



## ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**В. А. Шаповалов, И. В. Шейко, Ю. А. Никитенко,  
В. В. Якуша, В. В. Степаненко**

Приведен анализ современных способов получения кремния солнечного качества. Основной обзор посвящен очистке металлургического кремния до уровня необходимой чистоты. Показаны преимущества и недостатки разработанных технологий, которые можно реализовать при получении чистого кремния для производства фотоэлектрических преобразователей.

Analysis of modern methods for producing silicon of a solar quality was made. The main review is devoted to purification of metallurgical silicon to the level of a required quality. Shown are the advantages and drawbacks of the developed technologies, which can be realized for producing the pure silicon for manufacture of photoelectric transducers.

**Ключевые слова:** металлургический кремний; рафинирование; фотоэлектрические преобразователи

В связи с нестабильностью цен на природные энергоресурсы (уголь, нефть, газ) многие страны ищут пути создания альтернативных источников энергии. Причем такие мощные энергетические комплексы, как атомная отрасль и гидроэнергетика, также нуждаются в усовершенствовании, поскольку в некоторых случаях они уже не отвечают современным требованиям мировой и экологической безопасности. Поэтому наметилась тенденция к более широкому использованию солнечной и ветровой энергии.

По различным оценкам, прогнозируемая мощность солнечных фотопреобразователей будет постоянно возрастать и к 2020 г. может достигнуть примерно 200 ГВт, а вероятно, в дальнейшем также сохранит темпы роста.

Только в Украине в ближайшие годы планируется ввести в эксплуатацию «солнечные» электростанции мощностью около 1 ГВт, в некоторых других странах эти показатели намного выше.

Несмотря на то, что в последнее время возникли некоторые экономические проблемы с продвижением солнечной энергетики в связи с завышенными и слабо регулируемыми «зелеными тарифами», общую тенденцию развития альтернативной энергетики остановить не удастся. И в этом направлении основной задачей ученых является создание эффективных фотоэлектрических преобразователей

(ФЭП), которые смогли бы на равных конкурировать, а в дальнейшем и заменить основные виды энергии без ущерба для экономики стран.

Значительная доля ФЭП изготавливается на основе чистого кремния. Разработаны активные элементы с аморфной, поликристаллической (мультикристаллической), монокристаллической структурой, у каждого типа есть свои преимущества и недостатки. Преобразователи на основе аморфного кремния отличаются самым низким КПД (менее 10%), однако технология позволяет производить тонкопленочные элементы больших площадей и эффективно использовать сырье. Монокристаллические имеют КПД 14...18% (максимум 25%), однако вследствие технологической схемы очистки, выращивания и обработки монокристалла кремния они являются самыми дорогими. Поликристаллические преобразователи характеризуются КПД около 13...15% (максимум до 20%), но, в отличие от монокристаллических, дешевле.

Преимущество монокристаллического кремния перед поликристаллическим объясняется отсутствием в монокристалле границ зерен, которые являются центрами рекомбинаций. Поэтому при изготовлении поликристаллических слитков размер их зерна должен быть как можно большим. В таком слитке хоть и имеются большеугловые границы зерен, однако эффективность данных преобразователей намного выше, чем при мелкокристаллической структуре.

Преобразователи на основе аморфного кремния пока еще малоэффективны, к тому же их структура подвержена деградации, что приводит к нестабильному и малому сроку службы.

Однако для производства всех типов ФЭП необходим чистый кремний и по конкурентной цене. Как правило, производители чистого кремния и модулей имеют долгосрочные контракты, что способствует наращиванию мощностей и объемов производства и позволило снизить цены до менее 30 дол. за килограмм чистого кремния. На данный момент установочная цена ФЭП продолжает снижаться и находится на уровне 1 дол./Вт. К тому же, это связано с тем, что основная доля производимого кремния находится в одном регионе — Китае, что, с одной стороны, эффективно, но, с другой, делает его монополистом в этой области энергетики.

Украине, имеющей огромный потенциал в области производства кремния и электронной продукции, необходимо в кратчайшие сроки заняться совершенствованием технологии производства кремния, пригодного для «солнечной» энергетики.

Высокая стоимость ФЭП обусловлена затратами на получение кремния необходимой чистоты, т. е. удаление вредных примесей. В настоящее время существует несколько систем определения качества сырьевого кремния, получаемого из кварцита, в зависимости от химического состава и регламентируемых примесей (таблица).

Существует также условная градация кремния: MG-Si (metallurgical grade silicon) — металлургический кремний 98...99%-й чистоты, UMG-Si — очищенный металлургический кремний с чистотой примерно 99,95 %, SoG-Si (solar grade silicon) — кремний «солнечного» качества чистоты 99,9999... 99,999999 %) и EG-Si (electron grade silicon) — кремний «электронного» качества чистотой 9-11N.

Основную часть металлургического кремния получают карботермическим восстановлением, поэтому, кроме основных примесей, присутствует много нерегламентированного углерода.

Эффективной стадии получения SoG-Si практически не существует, его производят путем смешивания UMG-Si + EG-Si (скрап, обрезь, некондиционный кремний). Для производства EG-Si применяют водородные технологии с очисткой кремния в результате образования трихлорсилана или моносила (процесс Siemens). Сами водородные технологии и обработка силанов приводят к удорожанию кремния, к тому же могут быть очень опасными для окружающей среды в случае техногенных катастроф. Поэтому для полного цикла производства кремния требуется особая инфраструктура и замкнутый цикл. В мировой практике предприятия располагают в малонаселенных районах, когда города-спутники (население до 50 тыс. чел.) находятся в непосредственной близости, а крупные центры расположены на расстоянии свыше 100 км.

Для дальнейшего развития «солнечной» энергетики необходимо создание новых технологий получения относительно дешевого поликристаллического

Химический состав производимого кремния в соответствии со стандартами					
Марка кремния	Массовая доля элементов, %				
	Si*	Примесей, не более			
		Fe	Al	Ca	Сумма определяемых примесей
<i>Кремний технический (ГОСТ 2169-69)</i>					
Kp00	99,0*	0,4	0,3	0,4	1,0
Kp0	98,8*	0,5	0,4	0,4	1,2
Kp1	98,0*	0,7	0,7	0,6	2,0
Kp2	97,0*	1,0	1,2	0,8	3,0
Kp3	96,0*	1,5	1,5	1,5	4,0
<i>Стандарт GB/T2881-2008</i>					
1515	99,6	0,15	—	0,015	0,004**
2203	99,5	0,20	0,2	0,03	0,004**
2503	99,5	0,20	—	0,03	0,004**
3103	99,4	0,30	0,1	0,03	0,005**
3303	99,3	0,30	0,3	0,03	0,005**
441	99,0	0,40	0,4	0,1	—
553	98,5	0,50	0,5	0,3	—

\* Не менее. \*\* Фосфор.

го кремния «солнечного» качества. Способы очистки металлургического кремния можно разделить на два направления — химическое и металлургическое [1]. Химический путь основан на существующем процессе Siemens, его различных усовершенствованиях и модификациях. Металлургический путь заключается в получении солнечного кремния непосредственно из металлургического кремния путем воздействия на расплав. С экономической точки зрения эффективным окажется тот, который имеет наименьшее количество стадий и обеспечивает адекватную себестоимость. Металлургический путь может позволить проводить очистку расплавленного кремния и одновременно получать форму слитка, приемлемую для производства ФЭП (сокращение объемов обрезки). Однако сейчас наиболее изучен и имеет приемлемое качество химический путь, но для него требуется проведение многостадийных операций, что приводит к повышенным капиталовложениям [2].

Прежде всего необходимо описать состав примесей, встречающихся в кремнии и оказывающих негативное влияние на качество ФЭП. На все элементы наложены жесткие требования по допустимым пределам концентрации (рис. 1) [3, 4]. Как видно из зависимостей, основными примесями, определяющими эффективность ФЭП, являются фосфор и бор, к тому же они являются и трудноудаляемыми.

Основным источником загрязнения при производстве металлургического кремния, кроме самого сырья, является графит (восстановитель, электро-

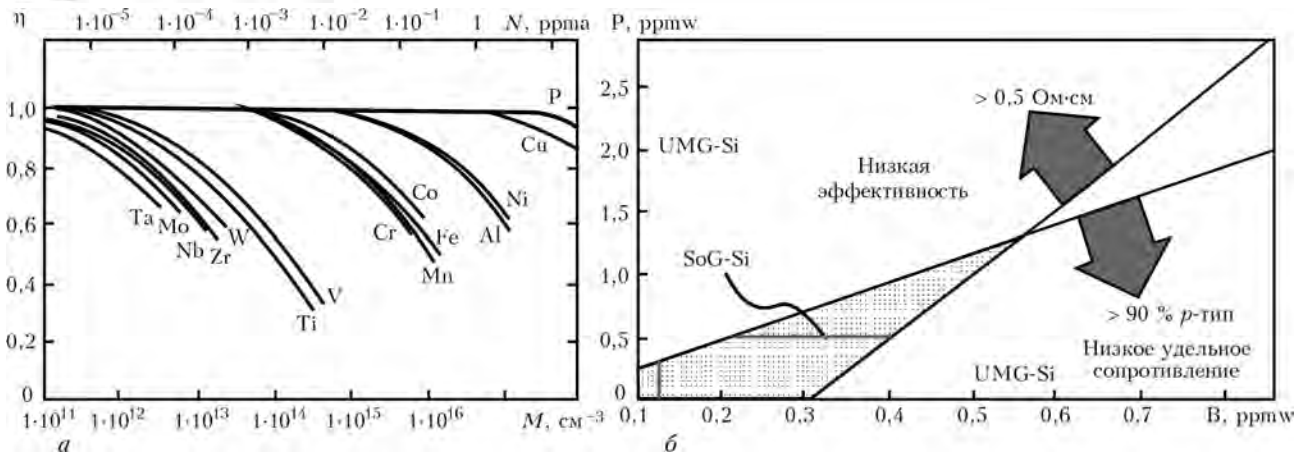


Рис. 1. Влияние концентрации примесей  $M$  в кремнии на относительную эффективность  $\eta$  ФЭП:  $a$  – металлические примеси;  $b$  – диапазон концентраций фосфора и бора

ды). Поэтому в металлургическом кремнии, кроме углерода, присутствует много алюминия, бора, фосфора, кальция, хрома, меди, железа, марганца, молибдена, никеля, титана, ванадия, церия, а также газов, растворенных и в виде соединений [5]. С учетом физических особенностей элементов (коэффициент распределения в расплаве, давление паров) большинство металлов и соединений можно удалить на ранних стадиях до и после карботермического восстановления. Для этого предлагается проводить дополнительную очистку кварцита, использование сажи в качестве восстановителей или после восстановления – доводку кремния в ковшах (вакуумирование), изложницах (направленная кристаллизация). Многие элементы с более высоким давлением паров эффективно удаляются при плавке кремния в вакууме (рис. 2) [6].

При вакуумировании и достаточном перегреве эффективно удаляются многие элементы и летучие соединения. Использование равновесного коэффициента распределения примесей в жидком кремнии также позволяет отделить большинство элементов.

**Равновесный коэффициент  $K$  распределения примесей в кремнии**

Элемент	$K$	Элемент	$K$	Элемент	$K$
Al	$2,8 \cdot 10^{-3}$	Fe	$6 \cdot 10^{-6}$	P	0,35
Ag	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Ge	0,3	Pb	$5 \cdot 10^{-4}$
As	0,3	In	$4 \cdot 10^{-4}$	Pd	$5 \cdot 10^{-5}$
Au	$2,5 \cdot 10^{-3}$	Li	$1 \cdot 10^{-2}$	S	$1 \cdot 10^{-5}$
B	0,8	Mg	$2 \cdot 10^{-3}$	Sb	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Bi	$7 \cdot 10^{-4}$	Mn	$1,3 \cdot 10^{-5}$	Sn	$1,6 \cdot 10^{-2}$
C	0,07	Mo	$4,5 \cdot 10^{-8}$	Ta	$2,1 \cdot 10^{-8}$
Ca	$3,9 \cdot 10^{-3}$	N	$7 \cdot 10^{-6}$	Ti	$5 \cdot 10^{-6}$
Cd	$1 \cdot 10^{-6}$	Na	$2 \cdot 10^{-3}$	V	$4,6 \cdot 10^{-6}$
Co	$2 \cdot 10^{-5}$	Nb	$4,4 \cdot 10^{-7}$	W	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Cr	$1,1 \cdot 10^{-5}$	Ni	$3,2 \cdot 10^{-4}$	Zn	$1 \cdot 10^{-5}$
Cu	$4 \cdot 10^{-4}$	O	1,3	Zr	$1,6 \cdot 10^{-8}$

Примечание. Во многих публикациях данные существенно различаются и зависят от температуры [7–11].

Практически все металлы можно удалить из кремния путем направленной кристаллизации и нескольких проходов фронта кристаллизации. При проведении процесса это выглядит, как отделение одной части слитка после зонной плавки. Только фосфор и бор имеют коэффициент  $K$ , близкий к единице, что свидетельствует о плохом перераспределении в жидкой и твердой фазах.

На первый взгляд, с такими возможностями в рафинировании практически не должно возникать проблем в очистке кремния и дополнительная химическая обработка не требуется. Но в действительности проблему рафинирования необходимо рассматривать в комплексе, а не поэлементно. Большое влияние оказывают газы, особенно кислород, который образует оксиды не только кремния, но и других элементов. Поскольку концентрации примесей очень малы, определить их взаимное влияние, распределение и наличие конкретных фаз при моделировании процесса рафинирования сложно.

Химический путь очистки кремния по силановой технологии в данное время является наиболее распространенным. Более 90 % всего чистого кремния получают именно этим способом. Очищенный металлургический кремний обрабатывают безводным хлористым водородом  $HCl$ , в результате реакции образуются летучие соединения  $SiHCl_3$ ,  $SiH_4$ ,  $SiCl_4$ , водород, а также галогениды металлов  $AlCl_3$ ,  $BCl_3$ ,  $FeCl_3$  и т. д. Силаны отделяют от примесных галогенидов с помощью ректификации, при этом получается соединение очень высокой чистоты. Далее в герметичных реакторах происходит пиролитическое разложение в водороде, и чистый кремний оседает на затравочных стержнях.

Параллельно развиваются технологии осаждения кремния в кипящем слое, когда осаждение происходит не на твердую поверхность, а в виде мелкодисперсного порошка. При использовании моносилана  $SiH_4$  стадии переработки практически идентичны, отличия заключаются в конструкции реакторов, химических реактивах, энергозатратах и производительности.

Удешевления получаемого кремния достигают благодаря сокращению времени обработки, оптимизации технологических параметров и т. д. Однако,

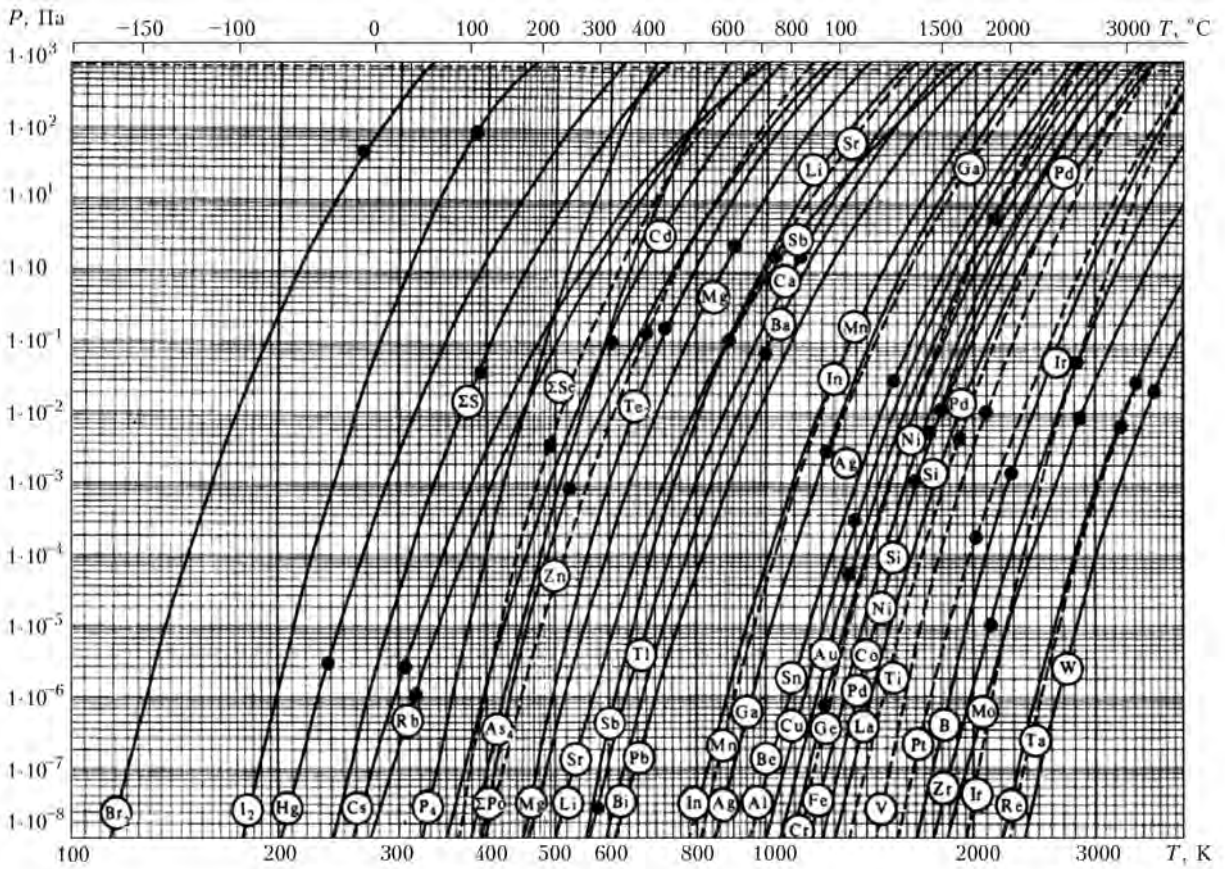


Рис. 2. Зависимость давления паров  $P$  однокомпонентных веществ от температуры;  $T_{пл}$  — температура плавления

по предварительным оценкам, стоимость такой переработки все равно не даст возможность получать ФЭП, позволяющие конкурировать с традиционной энергетикой. Подробно силановые технологии описаны в работе [12], где приведены характеристики и особенности процессов, оценки показателей экономичности и производительности.

Проблемы и недостатки водородных технологий способствовали созданию технологий менее энергоемких и исключающих необходимость работ со взрывоопасными и химически активными реагентами.

Для производства кремния предложено использовать его более простые соединения, например четыреххлористый кремний. Для разложения  $\text{SiCl}_4$  применяли активные металлы, например алюминий, цинк (цинкотермия) [13]. Однако рециркуляция цинка при производстве приводит к тому, что кремний получается низкого качества и требует дополнительной очистки. Проблемы возникли и при использовании чистого алюминия. Поэтому в последнее время предложено для разложения  $\text{SiCl}_4$  использовать летучую соль — субхлорид алюминия  $\text{AlCl}_3$  [14, 15].

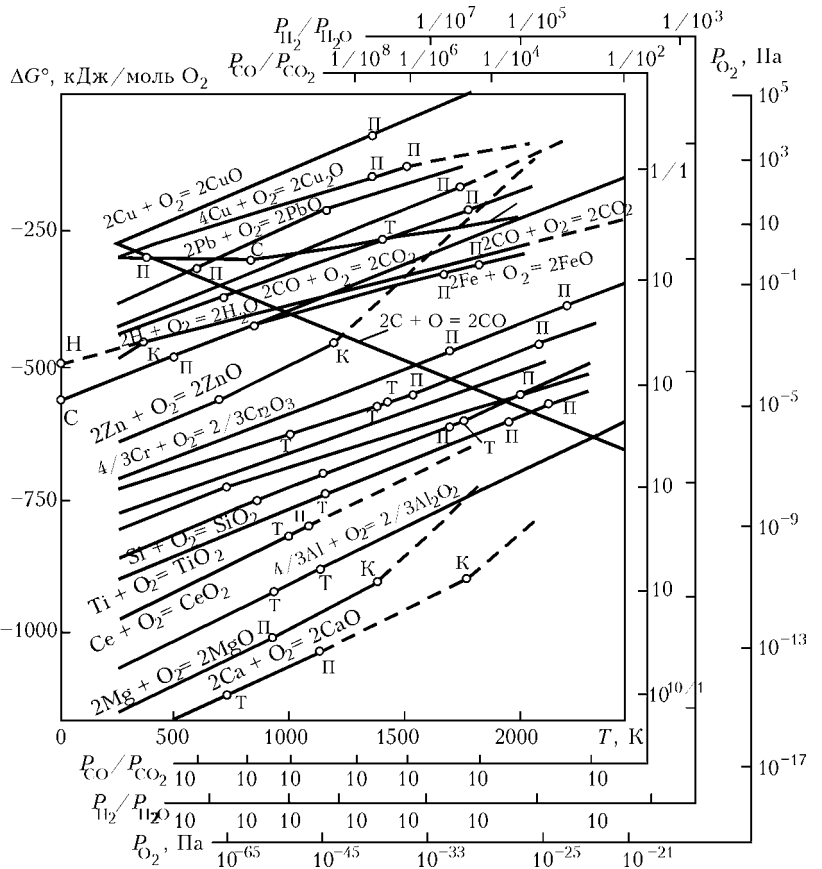


Рис. 3. Диаграмма Эллингама (Ellingham), зависимость термодинамического потенциала образования оксидов металлов от температуры

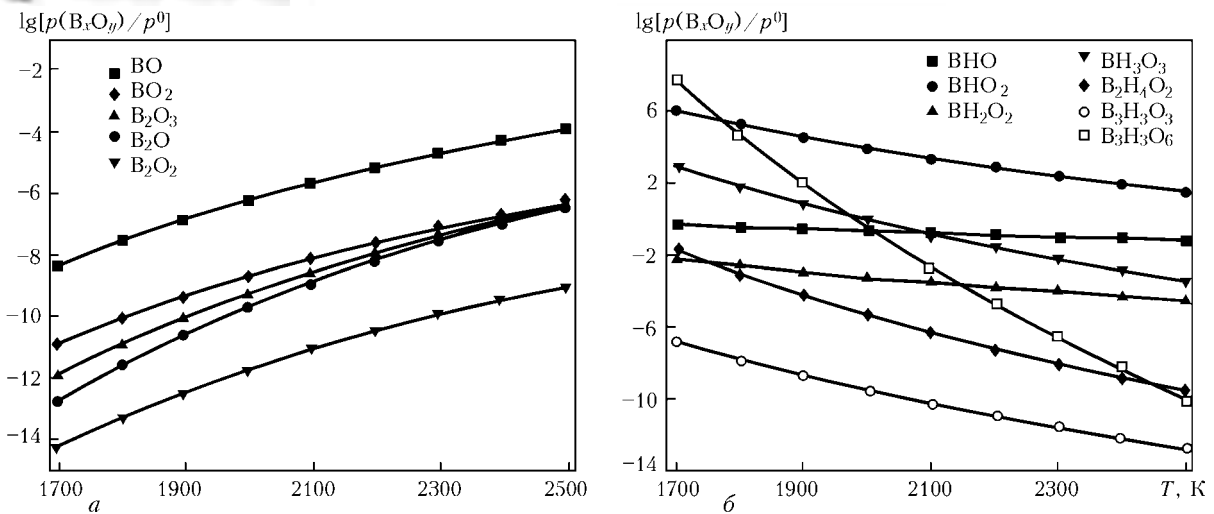
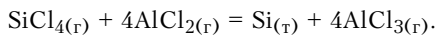
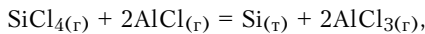


Рис. 4. Зависимость парциального давления соединений В-О (а) и В-Н-О (б) от температуры



В работах [14, 15] не указывается полный химический состав приведенного кремния, но поскольку реакционные компоненты находятся в газовом состоянии, можно предположить, что кремний получится достаточно чистым. Так как  $\text{SiCl}_4$  является побочным продуктом при процессе Siemens, то возможно данная технология найдет свое отражение и при промышленном производстве.

Металлургические способы рафинирования кремния имеют более разнонаправленные схемы очистки, среди которых — первичная обработка кварцитов, рафинирование металлургического кремния в ковше, а при непосредственном выращивании профилированных слитков — продувка газовыми реагентами, обработка шлаками, вакуумирование, направленная кристаллизация.

#### Обработка расплава газовыми реагентами $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{O}_2$ .

Поскольку кремний является высокоактивным химическим элементом, он легко вступает во взаимодействие с кислородом, образуя летучий  $\text{SiO}$  и  $\text{SiO}_2$ . Но продувка расплава кислородом и парами воды приводит к окислению и других элементов (рис. 3). Кремний  $\text{SiO}_2$  во всем температурном интервале имеет химическое сродство к кислороду большее, чем бор  $\text{B}_2\text{O}_3$ . При более высоких значениях температуры (более 2300 К) линии пересекаются, но это требует значительного перегрева, которого можно достичь при электронно-лучевом или плазменно-дуговом переплаве [16–19]. В этом процессе аргон выполняет роль газа-носителя, хотя при продувке в ковше также интенсифицирует процесс перемешивания. При попадании влаги и кислорода в кремний образуются многочисленные газообразные соединения с бором (В-О и В-Н-О). Причем давление паров соединений  $\text{B}_x\text{H}_y\text{O}_z$  выше, чем у оксидов бора, что позволяет эффективнее удалять бор из расплава кремния в ходе вакуумирования. В процессе реакции наиболее легко образуются соединения  $\text{B}_3\text{H}_3\text{O}_3$  и  $\text{BHO}$ . Однако исследование парци-

ального давления показало его самое высокое значение у соединения  $\text{B}_3\text{H}_3\text{O}_6$ . Вообще для гидроксидов бора, в отличие от оксидов бора, характерно снижение парциального давления при повышении температуры (рис. 4). Рафинирование кремния газовыми смесями Н-О, активированными в плазме, могут эффективно применяться для удаления менее 1 ppmw бора при небольшом перегреве и интенсивном перемешивании расплава.

На первых стадиях обработки кремния в ковше также можно осуществлять продувку металлургического кремния, при этом возможна очистка не только от бора, но и от металлов, которые переходят в шлак [20].

#### Рафинирование кремния расплавами системы $\text{CaO-SiO}_2$ .

Суть способа заключается в возможности очистки кремния от бора путем окисления его и ассимиляции оксида  $\text{B}_2\text{O}_3$  расплавами на основе  $\text{CaO-SiO}_2$ . Дополнительными компонентами такой шлаковой системы могут выступать  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . Причем  $\text{CaF}_2$  применяется как регулирующий компонент для снижения вязкости и температуры шлака. Наличие  $\text{CaF}_2$  в трехкомпонентном расплаве сопровождается образованием летучего фторида кремния  $\text{SiF}_4$ . Использование 10 %  $\text{Na}_2\text{O}$  позволило получить коэффициент распределения бора в системе кремний-шлак примерно 2,2 [21, 22].

В целом проведенные исследования с использованием таких шлаковых систем показывают возможность уменьшения концентрации бора в кремнии. Однако для изотермического рафинирования металлургического кремния шлаками требуются значительные затраты времени и энергии.

Норвежская компания ELKEM предложила технологию, в которой металлургический кремний, полученный карботермическим способом из особо чистых кварцитов, переплавляли под шлаком и подвергали химическому выщелачиванию ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HF}$ ). Далее из полученного блока выплавляли поликристаллический слиток, из которого изготавливали пластины с максимальной эффективностью 15... 16 % [23]. Однако такая многостадийность процесса делает их слабо конкурентоспособными.

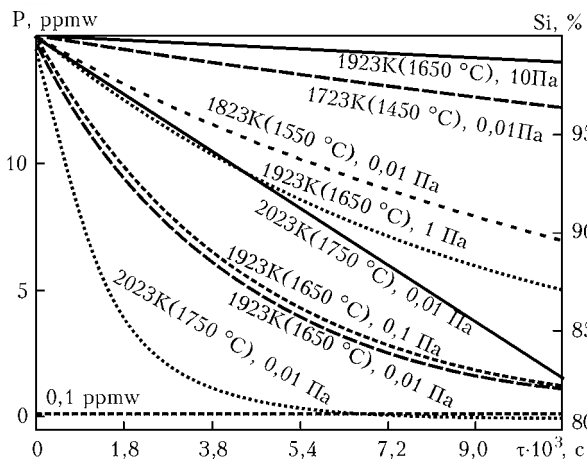


Рис. 5. Зависимость концентрации фосфора при различных значениях давления и температуры от времени выдержки  $\tau$

Рафинирование от самых вредных примесей (бор и фосфор) необходимо осуществлять на заключительных стадиях выплавки слитка. И если для удаления бора иногда требуются дополнительные компоненты, то для фосфора достаточно вакуумирования, что особенно эффективно происходит с повышением температуры расплава (рис. 5). Однако при глубоком вакууме и высокой температуре увеличиваются потери кремния [24].

Проведенный анализ показал, что в данное время альтернативной и эффективной технологии очистки металлургического кремния до уровня «солнечного» качества в мире нет. Однако эффективность водородно-силановых технологий также не обеспечивает необходимую себестоимость изготавливаемых ФЭП. Начатые работы по прямому рафинированию металлургического кремния показали свою принципиальную перспективность, но еще нет достаточных инвестиций в развитие таких разработок и серьезного промышленного внедрения. Дальнейшие исследования, безусловно, приведут к оптимизации технологических процессов очистки кремния и удешевлению конечной продукции.

Особенностью электронной промышленности является особая культура производства, направленная на сокращение продолжительности обработки и хранения материалов, минимализацию транспортировки, повышение чистоты помещений, создание прецизионного оборудования, повышение квалификации персонала и, самое главное, получение высокочистых материалов.

В настоящее время в развитых странах получением кремния и конечного продукта (ФЭП, микроэлектроника) занимаются большие корпорации с полным циклом производства, даже если заводы находятся в разных странах. Поэтому наладка полного и современного производства кремния в Украине позволит нам остаться на уровне технологически высокоразвитого государства и даст огромный задел для развития в будущем.

1. *Control of metal impurities in «dirty» multicrystalline silicon for solar cells* // A. A. Istratov, T. Buonassisi, M. D. Pickett et al. // *Materials Sci. and Engineering B* 134. — 2006. — P. 282–286.

2. *Сташевский М.* Мы будем делать кремний // *The Chemical J.* — 2008. — Сент. — С. 22–28.

3. *Tronstad R.* Elkem Solar — Ground-breaking technology for cost leadership (<http://hugin.info/111/R/1347406/323949.pdf>).

4. *Нагорный С. Л., Критская Т. В., Шварцман Л. Я.* Повышенные требования к технологическим схемам при получении кремния солнечной чистоты // *Металлургия.* — 2009. — № 19. — С. 72–81.

5. *Гасик М. И., Гасик М. М.* Электротермия кремния. — Днепропетровск: НМАУ, 2011. — 487 с.

6. *Иванов-Есипович Н. К.* Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Высш. шк., 1979. — 205 с.

7. *Bathey B. R., Cretella M. C.* Review Solar-grade silicon // *J. of materials science.* — 1982. — № 17. — P. 3077–3096.

8. *Рейви К.* Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 475 с.

9. *Lynch D.* Winning the Global Race for Solar Silicon // *JOM.* — 2009. — № 11. — P. 41–48.

10. *Lemke H.* Substitutional transition metal defects in silicon grown-in by the float zone technique // *Material science forum.* — 1995. — Vol. 196-201. — P. 683–688.

11. *Impurities in silicon solar cells* / Davis J. R., Rohatgi A., Hopkins R. H. et al. // *IEEE Trans. Electr. Dev.*, vol. ED 27. — 1980. — № 4. — P. 677–687.

12. *Кремний для солнечной энергетики: конкуренция технологий, влияние рынка, проблемы развития* // В. Н. Яркин, О. А. Кисарин, Ю. В. Реков, И. Ф. Червонный // *Теория и практика металлургии.* — 2010. — № 1-2. — С. 114–126.

13. *Соловьев О. В., Масенко Б. П., Хлопенова И. А.* Способ электродугового восстановления кремния // *Технологии и конструирование в электронной аппаратуре.* — 2005. — № 4. — С. 60–61.

14. *Парфенов О. Г., Пашков Г. Л.* Новый подход в металлургии кремния // *ДАН.* — 2008. — 422, № 2. — С. 202–203.

15. *Kouji Yasuda, Kunio Saegusa, Toru H. Okabe.* New method for production of solar-grade silicon by subhalide reduction // *Materials Transactions.* — 2009. — 50, № 12. — P. 2873–2878.

16. *Boron removal from metallurgical grade silicon by oxidizing refining* / Wu Ji-Jun, Ma Wen-Hui, Yang Bin et al. // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* — 2009. — № 19. — P. 463–467.

17. *Boron removal in molten silicon by a steam-added plasma melting method* / Naomichi Nakamura, Hiroyuki Baba, Yasuhiko Sakaguchi, Yoshiei Kato // *Materials Transactions.* — 2004. — 45, № 3. — P. 858–864.

18. *Purification of metallurgical grade silicon by a solar process* / G. Flamanta, V. Kurtcuoglu, J. Murray, A. Steinfel // *Solar Energy Materials & Solar Cells.* — 2006. — № 90. — P. 2099–2106.

19. *Plasma-refining process to provide solar-grade silicon* / Y. Delanoy, C. Alemany, K.-I. Li et al. // *Ibid.* — 2002. — № 72. — P. 69–75.

20. *Елисеев И. А., Непомнящих А. И.* Новая технология рафинирования кремния: Тез. докл. VII Междунар. конф. «КРЕМНИЙ-2010» (Нижегород, 6–9 июля 2010 г.) ([www.si-2010.unn.ru/docs/presentations/07.07.2010/4\\_Елисеев.pptx](http://www.si-2010.unn.ru/docs/presentations/07.07.2010/4_Елисеев.pptx)).

21. *L. A. V. Teixeira, Y. Tokuda, T. Ylko, K. Morita.* Behavior and state of boron in CaO–SiO<sub>2</sub> slags during refining of solar grade silico // *ISIJ Intern.* — 2009. — 49, № 6. — P. 777–782.

22. *Teixeira L. A. V., K. Morita.* Removal of boron from molten silicon using CaO–SiO<sub>2</sub> based slags // *Ibid.* — 2009. — 49, № 6. — P. 783–787.

23. *Compensated sog-si from a metallurgical route: high latitude outdoor performance* / G. H. Yordanov, O. M. Midtgard, T. O. Saetre et al. // *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: 5th World conf. on Photovoltaic Energy Conversion (Valencia, 6–10 Sept. 2010).* — Valencia, Spain. — P. 4289–4293.

24. *Numerical simulation of phosphorus removal from silicon by induction vacuum refining* / Songsheng Zheng, Thorvald Abel Engh, Merete Tangstad, Xue-Tao Luo // *Metallurgical and materials transactions A.* — 2011. — № 42A. — P. 2214–2225.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 26.06.2012