

УДК 621.315.592

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ КОНДЕНСИ- РОВАННЫХ ФАЗ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПРУТКОВ- ПОДЛОЖЕК

Ю. В. Реков

Генеральный директор

ОАО «Завод полупроводников»

ул. Тепличная, 16, г. Запорожье, Украина, 69009

Наведено аналіз утворення конденсованих фаз на поверхні кремнієвих прутков-підкладок. Утворення конденсаційних шарів в системі «розплав кремнію – кремнієва основа – парогазова фаза» у вакуумі проходить через ряд стадій, що підкоряються певним закономірностям: випаровування, масоперенос і конденсація. Завершуючим етапом є конденсація атомів кремнію на бічній поверхні кремнієвого прутка

Ключові слова: кремній, конденсація, парогазова фаза, кристалічна фаза, термодинамічний потенціал, випаровування, теплоперенос, масоперенос

Приведен анализ образования конденсированных фаз на поверхности кремниевых прутков-подложек. Образование конденсационных слоев в системе «расплав кремния – кремниевая основа – парогазовая фаза» в вакууме проходит через ряд стадий, подчиняющихся определенным закономерностям: испарение, массоперенос и конденсація. Завершающим этапом является конденсація атомов кремния на боковой поверхности кремниєвого прутка

Ключевые слова: кремній, конденсація, парогазовая фаза, кристаллическая фаза, термодинамический потенциал, испарение, теплоперенос, массоперенос

1. Введение

В настоящее время основную долю поликристаллического кремния электронного и солнечного качества, получаемого в мировой промышленности (80...90 %), производят методом водородного восстановления трихлорсилана, а (10...20) % кремния - из тетрахлорсилана и моносилана. Увеличивается доля кремния солнечного качества, который производят из технического кремния с использованием специальных методов очистки [1, 2]. Согласно данным [3, 4], объем производства поликристаллического кремния имеет существенный рост за счет интенсивного развития солнечной электроэнергетики. Мировое производство поликристаллического кремния в 2012 году достигнет 280 тысяч тонн, из которых только ~48 тыс. т затребовано электронной промышленностью

Одним из основных подготовительных этапов промышленного производства поликристаллического кремния по «Сименс-технологии» является получение кремниевых основ (прутков-подложек), используемых для осаждения на них кремния [5].

2. Состояние проблемы и задачи

При выращивании кремниевых прутков-подложек с пьедестала в вакууме технологической особенностью процесса является наличие вакуумной среды и значительной открытой поверхности расплава [6, 7, 8]. В этих условиях происходит испарение кремния с поверхности расплава и его конденсація на холодных поверхностях оснастки, стенках камеры выращивания

и на поверхности кремниевых прутков-подложек. В результате поверхность кремниевых прутков-подложек покрывается частицами конденсирующихся фаз, что визуально наблюдается как цвета побежалости. При дальнейшем использовании таких прутков в качестве подложек для осаждения кремния в процессе водородного восстановления хлорсиланов пленки конденсированных фаз на их поверхности образуют дополнительные центры кристаллизации, что приводит к неоднородности структуры получаемого поликристаллического стержня кремния. Для устранения такого дефекта требуется вынужденная дополнительная обработка прутков-подложек в виде шлифовки их поверхности после выращивания и химического травливания пленки конденсированных фаз. Такая дополнительная обработка прутков-подложек снижает производительность процесса их изготовления и повышает себестоимость. Для повышения эффективности производства кремниевых прутков-подложек и понижения их себестоимости необходимо принять меры, направленные на ограничение процессов конденсації на их поверхности непосредственно в процессе выращивания. Выработка таких мер требует рассмотрения физической природы явления и анализа факторов, определяющих скорость и движущие силы процесса конденсації.

3. Цель работы

Физико-химический анализ условий формирования конденсированных фаз на поверхности кремниевых прутков-подложек.

4. Выполнение исследований и обсуждение результатов

Усовершенствованы технологии и аппаратуры для выращивания методом индукционной бестигельной зонной плавки прутков-заготовок с повышенной степенью чистоты.

Образование конденсационных слоев в системе «расплав кремния – кремниевая основа – парогазовая фаза» в вакууме проходит через ряд стадий, каждая из которых является физическим явлением, подчиняющимся определенным закономерностям: испарение, массоперенос и конденсация.

На первом этапе происходит испарение атомов кремния с расплавленной поверхности пьедестала. Испарение – это эндотермический процесс, при котором поглощается теплота фазового перехода – теплота испарения, затрачиваемая на преодоление сил молекулярного сцепления в жидкой фазе и на работу расширения при превращении жидкости в пар. Мольная теплота испарения кремния составляет 383 кДж/моль, а массовая теплота испарения кремния равна 13,6 МДж/кг [9].

Скорость испарения определяется поверхностной плотностью потока пара, проникающего за единицу времени в газовую фазу с единицы поверхности жидкости (в моль·с⁻¹·м⁻² или кг·с⁻¹·м⁻²). Если вещество в процессе испарения не разлагается (в частности, это относится к металлам и кремнию), скорость изотермического испарения с единицы поверхности $\frac{\Delta m}{\Delta \tau}$ при однонаправленной диффузии пара в расположенную над поверхностью жидкости неподвижную парогазовую смесь описывается формулой Лэнгмюра [10]:

$$\frac{\Delta m}{\Delta \tau} = \alpha P \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}},$$

где Δm – масса испаренного вещества, кг;

$\Delta \tau$ – промежуток времени испарения, с;

α – коэффициент испарения, который зависит от состояния и чистоты поверхности;

P – давление насыщенного пара при температуре T , Па;

M – молекулярная масса испаряющегося вещества, кг·моль⁻¹;

R – универсальная газовая постоянная, Дж·моль⁻¹·К⁻¹;

T – температура, К.

Эта формула справедлива только для случая испарения в вакуум, когда испарившиеся частицы не возвращаются к поверхности испарения в результате столкновения с другими частицами. Если давление остаточного газа в камере сравнимо с давлением насыщенного пара, то скорость испарения существенно уменьшается.

В общем случае (движущиеся жидкость и газ, неизотермические условия) в прилегающем к поверхности раздела фаз пограничном слое жидкости и в пограничном слое парогазовой смеси происходят взаимосвязанные тепло- и массоперенос. Интенсивность массообмена при испарении зависит от разности химических потенциалов пара у поверхности раздела и в основной массе парогазовой смеси. При этом для

расчета скорости испарения используют экспериментальные коэффициенты тепло- и массоотдачи, а в относительно более простых случаях – приближенные методы численных решений системы дифференциальных уравнений для сопряженных пограничных слоев газовой и жидкой фаз.

Если жидкость и парогазовая смесь неподвижны и влияние свободной конвекции в них незначительно, удаление образовавшегося при испарении пара от поверхности жидкости в газовую среду происходит, в основном, в результате молекулярной диффузии и появления вызываемого диффузией потока парогазовой смеси, направленного от поверхности жидкости в газовую среду. С точки зрения термодинамики движущим потенциалом любого выравнивающего процесса является рост энтропии. При постоянных давлении и температуре в роли такого потенциала выступает химический потенциал μ , обуславливающий поддержание потока вещества J , который пропорционален при этом градиенту потенциала

$$J \approx -\left(\frac{\partial \mu}{\partial x}\right)_{P,T}.$$

В большинстве практических случаев вместо химического потенциала применяется концентрация C , и вышеприведенная формула может быть заменена на следующую

$$J = -D\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right),$$

согласно которой плотность потока вещества J пропорциональна коэффициенту диффузии D и градиенту концентрации $\frac{\partial C}{\partial x}$. Это уравнение выражает первый закон Фика [11].

Завершающим этапом является конденсация атомов кремния на боковой поверхности кремниевого прутка. Физические закономерности процесса конденсации включают в себя закономерности протекания таких процессов, как адсорбция, кристаллографическое превращение на поверхности растущего конденсата, закономерности протекания теплопереноса, связанного с выделением скрытой теплоты конденсации. В общем случае, решение этой задачи требует информации о химических потенциалах кремния в газовой фазе и в конденсате, специальных кинетических коэффициентов, связанных с тепло- и массопереносом, значения которых могут быть установлены для данной системы только экспериментальным путем. Так, например, между скоростью конденсации W и тепловой нагрузкой существует следующая связь [12]

$$q = W \cdot r,$$

где q – удельная тепловая нагрузка, Вт·м⁻²;

r – теплота конденсации, Дж·кг⁻¹.
Таким образом, отдельные стадии формирования конденсационных слоев контролируются сопряженными между собой потенциалами различной природы. В данных условиях, когда экспериментальное определение интересующих величин затруднено (и представляет собой задачу отдельного исследования), а их корректная теоретическая оценка невозможна, выбираем термодинамический подход. В его основу

положим сопоставление движущих сил при образовании конденсатов кремния различной структуры из парогазовой фазы.

Для сопоставления термодинамической стабильности слоев с различной структурой, отвечающей стабильной и метастабильным модификациям кремния, используем изобарного потенциала (энергию Гиббса) конкурирующих фаз. С этой целью используем обширную базу самосогласованных термодинамических данных для 78 элементов, представленную Европейской Научной Группой по термодинамическим данным SGTE (Scientific Group Thermodata Europe) [13]. В этой базе приведены термодинамические свойства для каждой фазы, которую может образовывать данный элемент в стабильных и метастабильных условиях, а также для каждой фазы, которую он может образовывать, растворяясь или взаимодействуя с другими элементами. В основу построения такой базы данных была положена информация о термодинамических свойствах элементов в стабильных состояниях, информация о фазовых равновесиях, в которых та или иная стабильная или метастабильная фаза принимает участие, известные эмпирические соотношения между термодинамическими свойствами фаз.

Данные для каждой фазы, которую может образовывать данный элемент, представлены в [13] в форме выражений для свободной энергии Гиббса по отношению к энтальпии элемента в состоянии, принятом в качестве стандартного (the Stable Element Reference state). Представленная таким образом свободная энергия обозначается как $^{\circ}G - H_{SER}$. В качестве стандартного состояния выбирается фаза, стабильная при давлении 10^5 Па и температуре 298,15 К. Все остальные термодинамические функции могут быть рассчитаны прямо из выражения для свободной энергии Гиббса. Выражение для свободной энергии Гиббса представляется как степенной ряд по температуре и имеет вид

$$G - H_{SER} = a + bT + cT \ln(T) + dT^2 + eT^{-1} + fT^3 + gT^{-9} + hT^7,$$

где a, b, c, d, e, f, g и h – коэффициенты.

Из этого выражения для свободной энергии могут быть оценены другие термодинамические свойства: высокотемпературная составляющая энтальпии

$$H_T^0 - H_{298}^0 = a - cT - dT^2 + 2eT^{-1} - 2fT^3 + 10gT^{-9} - 6hT^7;$$

энтропии

$$S_T^0 = -b - c - c \ln(T) - 2dT + eT^{-2} - 3fT^2 + 9gT^{-10} - 7hT^6;$$

теплоемкости

$$C_p^0 = -c - 2dT - 2eT^{-2} - 6fT^2 - 90gT^{-10} - 42hT^6.$$

В необходимых случаях к этим выражениям могут быть добавлены дополнительные члены, связанные с магнитным вкладом в свободную энергию Гиббса G_{mag} и вкладом, зависящим от давления G_{pres} .

В качестве приближения, принятого в базе данных SGTE для описания теплоемкости фазы в подобном случае, используется идея о том, что значения теплоемкости переохлажденной жидкости $C_p^J(T)$ стремятся к значениям теплоемкости твердой фазы, стабильной при температуре ниже температуры плавления $C_p^{tr}(T)$, и становятся равной им при некотором конечном переохлаждении:

$$\lim_{T < T_m} C_p^J(T) = C_p^{tr}(T). \tag{1}$$

Аналогично, значения теплоемкости твердой фазы, перегретой выше температуры плавления, стремятся к значениям теплоемкости жидкой фазы и достигают их при некотором конечном перегреве

$$\lim_{T > T_m} C_p^{tr}(T) = C_p^J(T). \tag{2}$$

Такой подход дает возможность его использования для количественных расчетов в случае отсутствия достоверной термодинамической информации о свойствах металлов в метастабильных условиях.

Наложение условий (1) и (2) на характер температурной зависимости термодинамических свойств фаз приводит к введению в выражение для свободной энергии Гиббса слагаемых gT^{-9} и hT^7 , и дает возможность избежать проблемы некорректной стабильности фаз при экстраполяции в область низких или высоких температур.

В таблице приведены использованные в расчетах коэффициенты уравнений температурной зависимости энергии Гиббса чистого Si согласно [13]. Расчеты энергии Гиббса проведены как для равновесных фаз кремния – жидкой и твердой с кубической структурой типа алмаза, так и для возможных метастабильных кристаллических модификаций кремния – гранцентрированной кубической, объемноцентрированной кубической, гексагональной плотноупакованной и сложных кубических фаз.

Результаты расчетов, выполненных для температурного интервала 900...1400 °С, отвечающего технологическим условиям в процесса выращивания кремниевых прутков с пьедестала, показаны на рис. 1.

Как следует из рис. 1, в температурном интервале, в котором возможно образование конденсированных слоев на поверхности кремниевых прутков-подложек, энергия Гиббса G различных метастабильных кристаллических модификаций кремния (кривые 3-7) имеет близкие значения. О близости термодинамических свойств различных кристаллических фаз кремния вблизи температуры плавления свидетельствуют и данные рис. 2, на котором показаны рассчитанные теплоемкости для различных кристаллических модификаций кремния.

Более детальное сравнение термодинамической стабильности различных конденсированных фаз кремния может быть проведено с использованием рис. 3, на котором функция энергии Гиббса дана в сопоставлении со стандартным состоянием кремния со

структурой типа алмаза и представлена как величина ΔG , равная разности между ними.

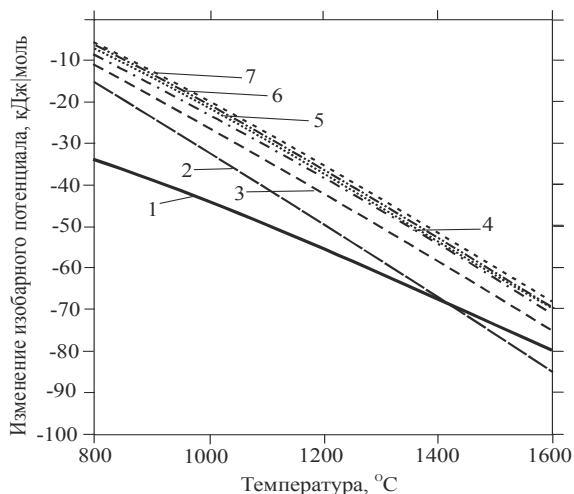


Рис. 1. Зависимость энергии Гиббса различных фаз кремния от температуры: 1 – структура алмаза; 2 – жидкая фаза (расплав); 3 – гранецентрированная кубическая решетка; 4 – объемноцентрированная кубическая решетка; 5 – гексагональная плотноупакованная решетка; 6 и 7 – сложные кубические решетки

С термодинамической точки зрения наиболее вероятным является образование конденсатов, состоящих из аморфного кремния, так как этот процесс будет сопровождаться наименьшим увеличением энергии Гиббса системы. При этом принимается широко используемое предположение, о том, что энергии Гиббса жидкой переохлажденной ниже температуры плавления фазы и аморфной фазы близки.

Образование конденсатов, содержащих различные кристаллические фазы кремния (табл. 1) будет протекать с более заметным увеличением энергии Гиббса, т.е. с точки зрения равновесной термодинамики является менее возможным. Вместе с тем, следует

учитывать, что процесс образования конденсатов на поверхности кремниевого прутка протекает в условиях, далеких от равновесия. Так, например, величина энтальпии сублимации, которая высвобождается при образовании конденсированных фаз, может быть оценена для осаждения равновесной фазы с решеткой типа алмаза как ~430 кДж/моль. Принимая во внимание это значение, можно отметить, что величина энергетического барьера для выделения упомянутых выше метастабильных аморфной и кристаллических фаз в самых неблагоприятных условиях не превышает 10 % от него. И, следовательно, их выделение следует рассматривать как возможное.

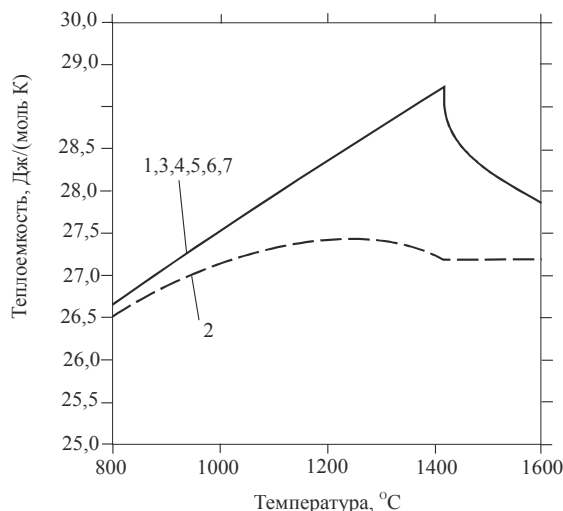


Рис. 2. Зависимость теплоемкости различных фаз кремния от температуры: 1 – структура алмаза; 2 – жидкая фаза (расплав); 3 – гранецентрированная кубическая решетка; 4 – объемноцентрированная кубическая решетка; 5 – гексагональная плотноупакованная решетка; 6 и 7 – сложные кубические решетки

Таблица 1

Коэффициенты уравнений температурной зависимости энергии Гиббса различных фаз кремния [5]

| $^{\circ}G - HSER = a + bT + cT \ln(T) + dT^2 + eT^{-1} + fT^3 + gT^{-9} + hT^7$, Дж/моль | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|-----------|---------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Me | Структура | a | b | c | d×10 ⁻³ | e | f×10 ⁻⁶ | g×10 ³¹ | h×10 ⁻²² | Интервал температур, К |
| Si | алмаза | -8162,61 | 137,24 | -22,83 | -1,91 | 176667 | -0,004 | - | - | 298,15...1687 |
| | | -9457,64 | 167,287 | -27,19 | - | - | - | -420,37 | - | 1687...3600 |
| | жидкая | 42533,75 | 107,12 | -22,83 | -1,913 | 176667 | -0,004 | - | 209,31 | 298,15...1687 |
| | | 40370,52 | 137,72 | -27,19 | - | - | - | - | - | 1687...3600 |
| | гранецентрированная кубическая | 42837,39 | 115,44 | -22,83 | -1,913 | 176667 | -0,003 | - | - | 298,15...1687 |
| | | 41542,36 | 145,48 | -27,19 | - | - | - | -420,37 | - | 1687...3600 |
| | | -10838,83 | 291,30 | -46,00 | - | - | - | - | - | 1811...6000 |
| | объемноцентрированная кубическая | 38837,39 | 114,74 | -22,83 | -1,913 | 176667 | -0,004 | - | - | 298,15...1687 |
| | | 37542,36 | 144,78 | -27,19 | - | - | - | -420,37 | - | 1687...3600 |
| | гексагональная плотноупакованная | 41037,39 | 116,44 | -22,83 | -1,913 | 176667 | -0,004 | - | - | 298,15...1687 |
| | | - | - | -27,19 | - | - | - | -420,369 | - | 1687...3600 |
| | сложная кубическая фаза A12 | 42045,39 | 116,86 | -22,83 | -1,91 | 176667 | -0,003 | - | - | 298,15...1687 |
| | | 40750,36 | 146,90 | -27,19 | - | - | - | -420,37 | - | 1687...3600 |
| | сложная кубическая фаза A13 | 39116,39 | 116,86 | -22,83 | -1,91 | 176667 | -0,003 | - | - | 298,15...1687 |
| 37821,36 | | 146,90 | -27,195 | - | - | - | -420,37 | - | 1687...3600 | |

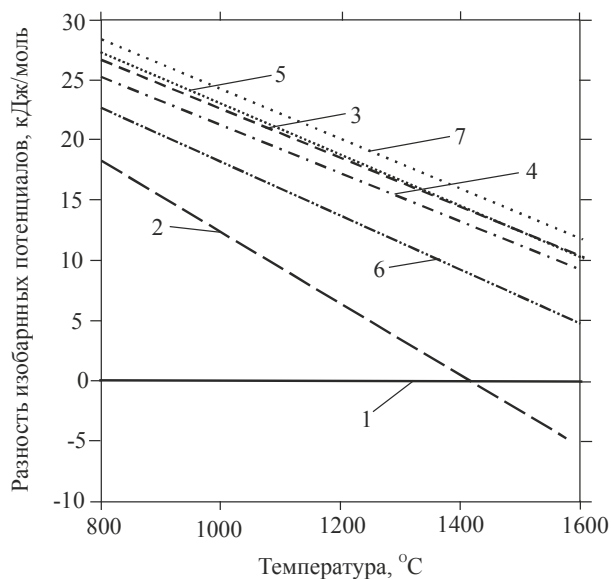


Рис. 3. Разность энергии Гиббса различных фаз кремния и кристаллической фазы с решеткой типа алмаза: 1 — структура алмаза; 2 — жидкая фаза (расплав); 3 — гранецентрированная кубическая решетка; 4 — объемноцентрированная кубическая решетка; 5 — гексагональная плотноупакованная решетка; 6 и 7 — сложные кубические решетки

5. Выводы

В технологических условиях выращивания кремниевых прутков-подложек методом индукционной вертикальной зонной плавки с пьедестала невозможно выбрать температурный интервал, в котором не происходило бы формирование конденсатов на поверхности растущих прутков. Не существует и температурный интервал при котором конденсирующиеся на поверхности кремниевого прутка пары образовывали бы эпитаксиальные слои, не влияющие на ее качество.

В этих условиях в качестве эффективного способа ограничения конденсации на поверхности можно рекомендовать создание искусственных барьеров на пути паров кремния, например, в виде специальных защитных экранов. В качестве еще одного способа может рассматриваться создание над жидким кремнием относительно плотной газовой среды, что должно привести к замедлению скорости испарения, так как эта величина обратно пропорциональна парциальному давлению постороннего газа. В качестве такого газа может быть использован аргон.

Литература

- Johannes Bernreuter. Polysilicon industry faces shakeout [E a resource]- Access mode : http://www.bernreuter.com/fileadmin/user_upload/silicon_report/Polysilicon_Industry.pdf/ - 23.09.2012.
- Travis Bradford. Polysilicon: Supply, Demand and Implications for the PV Industry [electronic resource] - Access mode: 20/09/2012.
- Green Rhino Energy. Value Chain Activity: Producing Polysilicon [the electrons resource] - Access mode: http://www.greenrhinoenergy.com/solar/industry/ind_01_silicon.php/, 23.09.2012.
- Brett Prior, Carolyn Campbell. Polysilicon 2012-2016: Supply, Demand & Implications for the Global PV Industry [electronic resource] - Access mode: <http://www.greentechmedia.com/research/report/polysilicon-2012-2016>, 13.09.2012.
- Таран, Ю. Н. Полупроводниковый кремний: теория и технология производства [Текст] / Ю.Н. Таран, В. З. Куцова, И. Ф. Червоный, Е. Я. Швец, Э. С. Фалькевич. — Запорожье : ЗГИА, 2004. — 344 с. — Библиогр.: с. 317-342. — 300 экз. — ISBN 966-7101-61-4.
- Червоный, И. Ф. Бестигельная зонная плавка кремниевых основ для производства поликристаллического кремния [Текст] / И. Ф. Червоный, Ю. В. Реков, С. Г. Егоров, О. А. Кисарин, Р. Н. Воляр // Теория и практика металлургии, 2011. — №1-2. — С. 70-73.
- Червоный, И. Ф. О надежности процесса получения поликристаллического кремния с применением кремниевых затравок / И.Ф. Червоный, Ю.В. Реков, В.Ф. Червоный, С.Г. Егоров / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - Х.: НТУ «ХПІ». - 2012р. - №44(950). — С. 137-143.
- Реков, Ю. В. Оптимизация процесса выращивания кремниевых основ для производства поликристаллического кремния [Текст] / Ю.В. Реков, И.Ф. Червоный, С.Г. Егоров, О.А. Кисарин, Р.Н. Воляр // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2011. - № 3/5 (51). — С. 15-19.
- Кнунянц, И. Л. Химическая энциклопедия [Ntrcn] : в 5 т. Т. 2. Даффа-Меди / Редкол. : гл. ред И. Л. Кнунянц. — М. : Сов. Энцикл., 1990. — : 671 с.: ил. — 10000 экз. — ISBN 5-85270-008-8; 5-85270-035-5(т.2)
- Peter, Atkins P., De Paula J., Atkins P.W. Atkins' Physical Chemistry (9th Revised Edition) Oxford University Press, 2009. — 1008 p. — ISBN: 0-19-954337-2.
- Годнев, И. Н. Физическая химия: Учеб. Пособие для хим.-тех. Спец. Вузов / И. Н. Годнев, К. С. Краснов, Н. К. Воробьев, В. Н. Васильева, В. П. Васильев, В. Л. Киселева, К. Н. Белоногов ; под. ред. К. С. Краснова. — М.: Выш. Школа, 1982. — 687 с. — 35000 экз.
- Трошенькин, Б. А. Теплообмен при кипении и конденсации / Сб. тез. докл. 6-ой Междунар. науч. школы-конф. Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики, 22–28 сент. 2008 г., — Алушта, 2008. — С. 71–73.
- Dinsdale, A. T. SGTE data for pure elements // CALPHAD. — 1991. — V. 15, N 4. — P. 317–425.

Abstract

There is an analysis of the formation of condense phases on the surface of silicon rod-substrates. The formation of condensation layers in the scheme “molten silicon - silicon base – steam-gas phase” in a vacuum undergoes series of stages, subject to certain regularities: evaporation, mass transfer and condensation.

The final stage is the condensation of the silicon atoms on the side surface of the silicon rod. Physical laws of condensation include the regularities of such processes as the adsorption, the crystallographic transformation on the surface of the growing condensate, the regularities of heat transfer associated with the release of latent heat of condensation.

From a thermodynamic point of view, the most probable is the formation of a condensate consisting of amorphous silicon, as this process is accompanied by the lowest increase of Gibbs energy of the system. This takes the widely used assumption that Gibbs energies of the supercooled liquid phase and the amorphous phase are close.

To compare the thermodynamic stability of the layers with different structure corresponding to the stable and metastable modifications of silicon, we use Gibbs energy of competing phases.

Keywords: silicon, condensation, steam-gas phase, crystalline phase, thermodynamic potential, evaporation, heat transfer, mass transfer

Розглянуто результати порівняльних експериментальних досліджень впливу різних радіаційно-захисних (РЗ) наповнювачів композиційних матеріалів на основі фосфогіпсового в'язучого на їх РЗ властивості. Встановлені закономірності впливу параметрів рентгенозахисних конструкцій на рівень радіаційного захисту персоналу з урахуванням властивостей композиційних матеріалів на основі фосфогіпсу та обґрунтування на цій основі параметрів та ефективності застосування таких конструкцій

Ключові слова: фосфогіпс, концентрація, радіаційний захист, наповнювач, рідкоземельні елементи, сульфат барію, вольфрам

Рассмотрены результаты сравнительных экспериментальных исследований влияния различных радиационно-защитных (РЗ) наполнителей композиционных материалов на основе фосфогипсового вяжущего на их РЗ свойства. Установлены закономерности влияния параметров рентгенозащитных конструкций на уровень радиационной защиты персонала с учетом свойств композиционных материалов на основе фосфогипса и обоснованы на этой основе параметры и эффективность применения таких конструкций

Ключевые слова: фосфогипс, концентрация, радиационная защита, наполнитель, редкоземельные элементы, сульфат бария, вольфрам

УДК 661.185-3:677.021.127

ОБОСНОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФОСФОГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО

В. А. Иванов

Кандидат технических наук, доцент*
Контактный тел.: (0562) 47-37-21
E-mail: vaivan@ukr.net

К. С. Голов

Кандидат технических наук*
Контактный тел.: (0562) 47-37-21
E-mail: klipsch@ukr.net

Ю. В. Мисовец

Врач высшей категории, заведующий рентгенологическим отделением
Отделение городской клинической больницы № 18
ул. Гусенко, 2, г. Днепропетровск, Украина, 49005
Контактный тел.: (0562) 47-37-21

*Отдел проблем разработки месторождений на больших глубинах института геотехнической механики им. Н.С. Полякова
НАН Украины
ул. Симферопольская, 2а, г. Днепропетровск, Украина, 49005