

Подготовка к промышленному выпуску: основное оборудование

Мы реорганизовали производственную площадку

В 2015 году продолжались научно исследовательские работы по технологии электронно лучевой обработки кремния и созданию оборудования для реализации этих процессов. **В марте окончен монтаж и введена в эксплуатацию первая версия промышленной установки для выращивания исходных стержней для FZ процесса диаметром до 250 мм.**

Для монтажа этой установки укреплены перекрытия здания на отметке 3.5 м, куда перемещены источники питания электронно лучевых нагревателей:



В части технологического развития наибольшее внимание было уделено выращиванию стержней. В сентябре 2015 года завершены работы по проекту, начатому в 2014 году совместно с институтом электроники и компьютерных наук. В результате усовершенствована система управления оборудованием и улучшена геометрия выращиваемых стержней. В апреле, совместно с Институтом физики твердого тела Латвийского университета, начата работа над проектом «Развитие энергоэффективных технологий для производства поликристаллического кремния». В ходе проекта из нашего стержня в Институте кристаллов (Берлин), выращен бездислокационный монокристалл диаметром 65-70 мм с удельным сопротивлением более 1000 Ом*см. Подробнее научно-технологические результаты описаны ниже.



Подготовка к промышленному выпуску: исследовательское оборудование

Мы успешно реализуем свое оборудование и приобретаем новое

В июле приобретена и установлена ранее арендованная лабораторная установка для исследования электронно-лучевых процессов, которая позволит ускорить проведения комплекса специфических исследовательских работ.



Окончена работа по изготовлению опытной установки для выращивания исходных стержней для процесса БЗП диаметром до 150 мм, которая изготавливалась по заказу европейского партнера. В ноябре установка демонтирована и подготовлена к отгрузке Заказчику.

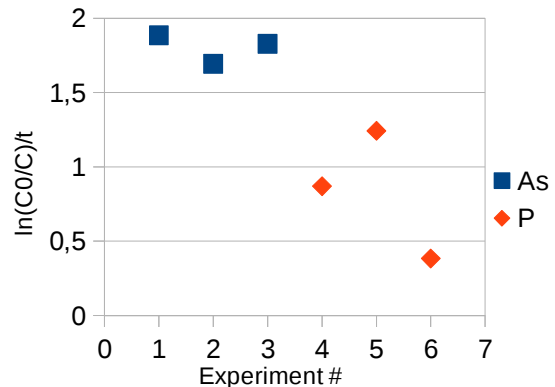
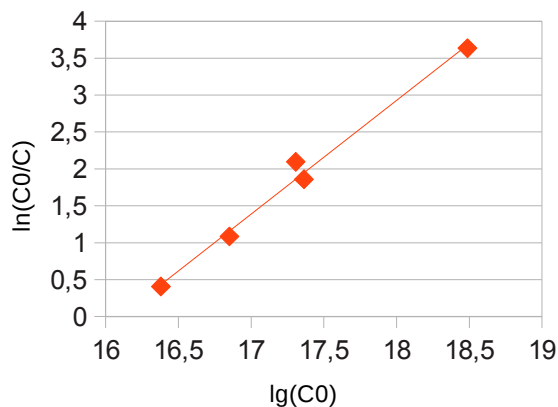


Исследования очистки кремния от от N-типных примесей

Процессы очистки вторичного кремния становятся понятнее

На конференции в Германии представлены результаты исследований в области очистки кремния от N-типных примесей.

При очистке от фосфора была обнаружена нелинейная зависимость скорости очистки (отношения конечной концентрации примеси к начальной) от времени.



В то же время была обнаружена линейная зависимость скорости очистки от начальной концентрации фосфора.

В результате была выдвинута гипотеза о влиянии испарения фосфора в молекулярной форме (например, молекулы фосфора P₂) и рассчитаны константы скорости, сопоставимые с представленными другими авторами.

Author	k _P , m/s	k _{P2} , m*at ⁻¹ /s*cm ⁻³	Ref.
Hanazawa	1-2x10 ⁻⁴	-	K. Hanazawa, et. al., Mat. Trans., V. 45, no. 3, pp. 844–849, 2004.
Suzuki	1.8-2.1x10 ⁻⁵	-	K. Suzuki, et. al., J. Japan Inst. Metals, vol. 54, 1990, pp. 161–167.
Yuge	1.3-2.2x10 ⁻⁵	-	N. Yuge, et. al., J. Japan Inst. Metals, vol. 61, 1997, pp. 1086–1093.
Our results	1.5x10 ⁻⁵	4.1x10 ⁻²³	

Определить, вызван ли наблюдаемый эффект ограничениями диффузии примеси к поверхности расплава, накоплением фона в установке в ходе процесса или бимолекулярным испарением планируется в ходе последующих экспериментов.

Совершенствование формы слитков и контроля за оборудованием

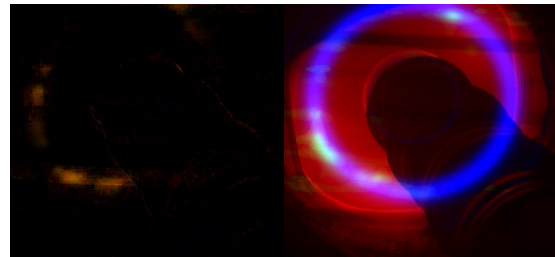
Колебания диаметра выращиваемых стержней уменьшились до ± 3 мм.

Для оптимизации процесса выращивания и улучшения контроля за диаметром растущего кристалла с помощью PID-регулирования в рамках сотрудничества с Institute of Electronics and Computer Science, Riga, были внесены значительные изменения в процесс обработки изображения.

Обнаружение мениска ведется в автоматически определяемом сегменте кадра, сам мениск выделяется при помощи линейного фильтра:



Для обеспечения равномерности теплового поля контролируется траектория движения электронных лучей. Для этого из двух соседних кадров вычитается их среднее, в результате чего в остаются только данные о сдвинувшихся вдоль своих траекторий лучах. Накопление информации по кадрам позволяет восстановить траекторию лучей.



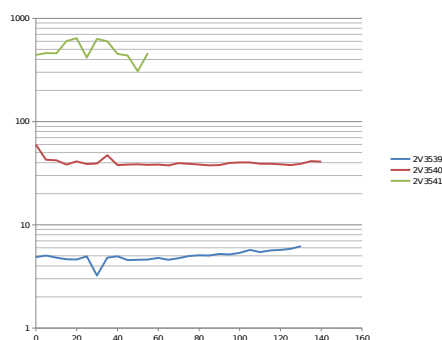
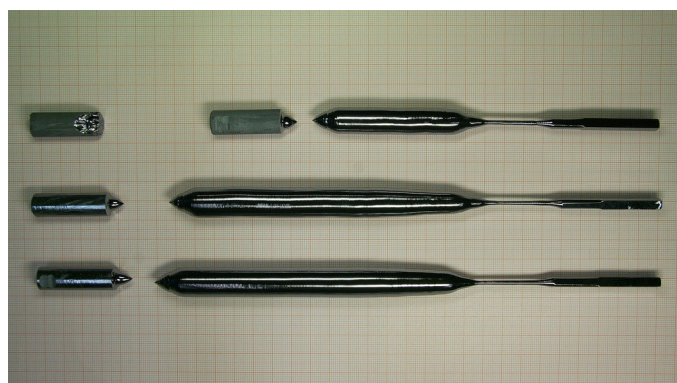
В результате применения новых алгоритмов удалось повысить качество контроля за диаметром слитка.



Чистота процесса

Удельное электрическое сопротивление стержней возросло до сотен Ом*см

Для исследований стерильности процесса были выращены стержни из различного сырья с разным содержанием легирующих примесей: из очищенного мышьяковистого кремния Керр 7-2V3539, из поликремния легированного бором Керр 8- 2V3540, и из чистого поликремния Керр 9- 2V3541. Образцы были вырезаны из конечной части стержней и перекристаллизованы методом БЗП:



Дальнейшее совершенствование тепловой зоны и модификации в технологии выращивания позволили получить целый ряд стержней, выращенных из поликремния с сопротивлением свыше 450 Ом*см. В результате перекристаллизации одного из них методом БЗП в Институте кристаллов (Берлин), выращен бездислокационный монокристалл диаметром 65-70 мм с удельным сопротивлением более 2000 Ом*см. Кристалл передан на дополнительную обработку для изготовления силовых приборов.

	50/1	51	52
Type	P	P	P
R, Ом*см	900-1200	500-1100	450-1600
L, мм	670	420	310



Публикации

- [1] R. Fuksis, M. Pudzs, Al. Kravtsov and An. Kravtsov, "Measuring the Radius of Meniscus Ring During the Growth of Silicon Rods", in Image Analysis: 19th Scandinavian Conference Proceedings, SCIA 2015, Copenhagen, Denmark, 2015, pp. 462-471.
- [2] R. Fuksis, M. Pudzs, Al. Kravtsov and An. Kravtsov, "Diameter control for silicon rod growth" in 5th International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE, Moscow, Russia, 2015.
- [3] R. Fuksis, M. Pudzs, Al. Kravtsov and An. Kravtsov, "Electron beam melting with digital image processing in obtaining float-zone silicon rods - an advanced material for high - performance solar panels", EuroNanoForum 2015, Riga, Latvia, 2015.
- [4] An. Kravtsov, Al. Kravtsov, R. Fuksis and M. Pudzs, "Ingot pulling with electron beam heating: Process enhancements," Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd, New Orleans, LA, 2015, pp. 1-4.
- [5] An. Kravtsov, "New Steps in the Electron Beam Pulling of Silicon Rods for the FZ Silicon Single Crystals", in 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 2015, pp. 567-570.
- [6] Al. Kravtsov and An. Kravtsov, "Phosphorus Removal in Batch Silicon Refinement by Electron Beam", in 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 2015, pp. 564-566.