэлектрического преобразования для солнечных элементов с одним $p-n$ -переходом в зависимости от ширины запрещенной зоны полупроводникового материала при различных условиях засветки (300 К): 1, 1' - $K_c=1$; 2, 2' - $K_c=1000$; 1, 2 - AM1.5; 1', 2' – AM0 [1, 2].

При прохождении через атмосферу солнечный поток ослабляется благодаря поглощению инфракрасного излучения парами воды, поглощению ультрафиолетового излучения озоном и рассеянию излучения молекулами газов и находящимися в воздухе частицами пыли и аэрозолями. Параметром, отражающим влияние атмосферы на интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, является атмосферная (или воздушная) масса (AM), которая зависит от высоты Солнца над горизонтом θ . Нулевой воздушной массе соответствует интенсивность солнечного излучения в космосе. В наземных условиях характерной является величина AM1.5 ($\theta \sim 42^\circ$).

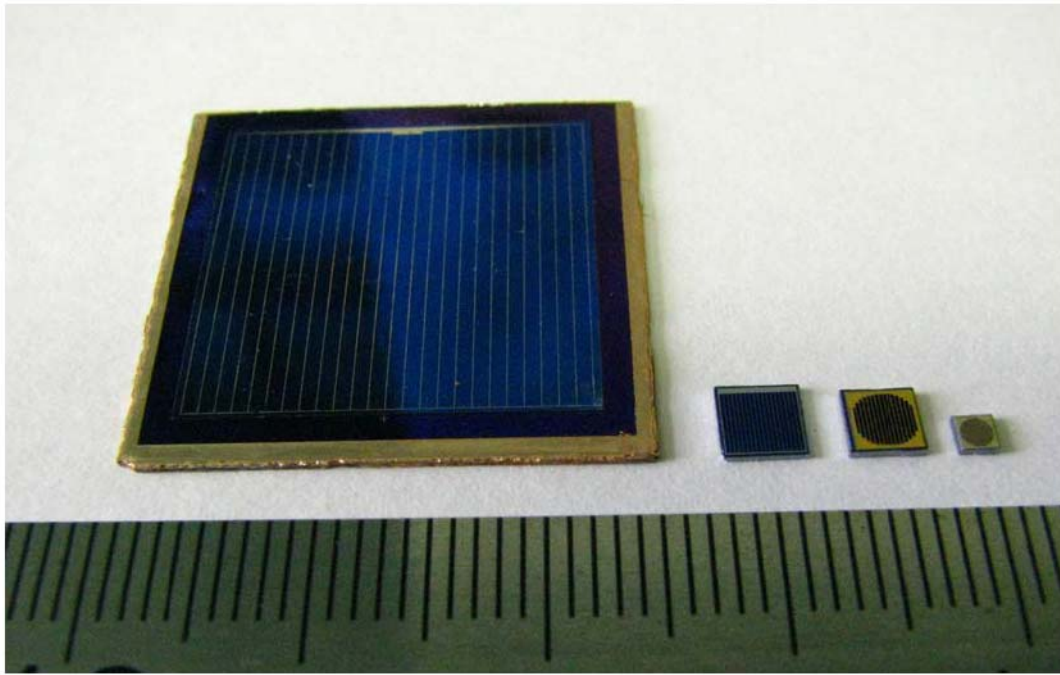


Рис. 2. Фотография преобразователей неконцентрированного (размер элемента 20 мм x 20 мм), концентрированного ($K_c = 100-200$, размер элементов 4 мм x 4 мм и 3.5 мм x 3.5 мм) и высококонцентрированного ($K_c > 500$, размер элемента 2 мм x 2 мм) солнечного излучения.

Кратность концентрирования относится к числу оптимизируемых параметров, поскольку допустимые плотности падающей энергии и максимальные рабочие температуры для различных полупроводниковых материалов будут неодинаковы. Например, для солнечных элементов (СЭ) на основе GaAs и его твердых растворов, а также других соединений A^3B^5 оптимальный диапазон K_c приблизительно на порядок выше, чем для кремниевых аналогов [1]. Фотопреобразователи на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs характеризуются меньшим снижением КПД и мощности при их перегреве даже на относительно невысокие температуры (рис.3, 4, 5). Так, при увеличении рабочей температуры на 35 °С мощность кремниевых батарей снижается на 15-16 %, а у батарей на основе соединений A^3B^5 – всего на 5 %. Это преимущество разработанных концентраторных батарей увеличивается при их использовании в условиях с повышенной температурой окружающей среды. Для Si-элементов температурный коэффициент КПД $\beta_T - d\eta / \eta dT$ составляет $-3.5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при $K_c = 1$ и $-2.6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при $K_c = 100$ [3]. Для СЭ на основе GaAs эти величины равны соответственно $-2.2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $-1.4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [4]. Поэтому даже при средних и высоких ($K_c \sim 100$) кратностях концентрирования батареи на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур позволяют использовать достаточно простые системы теплоотвода. Они способны эффективно преобразовывать излучение сверхвысоких концентраций вплоть до $K_c \sim 1000-2000$. Другим преимуществом СЭ на основе арсенида галлия является его радиационная стойкость, что дает возможность эффективного функционирования солнечных батарей на борту космических аппаратов и длительного срока службы.

Такой же перегрев имеет место и в кремниевых солнечных батареях. Однако, концентраторные солнечные батареи обладают лучшей температурной стабильностью КПД.

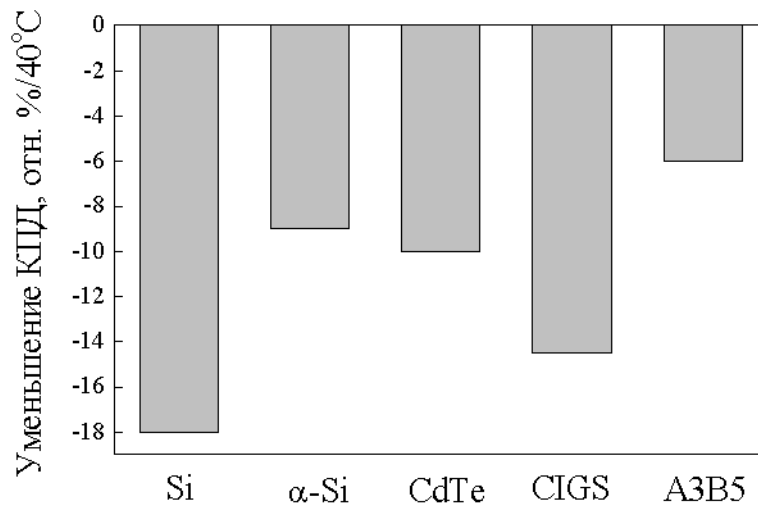


Рис. 3. Уменьшение КПД солнечных батарей на основе кристаллического (Si) и аморфного (α -Si) кремния, CdTe, CIGS, а также для A^3B^5 -концентраторных батарей при увеличении температуры на 40 °C [5].

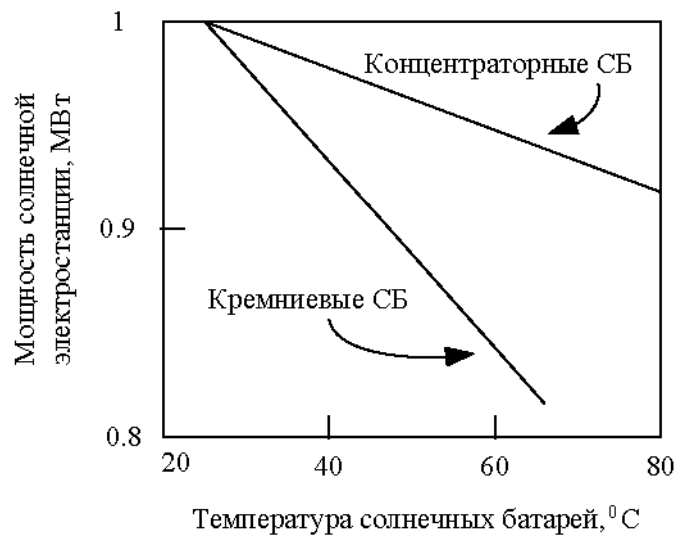


Рис. 4. Уменьшение мощности солнечной электростанции (1 МВт при 25°C) при увеличении температуры солнечных батарей на основе кристаллического кремния и концентраторных каскадных батарей.

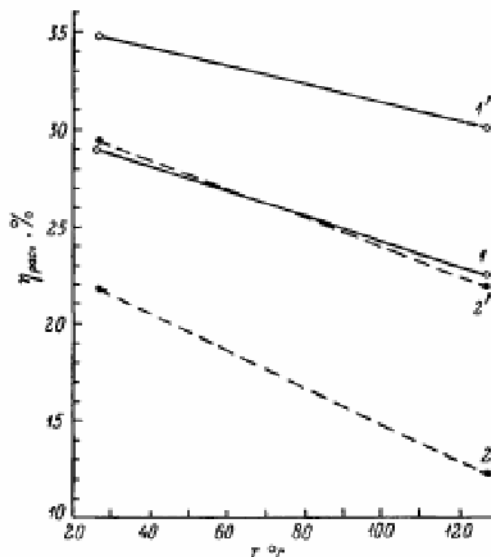


Рис. 5. Температурные зависимости расчетных значений КПД ($\eta_{расч}$) для СЭ на основе GaAs (1 и 1') и Si (2 и 2'). 1, 2 - $K_C=1$, 1', 2' - $K_C=1000$, спектр AM1.5 [1, 2].

Благодаря применению концентраторов и сокращению площади СЭ (рис 2) появляется возможность использовать в крупномасштабной солнечной электроэнергетике дефицитные или дорогостоящие полупроводниковые материалы. Кроме того, при малых линейных размерах фотоэлементов толщина подложки для выращивания структур также может быть уменьшена, а доля полезно используемой площади пластин увеличена, что ведет к дополнительной экономии (кроме факта концентрирования излучения) полупроводникового материала.

Многопереходные солнечные элементы ввиду высокой сложности их конструкции и, как следствие, высокой стоимости также целесообразно использовать для преобразования концентрированного светового потока. Применение оптических концентраторов излучения позволяет увеличить энергетическую эффективность таких фотоэлектрических модулей, а также улучшить их энерго-экономические показатели за счет многократного уменьшения расхода дорогостоящих и сложных гетероструктур. Так, при увеличении кратности концентрирования солнечного излучения в 100 раз площадь каскадных солнечных элементов сокращается в 100 раз.

При высококонцентрированном солнечном облучении использование многопереходных фотоэлементов имеет дополнительные преимущества. При увеличении количества каскадов выходное напряжение увеличивается, а фототок уменьшается. Благодаря этому обстоятельству снижаются внутренние омические потери при сборании тока, так что высокий КПД сохраняется при более высоких кратностях концентрирования излучения.

Важно отметить, что при степени концентрации излучения $K_C > 100$ стоимость энергетических установок определяется не стоимостью фотоэлементов, а стоимостью концентраторов и металлоконструкций. Это обстоятельство оправдывает усложнение структуры и удорожание СЭ, если их применение приводит к увеличению КПД преобразования. Так, при стоимости СЭ, составляющей одну десятую часть стоимости энергоустановки, увеличение КПД на 2-3 % обеспечивает снижение стоимости энергоустановки даже в том случае, если цена СЭ увеличивается на 50 %.

При разработке солнечных элементов, эффективно работающих при высоких K_C , возникает необходимость собирания больших абсолютных токов со всей облучаемой поверхности прибора при минимальных омических потерях. Омические потери, вызванные токами растекания, можно уменьшить за счет уменьшения шага контактной сетки, увеличения уровней легирования и толщин слоев, в которых происходит растекание тока.

Однако повышение уровней легирования влечет за собой снижение диффузионных длин неравновесных носителей заряда в фотоактивных слоях, что вместе с увеличением их толщин может приводить к уменьшению генерации фототока в элементе и снижению КПД. Уменьшение шага контактной сетки приводит к увеличению затенения элемента и также снижению его фототока и КПД из-за конечной ширины контактных шинок. Для уменьшения оптических потерь в этом случае используются призматические покрытия, которые могут быть изготовлены путем формовки силиконовой резины на химически травленной негативно-профилированной Si-пластине. За счет призматических покрытий световые лучи, нормально падающие на металлические контакты, преломляются на светочувствительную поверхность элемента.

При концентрировании солнечного излучения не только повышается его плотность, но и изменяется распределение в пространстве, а, следовательно, и на светочувствительной поверхности СЭ. Поэтому вид контактной сетки на лицевой стороне фотоэлемента должен быть оптимизирован не только с учетом плотности потока солнечного излучения, но и типа используемого концентратора (рис. 6).

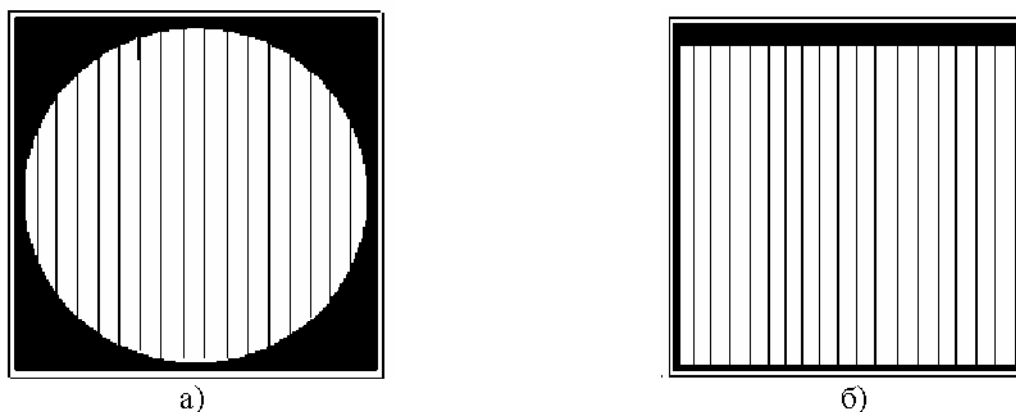


Рис. 6. Общий вид фронтальной поверхности солнечных элементов для преобразования концентрированного солнечного излучения с помощью точечных (а) или линейных (б) концентраторов.

Использование СЭ предполагает их соединение в модуль для достижения необходимых значений напряжения и тока. При сборке, например, в последовательные цепочки элементов ток в каждой из них, а, следовательно, и мощность, определяется СЭ с худшими характеристиками или с наименьшей освещённостью, что неизбежно влечет за собой потери в КПД. Кроме того, следует разработать такой способ коммутации СЭ, который обеспечит максимальную однородность распределения интенсивности солнечного излучения по освещаемой поверхности элементов. Снижение оптических потерь требует уплотнения СЭ в модуле и уменьшения зазора между отдельными элементами или цепочками элементов. Выполнение этих требований приводит к перегреву сильноточных СЭ, т.к. расстояние между фотопреобразователями будет оказывать существенное влияние на эффективность теплоотвода, приводя при перегреве к потерям в КПД.

Как правило, солнечные элементы монтируются на единой несущей основе, образующей фотоэлектрический модуль, который связан с одним концентратором. Различают зеркальные (на основе сферических или параболических зеркал) и линзовые концентраторы солнечного излучения. Использование фокусирующих зеркал имеет целый ряд недостатков - неудобство организации теплоотвода, чувствительность к загрязнению, неудобство защиты ФЭП от воздействия окружающей среды. Применение линзовых концентраторов (в первую очередь линз Френеля) ограничивается их высокой стоимостью. Линза Френеля представляет собой выполненную из оргстекла пластину толщиной 1 - 3 мм, одна сторона которой является плоской, а на другой образован профиль в виде

концентрических колец, повторяющий профиль выпуклой линзы. Линзы Френеля существенно дешевле обычных выпуклых линз и обеспечивают при этом степень концентрирования в 2 - 3 тысячи «солнц».

С начала 1990-х годов возникло другое направление, базирующееся на концепции малоразмерных модулей (рис. 7), где каждый СЭ (его размеры сокращаются до 1-2 мм) объединен с собственным концентратором. Усовершенствование модулей такой конструкции и переход к кратностям концентрирования 1000х и более возможен при использовании вторичных минилинз, расположенных в непосредственной близости от фотоэлементов. В этом случае вторичные линзы также могут быть объединены в панель.

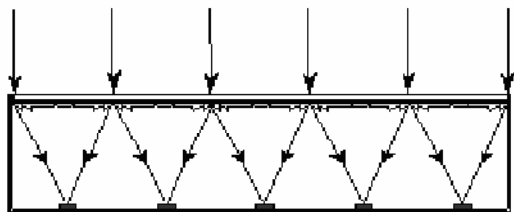


Рис. 7. Фотоэлектрический модуль для преобразования концентрированного солнечного излучения с панелью из линз Френеля.

Таким образом, на пути практической реализации высокоэффективного преобразования концентрированного солнечного излучения возникает ряд проблем. Во-первых, при повышении мощности солнечного излучения пропорционально увеличивается плотность генерируемого тока, что требует усложнения конструкции СЭ для уменьшения омических потерь. Во-вторых, увеличивается тепловая нагрузка на полупроводник, что требует создания эффективной системы теплоотвода. В-третьих, необходима разработка высокоэффективных и дешевых концентраторов излучения. И, наконец, необходимо точное наведение и слежение установок за положением Солнца, что требует создание специальных опорно-поворотных устройств, оснащенных датчиками положения Солнца и электроприводами. По сравнению с размещением обычных модулей без концентраторов это приводит к дополнительному расходу конструкционных материалов и расходу энергии на слежение. Но даже в обычном модуле при постоянном слежении за Солнцем за световой день вырабатывается на 30-40% больше энергии, чем без слежения. Учитывая эту прибавку и факт более высокой эффективности концентраторных модулей, можно сказать, что это компенсирует дополнительные затраты на материалы. Что касается затрат электроэнергии на слежение, то они составляют в экспериментальных установках лишь 0.2-0.3% от энергии, вырабатываемой концентраторными модулями, размещаемыми на этих установках.

Системы с концентраторами излучения смогут обеспечить минимальную стоимость «солнечной» электроэнергии уже в ближайшие годы (рис. 8) за счет увеличения КПД, снижения расхода полупроводниковых материалов и увеличения выработки электроэнергии в системах со слежением за Солнцем.

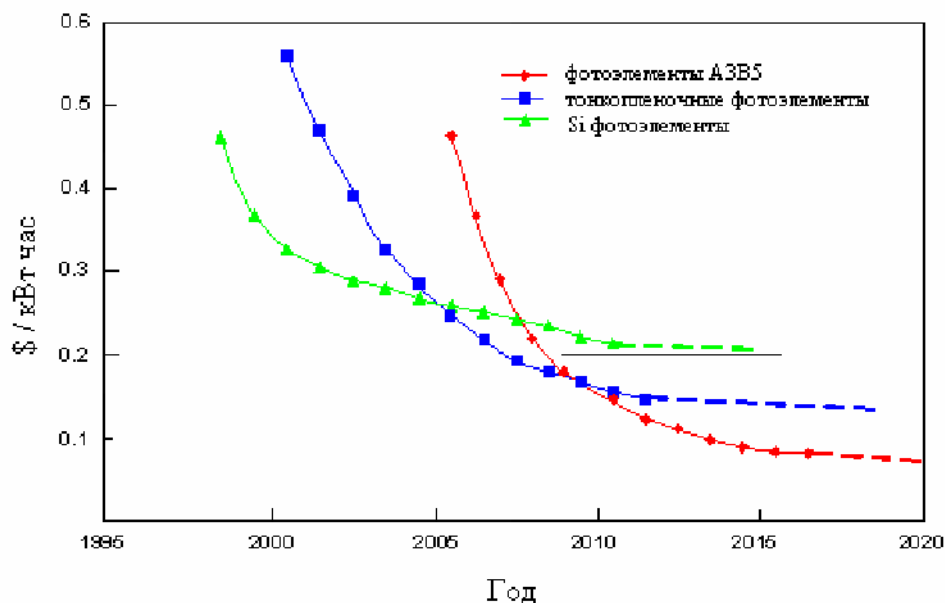


Рис. 8. Прогноз снижения стоимости солнечного электричества, получаемого кремниевыми, тонкопленочными и каскадными концентраторными батареями на основе каскадных гетероструктур [6]

Литература

1. Андреев В.М., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения на основе гетероструктур // Фотоприемники и фотопреобразователи / Под ред. Ж.И.Алферова, Ю.В.Шмарцева. - Л.: Наука, 1986.
2. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения // - Л.: Наука, 1989.
3. Nasby R.D., Garner C.M., Sexton F.W. et al High efficiency p+-n-n+ silicon concentrator solar cells // Solar Cells, 1982, v.6, N1, pp. 49-58.
4. Knechtli R.C, Loo R.J., Kamath G.S. High-Efficiency GaAs Solar Cells // IEEE Trans. on Electron. Dev., 1984, v ED-31, N 5, pp. 577-588.
- 5 Gombert A, Desrumaux C. Photovoltaics World, 2010, p. 10
- 6 Report EU PV Technology Platform

Рекомендуемая литература по курсу

1. В.М.Андреев, В.А.Грилихес, В.Д.Румянцев «Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения» - Л.: Наука, 1989, 309 с.
2. Андреев В.М., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения на основе гетероструктур // Фотоприемники и фотопреобразователи / Под ред. Ж.И.Алферова, Ю.В.Шмарцева. - Л.: Наука, 1986.
3. Ж.И.Алферов, В.М.Андреев, В.Д.Румянцев «Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики» - ФТП, т.38, в. 8, 2004, стр. 937-948
3. V. M. Andreev, V. A. Grilikhes, V. D. Romyantsev «Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight» - John Wiley & Sons, 1997
4. Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Romyantsev «III-V solar cells and concentrator arrays», Chapter 8 in «High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Recent Developments», edited by: W.T. Rhodes. V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger; Springer Series in Optical Sciences, vol.140, 2009.

Контрольные вопросы

1. Какие полупроводниковые материалы имеют преимущество для изготовления концентраторных солнечных элементов?
2. Где выше интенсивность солнечного излучения: в космосе или в наземных условиях? В каких условиях выше КПД фотоэлемента?
3. Назовите виды потерь, которые приводят к снижению КПД солнечного элемента и фотоэлектрического модуля.
4. Назовите типы концентраторов солнечного излучения, их достоинства и недостатки.