

УДК 537.52

ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ПЛАЗМОТРОН – ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ РЕАКТОР

© 2010 г. И. М. Уланов, М. В. Исупов, А. Ю. Литвинцев, П. А. Мищенко

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 23.12.2008 г.

Разработан и создан трансформаторный плазмотрон атмосферного давления мощностью до 50 кВт. Изучены теплофизические и электрофизические характеристики разряда мощностью до 20 кВт при атмосферном давлении смеси аргона и водорода и частоте тока 100 кГц. На примере тетрахлорида кремния показана возможность проведения различных восстановительных плазмохимических реакций с получением продуктов реакции высокой чистоты. На примере моносилана показана возможность получения нанопорошков веществ и их соединений.

ВВЕДЕНИЕ

Идеи создания плазмотронов трансформаторного типа были высказаны в сороковых годах прошлого столетия. В то время попытки создания таких плазмотронов не увенчались успехом по причине отсутствия хороших ферромагнитных материалов для создания магнитопроводов с низким уровнем теплопотерь на перемагничивание и вихревые токи.

В пятидесятых годах прошлого столетия данный принцип получения плазмы был использован для создания устройств типа «Токамак» и получения высокотемпературной плазмы в импульсном режиме.

В семидесятые годы прошлого столетия американский ученый Эккерт [1] работал над созданием индукционного плазмотрона трансформаторного типа для использования в аэрокосмической индустрии. Эккертом был получен индукционный разряд трансформаторного типа в аргоне при давлениях до 80 кПа и токе разряда до 100–150 А. Он характеризовался сильными конвективными неустойчивостями канала разряда, развитие которых с ростом давления аргона и приводило к погасанию разряда при давлениях свыше 80 кПа.

В это же время группа исследователей в Ленинграде также пыталась создать трансформаторный плазмотрон [2]. Созданное ими устройство работало на аргоне при давлении до 32 кПа. Попытка выйти на атмосферное давление не удалась, при повышении давления разряд также становился неустойчивым и погасал.

В Институте теплофизики СО РАН аналогичные исследовательские работы были начаты в конце восьмидесятых годов прошлого столетия. Авторам удалось, применяя вихревую подачу плазмообразующего газа, создать трансформаторный

плазмотрон, работающий при атмосферном давлении на аргоне и воздухе, мощностью ~200 кВт, с частотой тока 10 кГц [3]. На этом плазмотроне были получены интересные результаты по плазмохимическому способу получения окислов азота из воздуха [4]. При этом выход NO составил ~8%, что значительно выше, чем при использовании дугового плазмотрона постоянного тока.

Следует отметить, что плазмотроны трансформаторного типа имеют ряд преимуществ по сравнению с дуговыми и обычными индукционными плазмотронами. Отсутствие электродов у трансформаторного плазмотрона позволяет существенно повысить ресурс работы такого устройства. Передача электромагнитной энергии через магнитопровод дает возможность значительно уменьшить частоту тока по сравнению с ВЧ индукционными плазмотронами и практически исключить рассеяние электромагнитной энергии в пространстве.

В настоящее время, в связи с появлением новых ферромагнитных материалов (аморфные магнитномягкие сплавы, ферриты с малыми уровнями потерь на частотах тока 100–200 кГц), а также достаточно компактных и дешевых источников питания, существует возможность создавать трансформаторные плазмотроны небольшого веса и размера. Таким образом, применение ферритов позволяет значительно упростить конструкцию, уменьшить вес плазмотрона и использовать трансформаторные плазмотроны при проведении различных плазмохимических реакций, особенно там, где требуется высокая степень чистоты плазмы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Физическая сущность работы трансформаторного плазмотрона понятна из схемы, приведенной на рис. 1. Для расчета трансформаторного

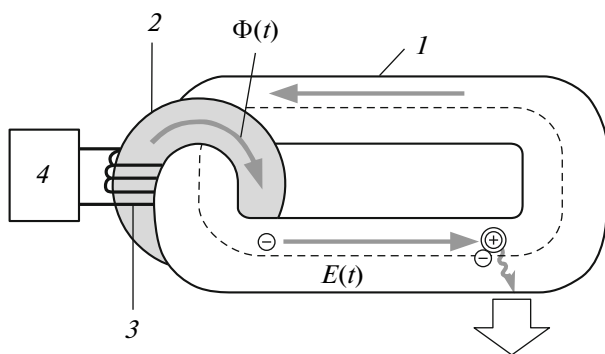


Рис. 1. Принцип генерации индукционного разряда: 1 – камера плазматрона, 2 – магнитопроводы, 3 – первичная обмотка, 4 – источник питания.

плазматрона обычно пользуются простой технической формулой, вытекающей из закона электромагнитной индукции. Для синусоидального тока она имеет вид

$$U_{\text{инд}} = 4.44 B_m S f, \quad (1)$$

где B_m – амплитуда индукции магнитного поля в магнитопроводе, Тл; S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м^2 ; f – частота тока, Гц.

Из формулы (1) видно, что при создании плазматронов трансформаторного типа следует увеличивать частоту тока в разумных пределах и применять для материала магнитопроводов аморфные сплавы или специализированные сорта силовых ферритов, обладающих наименьшим значением объемных потерь P_v при больших значениях частоты и индукции магнитного поля.

Анализ динамических характеристик ферромагнетиков, проведенный с использованием известной эмпирической формулы [4]

$$P_v = P^* (f/f^*)^\alpha (B_m/B_m^*)^\beta$$

(где P^* – удельные теплотери при частоте $f^* = 1$ кГц и индукции $B_m^* = 1$ Тл, α и β – коэффициенты, характеризующие свойства ферромагнетика), показал, что при частотах тока менее 20–30 кГц магнитопроводы на основе аморфных сплавов имеют явное преимущество перед лучшими сортами ферритов вследствие более слабой зависимости удельных тепловых потерь от индукции магнитного поля. При частотах тока выше 100 кГц наиболее оптимальным вариантом является использование специализированных сортов силовых ферритов (рис. 2).

Сравнивая принцип работы индукционных разрядов трансформаторного типа с принципом работы обычных индукционных разрядов соленоидального типа, можно сделать важное заключение: фактически индукционный разряд трансформаторного типа есть дуговой разряд переменного тока, в котором отсутствуют электроды.

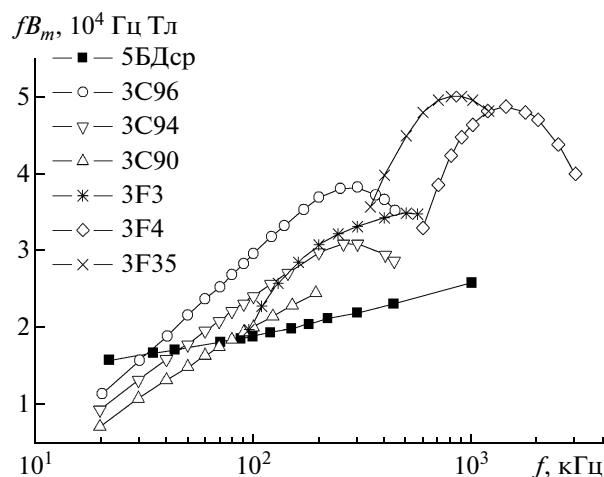


Рис. 2. Зависимость параметра fB_m от частоты тока f при фиксированном значении объемных тепловых потерь $P_v = 0.5$ Вт/см³ для аморфного сплава 5БДср и силовых ферритов фирмы Philips.

Обычный индукционный разряд резко отличается от индукционного разряда трансформаторного типа, так как там текут кольцевые токи.

С учетом вышесказанного к индукционному разряду трансформаторного типа применимы все закономерности по электрическим параметрам и устойчивости как к дуговому разряду переменного тока.

Проведенные ранее исследования авторов показали, что индукционный разряд трансформаторного типа при вихревой стабилизации даже более устойчив, чем дуговой разряд переменного тока. Это объясняется тем, что при отсутствии электродов нет перемещения анодных и катодных пятен, которые могут влиять на устойчивость дугового разряда. Характеристики дугового разряда не меняются по длине разряда за исключением места, где происходит вход плазменной струи в плазмохимический реактор. Это практически полезно, так как в этом месте уже начинаются плазмохимические реакции.

Авторы не исследовали равновесность плазмы индукционного разряда трансформаторного типа при атмосферном давлении. Имеется много работ по исследованию температурного равновесия дуговых разрядов переменного тока. Считается, что плазма в таких разрядах, при токах в десятки ампер, равновесна. Допустим, что плазма дугового индукционного разряда трансформаторного типа равновесна. Температурная неравновесность может наблюдаться только на краю плазменного шнура по радиусу. Это подтверждается также работой авторов [4], где энтропийным датчиком исследовалась температура плазмы в разных сечениях разрядной камеры.

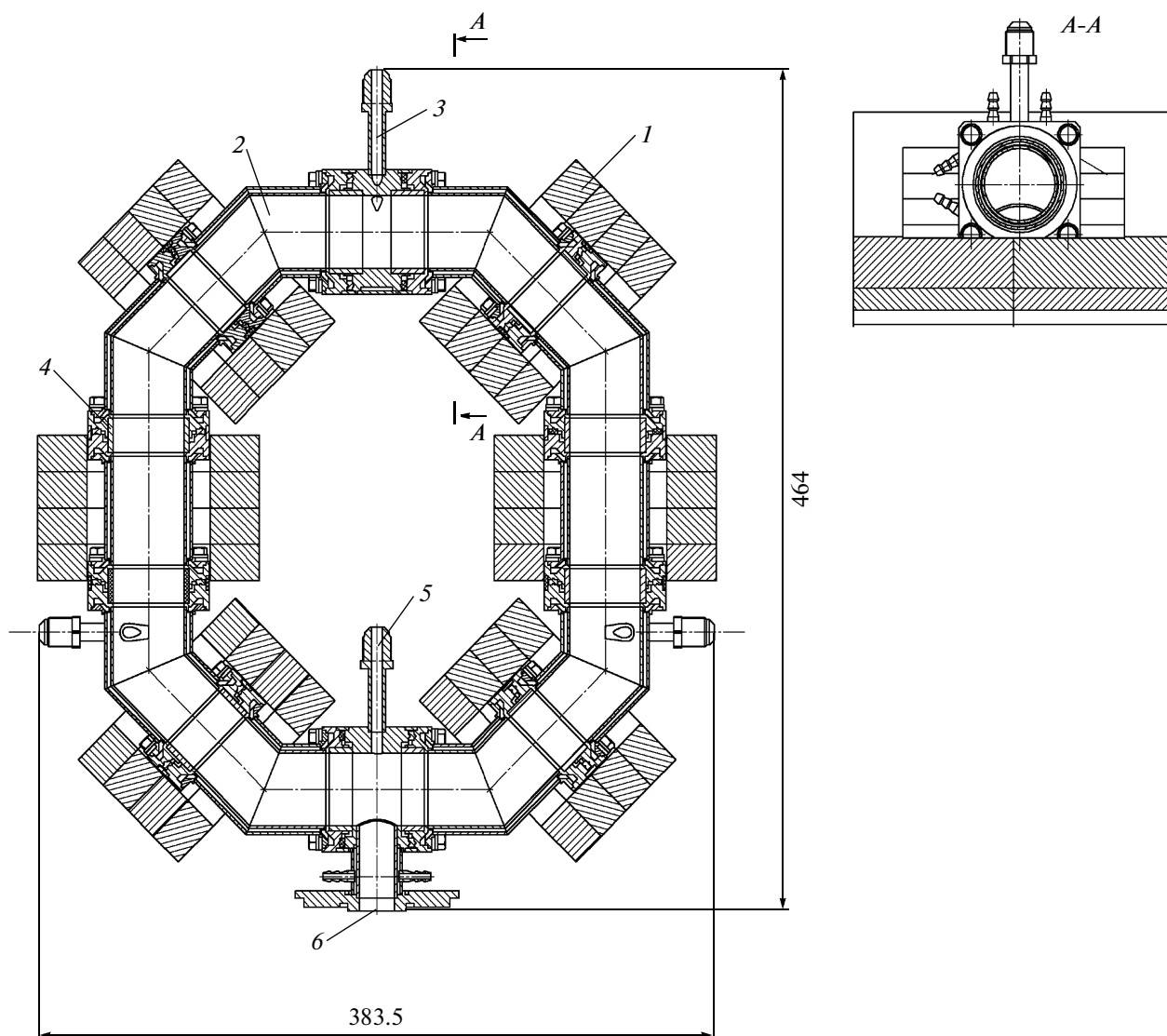


Рис. 3. Схема трансформаторного плазмотрона: 1 – магнитопровод, 2 – водоохлаждаемая камера, 3 – вихревой тангенциальный ввод, 4 – прокладки из силиконовой резины, 5 – ввод реагентов, 6 – выход в химический реактор.

Важным для работы любого плазмотрона является источник питания. В настоящее время в связи с развитием полупроводниковой техники промышленностью выпускаются источники питания различных индукционных устройств с частотой тока 100, 200 и 400 кГц и мощностью от нескольких киловатт до 100–200 кВт. Эти источники не намного дороже источников питания плазмотронов постоянного тока. Блоки согласования источника с индукционным плазмотроном позволяют просто и в достаточно широких пределах регулировать ток плазмотрона. Это обеспечивает программируемое изменение параметров рабочей среды в зоне протекания реакции. Изменение параметров плазмы осуществляется простым изменением индуктивности и емкости блока согласования. Этот процесс происходит во время работы плазмотрона. Очень глубокое изменение

параметров тока разряда, а значит параметров плазмы, что особенно важно при работе на разных газах, может быть реализовано путем параллельного или последовательного соединения секций магнитопроводов плазмотрона. Такое глубокое регулирование тока и напряжения на плазмотроне, а следовательно глубокое изменение параметров плазмы в разряде, невозможно в плазмотронах постоянного тока. В плазмотронах постоянного тока нельзя иметь напряжение на разряде больше напряжения источника питания плазмотрона. В плазмотронах трансформаторного типа напряжение на разряде может быть значительно больше напряжения источника питания за счет подбора межвитковых соотношений магнитопроводов.

С учетом проведенных исследований по изучению свойств материала магнитопроводов, а также

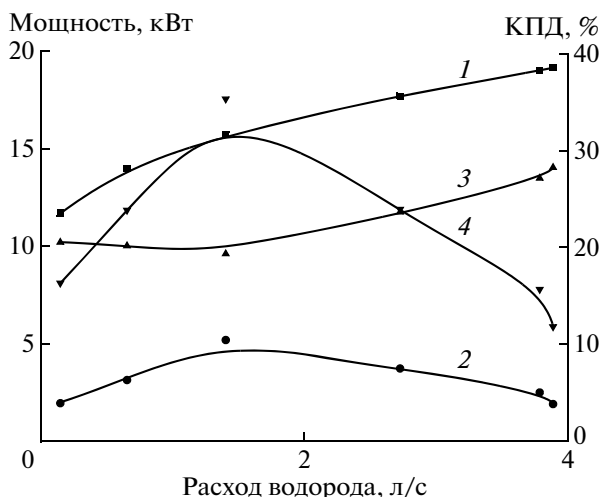


Рис. 4. Характеристики плазмотрона в зависимости от расхода водорода: 1 — мощность разряда, 2 — мощность струи, 3 — теплопотери, 4 — КПД.

по изучению простых и дешевых схем источников питания был разработан и изготовлен трансформаторный плазмотрон мощностью 50 кВт с источником питания на частоту тока 100 кГц.

Схема трансформаторного плазмотрона представлена на рис. 3.

Магнитопровод плазмотрона 1 был изготовлен из 6 отдельных секций. Каждая секция имела 9 витков первичной обмотки, подключенных к источнику питания с частотой тока 100 кГц, мощностью 20 кВт и максимальным напряжением 500 В. Магнитопроводы 1 были собраны из ферритовых брусков фирмы EPCOS марки № 87 (аналог феррита 3F3). Общая площадь сечения магнитопровода составила 100.8 см², а масса — около 20 кг. В процессе работы плазмотрона ферриты нагревались до температуры не более 40°C, поэтому в охлаждении не нуждались. Водоохлаждаемая камера 2 состояла из 12 секций, электрически изолированных между собой прокладками из силиконовой резины 4. С целью наибольшей стабилизации плазменного разряда трансформаторный плазмотрон был установлен вертикально, с подачей аргона через вихревую камеру 3. Выход плазмы происходил с противоположной стороны в камеру химического реактора 6. Для проведения различных плазмохимических реакций в нижней части разрядной камеры был предусмотрен ввод химических реагентов, а еще ниже расположены патрубки, которые могут быть использованы как для ввода дополнительных химических реагентов, так и для визуального наблюдения плазмы через смотровое окно. Камера химического реактора может использоваться как для сбора продуктов реакций, так и для размещения в ней деталей для обработки плазмой.

В процессе проведенных опытов измерялись следующие характеристики разряда: ток разряда I — с помощью пояса Роговского, напряжение U — дополнительным витком изолированного провода, проложенным по периметру камеры. Форма тока в плазме контролировалась осциллографом СФ-13.

Для зажигания разряда производилась откачка воздуха из плазмотрона и камеры до давления порядка 10–20 Па. После включения источника питания в разрядную камеру подавался аргон и происходил поджиг разряда. При достижении атмосферного давления открывалась задвижка для свободного выхода аргона в атмосферу. Общее время от запуска плазмотрона до выхода на рабочий режим составляло не более 2 минут. Подача водорода осуществлялась постепенно с доведением расхода до 4 л/с при расходе аргона 2 л/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Главный результат выполненной работы состоит в том, что в трансформаторном плазмотроне получен устойчивый низкочастотный разряд при давлении 10⁵ Па в атмосфере аргона и водорода.

Коэффициент полезного действия трансформаторного плазмотрона рассчитывался калориметрическим методом. Потери энергии в источнике питания и согласующем блоке при нахождении КПД плазмотрона не учитывались. Однако была произведена оценка этих потерь, которые составили около 7% от общей подводимой мощности из сети. Подача водорода осуществлялась в нижнюю секцию газоразрядной камеры. Подача водорода в верхнюю часть плазмотрона и его прохождение через всю длину газоразрядной камеры нецелесообразна по причинам резкого возрастания напряженности поля.

Зависимость КПД плазмотрона от расхода водорода представлена на рис. 4. Расход аргона 2 л/с.

Как видно из графика, максимальный КПД плазмотрона составляет ~35% и достигается при расходе водорода около 1.5 л/с. Дальнейшее уменьшение КПД объясняется увеличением турбулентности потока газов в выходной секции плазмотрона.

Мощность струи аргоноводородной плазмы в зависимости от расхода водорода определялась как разность мощности разряда и теплопотерь. Как видно из графика, максимальная мощность была получена при расходе водорода около 1.5 л/с, при дальнейшем увеличении расхода мощность струи несколько снижается. При изучении тепловых характеристик плазмотрона на основе мощности струи, истекающей из плазмотрона, была рассчитана среднемассовая температура аргоновой струи и аргоноводородной струи. Полученная

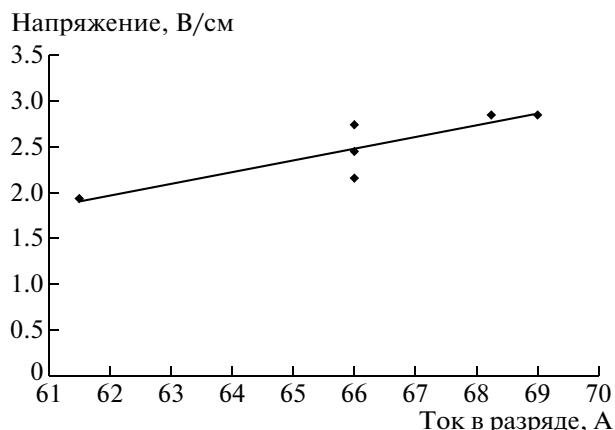


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика разряда.

на основе теплосодержания струи и энтальпийных зависимостей [5] расчетная среднемассовая температура аргона при расходе 5 г/с и мощности плазмотрона 20 кВт составляет 10000 К. Подача

SiCl_4 в количестве 0.25 г/с и водорода в количестве 0.65 л/с снижает общую среднемассовую температуру до 1850 К (оптимальной температуры для проведения данной плазмохимической реакции).

На рис. 5 представлена вольт-амперная характеристика разряда в аргоне. Напряженность электрического поля не превышает 3 В/см, что не вызывает пробоев между секциями плазмотрона даже при использовании достаточно тонкого слоя изоляции.

Представленный на рис. 6 трансформаторный плазмотрон рассчитан на мощность 50 кВт. Испытания плазмотрона проведены при мощности 20 кВт. Это связано с тем, что при мощности 50 кВт требуются большие количества аргона и водорода, а утилизировать такое количество водорода в наших условиях невозможно. По мнению авторов, трансформаторные плазмотроны можно создавать мощностью в сотни кВт и более при частотах тока 100–400 кГц.

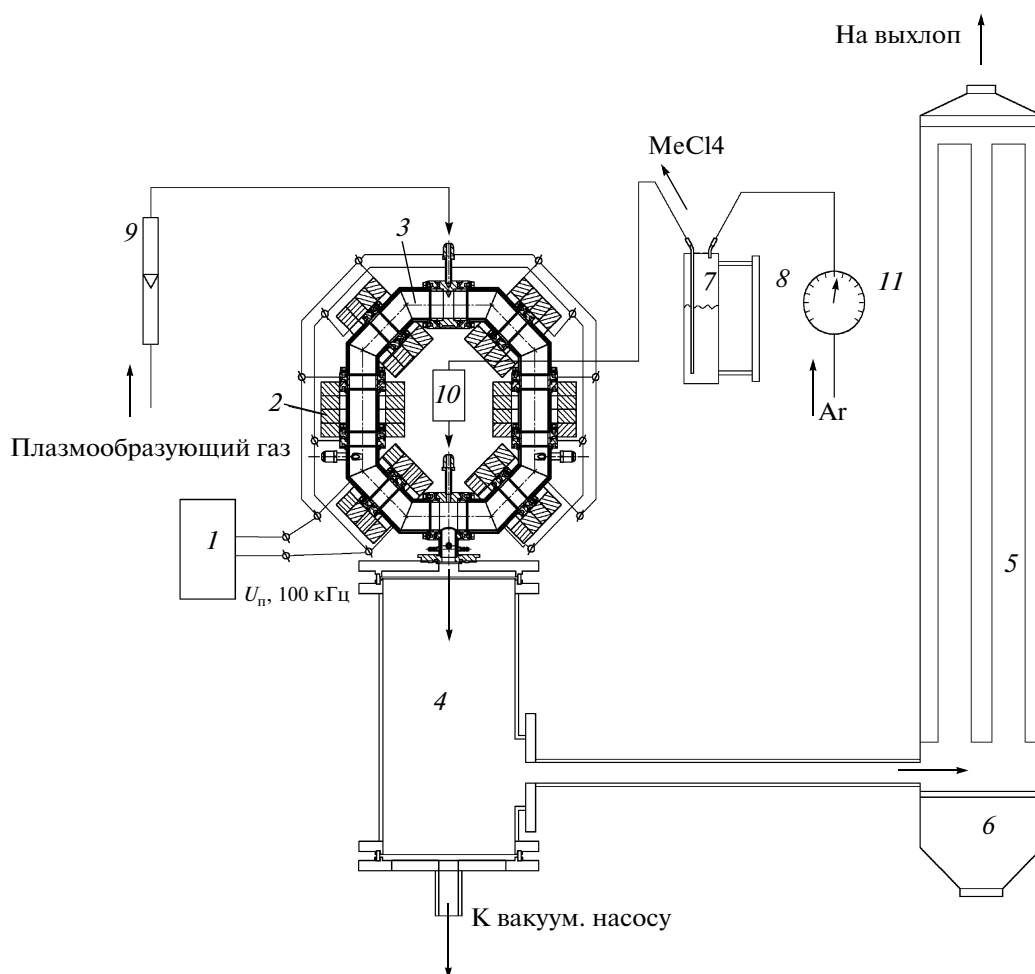


Рис. 6. Схема установки для проведения плазмохимических реакций: 1 – источник питания, 2 – магнитопроводы, 3 – газоразрядная камера, 4 – камера реактора, 5 – тканевый фильтр, 6 – бункер сбора продуктов реакции, 7 – питатель MeCl_4 , 8 – индикатор уровня MeCl_4 , 9 – ротаметр, 10 – испаритель, 11 – редуктор.

Заметим, что КПД плазмотрона ~35% определен для струи плазмы, выходящей в реактор (4 на рис. 6). Так как плазмохимические реакции начинаются в разряде плазмотрона, КПД плазмохимической реакции в случае ввода реагентов непосредственно в разряд будет значительно больше.

Созданный трансформаторный плазмотрон был применен для проведения плазмохимической реакции $\text{SiCl}_4 + 10\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl} + 8\text{H}_2$ (стехиометрическое соотношение 1:5).

В результате проведенных экспериментов получен порошок кремния в количестве 15% от массового исходного кремния, содержащегося в тетрахлориде кремния. К сожалению, не удалось приблизиться к 30-процентному выходу кремния, теоретически максимально возможному [6]. В первую очередь это связано с протеканием обратных реакций при охлаждении реакционной смеси (“закалка” продуктов реакции не производилась).

Также был опробован процесс разложения моносилана в плазме трансформаторного разряда. В этом случае наблюдалось полное разложение моносилана с образованием порошка кремния. Анализ полученного порошка кремния показал наличие частиц кремния размером 40–50 нм.

По мнению авторов, разработанный трансформаторный плазмотрон может быть использован для получения нанопорошков веществ и их соединений (оксидов, нитридов). Например, ввода вместо водорода кислород и добавляя пары тетрахлорида кремния, можно получать нанопорошки диоксида кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан трансформаторный плазмотрон, позволяющий проводить различные плазмохимиче-

ские реакции при атмосферном давлении в струе плазмы аргона или в струе плазмы аргона с водородом, а также любых других газов или жидкостей при подаче их в виде пара в нижнюю часть плазмотрона.

Впервые осуществлен ввод водорода в нижнюю часть газоразрядной камеры, что увеличило мощность плазмотрона в 1.5 раза и мощность струи в 4 раза.

Созданный трансформаторный плазмотрон может быть использован для проведения различных окислительных и восстановительных плазмохимических реакций с получением особо чистых веществ, а также нанопорошков веществ и их соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eckert H.U.* Induction Plasmas at Low Frequencies // AIAA J. 1971. № 8. P. 1452.
2. *Гольдфарб В.М., Донской А.В., Дресвин С.В., Резвов В.А.* Некоторые характеристики низкочастотного разряда в трансформаторном плазмотроне // ТВТ. 1979. Т.17. № 4. С. 703.
3. *Коган В.А., Уланов И.М.* Исследование возможности создания плазмотронов трансформаторного типа // ТВТ. 1993. Т. 31. № 1. С. 105.
4. *Колмаков К.Н., Уланов И.М., Предтеченский М.Р., Приходько В.Г.* Эффект “автозакалки” монооксида азота при вихревой стабилизации низкочастотного разряда трансформаторного типа // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 3. С. 433.
5. *Кацнельсон С.С., Ковальская Г.А.* Теплофизические и оптические свойства аргоновой плазмы. Новосибирск: Наука, 1985. 149 с.
6. *Сулис А.Л.* Термодинамика высокотемпературных процессов. Спр. М.: Металлургия, 1985. 568 с.