

# ПЛАЗМЕННЫЕ И СЕЛЕКТИВНЫЕ ПО ИЗОТОПАМ ПРОЦЕССЫ В ПОТОКЕ ВЧ-ПЛАЗМЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ижойкин<sup>1</sup> Д.А., Гамов<sup>2</sup> Д.Л.

Научный руководитель: Мышкин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, пл. Соляная, 2

<sup>2</sup>НИ Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [dizhoykin@gmail.com](mailto:dizhoykin@gmail.com)

В низкотемпературной плазме все вещества переводятся в газовую фазу, а доля ионов не превышает 1%. Поэтому низкотемпературная плазма в основном состоит из радикалов – частиц, имеющих не спаренный спин. Известно, что химическая реакция между двумя радикалами в жидкости, находящейся в магнитном поле, селективна по изотопам из-за сохранения суммарного спина при формировании молекулы. Цель исследования – установление и исследование изотопного эффекта в газофазной радикальной реакции, протекающей в магнитном поле.

Плазмохимический стенд для проведения экспериментальных исследований содержал высокочастотный (ВЧ) генератор с частотой 27,12 МГц и мощностью 4 кВт. ВЧФ разряд формировали в кварцевой трубе с внутренним диаметром 4 см и длиной 100 см. Температура внутренней стенки реактора не превышала 700°C. Поэтому пары остаточного углерода из диффузной оболочки разряда конденсировались на стенках в виде сажи. Плазмообразующую смесь в реактор подавали тангенциально ниже электрода при расходе: Ar – 5-10 л/мин, O<sub>2</sub> – 5-10 мл/мин. Магнитное поле формировали с помощью двух постоянных магнитов.

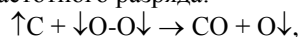
Графитовый электрод, с которого формируется поток низкотемпературной плазмы, разогревался и испарялся. В плазменном потоке концентрацию окислителя выдерживали в меньшем количестве, чем необходимо для полного окисления углерода. Из-за низкой концентрации углерода в плазмообразующей смеси количество образовавшегося СО не превышало 0,05% по объему. Для концентрирования СО использовалась азотная ловушка, в которую монооксид поступал после предварительного окисления до СО<sub>2</sub>.

Изотопный анализ проводили на масс-спектрометре ЭМГ 20-09, имеющем разрешение 400. Установлено, что в плазменных процессах, протекающих при атмосферном давлении, концентрация изотопа <sup>13</sup>С в продуктах реакции зависит от величины магнитного поля, расстояния между началом плазменного канала и областью приложения магнитного поля.

Между угловой координатой Δφ и полным моментом импульса ΔJ частицы, операторы которых не коммутируют, при малой угловой неопределенности, можно написать соотношение неопределенности  $\Delta\varphi \Delta J \geq 0,5\hbar$ . Это соотношение позволяет расширить понятие «синглет» для радикальной пары. Без магнитного поля образование химической связи происходит в результате случайного формирования синглетного состояния валентных электронов при столкновении атомов реагентов, энергия которых превышает порог химической реакции. Во внешнем магнитном поле спины валентных электронов прецессируют вокруг силовых линий. Поэтому количество возможных состояний спинов радикальных пар, образующихся при столкновении, уменьшается.

В низкотемпературной плазме время столкновения радикалов не превышает 10<sup>-13</sup> с. Поэтому состояние радикальной пары, образующейся при столкновении, определяется динамикой спинов перед столкновениями. В качестве радикальных пар можно рассматривать две частицы, между которыми неизбежно столкновение в конце времени свободного пробега.

С точки зрения динамики спина валентных электронов радикалов С и O<sub>2</sub> существенны: величина внешнего магнитного поля, частоты столкновений между собой <sup>13</sup>С, <sup>12</sup>С, O<sub>2</sub>. Реакция окисления углерода в низкотемпературной плазме высокочастотного разряда:



в постоянном магнитном поле может быть селективна по изотопам.

В модели сепарации изотопов предполагали следующее: для преимущественного выделения <sup>12</sup>С в конденсированную фазу необходимо, чтобы средняя частота столкновений O и <sup>12</sup>С была кратна разности парамагнитных частот наиболее химически активных возбужденных состояний указанных реагентов. Частоты прецессии спинов валентных электронов <sup>12</sup>С и <sup>13</sup>С отличаются из-за различия ядерных спинов. При этом скорость окисления изотопа <sup>12</sup>С уменьшается, что при охлаждении плазмы приводит к его преимущественной конденсации. Газ обогащается по <sup>13</sup>С.

В докладе анализируются физико-химические процессы, протекающие в низкотемпературной плазме, находящейся в магнитном поле, а также результаты экспериментальных исследований процесса формирования сажи в магнитном поле при охлаждении плазмы.

Исследования финансировались в рамках гранта РФФИ №16-08-00246.