

# Использование тонкопленочных солнечных модулей в архитектуре

---

С.А. Чесноков, ОАО «Институт стекла», А.Г. Чесноков, ОАО «Институт стекла»,  
С.Г. Прилипко, Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ

Устройства, напрямую преобразующие свет в электрический ток, которые мы называем солнечными батареями, на бытовом уровне хорошо известны уже давно. Их можно было видеть на макетах космических аппаратов, затем солнечные батареи появились на небольших бытовых приборах – таких как калькуляторы или часы. С развитием технологий размеры батарей увеличивались, их элементная база совершенствовалась. В настоящее время они уже не являются редкостью. Их можно встретить на улицах городов или в парках (рис. 1).



*Рисунок 1. Освещение с использованием светодиодных ламп и солнечных батарей.  
Экологический парк, Москва*

По мере израсходования запасов природных ресурсов, цена добычи и переработки которых постоянно растет, все большую роль в мировой энергетике начинают играть возобновляемые источники энергии, из которых Солнце является одним из главных. Преобразовывать энергию солнечного излучения в электрический ток можно несколькими путями, но самый универсальный и масштабируемый способ – это прямое преобразование при помощи фотоэлектрического эффекта в полупроводниках, который и лежит в основе работы модулей солнечной батареи. Технологии солнечных батарей часто объединяют термином «фотовольтаика», хотя в русском языке этот термин пока не закрепился. Как мы увидим далее, технологии эти весьма разнообразны и имеют разные области применения. Мы остановимся на солнечных панелях,

которые могут применяться и уже активно применяются по всему миру в архитектуре, в том числе как элементы современного фасадного остекления (рис. 2).



*Рисунок 2. Новое здание аэропорта Сочи (на фото еще строящееся, в настоящее время уже законченное) содержит солнечные панели в составе остекления*

Тонкопленочными солнечными модулями называют ячейки, полученные нанесением тонких (от нескольких нанометров до десятком микрометров толщиной) пленок материалов с фотоэффектом на диэлектрическую подложку (например, стекло). При этом сохраняются механические свойства подложки, например ее жесткость или гибкость, а толщина такого модуля практически не отличается от толщины подложки. Это позволяет использовать такие модули вместе или вместо «классических» строительных материалов на кровле или фасаде здания. Однако, тонкопленочные модули не являются самыми эффективными из возможных: они вырабатывают относительно мало электроэнергии на единицу площади (рис. 3). Максимальная достигнутая в лабораторных условиях эффективность наиболее перспективных тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного кремния составляет 13,4%.

Отметим, что цена солнечной батареи и, как следствие, производимой электроэнергии определяется, прежде всего, стоимостью материала, из которого изготовлены фотоэлементы и затратами технологического процесса их производства. Основным материалом при изготовлении фотоэлементов в настоящее время является кристаллический кремний, так как он является основой для всей твердотельной электроники, и его производство налажено. Основным недостатком фотоэлементов на основе кристаллического кремния является высокая стоимость, так как до 50 % от их общей стоимости составляет стоимость Si-подложки. При изготовлении

фотоэлементов данного вида используется высококачественное сырье, производство которого в настоящее время является очень энергозатратным. Велики и общие потери кремния в результате его обработки и резки. В связи с тем, что монокристаллический и поликристаллический кремний представляют собой непрямозонные полупроводники и их коэффициент поглощения невысок, для эффективного поглощения солнечного света толщина изготавливаемых из них ФЭПов должна составлять сотни микрон. Это в конечном счете и приводит к значительному расходу кремния и высокой стоимости фотоэлементов. Таким образом, перспективным становится создание тонкопленочных фотоэлементов с использованием вместо дорогостоящего кристаллического кремния аморфного гидрогенизированного и микрокристаллического кремния. Тонкопленочные технологии обладают большими потенциальными возможностями для снижения стоимости получаемых фотоэлементов, поэтому и темпы снижения стоимости их производства значительно выше, чем модулей на основе кристаллического кремния. Кроме того, тонкопленочная технология имеет и ряд специфических применений, невозможных или затрудненных при использовании кристаллических полупроводников (гибкие модули, полупрозрачные модули и т. д.). Одним из достоинств тонкопленочной технологии является получение слоев аморфного гидрогенизированного и микрокристаллического кремния при низкой температуре. Это дает возможность создавать полупроводниковые структуры на гибких подложках. Фотоэлементы на гибкой основе имеют малый вес, монтируются на любой поверхности и могут использоваться для изготовления сумок, чехлов, встраиваться в одежду и т.д. Полупрозрачные модули различного цвета находят применение, например, для украшения зданий. Наконец, еще одним существенным достоинством тонкопленочной технологии является возможность создания структур на очень больших площадях.

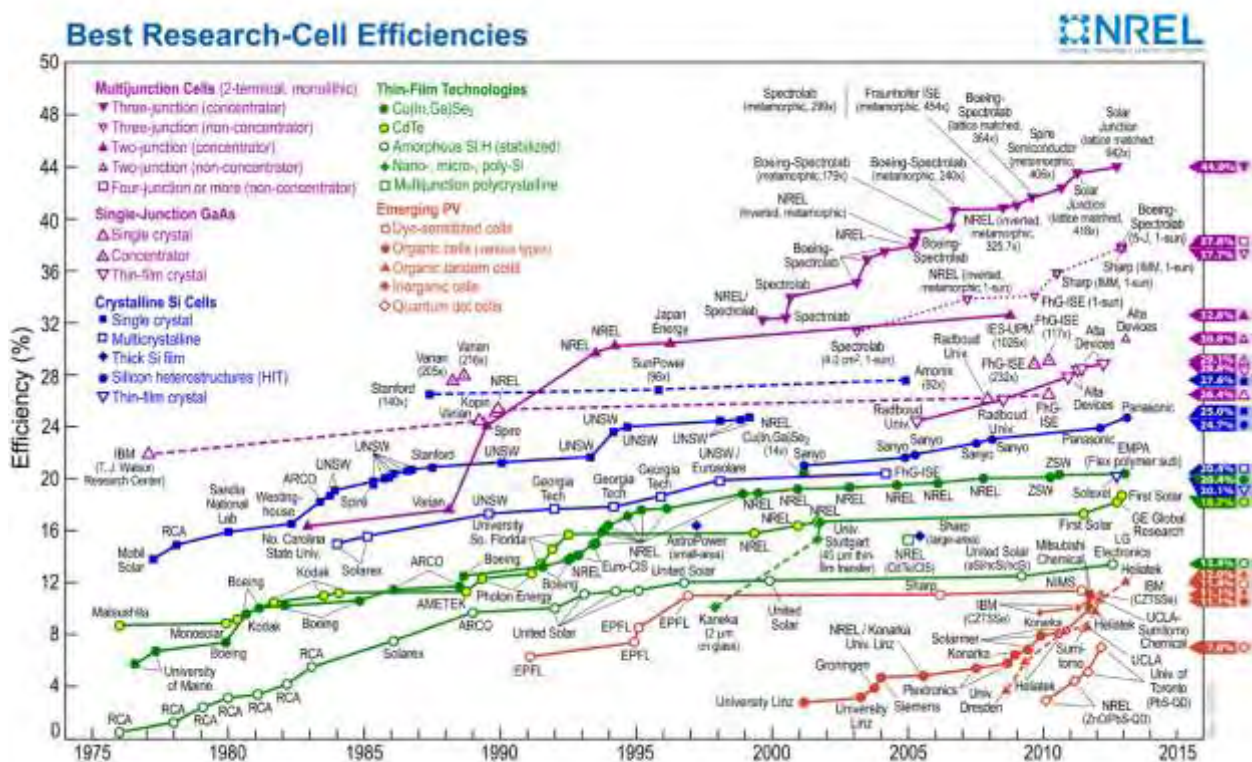
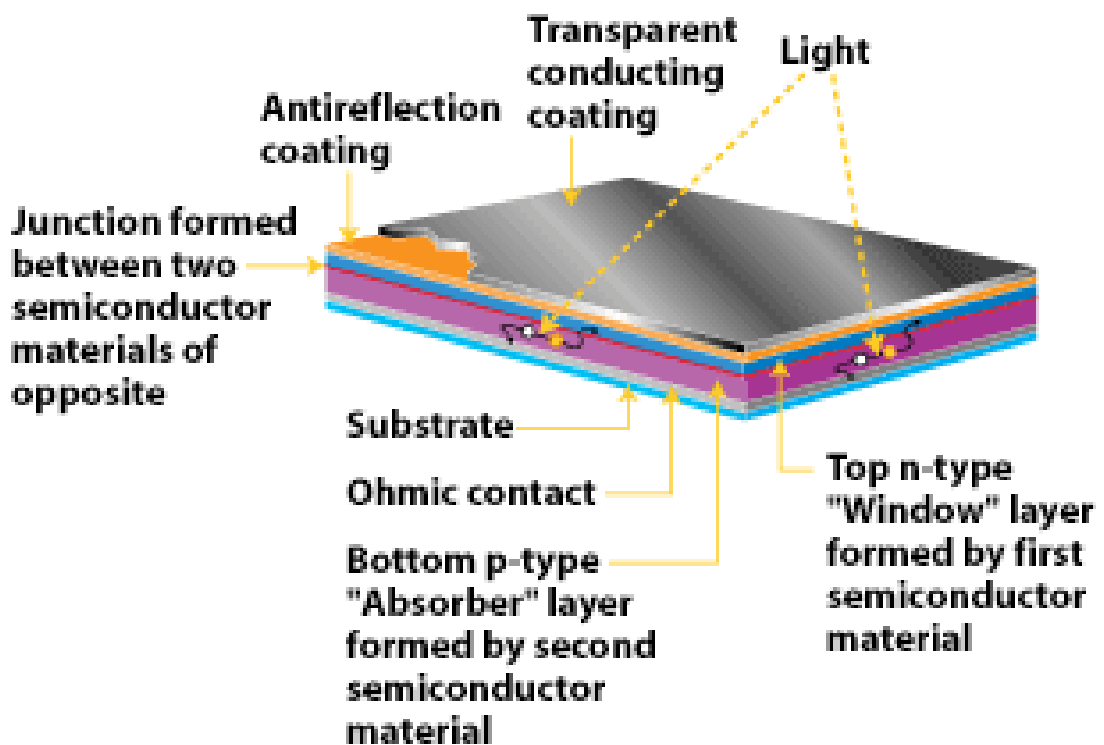


Рисунок 3. Наибольшая достигнутая эффективность солнечных модулей различных типов по информации NREL (Национальной лаборатории возобновляемой энергии, США). Тонкопленочные

*технологии отмечены зелеными линиями, при этом самая массовая – на основе аморфного кремния – линией с белыми кружками*

Структура тонкопленочного солнечного модуля показана на рисунке 4. Фотоэлектричество основано на прямом преобразовании солнечного света в электроэнергию в результате физической реакции, которая связана с физическим явлением р-п перехода. Конструктивно фотоэлемент чаще всего состоит из двух слоев кремния с добавлением примесей. При этом один слой содержит атомы бора, а второй - атомы мышьяка. Таким образом, в верхнем слое электронов переизбыток (слой n), а в нижней, так называемой, дырочной области (слое р) — их недостаток, в результате чего на границе возникает электронно-дырочный или n-р переход. На границе, где соприкасаются пластины, существует зона специального запирающего слоя, электрические поля которого противодействует переходу избыточных электронов между пластинами. При попадании на фотоэлемент фотонов слои взаимодействуют как электроды обычной электробатареи, в результате чего и происходит перемещения электронов между пластинами. Снятие электрической энергии происходит за счет напайваемых на пластины тонких слоев проводника и подключения их к нагрузке. За счет внешнего электрического поля электроны преодолевают запирающую зону, т.е. через проводник течет электрический ток - свободные электроны верхнего слоя переходят из фотоэлемента в электрическую цепь.



*Рисунок 4. Структура тонкопленочного солнечного модуля*

Сила тока в фотоэлементе пропорциональна количеству захваченных его поверхностью фотонов и зависит от площади поверхности захвата фотонов и интенсивности излучения, КПД, срока эксплуатации и т.п. Для повышения общей мощности фотоэлементы объединяют в солнечные батареи.

Поскольку получение этой энергии не связано ни с какими химическими реакциями или подвижными деталями, солнечная батарея может прослужить довольно долго. При этом надо учитывать, что для повышения эффективности солнечных батарей необходимо улучшать способы отвода возникающего при нагреве фотоэлементов избыточного тепла, поскольку коэффициент полезного действия, как было сказано выше, не превышает 20 %.

У солнечной энергетики имеются и очевидные недостатки. Это и сезонная, погодная, суточная нестабильность и относительно маленький энергетический поток. Поступление солнечной энергии на поверхность Земли зависит от географического расположения территории и особенностей местности (рис. 5). Поэтому актуальным является вопрос о экономической эффективности применения солнечных панелей в различных регионах. Исследования в этой области ведутся по всему миру, в том числе и в России, хотя российский опыт пока невелик.

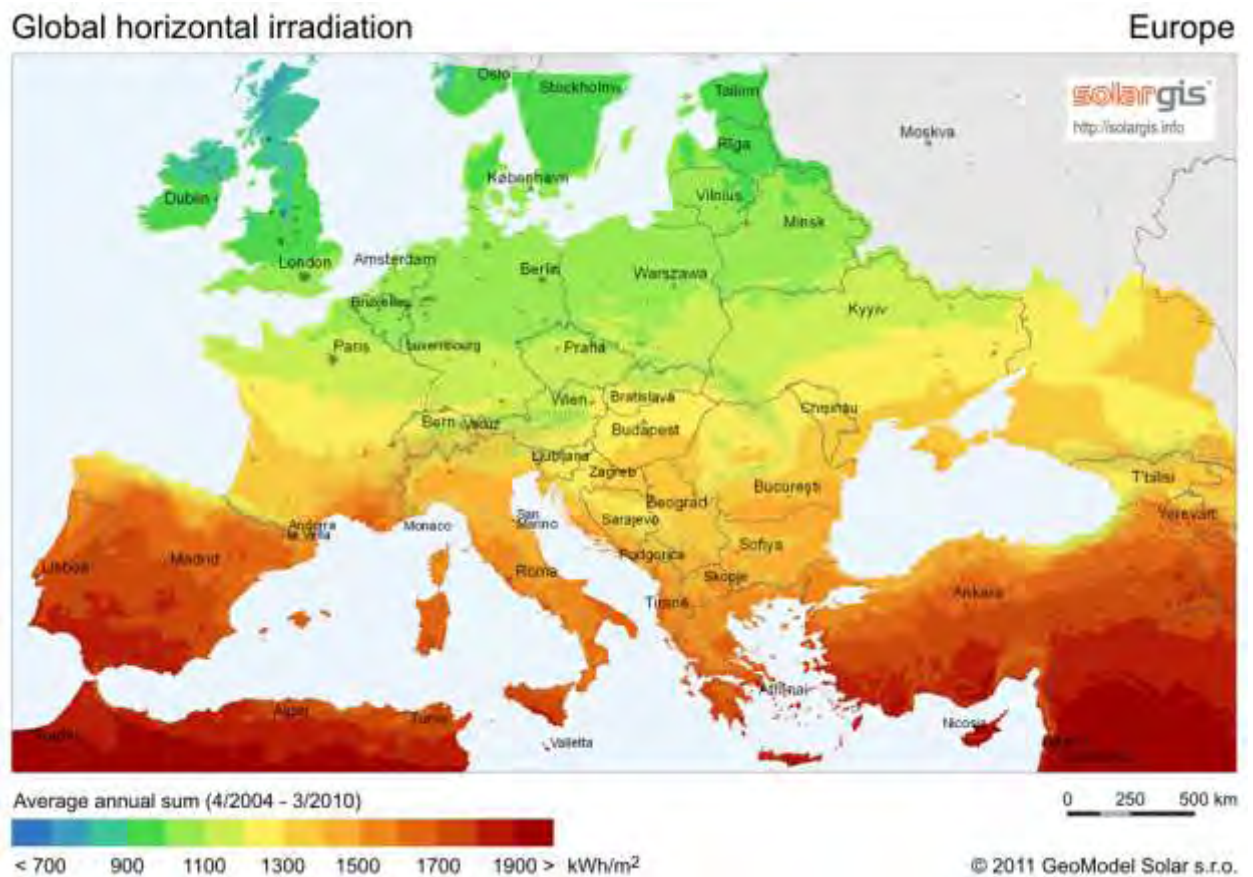


Рисунок 5. Среднегодовое поступление солнечной энергии на горизонтальную поверхность для Европы и прилегающих регионов по результатам наблюдений 2004-2010 годов

Отметим, что в России массовое использование фотовольтаики не менее важно, чем для других стран. Сейчас более 10 миллионов граждан России не имеют доступа к централизованному электроснабжению. При этом для обеспечения солнечной энергией одного миллиона граждан (около 2 киловатт-часов на человека в сутки), потребуется создать более пятисот мегаватт пиковой мощности. Вторым потенциальным и огромным потребителем энергии, выработанной на основе фотовольтаики, является сельское хозяйство, которое само по себе в состоянии использовать в год сотни мегаватт энергии солнечных электростанций. А если к этому добавить еще и рынок автономных солнечных энергосистем для телекоммуникаций, навигации, систем для туристического и курортного бизнеса, коттеджей, уличных фонарей и т.п., то суммарные потребности в России могут составить более одного гигаватта в год. Важно отметить, что

среднегодовое поступление солнечного излучения в ряде южных районов России больше, чем в Италии, Испании и Германии. Проведенные нами модельные расчеты показывают, что имеющиеся на рынке решения для обеспечения солнечной энергией небольшого загородного дома или дачи (с потреблением от 365 до 700 кВт·ч/год) имеют срок окупаемости от 8 до 12 лет в зависимости от региона (рассматривались Сочи, Москва и Петрозаводск) и особенностей системы.

Перейдем к рассмотрению примеров применения тонкопленочных солнечных панелей из зарубежного опыта. Следует отметить, что с точки зрения архитектурных решений, солнечные панели имеют ряд ограничений, наиболее заметным из которых является их характерная ячеистая структура и темный цвет. Прозрачность панелей, очевидно, снижает выработку панелью энергии, поскольку свет проходит сквозь нее. Изменение цвета также влияет на эффективность работы панели, хотя на мировом рынке представлены и панели, имеющие различные оттенки и степень прозрачности.

Наиболее эффективным с точки зрения выработки энергии является применение солнечных панелей на крыше отдельно стоящих сооружений, поэтому существует уже множество примеров использования солнечных панелей для беседок, крыш автомобильных стоянок, детских площадок и т.п. (рис. 6). Эффективнее такого расположения могут быть только системы, в которых батареи устанавливаются на собственные опоры с регулируемым углом наклона и слежением за положением Солнца.



*Рисунок 6. Орегон, США: Солнечные батареи на крыше парковки*

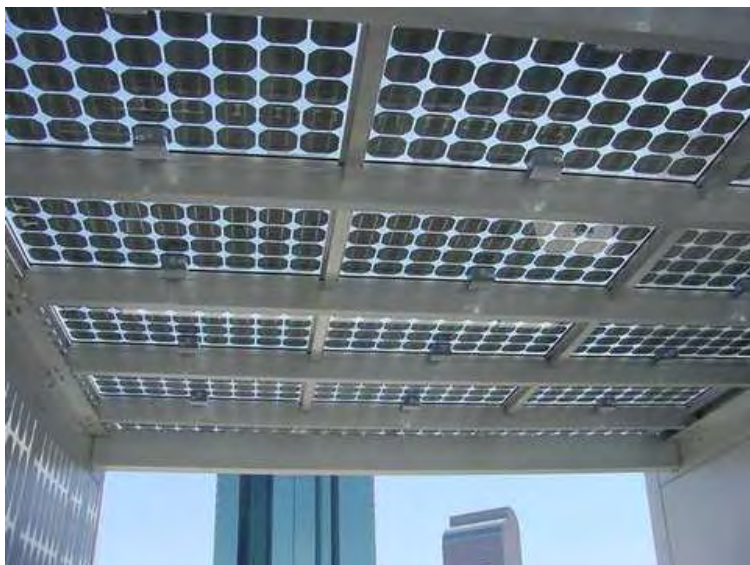
Однако гораздо интереснее с архитектурной точки зрения является применение солнечных панелей в качестве элементов фасада или другой части оболочки здания. Такие приемы проектирования на Западе получили общее наименование BIPV, Building-integrated photovoltaics. Например, на рисунках 7, 8, 9 и 10 приведены примеры как вертикальной установки панелей, так и наклонной.



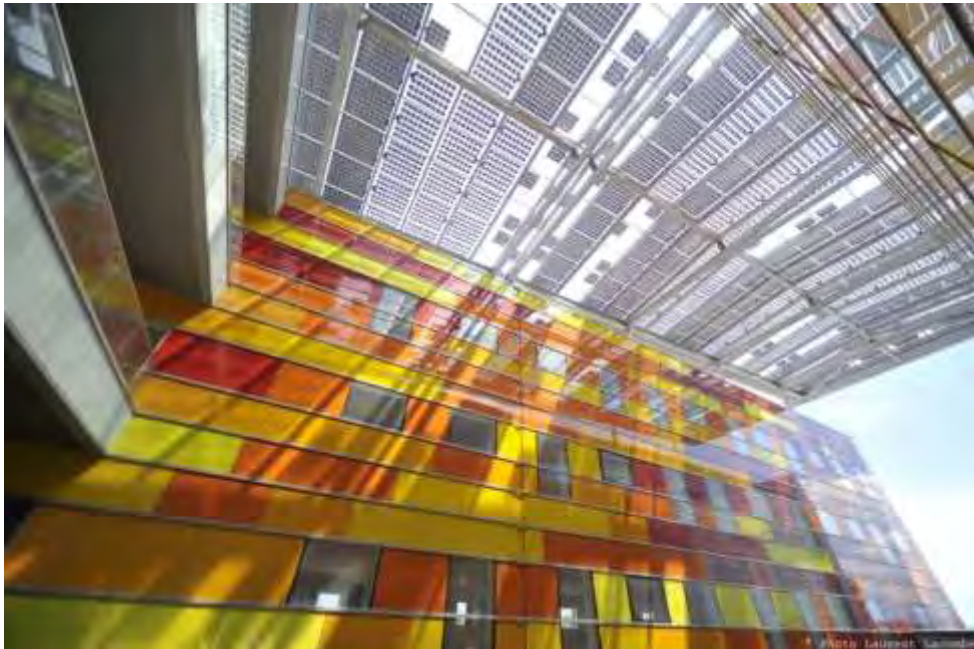
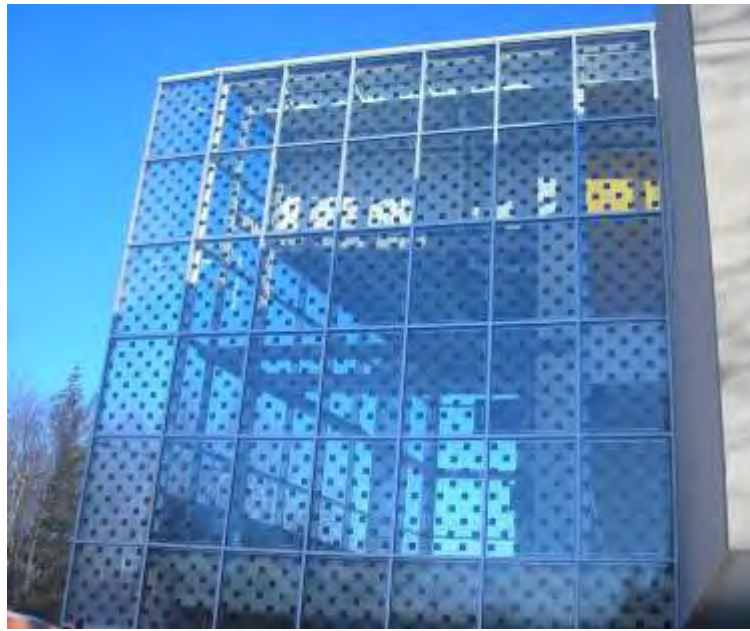
*Рисунок 7. Испания: Солнечные батареи в оболочке здания*



*Рисунок 8. Великобритания: Крытая галерея*



*Рисунок 9. Денвер, США: Входная группа здания суда штата*



*Рисунок 10. Еще три примера из Германии и Франции*



Следует обязательно сказать, что помимо самих солнечных батарей, система обеспечения здания солнечной энергией включает в себя целый ряд сложных компонентов, схематично представленных на рисунке 11.

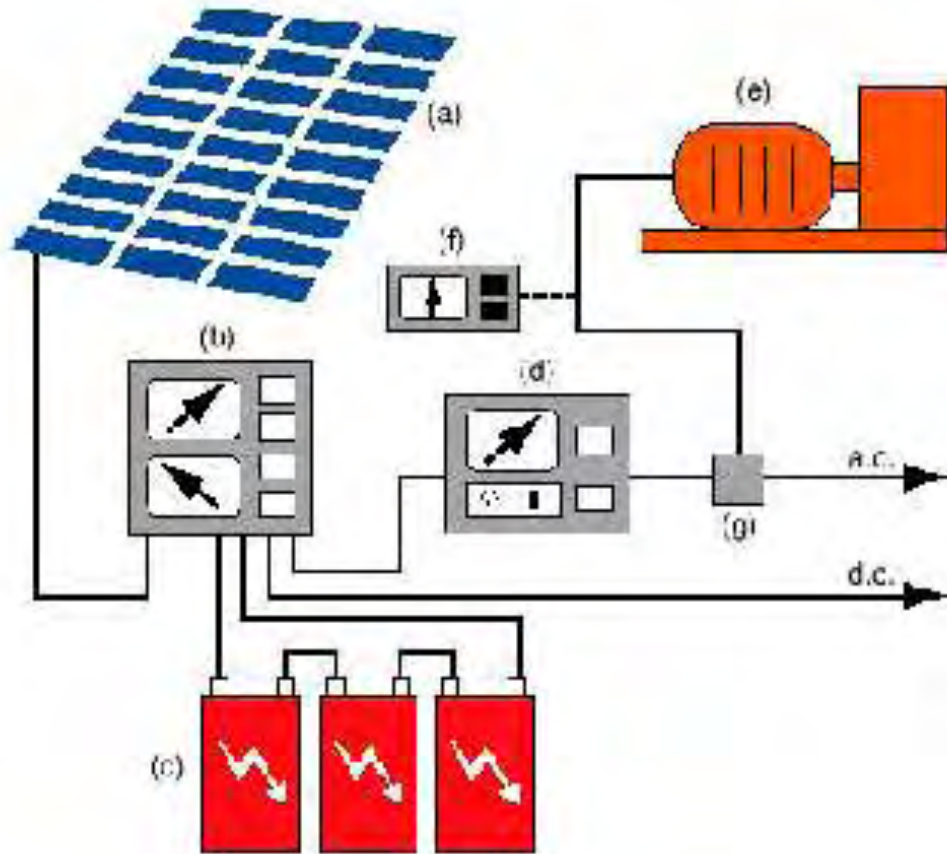


Рисунок 11. Солнечная энергетика в здании: (a) Фотоэлектрические модули; (b) Контроллер заряда батареи (при отсутствии выхода в сеть или в гибридной системе); (c) Система хранения энергии или подключения к сети; (d) Преобразователи напряжения, включая инвертеры постоянного тока модулей в переменный ток сети; (e) Резервные источники энергии; (f) Соответствующее монтажное оборудование, проводка и аварийная автоматика.

Новейшие достижения в разработке компонентов для строительных применений фотовольтаики демонстрировались на прошедшей прошлой осенью выставке Glasstec2012. Авторы отметили для себя несколько новинок, которыми хотели бы поделиться здесь с читателями:

- Для подложек и защитных стекол солнечных панелей применяется все более тонкое закаленное и химически упрочненное стекло, качество которого постоянно растет (рис. 12).



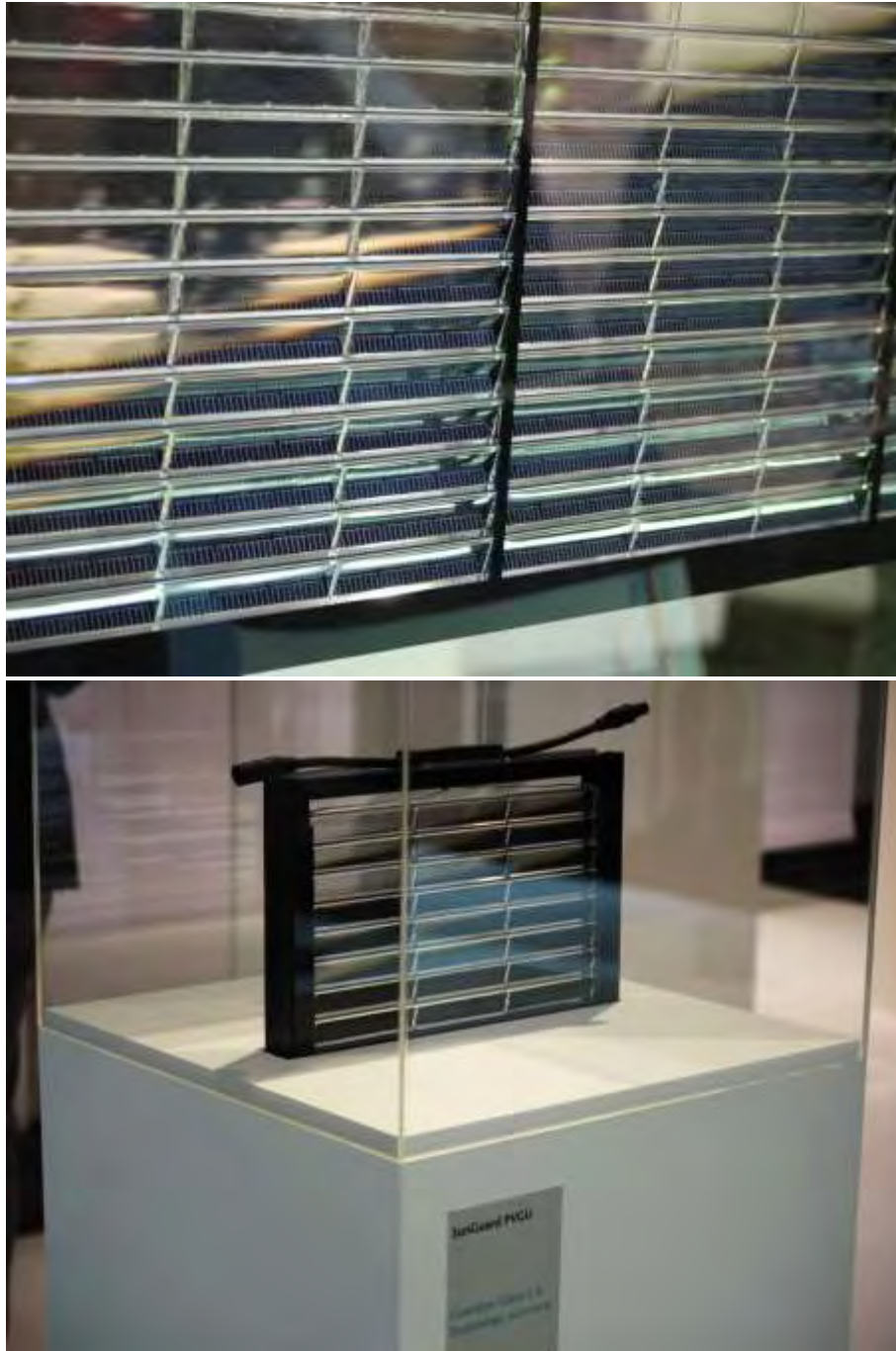
*Рисунок 12. Наиболее тонкие из представленных на выставке солнечных панелей имели толщину не более 2 мм*

- Кроме плоских панелей появились технические возможности для производства изогнутых (моллированных) панелей и параболических зеркал-концентраторов, позволяющих сфокусировать поток света на солнечном модуле (рис. 13).



*Рисунок 13. Представленные на выставке моллированные солнечные панели и параболические зеркала на основе закаленного стекла с толщиной от 3 мм*

- Солнечные модули интегрируются в изолированные стеклопакеты, что особенно актуально при использовании остекления в холодном климате, а также обеспечивает защиту от шума и защиту от жары летом (рис. 14). Отметим, что поворачивающиеся внутри стеклопакета солнечные модули не только могут выполнять роль жалюзи, но и способны устанавливаться при необходимости в оптимальном положении относительно Солнца для увеличения выработки энергии, необходимой для кондиционирования помещения.



*Рисунок 14. Солнечные модули, встроенные в изолированные стеклопакеты из особопрозрачного стекла.*

- Разрабатываются решения, позволяющие интегрировать в оболочку здания не только тонкопленочные модули, но и более эффективные модули других конструкций. В частности, Институт Фраунгофера представил прототип компактной солнечной панели с концентраторами светового пучка (рис. 15).



*Рисунок 15. Прототип относительно компактной солнечной панели с концентраторами светового пучка, представленный Институтом Фраунгофера, Германия. Очевидно, что это решение не подходит в качестве замены плоского остекления, но оно обладает нейтральным цветом (в отличие от большинства тонкопленочных панелей) и может применяться в оболочке здания как декоративное решение*

В качестве заключения хочется привести перспективы развития тонкопленочных солнечных панелей на ближайшие годы как они сформулированы ассоциацией тонкопленочной фотовольтаики PVthin:

- ▶ Следует ожидать падения стоимости солнечных модулей ниже 0,5 USD/Вт, 50 USD/м<sup>2</sup>.
- ▶ Эффективность тонкопленочных модулей вырастет до 16 % и более.
- ▶ Произойдет расширенные возможности комбинирования видов остекления и солнечных батарей.

2014 г.

**Полезные источники информации:**

- ▶ Раздел «Статьи» на сайте ОАО «ГИС» (<http://glassinfo.ru/index.php?page=page42>).
- ▶ Некоммерческая организация PVthin (<http://www.pvthin.org>).
- ▶ EPIA (European Photovoltaic Industry Association, <http://www.epia.org>).