

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.315.592.669

Новые технологии получения поликристаллического кремния для солнечной энергетики

Б.Г.Грибов, К.В.Зиновьев

НИИ особо чистых материалов (г. Москва)

Рассмотрены проблемы производства поликристаллического кремния для солнечных элементов в настоящее время и в обозримом будущем. Представлены новые прогрессивные технологии, которые уже реализованы в опытном производстве, а также некоторые оригинальные разработки последнего времени. В частности, очень перспективным для получения высокочистого кремния является процесс восстановления оксидов кремния в газовой фазе.

В последние годы солнечная энергетика бурно развивается. Темпы ежегодного роста мирового производства солнечных модулей превышают 20%, и эта тенденция сохранится на ближайшие годы. Сырьем для солнечной энергетики служили, как правило, отходы производства электронного кремния, но в последнее время этих отходов уже не хватало, так как темпы роста производства солнечной энергетики значительно выше, чем электроники. Дефицит кремния покрывался за счет резервных мощностей, имевшихся у производителей поликристаллического кремния для электроники. Кремний для солнечных элементов производился по упрощенной трихлорсилановой технологии (с исключением одной или нескольких стадий очистки). Далее сложилась ситуация, когда и резервных мощностей по выпуску электронного кремния уже не хватало, а спрос на поликристаллический кремний для солнечной энергетики намного превысил предложение.

Современное состояние развития производства поликристаллического кремния, включая новые разработки, анализируется в работах [1, 2]. Основной проблемой в настоящее время является огромный дефицит поликремния, который привел к резкому скачку цен на него. Поэтому все основные производители поликремния на мировом рынке уже запланировали увеличение производства к 2010 году. Кроме того, появился ряд новых производителей поликремния, готовых внести заметный вклад в общий выпуск (до 25% и более). Прогнозируется 2–3-кратный рост объемов производства поликремния к 2010 г. и соответственно значительное сокращение дефицита солнечного кремния, однако спрос на солнечный поликремний еще долго будет превышать предложение. Предполагается, что цены на солнечный поликремний в ближайшие 5 лет сохранятся на уровне 100 евро за 1 кг и выше, что позволит производителям поликремния иметь высокую прибыль.

Основой производства солнечного поликремния останется трихлорсилановая технология, модифицированная для получения более дешевого продукта. Производство солнечного кремния по новым технологиям может составить более 15% от всего сол-

нечного кремния, планируемого к выпуску в 2010 г. Разработки новых технологий с целью создания производства дешевого поликристаллического кремния были начаты еще в 70-х гг., но до последнего времени в промышленном производстве не реализованы. Широкие исследования за рубежом и в России проводились в нескольких основных направлениях: восстановление или пиролиз летучих соединений кремния; рафинирование металлургического кремния; восстановление чистого кремнезема углеродом, металлами и другими реагентами. Эти основные направления достаточно подробно рассмотрены в работе [3], однако прогноз о наибольшей перспективности карботермического метода получения солнечного кремния подтвердился лишь частично. Реально происходит интенсивное развитие всех трех направлений, а растущий дефицит кремния является стимулом для новых разработок, направленных на сокращение расхода кремния в солнечной энергетике. В настоящей работе рассматриваются некоторые новые перспективные технологии, реализующиеся в опытном производстве, а также оригинальные разработки, которые потенциально могут существенно снизить затраты в производстве солнечного кремния.

Хлорсилановые технологии. В настоящее время поликристаллический кремний «электронного» и «солнечного» качества получают в основном по одной технологической схеме с использованием типового промышленного оборудования, а удешевление производства солнечного кремния достигается за счет упрощения стадий очистки трихлорсилана, увеличения скорости осаждения кремния и снижения энергопотребления [1]. Компания «Wacker Chemie» разработала технологию получения гранул кремния солнечного качества, используя реакцию восстановления трихлорсилана в реакторе с кипящим слоем [4, 5]. Выход завода на многотоннажное производство планируется на 2008 г. Компания «Токуяма» разрабатывает технологию получения поликристаллического кремния, используя восстановление трихлорсилана при повышенной температуре (~1500 °C). Кремний осаждается на стенку трубчатого графитового реактора, плавится и стекая образует гранулы кремния. Скорость осаждения превышает обычную более чем на порядок, однако кремний содержит много углерода [6]. Промышленные испытания планировалось начать в 2006 г., а в 2009 г. будет создано новое производство объемом 5000 т/год.

Из других разработок последнего времени следует выделить те, которые предлагают использовать тетрагидрид кремния SiCl_4 для непосредственного получения поликристаллического кремния. Компания «Japan Solar Silicon» разработала пилотную технологию восстановления SiCl_4 парами цинка, ранее известную как «Batelle»-процесс. По этой технологии получены слитки солнечного кремния диаметром 150 мм и длиной 0,5 м. Планируется начать промышленное производство с октября 2009 г. Объем реализации оценивается в 400–2000 т/год [7].

Компания «City Solar AG» разрабатывает процесс получения поликремния из SiCl_4 по двум схемам [8]. По одной из них предлагается полимеризовать SiCl_4 в соединение типа $[\text{SiCl}_2]_n$ с последующим его пиролизом и осаждением высокочистого кремния. Другая схема – прямое восстановление SiCl_4 до кремния в водородной плазме, что может обеспечить высокую чистоту кремния при низкой себестоимости (~10 евро за 1 кг). Обе схемы прошли стадию лабораторных исследований, и в настоящее время разрабатывается оборудование для пилотного варианта технологии получения поликремния.

Бесхлорные силановые технологии. Известно несколько различных промышленных методов получения моносилана, но во всех так или иначе используются соединения хлора [9]. Исключением является бесхлорная алкоксисилановая технология (БАС-процесс) – получение триэтоксисилана реакцией металлургического кремния с этило-

вым спиртом на катализаторе с последующим его диспропорционированием и получением моносилана [10]. Алкоксисилановая технология экологически более безопасна, чем хлорсилановая (хлоридно-гидридная), так как все продукты промежуточных стадий не токсичны и не агрессивны.

В последнее время большой интерес представляют методы получения моносилана взаимодействием силицидов металлов с кислотами. Обычно сначала превращают диоксид кремния в силицид металла (магния или алюминия) с последующей обработкой минеральной или органической кислотой либо аммонийной солью [9, 11]. Исследуется также возможность прямого получения моносилана из кварцита (SiO_2) при действии гидридов лития [12]. Одним из важных направлений в разработке технологии получения моносилана следует считать эффективную утилизацию промышленных отходов. В работе [13] предложено использовать различные силикатные шлаки для алюмотермического восстановления с получением кремнийсодержащих сплавов. При обработке последних кислотой получен моносилан с хорошим выходом.

Технология осаждения поликристаллического кремния из моносилана также непрерывно совершенствуется для повышения качества продукции и снижения себестоимости. Наиболее перспективным является процесс получения поликремния в реакторах типа «кипящий слой» из газовой фазы SiH_4 . Компания «МЕМС» (США) разработала и начала промышленное использование процесса получения гранул поликремния в реакторе с псевдоожиженным слоем, где моносилан разлагается при температуре около $800\text{ }^\circ\text{C}$ с образованием гранул диаметром 1–2 мм [1]. В 2003 г. Solar World AG и Degussa создали совместное предприятие «Joint Solar Silicon GmbH» для производства поликремния методом разложения моносилана и осаждения его на разогретые стенки кремниевых труб [6]. Была разработана также технология механического уплотнения порошка осажденного кремния в 10 раз для облегчения последующих операций с этим продуктом. Для более эффективного использования порошкового кремния исследуется возможность изготовления пластин из него методами порошковой технологии. Показано, что такой процесс позволяет получать пластины поликремния требуемой формы и текстуры поверхности [14].

Рафинирование металлургического кремния. Технология получения солнечного кремния рафинированием металлургического уже достигла уровня, требуемого для промышленного выпуска. В настоящее время лидерами этого направления являются четыре фирмы (таблица), которые готовы к полупромышленной стадии освоения. Еще не менее трех компаний находятся в стадии пилотного производства и, вероятно, более пяти – в стадии лабораторной разработки. Круг производителей солнечного кремния по данной технологии быстро расширяется.

Производители солнечного кремния рафинированием металлургического по состоянию на 2007 г.

Компания (страна)	Производительность, т/год; стадия освоения	Планы (т/год)	Время реализации
«Japan Ferrous Engineering» (Япония)	100; полупромышленная	800–1000	2007 г.
«Elkem Solar AS» (Норвегия)	100–250; полупромышленная	5000	2008 г.
«Dow Corning Solar» (США, Бразилия)	1000; полупромышленная	5000	2010 г.
«Bescancour Silicon Inc.» (Канада)	150; полупромышленная	4000	до 2010 г.

Основой технологии получения солнечного кремния из металлургического являются методы рафинирования кремния в конденсированной фазе. Методы пиро- и гидрометаллургии используются в определенной последовательности применительно к характеристикам исходного кремния.

Все эти методы хорошо известны и подробно описаны в работе [3]. Что касается технологических процессов рафинирования металлургического кремния, разработанных ведущими фирмами, то сообщается только о последовательности операций. Более детальные сведения о технологии рафинирования «Japan Ferrous Engineering» можно найти в ранее опубликованной работе [15]. О разработках других фирм, указанных в таблице, известно гораздо меньше.

Исходный кремний, предназначенный для рафинирования до солнечного качества, должен иметь повышенную чистоту 99,3–99,9 вес.% с минимальным содержанием бора и фосфора. Солнечный кремний, полученный по технологии рафинирования металлургического кремния, отличается по некоторым характеристикам от кремния, полученного по силановым технологиям, однако он пригоден для солнечной энергетики. Сообщается, что на этом солнечном кремнии удастся получать фотоэлектрические преобразователи с КПД 14–16%. В настоящее время идут полупромышленные испытания таких преобразователей [2].

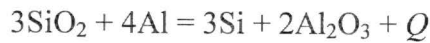
До 2010 г. солнечный поликремний, произведенный из металлургического, составит по осторожным аналитическим оценкам около 6% от всего объема солнечного поликремния [2]. В количественном выражении это соответствует 3000 т, что свидетельствует уже о создании новой технологии получения солнечного кремния в промышленных масштабах. Ориентировочная себестоимость солнечного кремния, полученного по новой технологии, планируется на уровне 20 евро за 1 кг при объеме производства около 1000 т/год.

Восстановление чистого диоксида кремния. В промышленном производстве металлургического кремния обычно используют классический вариант восстановления SiO_2 углеродом в рудно-термических печах. Этот вариант карботермического процесса обеспечивает получение достаточно дешевого кремния, когда не предъявляются повышенных требований к чистоте продукта восстановительной плавки. До настоящего времени проводятся исследования с целью применить такой карботермический процесс для получения высокочистого кремния с последующей финишной очисткой (рафинированием) до солнечного качества [3]. Реализовать эту технологию прямого карботермического восстановления чистого SiO_2 в производстве пока не удалось. Это может быть связано с тем, что процесс восстановления SiO_2 до кремния проходит в несколько стадий, причем в рудно-термической печи одновременно идет ряд реакций на разных горизонтах, т.е. в разных слоях садки [16]. Управлять процессом в такой системе затруднительно, в процессе плавки имеют место потери кремния в виде SiO и паров Si . При использовании очень чистых исходных компонентов процесс может оказаться невыгодным экономически.

Альтернативой классическому карботермическому процессу являются варианты двухстадийного карботермического процесса. В работе [17] предлагается использовать конструкцию шахтной дуговой печи, где имеется четкое разделение зон образования SiO , SiC и кремния по температуре. В работах [18, 19] сообщается о разработке так называемого карбидного метода получения высокочистого кремния: на первой стадии осуществляется синтез высокоактивного SiC в оптимальных условиях в кварцевых или

графитовых тиглях, на второй стадии производится выплавка металлургического кремния. Методом плазменного рафинирования металлургического кремния от примесей, особенно углерода, можно получить кремний солнечного качества. Такая технология уже реализована в пилотном варианте фирмой «Solsilc Development Co.» (Нидерланды) и первая опытно-промышленная партия объемом около 100 т планировалась на конец 2007 г. [20]. Это может означать, что наиболее перспективны для реализации в производстве технологические процессы, которые проводятся постадийно в оптимальных условиях для каждой стадии, в том числе и в отдельных реакторах для каждой стадии.

Существуют еще несколько вариантов восстановления SiO_2 металлами, в частности магнием, алюминием, цинком и др. Наиболее целесообразно использовать вариант восстановления диоксида кремния алюминием, поскольку при горении алюминия выделяется тепла гораздо больше, чем при сжигании других металлов. Получение кремния происходит по реакции



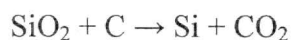
с выделением тепла. Когда реакция идет в ограниченном объеме, температура смеси быстро поднимается выше 2000°C . При этом полученный кремний расплавляется, а Al_2O_3 в виде шлака всплывает на поверхность. В работе [21] приведены результаты исследований получения кремния методом алюминотермического восстановления кремнезема в силикатных шлаках – отходах фосфорной промышленности с последующей гидрохимической очисткой металлургического кремния. Полученный кремний может служить исходным материалом для его превращения в солнечный кремний после финишной очистки.

Газофазное восстановление чистого диоксида кремния. В последнее время появились сообщения о возможности газофазного восстановления SiO_2 для получения солнечного кремния. Этот вариант представляет большой интерес, если использовать в качестве газообразного восстановителя чистый водород. В работе [22] рассматривается возможность восстановления кварцитов водородом и смесью водорода с углеводородами при температурах выше 2500°C . Восстановление в газовых смесях происходит при более низкой температуре, чем при использовании чистого водорода, но при этом возможно образование карбида кремния и углерода, загрязняющих конечный продукт. Варьируя температуру и состав газовой смеси (С/Н), можно найти оптимальные условия образования чистого кремния.

Реакция восстановления SiO_2 проходит, как правило, в две стадии – сначала до SiO с переводом его в газовую фазу, а затем газообразный монооксид восстанавливается до кремния. Монооксид кремния обладает высокой летучестью, парциальное давление паров SiO составляет (в мм рт. ст.): 2,1 при 1300°C ; 9,1 при 1440°C и 36,4 при 1580°C [23]. Летучесть SiO позволяет отделить его от ряда примесей, так как они имеют значительно меньшую летучесть [24]. Если затем при восстановлении SiO использовать очень чистый восстановитель (водород), то получаемый кремний будет иметь чистоту более высокую, чем исходный SiO_2 . Сопоставление парциальных давлений SiO и примесей при оптимальной температуре восстановления до SiO (1900°C) показывает, что степень очистки по большинству примесей может достигать $1 \cdot 10^{-3}$ и более. Таким образом, процесс восстановления SiO_2 через монооксид кремния позволяет совместить получение кремния с его дистилляционной очисткой от примесей.

Для получения монооксида кремния из кремнезема используют наряду с газообразными восстановителями также углеродную сажу или металлургический кремний [24, 25–28]. С целью повышения выхода SiO в реакции процесс проводят обычно при высоких температурах (до 2000 °С) или в электродуговой плазме. Полученный газообразный монооксид кремния может быть осажден при температурах ниже 800 °С в специальной камере с фильтром для сбора SiO. Конденсат представляет собой рыхлый порошок желто-коричневого цвета с очень малой кажущейся плотностью [29]. Он находит применение при изготовлении керамики [25] и в некоторых других областях [26]. При использовании в качестве промежуточного продукта для получения чистого кремния порошок SiO снова переводится в газовую фазу (при температуре выше 1300 °С) и восстанавливается до кремния.

В качестве восстановителей для монооксида кремния могут служить углерод и карбид кремния [27, 28], водород и водород-углеводородные смеси [22, 24]. Источником тепловой энергии, необходимой для протекания реакции, является индукционный нагрев или электродуговая плазма. Восстановление SiO происходит при температурах 1700–1900 °С и выше. Из имеющихся публикаций по этой проблеме не вполне ясно, в какой форме и с каким выходом получается кремний, а также какова его чистота по лимитирующим примесям. Нами [30] проведена работа по получению кремния из кварцитов по следующей схеме:



Эксперименты выполнялись с использованием углеродной сажи в качестве восстановителя на первой стадии. Кварциты высокой чистоты смешивались с сажой и нагревались до высокой температуры в вакууме и в токе аргона. При нагревании в вакууме до температуры 1300–1500 °С давление в системе изменялось от 10^{-3} до 1 мм рт. ст., но требовалось длительное время (несколько часов) для получения SiO. При нагревании до 1700 °С в аргоне (при атмосферном давлении) процесс образования SiO проходил очень интенсивно, но полученный монооксид загрязнялся сажой. Вообще использование сажи в таких процессах требует ее специальной обработки и, по-видимому, только усложняет процесс. Вторая стадия – восстановление SiO – выполнялась в атмосфере водорода при температуре до 1700 °С.

Проводились также эксперименты по восстановлению кремния из кварцевого сырья водородом в плазменном реакторе. В качестве источника тепла использовалась электрическая дуга постоянного тока. Исследовались два варианта образования монооксида кремния – взаимодействие кварцевой крупки с порошком технического кремния в атмосфере водорода и восстановление кварцевой крупки чистым водородом. В обоих вариантах исходные материалы быстро перерабатывались в SiO, который осаждался на фильтре-приемнике. Это доказывало, что первая стадия восстановления происходит успешно. Для проведения второй стадии был выбран вариант, когда газообразный монооксид сразу подавался на восстановление водородом в дуговом реакторе (без промежуточной конденсации).

Известно, что в среде водорода скорость газификации кремнезема самая высокая и в 6 раз выше, чем в среде аргона [31]. Водороду отводится роль агента, связывающего

кислород. Опыт показывает, что химическая активность водорода сильно повышается, когда реагируют не молекулы, а атомы (H) [32]. Атомарный водород в газообразном состоянии намного активнее молекулярного. Заметная термическая диссоциация водорода начинает идти с 2000 °С и быстро растет с повышением температуры. Благоприятно на развал молекулы H₂ действует электрический разряд, а также излучение с длинами волн менее 850 Å, что имеет место при горении дуги. Для увеличения выхода кремния в реакции восстановления SiO₂ нами применялась активация водорода в электрическом разряде.

Литература

1. **Заддэ В.В., Наумов А.В.** Трихлорсилан и Солнце // *The Chemical Journal*. – 2006. – № 3. – С. 44–48.
2. **Наумов А.В.** Еще раз о развитии солнечной энергетики и рынке кремниевого сырья с 2007–2010 гг. // Тез. докл. IV Российской конф. с междунар. участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологии получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе «Кремний – 2007». – М., 2007. – С. 46–50.
3. **Грибов Б.Г., Зиновьев К.В.** Получение высокочистого кремния для солнечных элементов // *Неорганические материалы*. – 2003. – Т. 39, № 7. – С. 775–785.
4. Pilot production of granular polysilicon from trichlorosilane using a fluidized bed-type reactor / **D.Weidhaus, E.Schindlbeck, K.Hesse et al.** // 20-th Europ (PVSEC). – 2005. – P. 565–568.
5. Пат. США №7029632. Radiation – heated fluidized-bed reactor. Weidhaus D. et al. (Wacker Chemie), 2006.
6. New Process for cost effective Solar Grade Silicon from silane / **A.Muller, R.Sonnenschein, T. Sill et al.** // 20-th Europ (PVSEC). – 2005. – P. 623–626.
7. Masatsugu Yamaguchi. Polysilicon manufacturing implementing the reduction of silicon tetrachloride with zinc vapor: a very uncommon approach from shisso // 4-th Solar Silicon conference. – Munich, 2007. – С. 78–85.
8. **Kreutzmann A.** Yellow is the color of hope // *Photon International*. – 2006. – № 9. – С. 66–70.
9. Моносилан в технологии полупроводниковых материалов **Е.П.Белов, Е.Н.Лебедев, Ю.П. Григораш и др.** / М.: НИИТЭХИМ, 1989. – 72 с.
10. Бесхлорная алкоксисилановая технология получения полупроводникового кремния / **Е.П.Белов, В.Г.Герливанов, С.И.Клещевникова и др.** // Тр. междунар. конгресса «Бизнес и инвестиции в области возобновляемых источников энергии в России». – М., 1999. – С. 226–236.
11. Исследование взаимодействия силицидов лития с кислотами для получения моносилана / **В.В.Соколов, Л.Н.Трушникова, А.П. Зубарева и др.** // *Материалы электронной техники*. – 2003. – № 3. – С. 22–25.
12. Процессы взаимодействия гидрида лития с двуокисью кремния / **А.А.Камарзин, Ю.М.Зеленин, В.И. Лаврентьев и др.** // *Материалы электронной техники*. – 2001. – № 2. – С. 16–19.
13. **Тамендаров М.Ф.** Новый способ получения силана для производства солнечного кремния // Тез. докл. I Российской конф. «Кремний-2003». – М., 2003. – С. 366.
14. Production of polycrystalline silicon sheet with different shapes by sintering of silicon powders / **A.Derbouz Draona, A.Straboni, A.M.Archambault et al.** // 20-th Europ. PVSEC. – 2005. – P. 1474–1477.
15. Development of NEDO melt-purification process of solar-grade silicon / **N.Yuge, M.Abe, K.Hanazawa et al.** // *Techn. Dig. Int. PVSEC*, 1999. – 22A1. – P. 115–118.
16. **Катков О.М.** Выплавка технического кремния. – Иркутск: Изд-во ИПУ, 1997. – 243 с.
17. Production of Solar grade silicon by carbothermic reduction of high purity silica / **F.Aratani, Y.Sakaguchi, N.Yuge et al.** // *Bull. Jpn. Inst. Metals*, 1991. – Vol. 30, № 5. – P. 433–435.
18. **Абдюханов И.М.** Разработка научных основ технологии производства металлургического кремния повышенной чистоты для наземной фотоэнергетики // *Российский хим. журнал*. – 2001. – Т. 45, № 5–6. – С. 107–111.
19. Solar grade-silicon by a direct route based on carbothermic reduction of silica: requirements and production technology / **L.J.Geerlings, G.P.Wyers, R. Yensen et al.** // 12-th NREL Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells, Materials and Processes. – 2002.

20. *Schmela M.* Mapping the silicon world // Photon International. – 2005. – № 5. – P. 24–35.
21. Получение кремния для фотоэнергетики из кремнийсодержащих отходов металлургической промышленности / *Х.А.Абдуллин, Б.А.Бекетов, Н.С. Бектурганов и др.* // Тез. докл. Совещания «Кремний-2004». – Иркутск, 2004. – С. 35.
22. *Демин В.Н., Титов А.А., Ващенко С.П., Кузнецов Ф.А.* О возможности газофазного восстановления кварцитов // Тез. докл. Совещания «Кремний-2004». – Иркутск, 2004. – С. 19.
23. *Ботвинкин О.К., Запорожский А.И.* Кварцевое стекло. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. – 235 с.
24. Пат. США №3010797. High purity elemental silicon / *R.S.Aries.* – 1961.
25. Пат. Японии №561235. Метод производства мелкодисперсного монооксида кремния / *T.Funahashi, K.Ueda, R.Uchimura, Y.Oguchi.* – 1990.
26. Плазменный процесс получения монооксида кремния / *И.Д.Кулагин, В.К.Любимов, К.Г.Марин и др.* // Физика и химия обработки материалов, 1967. – № 2. – С. 36–41.
27. Пат. ЕР 0329803 31. Method and apparatus for preparing high-purity metallic silicon / *F.Aratani, T.Fukutake.* – 1993.
28. Пат. РФ №21737386. Способ получения мульти- и монокристаллического кремния / *А.М.Прохоров, Г.Н.Петров, Н.А. Калужский и др.* – 1999.
29. *Леко В.К., Мазурин О.В.* Свойства кварцевого стекла. – Л.: Наука, 1985. – 148 с.
30. Решение о выдаче пат. РФ по заявке №2006130023/15 (032646). Способ получения кремния высокой чистоты / *В.Д.Афанасьев, Б.Г.Грибов, К.В.Зиновьев и др.* – 2006.
31. Кинетика газификации кремнезема в различных условиях / *Г.Г.Папин, И.В.Рябчиков, Н.М. Деханов и др.* // Докл. АН СССР. Химическая технология. – 1971. – Т.196, № 5. – С. 1156–1158.
32. *Некрасов Б.В.* Основы общей химии. – 3-е. изд. – М.: Химия, 1974. – Т. 1. – 656 с.

Статья поступила
14 февраля 2008 г.

Грибов Борис Георгиевич – доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН, генеральный директор ОАО «НИИ особо чистых материалов» (г. Москва). *Область научных интересов:* электронное материаловедение – исследование, получение и применение особо чистых материалов в электронике.

Зиновьев Константин Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «НИИ особо чистых материалов» (г. Москва). *Область научных интересов:* химия и технология полупроводниковых материалов для изготовления фотоэлектрических преобразователей.

**Информация для читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Вы можете оформить подписку на журнал по каталогу «Газеты, журналы» Агентства «Роспечать» в любом почтовом отделении связи.

**Подписной индекс
47570**