

## Численное моделирование и проектирование резонаторной камеры СВЧ-реактора CVD

*Е.В. Балзовский\*, С.С. Смирнов*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*bev@lhfe.hcei.tsc.ru*

Приведены результаты численного моделирования распределения поля в цилиндрическом резонаторе камеры CVD-реактора в среде CST Studio Suite. На частоте 2.45 ГГц помимо основной моды  $TM_{011}$  в резонаторе присутствуют вторичные радиальные максимумы, связанные с одновременным возбуждением  $TM_{021}$  и высших мод. Выявлено, что на модовый состав существенно влияет кварцевое кольцо, разделяющее вакуумную часть от части, находящейся под атмосферным давлением. Найдена оптимальная геометрия дисковой камеры резонатора, в которой максимальная напряженность электрического поля достигается вблизи подложки с образцами. Для повышения стабильности зажигания СВЧ-разряда в камере резонатора используется подвижный поршень. По результатам моделирования изготовлен образец резонаторной камеры, экспериментально обнаружены стационарные режимы зажигания и устойчивого горения плазмы.

**Ключевые слова:** CVD-реактор, синтез алмаза, СВЧ-резонатор.

### 1. Введение

Одним из направлений получения алмазных пленок высокой чистоты является химическое осаждение из газовой фазы (chemical vapor deposition – CVD) в атмосфере разреженного водорода и метана [1, 2]. В плазмохимическом реакторе получение кристаллов алмаза и бездефектных пленок возможно при использовании нагрева газа вблизи подложки мощным микроволновым излучением [3]. Камера CVD-реактора является СВЧ-резонатором, в котором максимум напряженности электрического поля должен быть расположен вблизи подложки с выращиваемым образцом. Существуют несколько типов реакторов с камерами различной формы. Наиболее простой конструкцией обладает камера в виде вытянутого цилиндра, возбуждаемая коаксиальным зондом [4]. Однако расположение плазмы вблизи кварцевых стенок камеры отрицательно влияет на чистоту выращиваемых образцов. Наиболее удален от стенок образец в резонаторной камере в виде эллипсоида вращения благодаря наличию двух фокусов, в одном из которых расположен облучатель, в другом – подложка с образцом [5]. Но такой резонатор избыточно сложен в изготовлении. Одним из наиболее часто используемых коммерческих плазменных реакторов является реактор с СВЧ-резонатором в виде низкого цилиндра, в котором используется мода  $TM_{011}$  и система возбуждения колебаний электрического типа с дискообразным зондом [6]. Точные размеры и особенности конструкции таких реакторов являются коммерческой тайной, для создания своего CVD-реактора для осаждения алмазных пленок необходимо рассчитать и смоделировать СВЧ-резонатор, возбуждаемый магнетроном частотой 2.45 ГГц.

Особенностью резонатора является наличие двух существенно различающихся режимов: до зажигания плазмы, когда резонатор заполнен практически идеальным СВЧ диэлектриком – разреженным газом, и после зажигания в камере плазменного образования с некоторой проводимостью и формой, зависящей от конфигурации электрического и магнитного полей, а также давления газа в камере. Поскольку электродинамическое моделирование с учетом нестационарной плазмы в резонаторе представляет крайне сложную задачу, моделирование СВЧ-резонатора проводится без плазмы, а режимы с плазмой исследуются экспериментально. В данной работе приведены результаты численного моделирования резонаторной камеры и исследований модового состава колебаний, а также распределение поля вблизи подложки с образцом, влияющее на устойчивость зажигания плазмы.

## 2. Моделирование резонаторной камеры

Конструкция резонаторной камеры показана на Рис.1а. Камера выполнена в виде металлического цилиндра диаметром  $D = 420$  мм, конусообразная часть полости 1 имеет в основании диаметр  $d$  и высоту над подложкой  $h$ . Для возможности подстройки резонанса и влияния на процессы в вакуумной камере применен подвижный поршень, изменяющий высоту полости 2 в пределах от нуля до 50 мм. СВЧ-колебания в резонаторе возбуждаются с помощью дискообразного зонда, на верхней поверхности которого устанавливается образец для роста кристаллов алмаза. Зонд питается коаксиальным фидером сопротивлением 36 Ом с воздушным заполнением. Вакуумная полость отделена от атмосферы кольцом 3 из кварцевого стекла, которое расположено между двумя плоскими поверхностями вдали от зоны повышенной концентрации плазмы.

Численное моделирование проведено в среде CST Microwave Studio. Для определения первоначального облика резонатора был проведен расчет собственных мод резонатора со свободными параметрами  $d$  и  $h$ . Целевым показателем был поиск режима колебаний с максимумом напряженности электрического поля  $E$  вблизи подложки, радиально симметричным пятном наибольшего сечения и наилучшей равномерностью. Модификация верхней части резонатора позволила сконцентрировать участки с максимальной напряженностью электрического поля непосредственно у подложки. С помощью процедуры оптимизации найдены значения параметров  $d = 280$  мм и  $h = 62$  мм, при которых что одна из мод имеет явно выраженный максимум вблизи частоты 2.45 ГГц и удовлетворяет указанным условиям. Эта мода названа основной. Распределение  $|E|$  основной моды вдоль вертикальной линии, проходящей от центра зонда до дна подвижного поршня при подводимой мощности 1 кВт на частоте 2.45 ГГц приведено на Рис.1б при различных положениях поршня, оптимальное положение выделено жирной линией. Положение поршня влияет на частоту резонанса основной моды, но вид пространственного распределения меняется мало.

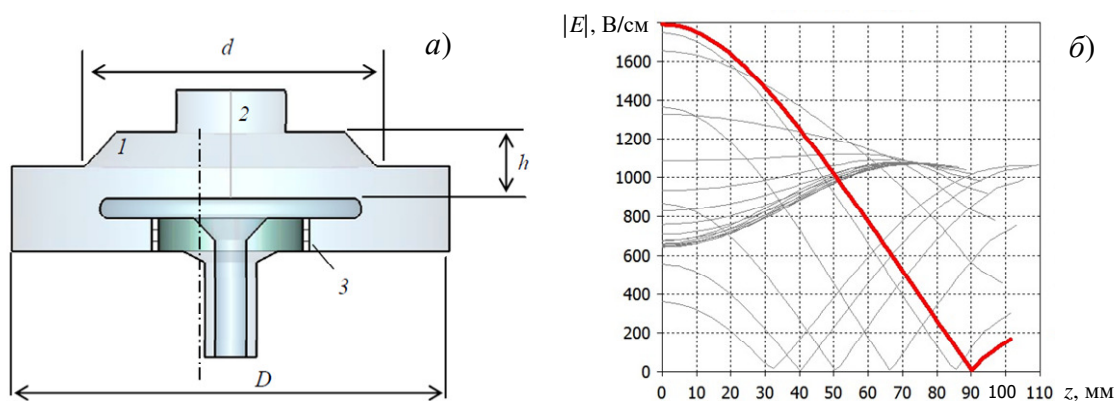


Рис.1. Конструкция резонаторной камеры (а); распределение напряженности поля основной моды вдоль оси резонатора на частоте 2.45 ГГц (б).

Распределение  $|E|$  основной моды в диаметральной сечении резонатора при подводимой мощности 1 кВт на частоте 2.45 ГГц приведено на Рис.2а. Положение поршня отличается от случая, приведённого на Рис.1а. Помимо основной моды вблизи частоты 2.45 ГГц существует около десятка паразитных мод, имеющих четное количество локальных максимумов, распределенных вблизи краев зонда (рис.2б) и в объеме вблизи внешней поверхности камеры (рис.2в), однако их уровень существенно ниже основной моды. Наиболее опасной является паразитная мода с распределением поля, приведенным на рис.2г, при котором плазма зажигается вблизи кварцевого стекла. Это приводит к избыточному нагреву стекла и появлению ультрафиолетового излучения, что приводит к деградации и

выходу из строя вакуумного уплотнителя. Это неоднократно наблюдалось в эксперименте.

Проведено моделирование с различными диаметрами кварцевых колец толщиной 4–5 мм. Расчеты показали, что при малых диаметрах, менее 100 мм, частоты резонансов основной моды и паразитной моды очень близки, что повышает вероятность аварийного режима зажигания плазмы вблизи кольца. Увеличение диаметра кольца сдвигает резонанс паразитной моды в область низких частот, ниже частоты генерации магнетрона. Выбор диаметра кольца ограничен как сортаментом выпускаемых кварцевых труб. Для диаметров колец 150 и 160 мм частоты основной и паразитной мод разнесены более чем на 100 МГц. Дальнейшее увеличение диаметра кольца свыше 200 мм приводит к обратной ситуации – резонансные частоты основной и паразитной мод сближаются. Найдены оптимальные размеры кварцевого кольца, которые лежат в пределах: диаметр 150–160 мм, толщина 4–5 мм, высота 32–38 мм.

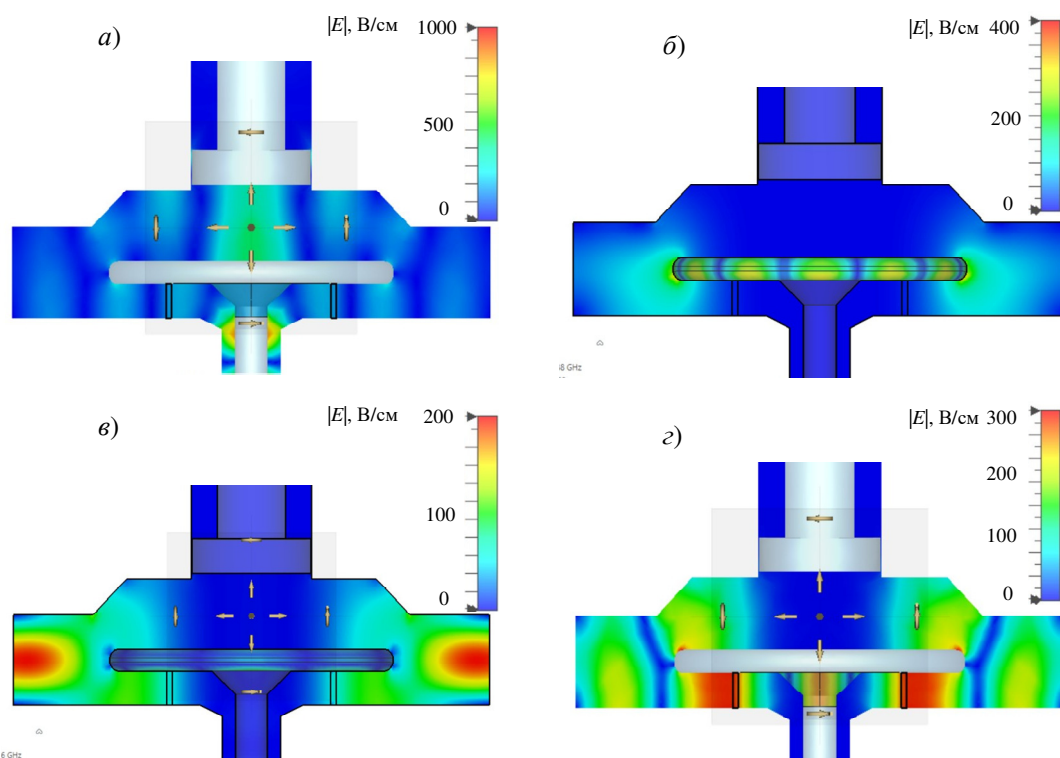


Рис.2. Распределение напряжённости поля основной моды в сечении резонатора на частоте 2.45 ГГц (а), а также распределение поля паразитных мод на частотах 2.35 (б), 2.38 (в) и 2.52 ГГц (з).

### 3. Экспериментальная установка

По результатам моделирования был спроектирован и изготовлен опытный образец CVD-реактора. Внешний вид установки приведён на Рис.3а. Резонаторная камера 1 оснащена системой охлаждения, подвижный поршень 2 перемещается с помощью сильфона, СВЧ-энергия подводится через волноводно-коаксиальный переход 3. Источником питания является магнетрон 4 бытовой печи, оснащенный системой водяного охлаждения. При питании магнетрона от трехфазной сети получена мощность в нагрузке не менее 2.5 кВт.

Экспериментально обнаружены стационарные режимы зажигания плазмы при давлениях воздуха до 10 Торр и горения плазменного сгустка при давлениях 30–80 Торр. При заполнении камеры водородом при давлениях 5–20 Торр плазма зажигается и устойчиво горит вблизи подложкодержателя (Рис.3б). Перемещением образца можно добиться равномерного распределения плазменного сгустка вблизи образца (Рис.3в).

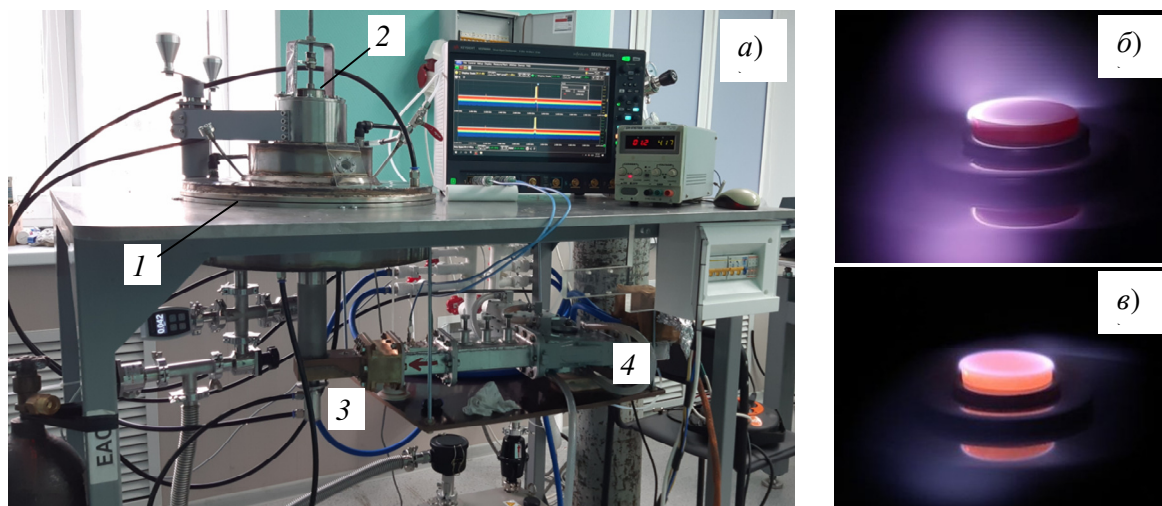


Рис.3. Внешний вид экспериментальной установки (а); неравномерное (б) и равномерное (в) горение плазмы водорода вблизи образца при подводимой СВЧ-мощности 1 кВт.

#### 4. Заключение

Приведены результаты численного моделирования распределения поля в цилиндрическом резонаторе камеры CVD-ректора, выполненные в среде CST Studio Suite. На частоте 2.45 ГГц помимо основной моды  $TM_{011}$  в резонаторе присутствуют вторичные радиальные максимумы, связанные с одновременным возбуждением  $TM_{021}$  и высших мод. Выявлено, что на модовый состав существенно влияет кварцевое кольцо, разделяющее вакуумную часть от части, находящейся под атмосферным давлением. Найдена оптимальная геометрия дисковой камеры резонатора, в которой максимальная напряженность электрического поля достигается вблизи подложки с образцами. Для повышения стабильности зажигания СВЧ-разряда в камере резонатора используется подвижный поршень. По результатам моделирования изготовлен образец резонаторной камеры, экспериментально выявлены стационарные режимы зажигания и устойчивого горения плазмы.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0002.

#### 5. Список литературы

- [1] Tallaire A., Achard J., Silva F., Brinza O., Gicquel A., *C.R. Phys.*, **14**(2), 169, 2013; doi: 10.1016/j.crhy.2012.10.008
- [2] Weng J., Liu F., Xiong L.W., Wang J.H., Sun Q., *Vacuum*, **147**, 134, 2018; doi: 10.1016/j.vacuum.2017.10.026
- [3] Li X.J., Tang W.Z., Yu S.W., Zhang S.K., Chen G.C., Lu F.X., *Diamond Relat. Mater.*, **20**, 480, 2011; doi: 10.1016/j.diamond.2011.01.046
- [4] Gu Y., Lu J., Grotjohn T., Schuelke T., Asmussen J., *Diamond Relat. Mater.*, **24**, 210, 2012; doi: 10.1016/j.diamond.2012.01.026
- [5] Plasma reactor. US Patent 5.954.882, 28 Mar. 1997;
- [6] Xinsheng Y., Zhao L., Liu F., *Proc. 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, Hangzhou, China, 86, 2018; doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634086