

РЫНОК АЛМАЗОВ И МЕСТО ВЫРАЩЕННЫХ АЛМАЗОВ В НЕМ

В 2014 году было добыто и произведено 135 млн карат алмазного сырья на сумму порядка 18 млрд долларов. Доля искусственных алмазов пока составляет несколько процентов.

Существует два способа получения искусственных алмазов:

HPHT (высокое давление-высокая температура)

CVD (газофазное осаждение при низком давлении)

Нас интересует MPECVD (Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) способ получения алмаза, и его применение. Алмазы полученные данным способом имеют наиболее высокие характеристики по качеству, в ювелирной классификации, цвет D, чистота VVS1, либо оптического и электронного качества в технологических применениях.

Алмазы полученные таким способом имеют следующие применения:

- Ювелирное
- Алмазная Электроника
- Научное

Неопределенность рынка

Рынок, представленный компаниями производителями, развивается слабо. Общие продажи порядка 20 установок в год. С другой стороны, компании, производители CVD алмазов на установках собственного производства, такие как element six, SCIO diamond, diamond materials и др. Нарращивают парк установок более 100 в год. Ситуация, при которой в рынок может войти только компания, производящая оборудование и разрабатывающая технологию роста, связана с особенностью рынка алмазов. На данный момент ювелирный рынок бриллиантов не выработал стратегию работы с искусственным алмазом. Ввиду высокой цены на монокристаллический алмаз, и неопределенности статуса, модель лаборатория-технологическая компания-производство на данный момент функционирует слабо. Технологией синтеза монокристаллов алмаза, официально, владеют три компании, но ожидается появление такой технологии у многих лабораторий, и соответственно, открытие ростовых компаний.

Таким образом, существуют две тенденции развития рынка искусственных алмазов:

- 1- ювелирная промышленность, после разделения рынка. На природный и искусственный алмаз
- 2- алмазная электроника, как spin-off ювелирного рынка после падения цен на искусственный алмаз.

Виды СВЧ ростовых установок

- ▶ Системы для роста искусственного алмаза в СВЧ плазме (MPECVD), делятся на 6 типов моделей реакторов и выпускаются 5 компаниями в мире
- ▶ С начала выпуска установок, было продано около 200 систем, с рабочей частотой источника СВЧ излучения, магнетрона, 2.45 ГГц. И менее 10 систем с магнетроном с частотой 915 МГц. Для собственного использования компании, производители алмазного материала, изготовили более 500 установок, также с магнетронами частотой 2.45 МГц
- ▶ Данная частота 2.45 ГГц, была выбрана ввиду единственного варианта на момент разработки, 10-15 лет назад. Рабочая зона составляет до 100 мм и мощность систем 6-10 кВт. Что позволяет выращивать алмаз с себестоимостью ниже природного (до 30-50% D-F VVS1-VS2 размером до 2 карат)
- ▶ Последние несколько лет появилась СВЧ линейка на частоту 5.8 ГГц и мощностью 800-900 Вт, что открыло новые возможности для производства новых ростовых систем

Рынок ростовых установок на 2.45 ГГц

| | цена | Продано, штук в России | за посл. 3 г. | Продано в мире, всего* |
|-------------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|
| SEKI Tech SDS-6K, Japan | от 700.000 \$ | 4 | 1 | Около 100 |
| iPlas CYRRANUS, Germany | от 220.000 \$ | 2 | 1 | Менее 50 |
| BJS-150 Plassys, France | от 250.000 \$ | 3 | 0 | Менее 20 |
| ARDIS-100, Russia | от 235.000 \$ | 9 | 4 | 13 |
| DiamoTek 700, USA | ? | 0 | 0 | Менее 50 |

*- начало продаж СВЧ ростовых установок, конец 80-х

Сравнительная таблица параметров установок CVD синтеза алмаза на частоте 2.45 ГГц

| Производитель, модель реактора | Мощность СВЧ, частота | Кол-во газовых каналов | Рабочие газы, допирующие компоненты | Рабочее давление в камере | Диаметр подложки | Скорость роста | Визуальный контроль | Камера | Управление |
|---|-----------------------|------------------------|--|--|------------------|----------------|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| IPLAS CYRANNUSI – 6 (ФРГ) | до 6кВт, 2,45 ГГц | 4 | H ₂ /CH ₄ допирующие компоненты: N ₂ , B | до 240 Torr | до 50 мм | 5 мкм/ч | сквозь защитную сетку | Водоохлаждаемая вакуумная камера из алюминия | Автоматизи- рованное от ПК. |
| SEKI SDS-6K (Япония) | 6 кВт, 2,45ГГц | 4 | H ₂ /CH ₄ допирующие компоненты: N ₂ , B | до 120 Torr | до 100 мм | 7 мкм/ч | 4 кварцевых окна | Водоохлаждаемая вакуумная камера из алюминия | Автоматизи- рованное от ПК. |
| PLASSYS BJS150 (Франция) | до 6кВт, 2,45 ГГц | 4 | H ₂ /CH ₄ допирующие компоненты: N ₂ , B | 150 Torr | до 50 мм | 6 мкм/ч | сквозь защитную сетку | кварцевая вакуумная камера | Автоматизи- рованное от ПК. |
| ARDIS 100 Оптосистемы (Россия) | до 6кВт, 2,45 ГГц | 4 | H ₂ /CH ₄ допирующие компоненты: N ₂ , B | До 180 Torr (250 Torr в смесях с Ar) | до 100 мм | до 8 мкм/ч | 5 кварцевых окон | Водоохлаждаемая вакуумная камера из нержавеющей стали | Автоматизи- рованное от ПК. |
| DiamoTek 700, Microwave Enterprises (США) | до 10 кВт 2.45 ГГц | 4 | H ₂ /CH ₄ допирующие компоненты: N ₂ , B | до 240 Torr (350 Torr в спец. Режиме) | до 100 мм | Неизв. | 4 кварцевого окна | Водоохлаждаемая вакуумная камера из алюминия | Автоматизи- рованное от ПК. |

Тип и преимущества камеры



Тип камеры и отличительные особенности установки:

- ▶ Для системы на 5.8 ГГц разрабатывается новая схема рабочей камеры

2D-эллипсоид

Данная схема не использовалась ранее в других системах, и была выбрана ввиду обеспечения равномерного отвода тепла и конструктивной возможности установки системы точного контроля и настройки параметров образца

Система мониторинга и моделирования процессов позволяет измерять и контролировать следующие параметры:

Температура 450-2200 С

Стабильность температуры
в процессе роста 1-2 С

Измерение толщины и профиля
образца 5-8 мкм

Сравнение ОСНОВНЫХ параметров установок на 2.45 ГГц и 5.8 ГГц

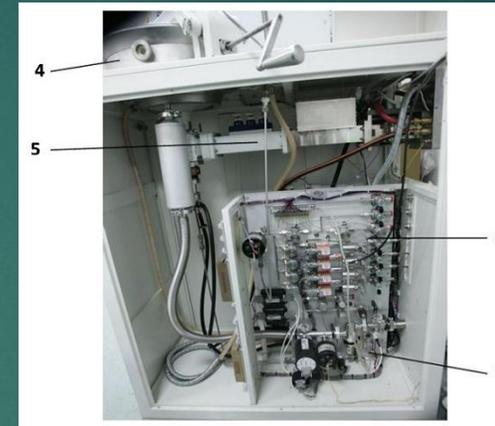
Рассмотрим преимущества установки на частоте 5.8 ГГц:

- Цена. Даже при мелкосерийном производстве, цена входит в психологические 100.000 \$
- Большая энергоэффективность, кВт/карат
- Размеры. 1.5 м², для систем на частоте 2.45 ГГц необходимо 6 м²
- Отсутствие водяного охлаждения и трехфазного электропитания.
(важно для лабораторного применения)

Недостатки установки на частоте 5.8 ГГц:

- Меньшая рабочая зона роста образцов, 32 мм к 75 мм в диаметре.

Сравнение цен на компоненты установок на 2.45 ГГц 5-6 кВт и 5.8 ГГц 800 Вт



Ростовая установка на 2.45 ГГц

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Стойка – | 2.000 \$ |
| 1 – Компьютер, дисплей, ИБП | 4.200 \$ |
| 2 – Блок питания СВЧ | 12.000 \$ |
| 3 – Блок водяного охлаждения | 4.000 \$ |
| 4 – Ростовая камера | 20.000 \$ |
| 5 – СВЧ тракт | 7.800 \$ |
| 6 – Газораспределительный блок | 21.000 \$ |
| 7 – Блок откачки газов | 15.500 \$ |
| Сумма: | 85.500 \$ |

Ростовая установка на 5.8 ГГц

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Стойка – | нет |
| 1 – Компьютер, дисплей, ИБП | 3.500 \$ |
| 2 – Блок питания СВЧ | 4.000 \$ |
| 3 – Блок воздушного охлаждения | 1.200 \$ |
| 4 – Ростовая камера | 6.400 \$ |
| 5 – СВЧ тракт | 6.000 \$ |
| 6 – Газораспределительный блок | 15.000 \$ |
| 7 – Блок откачки газов | 11.000 \$ |
| Сумма: | 47.100 \$ |

Инвестиционные условия

Требуемое инвестирование для создания прототипа установки роста искусственного алмаза на частоте 5.8 ГГц

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| ▶ Научно-исследовательские изыскания | 28.000 \$ |
| ▶ Компоненты системы | 47.000 \$ |
| ▶ Патентование (российское) | 2.000 \$ |
| ▶ Конструкторская документация | 5.000 \$ |
| ▶ Инженерная системотехника | 8.000 \$ |
| ▶ Хозяйственные расходы | 8.000 \$ |
| ▶ Итого | 88.000 \$ |

Время выполнения работы 1 год 6 месяцев

Форсайт

Для лабораторного применения данных установок, мы рассчитываем на продажу 2-3 штук в год, в 2017-2018 годах.

Установка наиболее адаптирована к росту всех типов алмаза, нано-поли-моно кристаллической формы. При введении катализатора возможен рост нанотрубок.

Себестоимость \$/карат для данного типа установок ниже, для небольших ростовых компаний.

Через 1-2 года завершится неопределенность ювелирного рынка алмазов, что привет на рынок новые, ростовые компании.

Мы ожидаем появление ростовых компаний, заинтересованных в покупке оборудования, что приведет к многократному увеличению продаж.

Рабочая группа



Савельев Алексей
Владимирович
Руководитель проекта,
разработчик
Образование: МГУ, физ ф-т,
более 40 публикаций, индекс
Хирша 9
Один из создателей установки
роста CVD алмаза АРДИС 100



Маркелов Вячеслав
Игоревич
Специалист по
математическому
моделированию
Образование: МГУ, физ ф-т

Сергейчев Константин
Федорович
Консультант проекта
Ведущий разработчик
установки роста CVD
алмаза АРДИС 100
Зав. лаб. Плазменной
Радиофизики
Института Общей Физики РАН
к. ф.-м. н.

Заключение

- ▶ На данный момент для научного применения и технологического, в небольших компаниях, продается около 20 установок с частотой 2.45 ГГц, не более одной с частотой 915 МГц в год
- ▶ Рынок ростовых установок ожидает развития после разделения ювелирного рынка на натуральный и искусственный сектор. Ввиду сильного увеличения парка установок и улучшения технологии роста монокристаллов, ожидается сильное падение цены искусственного алмаза, и как следствие развитие алмазной электроники
- ▶ Диапазон цен установок на частоте 2.45 ГГц и 6 кВт мощности составляет от 220 до 700 тыс. долларов для всех 5 производителей
- ▶ Установки на частоте 5.8 ГГц находятся в стадии разработки компаниями производителями (iPlas, MW Enterprises), но пока не поступили в продажу
- ▶ Установки на частоте 5.8 ГГц имеют мощность 800-900 Вт и занимают в 4 раза меньше места, и их цена может быть уменьшена до 100 тыс долларов

Таким образом, разработка и производство установок на частоте 5.8 ГГц для роста искусственного алмаза является перспективным направлением