Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i4.480

Концентраторные солнечные модули с преобразователями на основе гранулированного кремния

Б.М. Абдурахманов, Т.К. Турдалиев, М.М. Адилов*, Х.Б. Ашуров, М.Ш. Курбанов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, ул. Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

Получена 16.10.2023, revised 28.12.2023

* Corresponding author: e-mail adilov@iplt.uz, Phone +998 90 987 55 60

Описаны конструкции и характеристики новых типов модулей, оснащенных преобразователями тепловой составляющей концентрированного солнечного излучения на основе гранулированного кремния. Специфические свойства этого материала в части высокого коэффициента Зеебека при значительно меньшей, чем в монокристаллическом кремнии, теплопроводности, а также устойчивость к радиации, позволяют рассматривать его в качестве основы для преобразователей тепловой энергии, предназначенных как для наземных, так и космических модулей с концентраторами солнечного излучения.

Ключевые слова: концентрированное солнечное излучение, гранулированный и пористый кремний, концентраторы солнечного излучения на основе кругового и круглого конуса, преобразователь тепловой энергии, примесный тепловольтаический эффект.

This article describes the designs and characteristics of new module types equipped with converters that can convert the thermal component of concentrated solar radiation. These converters are based on granular silicon, which possesses specific properties such as a high Seebeck coefficient, at significantly lower thermal conductivity compared to single-crystal silicon, and resistance to radiation exposure. These properties make granular silicon an ideal material for manufacturing thermal energy converters designed for both ground and space modules equipped with solar radiation concentrators.

Keywords: concentrated solar radiation, granular and porous silicon, solar radiation concentrators based on circular and round cones, thermal energy converter, impurity thermal-voltaic effect.

I. Введение

Работа космических аппаратов (КА), предназначенных для межпланетных перелетов или эксплуатируемых на высоких орбитах, сопряжена с необходимостью защиты от радиации, наряду с аппаратурой, также и солнечных элементов (СЭ) в солнечных батареях (СБ) [1-5]. Известны методы защиты, основанные на закреплении на поверхности СЭ специальных стекол, в том числе проводящих [6], а также на выполнении СБ КА с концентраторами солнечного излучения (КСИ), защита которых от радиации обеспечивается экранированием СЭ телом концентрирующей системы [7, 8].

Эти решения не отвергают поиск радиационно-стойких материалов для самих СЭ, а, наоборот, расширяют их диапазон [8, 9].

Системы с КСИ для КА подразделяются на два типа, первый из которых предполагает их встраивание в строительную высоту существующих планарных панелей СБ КА [9]. Этот тип привлекает возможностью использования существующих систем развертки в космосе планарных панелей СБ КА из транспортного в рабочее положение, что облегчает внедрение таких систем. Второй тип предполагает разработку объемных систем с КСИ для КА, а это сопряжено с необходимостью решения принципиально новых и более сложных задач, в том числе, связанных с выбором тел вращения, поверхность которых можно использовать в качестве отражающих элементов системы КСИ и которые при этом наиболее просто можно было бы развернуть в космосе. Анализ [9]

показал, что перспективным представляется использование тел вращения типа конуса и его усеченного варианта, на основе которого был создан ряд модулей, испытания которых дали неплохие результаты. Однако, конические концентраторы обладают рядом существенных недостатков, главный из которых заключается в неравномерности засветки СЭ, находящихся в фокальной полосе концентратора, что сопровождается возникновением не только градиента температуры и разницы величин снимаемого тока по телу СЭ, но и ведет как к потерям мощности, так и к выходу СЭ из строя, вследствие раскола кристалла за счет упомянутого градиента температуры. Существует ряд приёмов повышения однородности засветки СЭ в фокальной полосе конического концентратора [9, 10], однако все они основаны на использовании оптических схем с контротражателями, то есть, громоздки и отличаются, вследствие двойного отражения, еще и существенными потерями излучения.

II. Обоснование технического решения, результаты и их обсуждение

По нашему мнению, решение задачи кардинального повышения энергетических показателей с одновременным обеспечением радиационной стойкости космических, концентраторных солнечных модулей необходимо искать путем замены фотоэлектрических преобразователей в составе модулей на преобразователи тепловой энергии (ПТЭ), и выполнять рабочее тело этих ПТЭ из нового для этой области техники материала, – гранулированного кремния (ГК), то есть кремния, находящегося в порошкообразном состоянии [11, 12]. Отметим, что важным условием при этом является то, что частицы Si порошка в рабочем теле такого преобразователя не должны быть спечены и, вообще, не должны подвергаться термообработке в режимах, которые могли бы привести к нарушению наноразмерного слоя двуокиси кремния, возникающего на поверхности частиц кремниевого порошка, при размоле кремния на воздухе. Это условие является обязательным для обеспечения высокой термоэлектрической добротности ПТЭ из ГК.

Изложенный подход базируется на следующих основаниях. В [13] было предсказано существование тепловольтаического эффекта, заключающегося в генерации носителей заряда в нагреваемом полупроводнике с поглощением субзонных фотонов, происходящим с участием примесей и (или) дефектов, дающих глубокие энергетические уровни и присутствующих в Si в больших, более чем 3×10^{18} $см^{-3}$, концентрациях. Экспериментально этот эффект был обнаружен в 2007 г. на материалах, априори изобилующих дефектами и (или) примесями, дающими в кремнии глубокие энергетические уровни, а именно, на нагреваемых структурах из поликристаллического кремния [14], затем на переплавленном на солнечной печи техническом кремнии [15] и, наконец, на образцах монокристаллического кремния, облученных быстрыми электронами с энергией 1 МэВ или подвергнутых ионной имплантации щелочных металлов, но в обоих случаях, без отжига наведенных радиационных дефектов [16]. Проявление тепловольтаического эффекта сопровождается аномальным, ростом коэффициента Зеебека, измеряемого на таких Si образцах при нагреве.

Было показано, что именно ГК является идеальным материалом для максимального проявления данного эффекта, поскольку поверхностные области составляющих его частиц, изобилуют всевозможными макро- и микро- нарушениями, структуры, возникшими в результате механического разрушения кристалла при размоле.

Изучение свойств ГК показало, что при температурах ~500 К коэффициент Зеебека у этого материала составляет ~500 мкВ/К, что более чем в 10 раз больше, чем у монокристаллического кремния [17], и сопоставимо или превышает аналогичный показатель у лучших традиционных термоэлектрических материалов [18]. В то же время теплопроводность ГК в 7-9 раз меньше, чем у монокристаллического кремния, и сопоставима со значением теплопроводности у пористого кремния [19], сходство с которым будет нами обсуждено ниже.

Оценка радиационной стойкости ГК показала, что при его облучении гамма-квантами Co^{60} дозой 10^9 рад, являющейся, безусловно, разрушающей для всех видов и типов полупроводниковых приборов, никаких изменений его характеристик не последовало [11].

Единственной и очень существенной проблемой является низкая проводимость ГК, но проведенные нами эксперименты и новые методы изготовления ГК дают надежду на ее преодоление.

Экспериментальный задел по изучению и оптимизации свойств ГК позволил провести разработку ряда новых видов ПТЭ на его основе, а

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

также предложить новые способы повышения проводимости ГК, краткая информация о которых со ссылкой на соответствующий, защищающий их особенности, патент Республики Узбекистан, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические решения конструкций ПТЭ с рабочим телом на основе ГК и способов повышения его проводимости

№	Краткая характеристика разработки	Номер Патента РУз, Приоритет
1.	ПТЭ с рабочим телом на основе ГК из порошка кремния одного типа проводимости.	№IAP 05121 16.06.2010
2.	ПТЭ, рабочее тело которого выполнено из контактирующих друг с другом областей ГК, изготовленного размолом кремния *p*- и *n*- типов проводимости.	№IAP 04831 16.06. 2010
3.	Батарея из ПТЭ, в которой обеспечена оптимальная конструкция контактов отдельных ПТЭ при соединении друг с другом.	№IAP 04824 16.06.2010
4.	Модуль с ПТЭ с рабочим телом из ГК, размещенным в термостойком корпусе, один из концов которого нагревают концентрированным солнечным излучением	№ IAP 04884 16.06.2010
5.	Способ изготовления ГК, обеспечивающий повышение его проводимости созданием на поверхности частиц кремниевого порошка, покрытых пленкой двуокиси кремния, наноразмерных островков из проводящего материала, например, из двуокиси олова (SnO_2)	№IAP 05288 13.07. 2012
6.	Способ изготовления ГК, обеспечивающий повышение его проводимости созданием наноразмерной пленки SiO_2 с энергетическими уровнями вблизи дна зоны проводимости, и покрывающей частицы кремниевого порошка, с помощью которой в ГК осуществляется не гамовское, а резонансное туннелирование носителей заряда.	№IAP 05615 25.05.2015
7.	ПТЭ, в конструкции которого предусмотрено преобразование в электричество не только подводимого к рабочему телу из ГК тепла, но и воздействие на него внешнего давления.	№IAP 07122 30.09.2022
8.	ПТЭ, в конструкции которого с помощью концентрированного солнечного излучения обеспечивают не только нагрев одного из концов рабочего тела, изготовленного из ГК, но и путем нагрева паров воды в замкнутой полости обеспечивают создание внешнего давления на него, а второй конец рабочего тела из ГК охлаждают с помощью тепловой трубы.	№IAP 06853 01.05.2020
9.	Способ изготовления ГК, в котором повышение проводимости обеспечивают применением в качестве сырья тонких поликристаллических кремниевых пластин, в которые перед размолом на воздухе диффузией или ее сочетанием с ионной имплантацией вводят примеси щелочных металлов, железа или никеля.	№IAP 06917 26.06.2020

Результаты анализа работы этих новых типов ПТЭ позволили обратиться к разработке солнечных модулей с КСИ, содержащих упомянутый выше конический концентратор с углом раскрытия 90 градусов и, помещенный в его фокальную полосу преобразователь тепловой составляющей КСИ с рабочим телом, представляющим собой приведенные в механическое соприкосновение области, выполненные из ГК, соответственно *n*- и *p*-типов проводимости, снабженные контактами. Один из упомянутых модулей и его энергетические характеристики подробно описаны в [20], в варианте, когда засветке КСИ подвергалась граница контакта *p*- и *n*-областей преобразователя, каждая из которых была выполнена из ГК. Было получено, что единичный преобразователь из ГК с рабочим телом длиной всего 12 мм и диаметром 1,7 мм при температуре стыка *p*- и *n*-областей ~700 К, может выдать до 6.6 мА при напряжении 200 мВ или ~48 мВт/грамм. Отметим, что описываемый модуль может быть использован как в наземных, так и космических условиях эксплуатации, и может быть оснащён преобразователем из изотипного материала, то есть ГК из порошка Si *n*- или *p*-типа проводимости, а также из смеси каждого из этих порошков с аналогично диспергированным техническим кремнием марки Кр0 [12]. В этом случае засветка КСИ должна быть направлена на разогрев стыка одного из металлических контактов преобразователя с Si порошком. При напряжении 40–60 мВ единичный преобразователь такого типа с длиной рабочего тела всего

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

6 мм и диаметром 1.7 мм может выдавать при ~800 К ток плотностью ~200 мА/см^2 [17].

Ниже приведено описание конструкции нескольких новых вариантов модулей космического и наземного назначения. Отличие первого из них от описанного в [20] состоит в том, что в фокальной полосе усеченного конического концентратора размещен не один, а несколько ПТЭ, электрически соединенных друг с другом в любом необходимом, последовательно-параллельном сочетании. Конструкция поясняется на рис. 1, где приведен общий вид модуля и дан перечень ее составных элементов.

Отличие от модуля [20] состоит не только в увеличении числа ПТЭ в составе единичного модуля, а в полезном использовании экспериментального факта роста энергетических характеристик ПТЭ, по рабочему телу которого создан не только продольный, но и поперечный градиент температуры [12, 16].

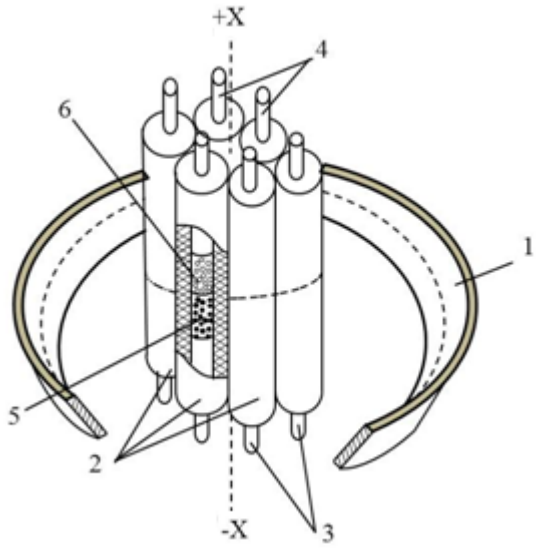


Рисунок 1. Модуль с концентратором солнечного излучения в виде усеченного круглого конуса 1, оснащенный группой из 6 преобразователей тепловой энергии 2, выполненных в виде пустотелых цилиндров из диэлектрического жаропрочного материала, н-р, керамики с установленными на торцах металлическими контактами-электродами 3 и 4, контактирующих внутри корпусов с помещенным туда рабочим телом, сформированным из приведенных в механическое соприкосновение (с усилием ~25 кПа) разнотипных кремниевых порошков 5 и 6, изготовленных размолом кремния р- и *n*-типа соответственно. Ось X направлена на Солнце.

Действительно, концентрированное солнечное излучение, идущее в описываемом модуле от концентратора, непосредственно воздействует только на ту часть внешней поверхности каждого из ПТЭ 2, которая повернута к фокальной полосе усеченного конического концентратора 1, а поверхности корпусов 2, повернутые к оси X, находятся в тени и засветке не подвергаются. Вследствие этого в рабочих телах каждого из шести ПТЭ кроме продольного, вдоль оси X, возникает и поперечный градиент температуры.

Вследствие особенностей механизмов генерации и переноса носителей заряда в немонокристаллических модификациях кремния [11, 12, 16], которые наиболее ярко проявляются в ГК, наличие такого градиента приводит к увеличению вырабатываемого неравномерно нагреваемым ПТЭ из ГК, электрического тока, а увеличение проводимости сопровождается ростом напряжения. Наибольший эффект наблюдается при пространственном совпадении средней линии отражающей поверхности концентратора 1 (показана пунктиром) с плоскостью соприкосновения разнотипных областей 5 и 6 в рабочем теле ПТЭ 2 (схематично также показана пунктиром). Радиационная стойкость такого модуля, помимо его комплектации изначально радиационно-стойкими ПТЭ из ГК, дополнительно обеспечивается их защитой с боков корпусом концентратора, а со стороны входного окна модуля по аналогии с [20, 21] тем, что поверх электродов 4, перпендикулярно оси X, для этой цели размещен металлический экран, а снизу, имеющий тепловой контакт с ПТЭ со стороны электродов 3, радиатор с развитой поверхностью.

Схема модуля с описанными конструктивными особенностями приведена на рис. 2. Все элементы конструкции на этом рисунке обозначены аналогично рис. 1, но кроме того, волнистыми стрелками показаны падающее во входное окно концентратора солнечное излучение и ход лучей в системе концентратор-преобразователь. Показаны также металлический зачерненный экран 7 с оконечностью, охватывающей снаружи группу из 6 преобразователей у их верхнего конца, и радиатор 8 с хвостовиком, которые имеют тепловой контакт соответственно не только с разными концами группы преобразователей тепловой энергии 2, но и, что важно, с разными частями их поверхности у этих концов.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

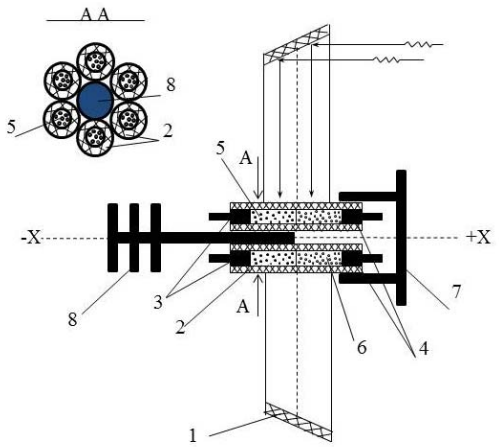


Рисунок 2. Разрез модуля в плане с защитным экраном 7 и радиатором 8. На выноске рис. 2 приведено сечение по АА группы из 6 преобразователей и находящегося в промежутке между ними хвостовика радиатора 8 с обеспечением теплового контакта с частью их поверхности, обращенной к оси X.

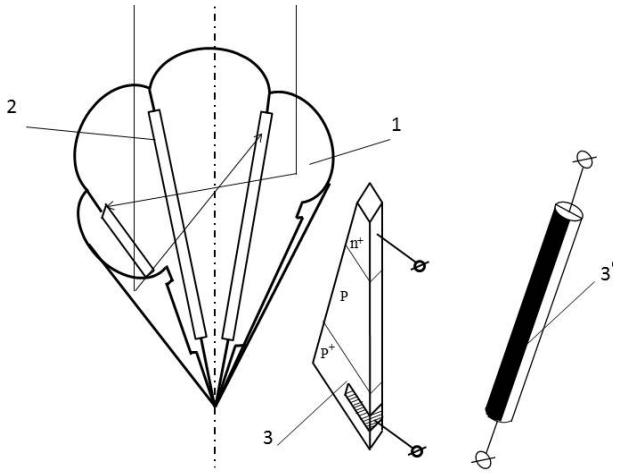


Рисунок 3. Схема модуля на основе вырезок-сегментов 1 из «кругового конуса» с узкими проемами 2, выполненными по краям стыков друг с другом для случая сборки концентратора из нечетного числа сегментов. ПТЭ КСИ 3 или 3' помещают в этих проемах с обеспечением засветки рабочей поверхности (для случая 3' она зачернена) потоком излучения, показанного стрелками.

Конструкция и оптическая схема еще одного нового типа модуля, но с концентрирующей системой на основе тела вращения «круговой конус» [9] приведена на рис. 3. Тело вращения «круговой конус» [9] отличается от ранее использованного «круглого конуса» [10, 20, 21] тем, что его высота не совпадает с центром окружности. На рис. 3 приведён разрез предлагаемого модуля, сформированного из вырезок из «кругового конуса», симметричных относительно его меньшей образующей.

Подробно принцип построения такого рода концентраторов изложен в [9]. Здесь же укажем, что их оптическая схема коренным образом отличается от таковой у концентраторов, созданных на базе «круглого конуса» [20, 21]. Так, фокальная полоса у них проходит при четном числе состыкованных друг с другом вырезок (сегментов) из «кругового конуса», по осевой линии каждой из этих вырезок, а при их нечетном числе – по стыкам между сегментами, что и проиллюстрировано на рис. 3. Преобразователи излучения располагаются рабочим торцом в прямоугольном узком проеме 2, вырезанного по их форме на стыке двух соседних сегментов 1 из «кругового конуса». Это делается в случае изготовления ПТЭ из поликристаллических кремниевых $п^{+-}$-p-p^{+} структур 3 [12]. В случае изготовления корпусированных ПТЭ из ГК (табл. 1, п.1), 3′, в проемах 2 размещают зачерненную часть боковой поверхности их корпусов. При создании модулей для наземного использования с такими концентраторами их снабжают системой водоохлаждения, патрубки которой имеют тепловой контакт только с нижней частью корпуса преобразователя, находящейся в тени концентратора. Это главное отличие теплоотвода от СЭ, применяемых в модулях с аналогичным концентратором, который необходимо осуществлять равномерно от всей их поверхности [9]. В модулях космического назначения теплоотвод от преобразователей осуществляется излучением, при этом, если модуль оснащается ПТЭ на основе поликристаллических кремниевых структур, то, по нашему мнению, их целесообразно изготавливать клиновидной формы, как это показано на рис. 3, поз. 3. В этом случае обеспечиваются как продольный, так и поперечный градиенты температуры по рабочему телу ПТЭ, возникающие не только за счёт разницы в объемах лучистой энергии, подводимых к верхней и нижней частям преобразователя 3 (что видно из оптической схемы модуля), но и за счёт, априори, разной площади поверхности в верхней и нижней его частях, с которых в окружающее пространство идёт сброс длинноволнового ИК-излучения.

Необходимо отметить, что модуль, в этом случае, по определению, оснащается ПТЭ, изготовленными из мелкозернистого, поликристаллического кремния, также обладающими, как и ГК, более высокой радиационной стойкостью по

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

сравнению с таковой у преобразователей из монокристаллического кремния. При этом именно такой характер подвода теплового излучения – не к плоскости тела преобразователя, а к одному из его торцов, как на рис. 3, – обеспечивает максимальную энергетическую эффективность модуля. А увеличению как продольного, так и поперечного градиентов температуры способствует выполнение контактов к p^+ области в нижней, находящейся в тени концентратора, части структуры больших размеров и их соединение с радиатором. Для повышения вырабатываемой мощности преобразователи клиновидной формы, например, изготавливаемые из тонких, поликристаллических Si пластин, могут быть собраны «в стопку», естественно с обеспечением необходимых электрической коммутации и изоляции, а также теплового контакта друг с другом и присоединением широкой части клиновидных ПТЭ с тепловым контактом к пассивному или активному, то есть принудительно охлаждаемому, радиатору.

Как было показано в [11], обязательно выполняемое при создании ГК условие сохранения на поверхности каждой, приводимой в механическое соприкосновение друг с другом, частицы кремниевого порошка наноразмерного слоя SiO_2, превращает данный материал в подобие системы «электронный кристалл-фононное стекло» («ЭК-ФС»), считающейся весьма перспективной в области термоэлектричества [22], то есть позволяет рассматривать его как «электронный скутеррудит», выражение термоэлектрической добротности (Z), которое имеет вид [23]:

$$Z = \alpha_1^2 \sigma_2 / \chi_2 ,$$

где α_1 – коэффициент Зеебека в кремниевой частице, χ_2 – теплопроводность наноразмерного слоя двуокиси кремния, которым покрыта каждая частица кремниевого порошка и σ_2 – электропроводность этого слоя двуокиси кремния.

Как и в традиционной системе «ЭК-ФС», изготавливаемой, например, сплавлением порошков теллура и висмута с добавками редкоземельных элементов в присутствии компаундов, проводимость ГК обеспечивается за счет переноса носителей заряда в местах туннельных контактов частиц порошка друг с другом. Однако наблюдаются и отличия ГК от типичной системы «ЭК-ФС». Первое принципиальное отличие состоит в том, что в случае «ЭК-ФС» на основе Te и Bi [22] туннельный контакт формируется в тончайшем слое компаунда, механически скрепляющего, но электрически разделяющего частицы полупроводникового порошка, тогда как в случае ГК (рис. 4) туннельный контакт возникает в области соприкосновения образовавшихся при размоле кремния на воздухе на поверхности каждой частицы Si-порошка, наноразмерных, толщиной (d), слоев двуокиси кремния, в местах механического контакта частиц Si порошка друг с другом, создаваемого внешним давлением.

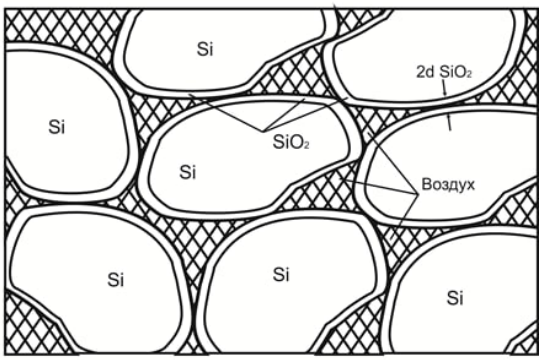


Рисунок 4. Схема гранулированного кремния, состоящего из частиц Si порошка с наноразмерным слоем SiO_2 на поверхности, туннельными контактами в местах соприкосновения частиц порошка друг с другом и пустотами между ними (заштриховано), которые могут быть заполнены газами, компаундами или жидкостями с заданными свойствами. Туннелирующие носители заряда преодолевают диэлектрический промежуток из SiO_2 в местах контактов с суммарной толщиной 2d.

Второе принципиальное отличие от стандартного варианта «ЭК-ФС» [22] состоит в том, что между частицами Si порошка в ГК существуют пустоты (заштриховано на рис. 4), обусловленные разнообразной формой частиц порошка. Отметим, что форма частиц ГК сильно отличается от формы частиц кварцевого песка с их характерной «окатанностью» краев и от техногенных частиц SiO_2 в виде микрокремнезема, имеющих форму каплевидных глобул или сферическую [12], она наиболее близка к форме зерен поликристаллического кремния, поверхность которых изобилует впадинами и выступами с размерами до ~25% размера самого зерна [16].

Первая из упомянутых особенностей ГК собственно и обусловливает низкую проводимость этого материала. В табл. 1 приведены краткие характеристики разработанных нами приемов повышения проводимости:

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

– создание на поверхности частиц Si порошка, покрытых пленкой SiO_2, наноразмерных островков из проводящего материала, например, из двуокиси олова (SnO_2) (табл. 1, п. 5);

– организация взамен или наряду с обычным гамовским [23], также и резонансного туннелирования носителей заряда через наноразмерный слой SiO_2 с суммарной толщиной 2*d* путем создания в запрещенной зоне SiO_2 у дна зоны проводимости энергетических уровней (табл. 1 , п. 6);

– применение в качестве сырья для ГК тонких поликристаллических кремниевых пластин, в которые предварительно, перед размолом на воздухе, диффузией или ее сочетанием с ионной имплантацией вводят примеси щелочных металлов, железа или никеля (табл. 1, п. 9).

Отметим, что в результате реализации приведенных выше технических решений к настоящему времени удалось повысить проводимость ГК, например, в диапазоне рабочих температур ПТЭ 450–750 К от 5 до более сотен раз [24], что уже приемлемо для оснащения ими различного типа модулей [9, 20, 21], но пока недостаточно для получения рекордных энергетических характеристик преобразователей, предсказываемых в [25], включая КПД на уровне 70% у ПТЭ, изготовленных из немонокристаллических модификаций кремния с обеспечением проявления примесного тепловольтаического эффекта. Тем не менее, использование ПТЭ из ГК в концентраторных модулях уже сейчас показывает свои неоспоримые преимущества перед концентраторными Si СЭ, поскольку снимает все ограничения в части высоких температур нагрева преобразователей в модулях с КСИ, а значит и в части, напрямую связанных с ними, ограничений размеров и соответственно мощности систем КСИ.

Вторая особенность ГК, касающаяся наличия в нем пустот (см. рис. 4) вообще ранее не принималась во внимание и обсуждается здесь впервые. Считалось (в том числе и в наших расчетах [23] эффективных значений теплопроводности, электропроводности и удельной термоэдс ГК), что эти пустоты, будучи заполненными воздухом, являющимся в нормальных условиях диэлектриком, никак (или исчезающе мало) не могут влиять на значения упомянутых величин, а сам материал ГК рассматривался как двухкомпонентная система «частица Si-нанопленка SiO_2». И если для оценок электропроводности и, возможно, коэффициента Зеебека, такое допущение справедливо, то в случае проведения оценок теплопроводности влияние пустот в ГК может быть сопоставимо с вкладом наноразмерного слоя SiO_2 на поверхности частиц порошка. Не случайно величины теплопроводности ГК и пористого кремния сопоставимы по величине и ниже этого показателя для монокристаллического кремния в 7-9 у ГК и на порядок и более у пористого кремния. Представляется логичным рассматривать эти пустоты как аналог специально создаваемых химическим травлением пор в пористом кремнии, материале, имеющем специфические, но чрезвычайно интересные области применения [19]. Размер частиц ГК, а значит и размер пустот между ними можно регулировать чисто механическими методами от единиц нанометров до единиц микрометров при размоле. Поскольку, если условно рассматривать пустоты между частицами кремния в ГК в виде соприкасающихся сфер со средним диаметром *h*, то средний линейный размер пустот будет $k = h(2^{1/2}-1)=\sim 0.41h$.

Из работ по описанию свойств пористого кремния [19, 26, 27] следует, что диапазон размеров пор практически совпадает с указанными выше размерами «идеализированных» пустот в ГК; на практике стараются минимизировать разброс размеров пор по образцу и получать монодисперсные пористые структуры, для чего тщательно готовят поверхность кремниевых подложек, применяя прецизионные методы литографии. Вследствие этого процесс изготовления пористого кремния намного сложнее процесса получения ГК. На рис. 5 сопоставлен внешний вид поверхности образцов пористого кремния (а) и ГК (б) сразу после помола, то есть без просеивания Si-порошка. Несмотря на казалось бы кардинально различающуюся картину удельный вес обоих образцов различается всего на 15%, что указывает на то, что суммарный объем пор, с размерами лежащими в пределах от 2 до 2.5нм примерно совпадает с суммарным объемом пустот в ГК.

Отметим, что удельный вес ГК можно в некоторых пределах регулировать приложением внешнего давления, при этом протяженность образца из ГК с порами-пустотами ничем не ограничена во всех направлениях, в отличие от образцов пористого кремния, в которых поры выполняются локальным и достаточно трудоемким химическим травлением тонких пластин [19, 26], то есть, по крайней мере, один из линейных

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

размеров пористого кремния, а именно, его толщина, технологически ограничена.

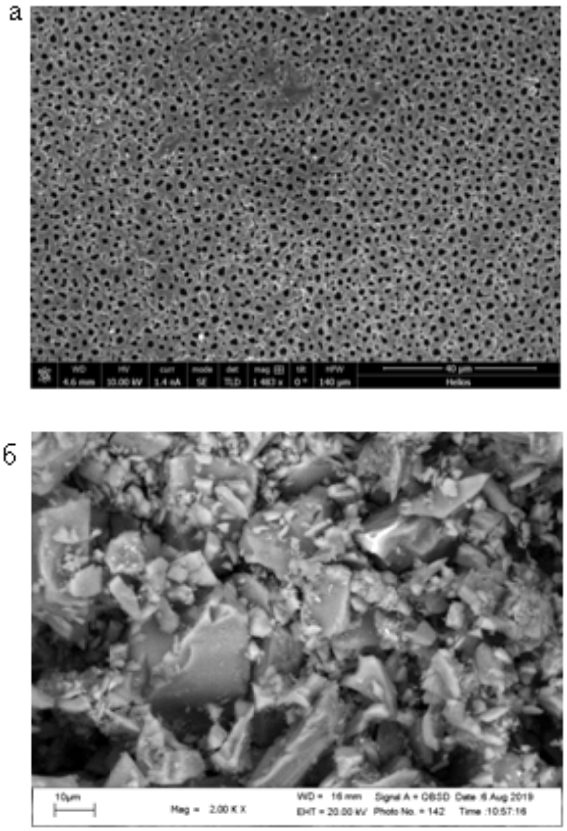


Рисунок 5. Внешний вид поверхности образцов пористого (а) и гранулированного (б) кремния.

Важно отметить и сходство этих двух материалов, состоящее в том, что, воздействуя на внутреннюю поверхность пор или пустот газами или жидкостями, а также путем нанесения на нее наноразмерных покрытий металлов или соединений различных веществ, можно кардинально менять электрофизические свойства этих модификаций кремния. Один из таких путей опробован нами применительно к созданию на поверхности частиц ГК наноразмерных островков проводящих пленок двуокиси олова (табл. 1, п. 5), что приводит к повышению проводимости ГК. Основные стадии процесса (табл.1, п. 5) и его модификаций состоят в помещении ГК в проточную систему и очистке поверхности частиц кремниевого порошка от пленки двуокиси кремния, возникающей при его контакте с кислородом воздуха, что достигается продувкой толщи порошка разогретыми до 400-500 К парами плавиковой кислоты в токе азота. Затем методом пульсаций, то есть с прерывистой подачей разогретой парогазовой смеси хлорида олова и плавиковой кислоты ведется создание проводящих микрообластей-островков двуокиси олова. Следом, ведется осаждение на полученную поверхность «рыхлого» окисла, то есть смеси двуокиси и моноокиси кремния с преобладанием последней, причем эта операция идет с механическим перемешиванием порошка с последующей тщательной продувкой продукта сухим азотом. Очевидно, что подобная технология нанесения наноразмерных пленок двуокиси олова может быть применена и для придания соответствующих электрофизических характеристик наноразмерным покрытиям на внутренней поверхности наноразмерных пор пористого кремния. Аналогично, наработанные приемы управления свойствами пористого [26,27,28] кремния могут найти применение в технологии ГК, нацеленной на увеличение проводимости этого материала, что позволит увеличить КПД преобразователей тепловой энергии на его основе.

III. Заключение

Приведенные результаты иллюстрируют возрождение интереса к разработкам по энергообеспечению космических аппаратов для дальнего космоса на основе модулей с концентраторами солнечного излучения, тело которых предназначено для экранирования преобразователя солнечного излучения от радиации. Реализация разработок, сделанных в конце XX века в этом направлении, несмотря на положительный эффект в защите преобразователей от радиации, столкнулась с рядом трудностей. В частности, использование в космосе концентрирующих солнечное излучение систем имело принципиальные ограничения, связанные с неизбежным увеличением температуры преобразователя, в данном случае солнечного элемента, до неприемлемых величин при облучении даже слабо концентрированным излучением.

В рамках предлагаемого подхода, основанного на замене солнечных элементов преобразователями тепловой энергии на основе гранулированного кремния, в которых реализуется тепловольтаический эффект, применение модулей с концентраторами солнечного излучения не создает никаких проблем, более того, позволяет полезно использовать характерные для этого вида систем высокие температуры, а также неизбежно возникающий градиент температуры по телу приемника излучения в случае применения наиболее удобных для развертки в космосе конических

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

концентраторов и прогнозировать в перспективе многократное повышение КПД таких модулей.

Метаданные

Concentrator solar modules with converters based on granular silicon

B.M. Abdurakhmanov, T.K. Turdaliev, M.M. Adilov, Kh.B. Ashurov, M.Sh. Kurbanov

Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the UzbekAcademy of Sciences, Durmon yili str. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

This article describes the designs and characteristics of new module types equipped with converters that can convert the thermal component of concentrated solar radiation. These converters are based on granular silicon, which possesses specific properties such as a high Seebeck coefficient, at significantly lower thermal conductivity compared to single-crystal silicon, and resistance to radiation exposure. These properties make granular silicon an ideal material for manufacturing thermal energy converters designed for both ground and space modules equipped with solar radiation concentrators.

Keywords: concentrated solar radiation, granular and porous silicon, solar radiation concentrators based on circular and round cones, thermal energy converter, impurity thermal-voltaic effect

Литература (References)

[1] V.A. Grilixes, P.P. Orlov, L.B. Popov. Solnechnaya energiya i kosmicheskiye poleti (Moscow, Nauka, 1984).
[2] V.K. Sysoev, K.M. Pichhadze, P.A. Greshilov, V.A. Verlan. Solnechnye kosmicheskie elektrostancii. Puti razvitija. MAI-PRINT, 2013).
[3] I.V.Trifanov, M.G. Melkozerov, V.I. Trifanov. Patent RF 2714411. Sposob zashity ot zarjazhennyh chastic kosmicheskoj radiacii.
[4] M.V. Kozhuhov, K.S. Osipova. Sistema elektromagnitnoj zashity kosmicheskogo apparata ot ionizirujushih izluchenij kosmicheskogo prostranstva. Trudy VNIIJeM. Voprosy elektromehaniki **190**, No.5 (2022).
[5] I.V. Vaganov, V.B. Fedorov. Sposoby zashity kosmicheskih apparatov ot deistvija kosmicheskoj radiacii. Nauka JuUrGU: Materialy 71-oj nauchnoj konf.
[6] K.A. Goncharov, A.A. Savel'ev, A.A. Barabanov. Patent RF 150834, Stekljanaja plastina dlja radiacionnoj i elektrostaticheskoj zashity fotoelektricheskih preobrazovatelej kosmicheskih apparatov.
[7] V.A. Grilixes, G.M. Grigoreva, V.G. Konov. Geliotexnika, **3**, 28 (1987).
[8] V.M. Andreev, V.A. Grilixes, V.D. Rumyansev. Fotoelektricheskoye preobrazovaniye konsentrirovannogo solnechnogo izlucheniya (Leningrad, Nauka, 1989).
[9] B.M. Abdurakhmanov, S.G. Baydakov, V.I. Soloveychik, V.P. Chirva. Moduli i elementi solnechnix fotoelektricheskix stansiy s konsentratsiey izlucheniya. (Fan, Tashkent, 1993).
[10] D.S. Strebkov, A.G. Abdullayev, V.P. Bugayev, S.Ya. Mustafayev. Patent RF № 2282113. Solnechniy fotoelektricheskiy modul s konsentratorom.
[11] M.M. Adilov. Termoelektricheskiye svoystva granulirovannogo kremniya. Avtoreferat dissertatsii doktora filosofii (PhD), (Tashkent, 2019).
[12] B.M. Abdurakhmanov, Kh.B. Ashurov, M.Sh. Kurbanov. Khimiko-metallurgicheskiy peredel kremnezema v monosilanovoye syr′e dlya solnechnoy energetiki i nanoelektroniki Monografiya (Navroz, Tashkent, 505, 2018).
[13] M.S. Saidov. Applied Solar Energy **43**, 199 (2007).
[14] M.S. Saidov, B.M. Abdurakhmanov, L.O. Olimov. Applied Solar Energy **43**, 203 (2007).
[15] A.S. Saidov, A.A. Abakumov, M.S. Saidov, Sh.N. Usmonov, K.T. Kholikov. Applied Solar Energy. **43**, 266 (2007).
[16] L.O. Olimov. Mejzerennie granitsi v polikristallicheskom kremnii: mikrostruktura, zaryadovie sostoyaniya i r-p perexodi, Avtoreferat doktorskoy dissertatsii. (Akademiya nosharlik markazi, Tashkent, 2017).
[17] Ya.B. Magomedov, G.G. Gadjiyev, Z.M. Omarov. Fazovie perekhody, uporyadochenie, sostoyaniya i novie materiali **1**, 1 (2009)
[18] D.M.Rowe. Thermoelectrics Handbook (2006).
[19] J. de Boor, D.S. Kim, X. Ao, D. .Hagen, A. Cojocaru, H.F. Oll, V. Schmidt. EPL **96**, 16001 (2011).
[20] B.M. Abdurakhmanov, M.M. Adilov, Kh.B. Ashurov, M.Sh. Kurbanov. Applied Solar Energy **56**, 257 (2020).
[21] B.M. Abdurakhmanov, M.M. Adilov, Kh..B. Ashurov, M.Sh. Kurbanov. Fizika Poluprovodnikov i Mikroelektronika **3**, No.3, 34 (2021).
[22] A.A. Snarskiy, A.K. Sarichev, I.V Bezsudnov, A.N. Lagarkov. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov **46**, 677 (2017).
[23] B.L.Oksengendler, B.M. Abdurakhmanov, M.M. Adilov, Kh.B. Ashurov. Geliotexnika **2**, 37 (2017).
[24] B.M. Abdurakhmanov. Modernizatsiya elektrodugovogo protsessa vosstanovleniya kremniya i sozdaniye elektronnix ustroystv na yego osnove. Avtoreferat dissertatsii doktora filosofii (PhD), Tashkent, (2021).
[25] M.S. Saidov. Geliotekhnika **3**, No.3 (2003).
[26] L. Canham, L. Routes of Formation for Porous Silicon. Handbook of Porous Silicon (Springer, Cham. 2018).
[27] A. Langner, M. Knez, F. Müller. Appl. Phys. A **93**, 399 (2008).
[28] V.M. Rotshteyn, T.K. Turdaliev, Kh.B. Ashurov. Journal of Applied Spectroscopy **89**, No.1, 43 (2022).

Гранулаланган кремнийга асосланган концентраторлик қуёш модуллари

Б.М. Абдурахманов, Т.К. Турдалиев, М.М. Адилов, Х.Б. Ашуров, М.Ш. Курбанов

Ўзбекистон Фанлар академияси, У.А. Арифов номидаги Ионплазма ва лазер технологиялари институти, Дўрмон йўли кўч., 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Ушбу мақола концентрланган қуёш нури иссиқлигини конверторловчи янги модул турларининг қурулмаси ва хусусиятларини тавсифлайди. Ушбу конверторлар юқори Seebeck коэффициенти, монокристалли кремнийга нисбатан сезиларли даражада паст иссиқлик ўтказувчанлиги ва радиация таъсирига қаршилик каби ўзига хос хусусиятларга эга бўлган гранулалик кремнийга асосланган. Бу хусусиятлар гранулалик кремнийни қуёш радиацияси концентраторлари билан жиҳозланган ер ва космик модуллар учун мўлжалланган иссиқлик энергиясини конверторларини ишлаб чиқариш учун идеал материалга айлантиради.

Калит сўзлар: концентрланган қуёш нурланиши, донадор ва ғовакли кремний, айлана ва айлана конусга асосланган қуёш радиация концентраторлари, иссиқлик энергиясини ўзгартирувчи, иссиқлик-вольтаик эффекти

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.