

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ АМОΡФНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СПЛАВОВ

ГОРДИЕНКО Ю.Е., МАЗИНОВ А.С.,
ЯКОВЛЕВ Д.Р.

Показывается возможность создания эффективных фотовольтаических элементов на основе сплавов а-Si:H. Обсуждаются физические особенности преобразования солнечной энергии в многозонных тонкопленочных структурах, современные технологические концепции их создания, а также связанные с этим проблемы и возможные пути их решения. Показывается целесообразность развития в отечественных условиях групповой концепции.

1. Введение

В последнее время остро стоит вопрос внедрения альтернативных источников энергии, среди которых наиболее перспективным считается солнечное излучение. По оценкам специалистов в 2060 году преобразователи солнечной энергии будут вырабатывать 15–20 % от общего количества электроэнергии [1]. Однако для достижения таких показателей необходимо в первую очередь повысить рентабельность фотовольтаических преобразователей. Именно поэтому в “земных” применениях, когда не накладываются ограничения на площадь и массу солнечной батареи, все более притягивающим становится использование тонкопленочных солнечных элементов (СЭ) на основе аморфных полупроводников, свойства которых незначительно уступают своим кристаллическим аналогам при значительно меньшей стоимости. Вообще, повышение интереса к аморфному кремнию и сплавам на его основе вызвано его перспективностью для создания целого ряда электронных приборов больших площадей. Кроме солнечных элементов, это тонкопленочные транзисторы [2], фотоприемники, светоизлучающие приборы и др.

2. Аморфные кремниевые сплавы для солнечных элементов

Оптические и электрофизические свойства аморфного гидрогенизированного кремния (а-Si:H) и монокристаллического кремния значительно отличаются из-за различия в атомной структуре. Так, оптическая ширина щели в монокристаллическом кремнии, как известно, составляет 1,1 эВ. В сплавах на основе а-Si:H этой величиной можно варьировать в диапазоне 1,4–2,2 эВ путем регулирования содержания примесных атомов (например, водорода, германия, углерода). Отсутствие дальнего порядка в атомной сетке а-Si:H, как известно, приводит к появлению хвостов плотности энергетических состояний в зазоре подвижности около краев

зон, а значит – к уширению хвостов на спектральной характеристике коэффициента поглощения (рис. 1). При этом коэффициент поглощения а-Si:H в видимой части спектра значительно (на порядок) выше, чем у монокристаллического кремния. Кроме того, наличие дефектов (оборванных кремниевых связей) приводит к образованию глубоких состояний в зазоре подвижности. Наличие глубоких состояний увеличивает коэффициент поглощения в инфракрасной области спектра, однако плотность таких состояний сравнительно невелика, поэтому их влияние на коэффициент поглощения оказывается незначительным. В то же время оборванные связи действуют как центры захвата и рекомбинации. Поэтому в целях увеличения удельного сдвига носителей $\mu\tau$, что весьма существенно при изготовлении, например, тонкопленочных транзисторов, максимальное число оборванных связей необходимо пассивировать одновалентными атомами (например, атомами водорода). При этом пленки должны содержать около 10 ат. % водорода [2]. В случае же солнечных элементов наряду с величиной удельного сдвига носителей критической характеристикой является стабильность параметров элемента во времени. Нестабильность фотовольтаических параметров обусловлена образованием метастабильных дефектов под действием излучения (эффект Стаблера-Вронского) или в темноте – за счет инжекции биполярного тока в диодной структуре. Считается, что образование таких дефектов может быть связано с разрывом слабых Si–H связей [3]. Один из путей получения материала со стабильными параметрами – уменьшение процентного содержания водорода. Однако варьированием основных технологических параметров осаждения не удается получать пленки с концентрацией водорода, меньшей 6 ат. %.

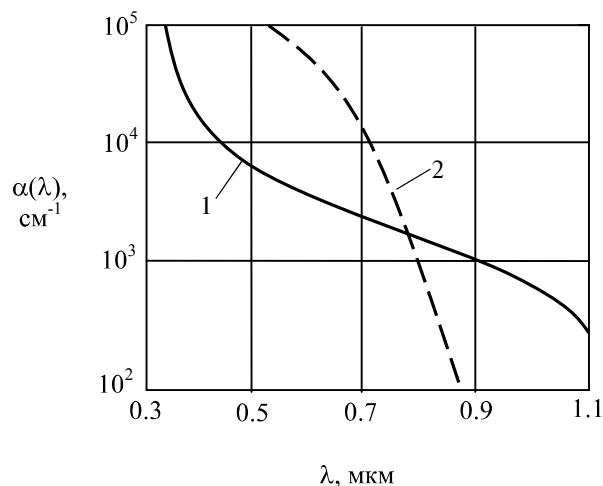


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения в c-Si (1) и a-Si:H (2)

Энергетическая структура а-Si:H характеризуется наличием непрерывного распределения плотности локализованных состояний в щели подвижности. Плотность этих состояний довольно большая, так что они оказывают значительное влияние на распределение электрического поля в поглощающем

слое и действуют как центры рекомбинации и рассеяния. Можно оценить, при какой концентрации ловушек характеристики прибора начинают значительно ухудшаться. В отсутствие локализованного пространственного заряда напряженность электрического поля определяется величиной изгиба зон в p-i-n структуре ΔE :

$$F = \frac{\Delta E}{q \cdot d}, \quad (1)$$

где q – заряд электрона; d – толщина i-слоя.

Если толщина базы 200 нм, а $\Delta E = 1,3$ эВ, напряженность электрического поля равна $6,5 \times 10^4$ В/см. Пусть плотность электронных состояний в базе N . Их заполнение (концентрация заполненных состояний N_t) будет изменять величину напряженности поля на величину

$$\Delta F = \frac{qN_t d}{\epsilon_s}, \quad (2)$$

здесь ϵ_s – диэлектрическая проницаемость a-Si:H.

Тогда $\Delta F \ll F$ в случае, если $N_t < 7 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Величина электрического поля должна быть достаточна для того, чтобы время пролета носителей через базу $\frac{d}{\mu F}$ было меньше рекомбинационного

времени жизни $\frac{1}{N\nu\sigma}$ (здесь μ – подвижность носителей, ν – тепловая скорость $\sim 10^7$ см/с, σ – сечение захвата $\sim 10^{-14} \text{ см}^2$). Это условие удовлетворяется в случае:

$$\frac{N}{\mu} < \frac{F}{d\nu\sigma} = 3 \cdot 10^{16} \frac{B \cdot c}{\text{см}^5}. \quad (3)$$

Если предположить, что плотность состояний имеет порядок $10^{17} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$, то достаточно значения подвижности носителей $\sim 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Практическое достижение полученных параметров a-Si:H вполне возможно, а следовательно, возможно создание эффективных солнечных элементов.

3. Структуры тонкопленочных СЭ

Коэффициент поглощения a-Si:H в видимой части спектра имеет порядок 10^4 - 10^5 см^{-1} , а значит, большинство носителей генерируются на расстоянии, не превышающем 1 мкм от освещенной поверхности. Следовательно, простейшая ячейка солнечной батареи может представлять собой p-i-n структуру с толщиной собственного слоя менее 1 мкм (рис. 2).

Однако в настоящее время такая ячейка не используется в коммерческих батареях и может представлять лишь исследовательский интерес. Причиной тому служат ограничения на толщину базы, накладываемые длиной диффузии носителей заряда в a-Si:H (100–200 нм) и нестабильностью.

Наиболее эффективные фотовольтаические элементы на основе сплавов a-Si:H имеют пакетную или многозонную структуру с двумя (рис. 3) или тремя (рис. 4) соединенными последовательно p-i-n ячейками.

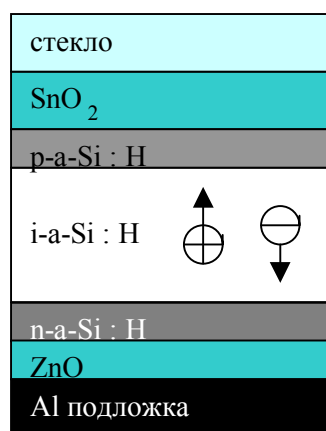


Рис. 2. p-i-n- структура

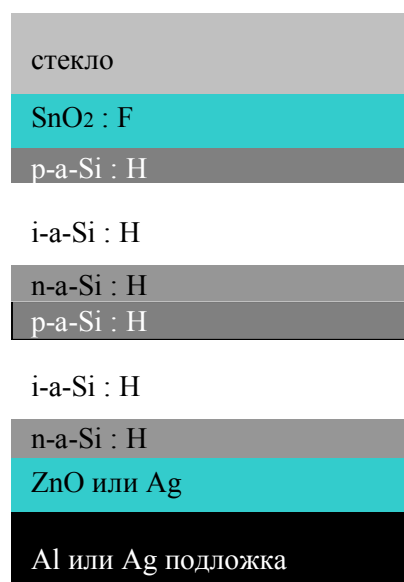


Рис. 3. Пакетная структура СЭ

В каждой ячейке пакетной структуры в качестве поглощающего используется один и тот же материал. Оптический путь в этом случае достаточно длинный (500–700 нм), притом, что толщина собственного слоя в каждой из p-i-n структур не превышает 250 нм. В этом случае пагубное воздействие эффекта Стаблера-Вронского незначительно, так как усиленная дрейфом длина разделения носителей заряда превышает толщину базы.

Повысить эффективность ячейки СЭ можно, расширив спектральный диапазон преобразования. С этой целью используются многозонные структуры, в которых собственные слои выполняются из сплавов a-Si:H с различной оптической шириной квази-запрещенной зоны. При этом p-i-n структура, через которую излучение попадает в ячейку, выполняется на основе наиболее широкозонного материала, эффективно поглощающего коротко-

волновую часть спектра солнечного излучения. Коэффициент поглощения сплавов $a\text{-Si:H}$ в коротковолновой части спектра очень высок, следовательно, голубые фотоны практически полностью поглощаются в слое толщиной 80-100 нм. Для преобразования энергии длинноволнового солнечного излучения используются сплавы с меньшей оптической шириной щели (в основном $a\text{-SiGe:H}$).

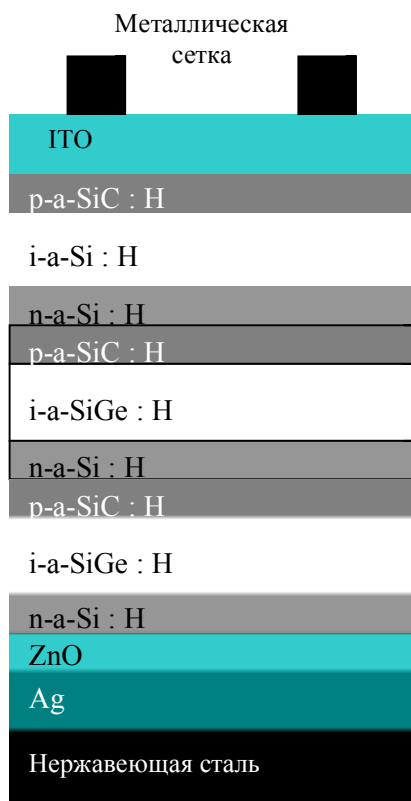


Рис.4. Многослойная структура СЭ

Максимальная эффективность преобразования солнечных элементов на основе сплавов $a\text{-Si:H}$ (15,2 %) в настоящее время получена при использовании тройной многослойной структуры (см. рис. 4). Поэтому в дальнейшем будем рассматривать именно ее.

Собственный слой должен поглощать солнечное излучение и обеспечивать эффективное разделение носителей заряда. Число поглощенных фотонов определяется толщиной i -слоя и коэффициентом поглощения материала на данной длине волны. Эффективность разделения зарядов зависит от соотношения толщины базы и длины разделения носителей заряда. Длина разделения, в свою очередь, зависит от свойств материала и определяется величиной удельного сдвига носителей $\mu\tau$, а следовательно, величиной и формой распределения плотности локализованных состояний в щели. Как уже отмечалось, для практических применений критическим параметром является также стабильность свойств ячейки во времени, а значит и содержание атомов, пассивирующих оборванные кремниевые связи. Исходя из сказанного, для получения элементов с достаточной эффективностью необходима оптимизация геометрических и физических пара-

метров собственного слоя, а именно, толщины и содержания пассивирующих атомов.

Как уже упоминалось, в качестве верхнего i -слоя используется материал с наибольшей оптической шириной щели ($a\text{-Si:H}$, $E_g = 1,8$ эВ). i -слой средней ячейки выполняется из сплава $a\text{-SiGe:H}$ (10-15 % Ge) с шириной щели $\approx 1,6$ эВ. Такой сплав идеально подходит для поглощения фотонов зеленого цвета. В качестве нижнего поглощающего слоя также используется сплав $a\text{-SiGe:H}$, однако содержание атомов Ge составляет 40-50 %, $E_g = 1,4$ эВ. Нижняя ячейка поглощает красную и инфракрасную часть солнечного спектра.

Наиболее качественные материалы в настоящее время получают с использованием технологии радиочастотного плазмохимического осаждения паров (PECVD – plasma-enhanced chemical vapor deposition). При этом фундаментальными принципами являются предотвращение полимеризации в плазме и низкие скорости роста для получения стабильных связей. Для этих целей используется осаждение из смесей германа и силана с H_2 при низких уровнях мощности и давления. Сообщается, что минимальное количество метастабильных состояний получается в случае порогового материала между аморфной и микрокристаллической фазами. Температура осаждения пленок для солнечных батарей 150-200 °С.

При осаждении сплавов $a\text{-SiGe:H}$ имеется ряд особенностей. Так, герман и силан имеют различные скорости диссоциации в ВЧ плазме, поэтому для осаждения используется смесь дисилана, германа и водорода. Кроме того, молекулы германа относительно тяжелые, поэтому оптимальная температура подложки должна быть выше.

Включение Ge в кремниевую сетку приводит к появлению новых дефектов и уширению хвостов зон, поэтому в современных ячейках содержание Ge является функцией расстояния. Это вызывает появление поля, улучшающего перенос дырок.

Легированные слои должны:

- 1) иметь низкое контактное сопротивление между собой и внешними электродами;
- 2) увеличивать встроенный потенциал для получения высокого напряжения холостого хода;
- 3) быть прозрачными для уменьшения оптических потерь.

Последнее особенно важно для верхнего p -слоя, через который свет входит в структуру. Потери в этой пленке могут значительно ухудшить характеристики СЭ. Чтобы этого не произошло, используют материалы, альтернативные $a\text{-Si:H}$ ($a\text{-SiC:H}$ и микрокристаллический кремний - $mc\text{-Si}$). Сплав $a\text{-SiC:H}$ имеет достаточно высокую прозрачность, однако его электрические свойства (проводимость) значительно хуже, чем у $a\text{-Si:H}$. Поэтому наиболее перспективным в качестве материала для верхнего p -слоя является микрокристаллический кремний.

Для обеспечения низкого контактного сопротивления между ячейками легированные слои делают очень тонкими (10-30 нм). В этом случае внутренний р-п переход между ячейками по существу короткозамкнутый из-за туннельного эффекта и называется туннельно-рекомбинационным.

В многозонной структуре довольно важным является вопрос согласования токов через ячейки. Для этих целей необходимо оптимизировать толщину ячеек и величину оптической щели используемых в них материалов. Так как верхняя ячейка наиболее тонкая и не содержит германия, она имеет наибольший коэффициент заполнения. Для получения максимального коэффициента заполнения всей структуры ток в верхней ячейке обычно ограничивают. Оптимальная толщина собственного слоя в верхней ячейке составляет 80-100 нм, а в средней и нижней — 150-200 нм [4].

Как известно, эффективность преобразования солнечного элемента определяется числом поглощенных фотонов, а значит и длиной оптического пути. В целях увеличения этой длины используются эффекты преломления и полного внутреннего отражения (заклЮчения) света. Для этого применяются отражающее и просветляющее покрытия.

Отражающая структура (рефлектор) должна отражать свет и рассеивать его под углом, большим угла полного внутреннего отражения. Высоким коэффициентом отражения обладает серебро, однако поверхность раздела пленок серебра и кремния имеет очень плохие отражательные характеристики. Поэтому между ними часто осаждают пленку ZnO. Кроме того, пленка оксида цинка выполняет еще и рассеивающую функцию. В целях получения необходимой текстуры этой пленки используется ее осаждение при высоких температурах. Для снижения стоимости солнечной батареи вместо серебряной пленки иногда используют алюминиевую.

Фронтальный электрод может быть выполнен в виде пленки SnO₂, легированной фтором, ZnO, легированной бором или алюминием, In₂O₃, легированной оловом (оксид индия-олова, ITO). Пленка SnO₂:F имеет текстуру колончатых кристаллитов с пирамидальной поверхностью (неровность поверхности rms = 30-50 нм [1]). Вместе с задним рефлектором такое просветляющее покрытие может увеличить длину пути света в 5 раз.

4. Технологические концепции

Как уже отмечалось, гелиоэнергетика на основе неупорядоченного кремния претендует на расширение своих позиций на мировом рынке производства электроэнергии. Поэтому основным направлением считается удешевление удельного ватта энергии. В связи с этим в настоящее время развиваются две технологические концепции массового производства солнечных батарей.

Первая — групповая — является стандартной для микроэлектроники, в том числе тонкопленочной.

В этом случае пленки наносятся на подложку, площадь которой ограничена площадью камеры соответствующей установки для осаждения.

Пример солнечного элемента, выполненного по групповой концепции, приведен на рис. 3. Как видно, подложкой в технологическом процессе является фронтальная стеклянная пластина, на которую наносится прозрачный электрод (ПЮ), одновременно выполняющий функции просветляющего покрытия, и контактная сетка. Пленки составного (ZnO-Ag) рефлектора наносятся в последнюю очередь. Осаждение всех неметаллических пленок может производиться в одном плазмохимическом (PECVD) реакторе.

Для удешевления солнечных батарей большой площади в качестве отражающей используется Al пленка.

Последовательность технологических операций при изготовлении фотовольтаических элементов по групповой технологии приведена на рис. 5. Во время окончательной сборки структура накрывается еще одной стеклянной пластиной.

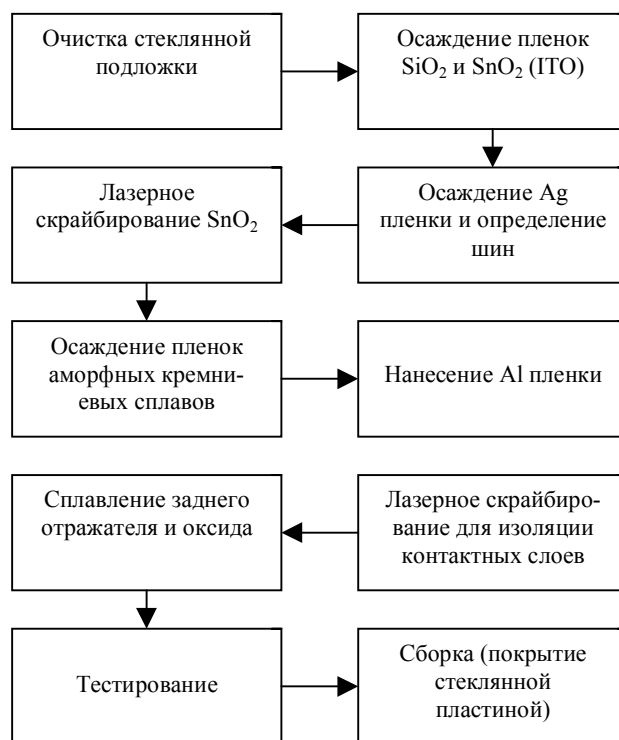


Рис. 5. Последовательность технологических операций в групповой концепции

Описанная концепция имеет целый ряд достоинств. Так, используемые стеклянные подложки являются отличными носителями, предохраняющими структуру солнечной батареи от воздействия окружающей среды. Однако при этом для осаждения кремнийсодержащих пленок применяется технология PECVD, а значит требуется много времени для нагрева и охлаждения, обработки тяжелого и твердого стекла в вакуумных системах. Это значительно повышает стоимость ватта электроэнергии.

Несколько лет назад была предложена новая, конвейерная концепция [1]. По сравнению с групповой технологией, в конвейерной используется более компактное оборудование с высокой производительностью даже при относительно невысоких скоростях осаждения. Солнечные батареи имеют меньшую стоимость из-за снижения сложности обработки и лучшей однородности пленок, а значит и лучшего выхода годных. Кроме того, в случае конвейерного процесса возможно использование систем его автоматизации.

Согласно конвейерной концепции, пленки последовательно наносятся в четырех связанных между собой камерах на непрерывно движущуюся полиамидную или металлическую фольгу. Выбор материала фольги зависит от требования к температурам осаждения. Полиамидная фольга допускает осаждение при температурах до 350 °С, а значит и вся структура должна формироваться с учетом таких температурных ограничений; кроме того, полиамид – довольно дорогой материал. Поэтому чаще применяют фольгу на основе нержавеющей стали или алюминия. При использовании металлической фольги возможно проведение упомянутого выше высокотемпературного (550–600 °С) процесса нанесения ZnO с текстурой, обеспечивающей необходимые оптические свойства.

Структура многозонного элемента, выполненного с помощью конвейерной технологии, показана на рис. 4, а на рис. 6 – последовательность ее формирования. Сначала структура наносится на временную суперподложку (алюминиевую, стальную, медную) толщиной 50–100 мкм и длиной несколько километров. При этом текстурированное просветляющее покрытие (TCO – проводящий прозрачный оксид) можно наносить высокотемпературным APCVD методом при большой скорости осаждения. Далее после лазерного скрайбирования в другой конвейерной системе без вакуумного разрыва осаждаются р-и-n структуры. После этого опять проводится лазерная обработка и осаждаются задний контакт. Это может быть ZnO/Al или ZnO/Ag. В заключение производится последовательное соединение необходимых ячеек. Затем производится покрытие постоянной фольгой-носителем, а временная подложка удаляется травлением и заменяется прозрачным герметиком.

Использование временной фольги требует химически стабильного фронтального электрода. В этом отношении подходящим является поликристаллический SnO₂:F с пирамидальной текстурой и призматическими кристаллитами размером 120 нм.

5. Проблемы и возможные пути их разрешения

Отметим следующие проблемы, решение которых может привести к повышению эффективности СЭ на основе аморфных кремниевых сплавов:

- улучшение оптоэлектронных свойств поглощающих слоев;

- уменьшение оптических потерь в легированных слоях, особенно в верхнем р-слое и увеличение их проводимости;

- расширение спектрального диапазона поглощения.



Рис. 6. Последовательность технологических операций в конвейерной концепции

Как уже отмечалось, варьированием основных технологических параметров осаждения не удастся получать пленки с концентрацией водорода, меньшей 6 ат.%. При этом содержание водорода определяет стабильность СЭ. Наиболее перспективным способом решения данной проблемы является отжиг осажденных пленок в атмосфере атомарного водорода, в процессе которого уменьшается концентрация слабых кремний-водородных связей. Суммарное содержание водорода может быть уменьшено до 1 ат.% [3].

Плазма ВЧ разряда, используемая при осаждении кремнийсодержащих пленок, содержит множество атомов посторонних веществ, ухудшающих свойства солнечных элементов. Поэтому исследуются альтернативные методы осаждения (в первую очередь СВЧ). Кроме того, для повышения технологичности увеличивают скорость осаждения путем использования повышенных уровней мощности, давления и высших силанов [5]. При этом ухудшается качество из-за того, что уменьшается время достижения атомами подложки и занятия выгодных энергетических состояний. Ожидается, что СВЧ осаждение приведет к высокому качеству материала при большой скорости его осаждения [4].

В качестве материалов для фронтального р-слоя перспективным кажется использование микрокристаллического кремния [6]. Его оптические (коэф-

фициент пропускания) и электронные (проводимость) свойства лучше, чем у a-Si:H и a-SiC:H. Кроме того, mc-Si имеет такую же оптическую ширину щели, как и кристаллический кремний (1,1 эВ), а значит можно еще больше расширить спектральный диапазон преобразования, если на его основе строить нижние ячейки СЭ (микроморфные солнечные элементы). Однако использование mc-Si приводит к следующим проблемам. Для эффективного поглощения в длинноволновой области необходима толщина i-слоя в несколько мкм, притом, что скорость роста mc-Si невелика (<0,5 нм/с). Более того, для согласования токов при использовании нижних mc-Si слоев нужно увеличивать толщину верхнего слоя.

Заключение

Дальнейшее развитие тонкопленочных солнечных элементов должно быть связано с оптимизацией текстурированных многозонных структур, при этом перспективным является использование микроморфных солнечных элементов с высококачественным (стабильным) верхним a-Si:H i-слоем и СВЧ систем осаждения. Необходимо развитие как групповой, так и конвейерной технологических концепций для достижения оптимального соотношения эффективность/цена.

Для развития гелиоэнергетики по конвейерной концепции нужны значительные капиталовложения. В связи с этим в отечественных условиях более целесообразно использовать стандартную групповую технологию и уже имеющееся оборудование тонкопленочного производства. При этом основной задачей станет повышение эффективности преобразования.

Литература: 1. Ruud E.I. Schropp, Miro Zeman. New developments in amorphous thin-film silicon solar cells // IEEE Trans. on ED. 1999. V. 46. № 10. P. 2086-2092. 2. Гордиенко Ю.Е., Яковлев Д.П. Тонкопленочные транзисторы на основе неупорядоченного кремния // Радиоэлектроника и информатика. 2000. № 4. С. 4-8. 3. Мездрогина М.М., Абрамов А.В., Мосина Г.Н., Трапезникова И.Н., Пацекин А.В. Влияние отжига в атмосфере атомарного водорода на свойства пленок аморфного гидрированного кремния и параметры p-i-n структур на их основе // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32, № 5. С. 620-626. 4. Subhendu Guha, Jeffrey Yang. Science and technology of amorphous silicon alloy photovoltaics // IEEE Trans. on ED. 1999. V. 46, № 10. P. 2080-2085. 5. Amorphous semiconductor technologies & devices. V. 6 / Y. Hamakawa. Tokyo-Amsterdam, 1983. 6. Keppner H., Meier J., Torres P., Fischer D., Shah A. Microcrystalline silicon and micromorph tandem solar cells // Appl. Phys. A. 1999. V. 69. P. 169-177.

Поступила в редколлегию 12.12.2001

Рецензент: д-р физ.-мат. наук. проф. Ажажа В.М.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. : (0572) 409-362, 321-276.

Мазинов Алим Сеит-Аметович, канд. техн. наук, доцент физического факультета Таврического национального университета. Научные интересы: многослойные фотоэлектрические преобразователи на основе гетеропереходов. Адрес: Украина, 95000, Симферополь, ул. Ялтинская, 4, тел. (0652) 230-333, 230-360.

Яковлев Дмитрий Рудольфович, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: интегральные тонкопленочные устройства на основе неупорядоченных полупроводников. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62, 93-71-84.

УДК 548.4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РОСТЕ КРИСТАЛЛОВ

ТЕВЯШЕВ А.Д., СУЗДАЛЬ В.С.,
БОРОДАВКО Ю.М., ПЕЛИПЕЦ А.А.

Рассматриваются основные уравнения теории упругости в связи с условиями роста кристаллов – уравнения, составляющие математическую модель термоупругих напряжений при росте кристаллов. Эта математическая модель позволяет найти компоненты тензора деформации и тензора напряжений при заданном температурном поле и соответствующих начальных и граничных условиях в конкретном процессе выращивания монокристаллов из расплава.

1. Введение

Наиболее существенными источниками напряжений при росте кристаллов являются неоднородное поле температурных деформаций, вызывающее

термоупругие напряжения, а также дислокации и примесные неоднородности, создающие остаточные напряжения [1, 2, 4, 5].

Нахождение тензора деформации и тензора термоупругих напряжений является основой исследования процессов образования напряжений и дислокаций в растущих кристаллах и представляет самостоятельный интерес при установлении безопасного режима их охлаждения [3-5].

2. Тензор деформации и тензор напряжений. Уравнения равновесия

Под влиянием приложенных сил твердые тела деформируются. Для математического описания их деформации поступают следующим образом. Положение каждой точки тела определяется ее радиус-вектором \vec{r} в некоторой системе координат. При деформировании тела все его точки смещаются. Такое смещение можно представить вектором $\vec{u} = \vec{r}' - \vec{r}$ или

$$u_i = x'_i - x_i, \quad (1)$$