

А. В. НАУМОВ

Россия, ООО «КВАР»

Перепечатано из журнала «Известия вузов. Материалы электронной техники», № 1`2007

## ЕЩЕ РАЗ О РАЗВИТИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РЫНКЕ КРЕМНИЕВОГО СЫРЬЯ В 2007—2010 гг.

*На основе публикаций последних лет продолжен (см. Наумов А. В. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2006, № 4, с. 3—8) обзор современных планов производства фотоэлектрических преобразователей, рассмотрены разные возможные сценарии развития отрасли до 2010 г.*

За последние два года кардинально изменилось положение в солнечной энергетике. В 2005 г. произведено фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) суммарной мощностью 1656 МВт (в том числе 1500 МВт на кремнии, 165 МВт на других материалах; рост объема производства составил 30 % по отношению к 2004 г.). В 2006 г. произведено 2400 МВт (рост производства — 45 %). После 2004—2005 гг. солнечная индустрия стала развиваться быстрыми темпами. Общий валовой доход отрасли (с учетом внутриотраслевых продаж) в 2005 г. составил ~12 млрд. дол. США, а общая условно чистая (до уплаты налогов) прибыль — ~2,7 млрд. дол. США. В 2006 г. общий валовой доход составил ~19 млрд. дол. США, а условно чистая прибыль — ~5,7 млрд. дол. США.

Следствием этого бума явился сохраняющийся до настоящего времени дефицит исходного сырья для производства фотоэлектрических преобразователей — поликристаллического кремния [1—4].

Данная работа является продолжением ранее опубликованной [5] и ставит целью рассмотрение разных сценариев развития солнечной энергетике на период 2007—2010 гг. Также предпринята попытка определения оптимальных сроков для реализации отечественных проектов развития производства поликристаллического кремния.

### Общие положения

Известно, что в настоящее время все произведенные ФЭП можно разделить на две категории:

- ФЭП на основе кристаллического Si — монокристаллические слитки кремния (~35 % всех ФЭП), мультикристаллические слитки кремния (~56 %) и ленты кремния (~4 %);
- ФЭП на основе прочих материалов — пленки α-Si, CdTe, CuInSe<sub>2</sub> (или CIS) ~5—8 % ФЭП.

Более чем на 90 % солнечная энергетика базируется на полупроводниковом кремнии и в силу этого является частью электронной промышленности, имея общую с ней базу в виде поликристаллического кремния («электронного» или «солнечного» качества). Удельный вес «солнечного» кремния в общем выпуске поликристаллического кремния растет, и, по-видимому, общая ситуация еще долго будет определяться наложением циклов потребления «электронного» и «солнечного» кремния.

Большинство прогнозов развития спроса и потребления на поликристаллический кремний до 2010—2011 гг. строится исходя из следующих факторов:

- ожидаемых темпов роста потребления электронного поликристаллического кремния;
- ожидаемых темпов роста потребления солнечного поликристаллического кремния;
- заявленных производителями темпов роста выпуска поликристаллического кремния.

На рис. 1 приведен типичный прогноз развития рынка [1]. Недостатком такого подхода является то, что нельзя ответить на вопрос: не будет ли тот прогнозируемый дисбаланс, который должен сохраниться в 2010—2011 гг., восполнен какими-либо иными способами? Например, снижением норм расхода на производство ФЭП на основе кристалли-

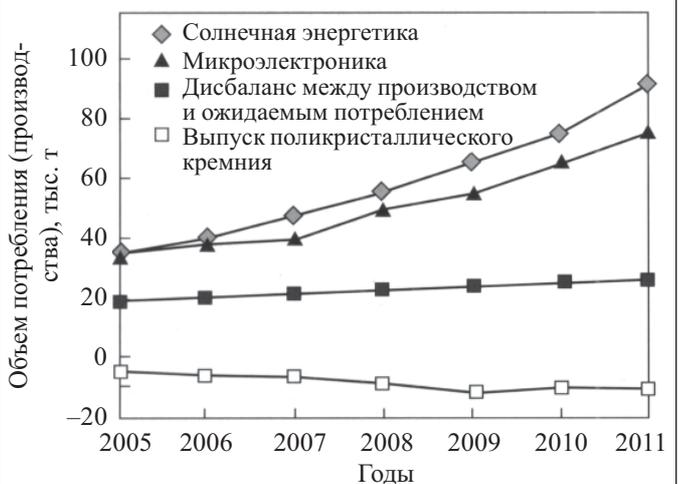


Рис. 1. Оценка развития потребности рынков электроники и солнечной энергетике и выпуска поликристаллического кремния (источник — SINTIF Materials, ECN)

ческого кремния, ростом производства ФЭП на основе иных материалов, появлением дополнительного количества кремния на рынке от новых производителей и пр. Если упомянутый дисбаланс будет восполнен такими источниками, то это означает, что рынок солнечной энергетики в целом окажется сбалансированным и цена на поликристаллический кремний пойдет вниз.

Поэтому, рассматривая возможные пути развития солнечной энергетики, необходимо также учесть следующее:

- рост предложения поликристаллического кремния из всех теоретически возможных источников;
- прогресс в области расхода кремния для ФЭП на кристаллической основе;
- перспективы развития других ФЭП (тонкопленочные на CdTe, CuInSe<sub>2</sub>, A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>).

Это позволит, оценив ожидаемый выпуск поликремния (солнечного и электронного) к 2010 г., рассчитать суммарный возможный выпуск ФЭП и сравнить эту величину с ранее достигнутой динамикой развития солнечной энергетики. Таким образом, косвенно можно будет оценить, останется ли рынок сырья несбалансированным или нет.

#### Динамика развития электронной промышленности и солнечной энергетики

*Оптимистичный взгляд.* Во-первых, если в период 2007—2010 гг. темп роста электронной промышленности будет превышать 15 % в год, то никаких усилий производителей поликристаллического кремния не хватит для того, чтобы удовлетворить этот темп и одновременно сохранить рост солнечной энергетики. Впрочем, электронная промышленность, вероятнее всего, вошла в фазу завершения очередного цикла развития, и этот вариант маловероятен. Кроме того, действие известного закона Мура, согласно которому число полевых транзисторов в интегральных схемах на единичный кристалл увеличивается экспоненциально со временем, удваиваясь каждые 2—3 года, приводит к тому, что потребление поликристаллического кремния для электроники растет медленнее, чем развитие самой электроники в целом [6].

Во-вторых, рынок солнечной энергетики, по мнению аналитиков [4], в период 2007—2010 гг. останется далеким от насыщения: сегодня общий спрос на ФЭП, производящие электрическую энергию по цене 3,50—4,50 дол. США/Вт, составляет 5,0 ГВт при производстве в 2006 г. ~2,4 ГВт. В 2008 г. ожидается спрос от 8,0 до 10,0 ГВт при ожидаемом производстве 5,0 ГВт. Перепроизводство рынку до 2010 г., вероятно, не грозит.

*Пессимистичный взгляд.* Существует вероятность того, что в 2007—2010 гг. и глобальная экономика, и электронная промышленность переживут спад. Если в рассматриваемый период произойдет резкий спад электронной промышленности, подобный спаду 1997 и 2001 гг., то на рынке солнечного поликристаллического кремния появится предложение материала в количестве, достаточном для реализации любой динамики роста солнечной энергетики. Од-

нако в случае глобального спада электронной промышленности конечная продукция солнечной энергетики — солнечные станции — вряд ли найдет своих покупателей [2, 3, 5].

Все дальнейшие рассуждения исходят из умеренного прогноза развития электронной промышленности (главное снижение темпов роста до 3—4 % в год) и «оптимистического» прогноза развития солнечной энергетики (рост производства сдерживается только предложением сырья).

#### Рост выпуска поликристаллического кремния

Все существующие производители поликристаллического кремния — HEMLOCK, Wacker Chemie, MEMC (США и Италия), Tokuyama Soda и другие — объявили о планах существенного роста объемов выпуска. Если в 2005 г. (по разным данным) было произведено 30—34 тыс. т поликристаллического кремния, то к 2010 г. общий выпуск этого материала ожидается в пределах от 85 до 120 тыс. т (рост в ~2,7—3,5 раза). Различные варианты прогнозов роста производства поликристаллического кремния приведены на рис. 2 [7—9].

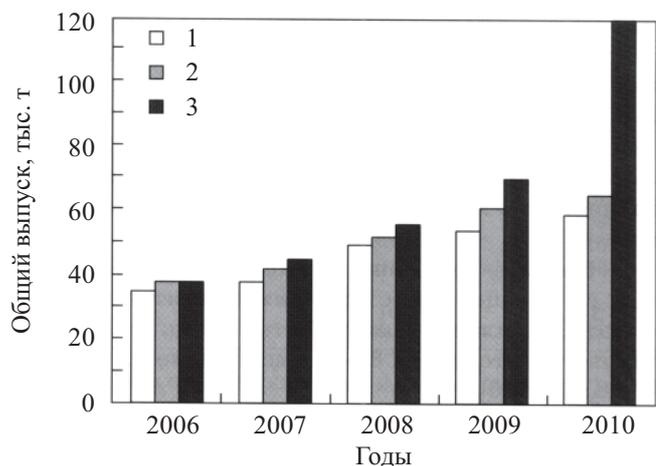


Рис. 2. Производство поликристаллического кремния в 2006 г. и прогноз до 2010 г.:

1 — пессимистичный прогноз; 2 — умеренный; 3 — оптимистичный

Пытаясь более точно определить ситуацию, очевидно, стоит учесть следующие соображения.

1. *Сырьевая база.* Для создания предприятия для выпуска поликристаллического кремния традиционными методами нужны только время (12—36 мес.) и деньги (250—500 млн. дол. США). Сырье для производства поликристаллического кремния — это кремний, который является вторым по распространенности элементом на Земле. Технический (металлургический) кремний ( $Si_{mg} > 98,5 \%$ ), получаемый восстановлением  $SiO_2$  углеродом по реакции  $SiO_2 + C \rightarrow Si_{mg} + CO_2$ , служит исходным сырьем.

Если принять, что к 2010 г. будет произведено по традиционным технологиям ~65—70 тыс. т поликристаллического кремния, то для обеспечения такого количества сырьем потребуется увеличить производство  $SiHCl_3$  (ТХС) в ~4—5 раз,  $SiH_4$  (МС) — в ~2—3 раза (предполагается, что ~70 % поли-

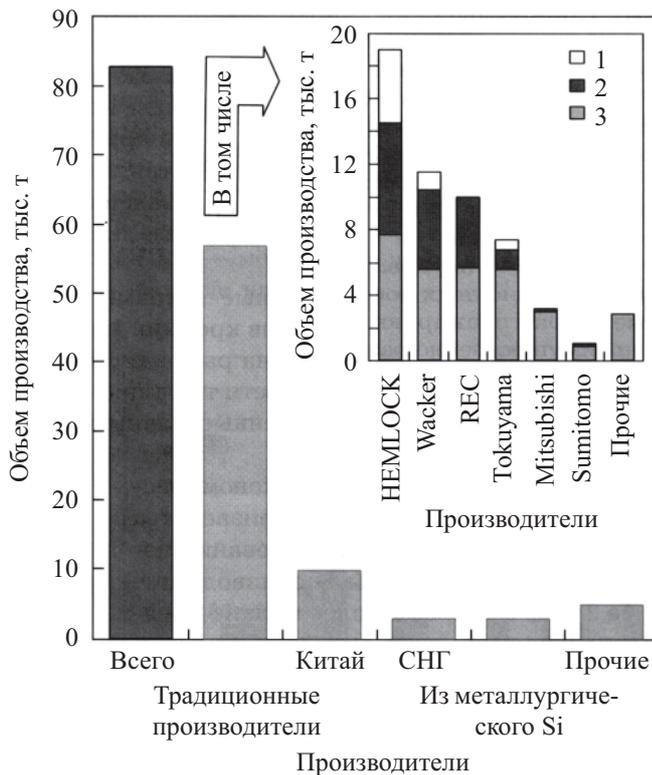


Рис. 3. Прогноз производства поликристаллического кремния к 2010 г. (по различным источникам): 1 — существующее производство; 2 — вводимое с 2008 г.; 3 — вводимое с 2010 г.

кристаллического кремния будет производиться водородным восстановлением ТХС, а ~30 % — пиролизом МС). Задача представляется вполне осуществимой, так как нет принципиальных трудностей для обеспечения сырьевой базой [5—7].

2. Традиционные производители и новые участники. Основным производителям поликремния из ТХС и МС — HEMLOCK, Wacker Chemie, MEMC, Tokuyama Soda, REC (SGS+ASiMi), Mitsubishi и другим — принадлежит сегодня ~90 % всего мирового рынка поликристаллического кремния. Согласно планам развития их производства (рис. 3, вставка), к 2010 г. основные производители выпустят ~57—60 тыс. т поликристаллического кремния. Эту цифру можно принять достаточно точной, так как речь идет о проектах высокой степени готовности.

Сложнее оценить, сколько поликремния новые производители добавят к этой величине к 2010 г.

Из возможных новых производителей поликристаллического кремния называют следующие страны:

— Китай — ожидания расходятся от 5 тыс. т к 2010 г., по оценкам сторонних аналитиков, до 14 тыс. т, по планам самого Китая (табл. 1). Представляется, что цифра 8—10 тыс. т является вполне реальной [5];

— страны СНГ — после того, как бум поликристаллического кремния стал очевиден для собственников химических и электронных производств, намечается ряд проектов по восстановлению старых производств (Подольский ХМЗ, ЗТМК, Донецкий ХМЗ, Таш-Кумырский ХМЗ), завершению уже начатых (г. Железнодорожск) или созданию новых. Так, немецкая фирма Folgat в 2006 г. получила разрешение Антимонопольного комитета Украины на создание консорциума по производству поликристаллического кремния на Украине. Представляется, что большая часть этих проектов будет завершена после 2010 г., для 2010 г. цифра 1—2 тыс. т является вполне реальной;

— прочие — неудовлетворенные темпами развития традиционных поставщиков кремния, многие новые игроки планируют выйти на рынок (используя преимущественно разновидности традиционных технологий). Некоторые объявленные планы приведены в табл. 2.

Таблица 1

Планы развития производства поликристаллического кремния в Китае до 2010 г.

Компания	Объем производства, т/год	
	1-я фаза	2-я фаза
Emei Semiconductor Materials (Emeishan)	100 (в 2005 г.)	220
China Silicon High-Tech Co. Ltd. (Luoyang)	300 (в 2005 г.)	3000
Sichuan Xingguang Silicon Technology (Leshan)	1000 (в 2005 г.)	3000
Ningxia Sunshine Silicon (Shizushan)	1000	4000
CSG Holding Co. (Yichang)	1500	4500
Yunnan Qujing Aixingui Ltd. (Qujing)	3000	10000
Suntech Power Co. Ltd. (Wanzhou)	3000	6000

Таблица 2

Новые проекты производства поликристаллического кремния в мире

Компания	Страна/Партнеры	Заявленная мощность, тыс. т	Примечание
Joint Solar Silicon GmbH	Германия/SolarWorld, Degusa	0,85 к 2008 г.	Технология — полунепрерывный пиролиз моносилана
Isofoton	Испания/Правительство, Endesa	2,5	—
DC Chemical	Корея/SunPower	3,0	Начало в 2008 г.
ARISE Technologies	Канада/Инвестиционные фонды	2,0 к 2010 г.	200 т — опытный проект в 2008 г.
Hoku Scientific	США/Инвестиционные фонды	1,5 к 2008 г.	Расположение — Сингапур
M. Setek	Япония/E-Top	3,0 к 2010 г.	—

Производители «солнечного» кремния из металлургического

Компания	Страна	Стадия готовности производства	Производительность, т/год		Время реализации, год
			на сегодня	плановая	
JFE Steel	Япония	Полупромышленная	100	800—1000	2007
ELKEM Solar	Норвегия	Полупромышленная	100—250	5000	2008
Dow Corning Solar Solutions	США	Полупромышленная	1000(?)	5000	2010
Scheuten Solar	Нидерланды	Опытная	—	—	2008
GT Equipment	США	Лабораторная	—	—	—
Solsilk Development Co.	Нидерланды	Лабораторная	—	100	2007
Solarvalue Production	Германия/Словения	Лабораторная	—	5000	2010

Видимо, смягчатся также экономические ограничения на масштаб производства поликремния. Право на существование получают не только гиганты, производящие свыше 2 тыс. т/год, но и более мелкие предприятия производительностью ~500 т/год. Ситуация осложняется тем, что производство поликристаллического кремния не продается «под ключ», поэтому новым производителям потребуется больше времени для пусковых работ, но можно предположить, что еще 3 тыс. т добавится от новых производителей.

3. *Производители солнечного кремния из металлургического.* Многолетние исследования возможности производства поликристаллического кремния солнечного качества непосредственно очисткой металлургического Si<sub>mg</sub>, минуя газовую фазу, стали переходить в опытно-промышленную стадию. В 2006 г. Dow Corning Solar Solutions Group объявила о разработке солнечного поликристаллического кремния из металлургического. Лидерами, видимо, останутся по-прежнему норвежское предприятие Elkem Solar AS и японская компания Japan Ferrous Engineering (JFE Steel, бывшая Kawasaki Steel). Elkem Solar, занимаясь проблемой с 1980 г., в 2004 г. получила кремний солнечного качества, произвела и исследовала ФЭП на мультикристаллических пластинах, в 2006 г. — на монокристаллических пластинах. В планах предприятия — в 2007 г. выйти на промышленное производство. JFE Steel, занимаясь проблемой с 1996 г., в 2001 г. выпустила первые 200 т солнечного поликристаллического кремния, с 2005 г. выпуск вырос до 800 т/год. Во всех случаях удалось получить ФЭП с КПД 14—16 %. В настоящее время идут полупромышленные испытания таких ФЭП. Объявленные планы приведены в табл. 3.

По-видимому, до 2010 г. нетрадиционный поликристаллический кремний не станет сколько-нибудь заметным источником сырья для солнечной энергетики, но 3 тыс. т даже осторожные аналитики принимают для расчетов [3, 4].

Таким образом, по оценкам, общее количество поликристаллического кремния, который будет произведен к 2010 г., составит ~75—80 тыс. т (рис. 3), из которых 25—30 тыс. т пойдут для электронной промышленности, а ~50 тыс. т — для солнечной [1—5].

### Прогресс в области использования монокристаллического кремния

Производители пластин, получаемых резкой монокристаллических слитков, выращенных по методу Чохральского, или мультикристаллических слитков, уменьшают толщину пластин при резке. Ожидается, что к 2010 г. большинство производителей достигнут уровня 220—240 мкм вместо ~300 мкм на сегодняшний день.

Производители пластин, полученных из лент кремния, оказались в более выигрышной позиции в условиях дефицита 2005—2006 гг. Выращенные из расплава ленты кремния толщиной ~300 мкм скрайбируют лазером на пластины, сразу пригодные для последующих операций формирования ФЭП, избегая операции резки слитка на пластины. Такие технологии требуют меньшего количества кремния (~60 % от традиционного). Ленты кремния наиболее часто выращивают следующими методами [10]:

- рост ленты кремния из расплава — рост ленты с краевой поддержкой, в котором роль боковых дендритов играют поддерживающие струны из другого материала («string ribbon»);

- рост полого многогранника кремния методом Степанова из расплава с помощью капиллярной фильеры (метод EFG — edge defined film fed growth).

Так, компания Evergreen Solar (США), использующая метод «string ribbon», достигла выпуска 50 МВт/год в 2006 г. Компания RWE Schott Solar, использующая EFG-метод, выращивает полые восьмигранники, которые режет на пластины. Компания произвела более 100 МВт/год пластин и модулей в 2006 г. Производители лент также опережающими темпами идут по пути снижения толщины вытягиваемых лент. Ожидается, что достигнутый на сегодня уровень 300 мкм снизится до 150 мкм уже в 2007 г. [4].

Увеличение удельного веса тонких кремниевых лент в общем выпуске пластин приведет к снижению «средней» толщины пластины с ~260 мкм в 2005 г. до 175 мкм в 2010 г. Это, наряду с другими факторами, приведет к снижению нормы расхода кремния на 1 Вт с 11,5 г/Вт в 2006 г. до 7,0 г/Вт к 2010 г. Если в 2005—2006 гг. снижение до этой величины ожидалось лишь в самых смелых прогнозах, то сегодня большинство экспертов считают расход кремния 7,0 г/Вт вполне достижимой величиной [3, 4].

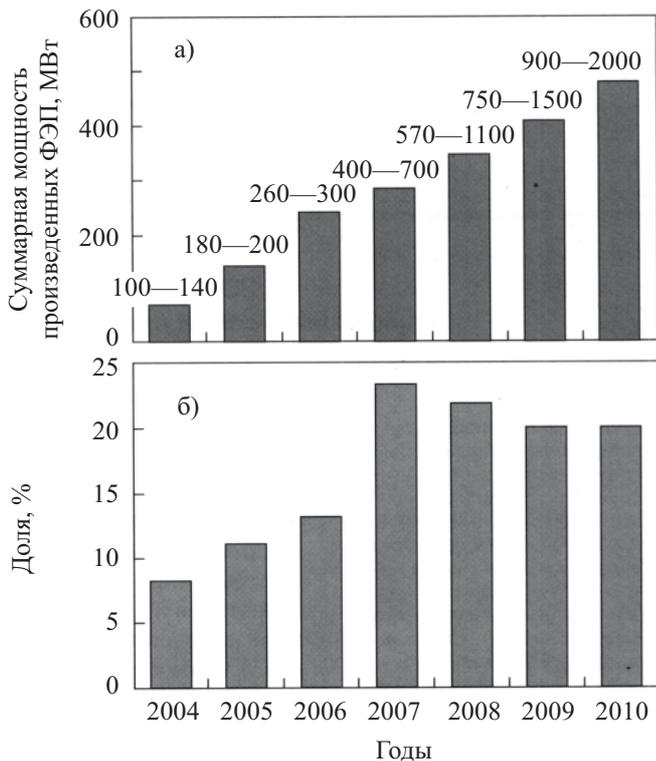


Рис. 4. Ожидаемая динамика производства ФЭП на прочих материалах (а) и доля этих приборов на общем «солнечном» рынке (б).

Источники — CLSA ASIA-Pasific Markets, Piper Jaffray Solar Ind.

### Перспективы использования других материалов

Производители ФЭП на основе других материалов (аморфный Si, CdTe, CuInSe<sub>2</sub>) в условиях дефицита кремния также получают шанс укрепить свои позиции. В первую очередь это фирмы: Bangkok Solar (Таиланд), Solar Cells Ltd. (Хорватия), выпускающие модули на аморфном кремнии; Wuth Solar (Германия) — модули на CuInSe<sub>2</sub>; First Solar (США) — модули на CdTe; Telecom STV (Россия) — модули на А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> с концентратором и другие.

В целом, по оценкам аналитиков [3, 4], производители ФЭП на некристаллической основе увеличат свои мощности (рис. 4, а). Так, в 2006 г. калифорнийская компания Nanosolar объявила об инвестировании 100 млн. дол. США в строительство завода по выпуску 200 млн. штук ФЭП в год общей мощностью 430 МВт на основе CuInSe<sub>2</sub>-технологии.

Это означает, что до сих пор крупнейший в мире завод компании Sharp, выпустивший в 2005 г. традиционных Si-ФЭП на 427,5 МВт, окажется на втором месте. Однако в общей картине солнечной индустрии доля новых материалов до 2010 г. существенно не вырастет (см. рис. 4, б) из-за опережающего роста традиционных ФЭП [6—8].

### Заключение

Представленный умеренно оптимистичный сценарий предполагает, что к 2010 г. из разных источников будет произведено 78—80 тыс. т поликристаллического кремния, из которых 27—30 тыс. т пойдет для электронной промышленности, а ~50 тыс. т — для солнечной, кроме того, ~10 % от электронной промышленности — в виде скрапа, т. е. ~3 тыс. т [2—4, 8].

Это, в свою очередь, означает, что из данного количества сырья при норме расхода кремния 7 г/Вт будет получено ФЭП суммарной мощностью ~7,5 ГВт. К этому добавится ~1,5 ГВт от ФЭП на основе других материалов, что составит в сумме 9,0 ГВт. Рост в 5,4 раза по сравнению с 2005 г. равен темпу роста солнечной энергетики за предыдущие 5 лет (с 2000 по 2005 гг. — в 5,7 раза). В таком случае ажиотажный спрос на сырье должен к 2010 г. заметно уменьшиться, хотя и после 2010 г. в целом рынок еще долго будет оставаться «рынком продавцов», т. е. рынком, где цены определяют производители поликристаллического кремния.

Для реализации отечественных проектов строительства или восстановления производства поликремния, видимо, оптимальным является период до ~2010—2011 гг.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. European Photovoltaic Projects 1999—2002 // Europ. Comm. Unit A-3. 2003. P. 194. (www.europa.eu.net).
2. Rogol M. // CLSA Asia-Pacific Markets. 2004. P. 76.
3. Rogol M. // Ibid. 2005. P. 85. (www.clsa.com).
4. Rogol M. // Ibid. 2006. P. 40. (www.photon.com).
5. Наумов А. В. // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. 2006. № 2. С. 29—35.
6. Двуреченский А. В. // Там же. 2006. № 2. С. 72—74.
7. Peter K., Kopecek R., Pernau T. et al. // Mater. 31 IEEE PVSC.— Lake Buena (Florida), 2005.— P. 152—156.
8. Mater. Third Solar Silicon Conf.— Munich (Germany), 2006.— P. 205.
9. Mater. «SEMICON».— Munich (Germany), 2006.— P. 157.
10. Sachs W. M., Ely D., Serdy J. // J. Crystal Growth. 1987. N 82. P. 117—125.

### НОВЫЕ КНИГИ

#### Бортовые интеллектуальные системы. Ч. 2. Корабельные системы.— М.: Радиотехника, 2006.— 80 с.

Рассмотрены технологии искусственного интеллекта и их приложения при создании бортовых корабельных интеллектуальных систем обеспечения мореходности, непотопляемости и управления в сложных ситуациях.

Для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся проблемами создания искусственного интеллекта.

