

УДК 537.521(575.2) (04)

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ МАГ- НЕТРОННОГО ТИПА В СМЕСИ Ar-CH₄

С.В. Автаева – канд. физ.-мат. наук, доц.

Effect of argon on production of atomic hydrogen in the magnetically enhanced RF discharge in argon-methane mixtures is studied by optical actinometry method. It is shown that in the experimental conditions a formation of hydrogen atoms is realized in processes of dissociation of methane molecules in interaction with metastable argon atoms.

1. Введение. Низкотемпературная плазма в смеси углеводородсодержащих газов (метан, ацетилен и др.) с инертными газами (гелий, аргон) и водородом в настоящее время интенсивно изучается, поскольку используется для плазменного осаждения аморфных гидрогенизированных углеродных пленок, получивших название алмазоподобных из-за таких характерных свойств, как высокие твердость, электрическая прочность, химическая стойкость, прозрачность в видимой области спектра и др. [1–6]. Благодаря этим свойствам они могут использоваться в качестве диэлектрических и защитных слоев в микроэлектронике, в качестве защитных покрытий в оптике, как механические защитные покрытия и т.д. [7, 8] Инертный газ позволяет поддерживать параметры источника плазмы на заданном уровне при относительно небольшой концентрации реагирующих газов, способной проводить контролируемый процесс осаждения пленки. Кроме того, наличие инертного газа часто приводит к повышению концентрации активных компонент, образующихся в плазме. Водород способствует образованию специфических химических связей в растущей углеродной пленке, улучшающих ее качество [9, 10]. Параметры осаждаемых пленок определяются кинетикой физико-химических реакций в объеме плазмы и процессами взаимодействия плазмы с поверхностью, которые в свою очередь связаны с процессами генерации, переноса и гибели заряженных частиц.

В данной работе рассмотрено влияние атомарного аргона на процесс образования атомарного водорода в замагниченной плазме высокочастотного разряда в смеси аргона с метаном.

2. Эксперимент. Исследовался ВЧЕ разряд магнетронного типа в асимметричном реакторе [5]. ВЧ разряд горит между центральным электродом и стенками цилиндрической разрядной камеры, которая заземлена. На электрод подается ВЧ сигнал от ВЧ-генератора с частотой 13.6 МГц через согласующее устройство. ВЧ электрод, полый внутри, имеет размеры $1.6 \times 10 \times 10$ см и охлаждается с помощью масла. Диаметр рабочей камеры 30 см, высота 25 см. Проходящая и отраженная ВЧ мощности измеряются рефлектометром. Две магнитные катушки создают магнитное поле, направленное перпендикулярно ВЧ электрическому полю. Остаточное давление в рабочей камере 10^{-4} – 10^{-5} Тор. Расход газа регулируется игольчатыми натекателями и контролируется датчиками расхода газа.

Действующие параметры установки изменялись в следующих пределах: давление рабочего газа 0.5–10 Па, мощность, подводимая к разряду, 80–150 Вт, индукция магнитного поля 25–200 Гс. В качестве рабочего газа использовалась смесь аргона с метаном. Парциальное давление метана в разрядной камере поддерживалось постоянным 0.1 Па и объемное содержание метана в смеси газов колебалось от 1 до 10% в зависимости от парциального давления аргона.

Для измерения усредненных по времени параметров плазмы использовались оптическая эмиссионная спектроскопия и двойной ленгмюровский зонд.

Регистрирующая оптическая система включала монохроматор МДР-23 и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79 с автоматизированной системой регистрации спектров, собранной на базе персонального компьютера. Для регистрации пространственного распределения интенсивности излучения разряда вблизи ВЧ электрода использовалась сканирующая система, состоящая из щели и световода, передвигаемых параллельно плоскости диагностического окна реактора с помощью электродвигателя.

Для измерения средней энергии электронов и концентрации заряженных частиц в камеру был помещен неподвижный двойной электрический зонд из молибденовой проволоки диаметром 0.14 мм, длина собирающих концов зонда составляла 7 мм, расстояние между зондами – 10 мм. Зонд устанавливался перпендикулярно направлению магнитного поля и ВЧ электроду на расстоянии 1 см и 5 см от ВЧ электрода.

3. Результаты и обсуждения. Известно, что на свойства алмазоподобных покрытий большое влияние оказывает содержащийся в плазме атомарный водород, что обусловлено двумя эффектами, во-первых, водород стабилизирует свободные связи на поверхности растущей пленки, во-вторых, способствует стравливанию неалмазной компоненты в растущей пленке, например, графита [9, 10].

В тлеющем разряде в смесях углеводородсодержащих газов с инертными газами возможно определение концентрации атомарного водорода спектрально-оптическими методами по отношению интенсивностей спектральных линий атомарного водорода H_{α} (656.2 нм) серии Бальмера и аргона AgI (696.5 нм) [11, 12]. Были проведены оценки механизмов возбуждения излучающих состояний Ag ($4p^3P_1$) и H (3S, 3P, 3D) в плазме ВЧ разряда в смеси метана с аргоном в диапазоне давлений рабочего газа 1–10 Па. Использовалась следующая схема реакций заселения и обеднения излучающих A^* и метостабильных A_m состояний атомов A аргона и водорода [11, 12]



Здесь e – электроны, M – атомы и молекулы (Ag , CH_4 , H_2 и др.) в основном в возбужденных состояниях, A_k – возбужденный атом в состоянии k .

Константы скоростей реакций (3–5, 8) для атомов аргона и водорода приведены в таблице.

Константа скорости k_7 есть суммарная вероятность перехода из возбужденного состояния A^* в нижележащие состояния $k_7 = \sum A_{ki} = A = 1/\tau$, где τ – время жизни возбужденного состояния. Вероятность перехода A_{ki} для линии Ag (696.5 нм) и время жизни τ для излучающего уровня Ag ($4p^3P_1$), а также A_{ki} для линии H_{α} (656.2 нм) и τ для излучающего уровня H (3S, 3P, 3D) были взяты из [17, 18].

По измерениям Д.И. Словецкого с сотр. [13], возбужденное состояние Ag ($4p^3P_1$) тушится атомами аргона в основном состоянии, константа скорости составляет величину $k_6 \leq 5 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$. Время тушения состояния Ag ($4p^3P_1$) в наших условиях составляет $10^{-4} - 10^{-5} \text{ с}$, что гораздо больше времени гибели данного состояния за счет излучения ($\tau_{\text{рад}} \sim 1.5 \times 10^{-7} \text{ с}$). Следовательно, реакцию (6) можно

исключить из рассмотрения. По-видимому, то же самое можно сказать о состояниях H(3S, 3P, 3D), ответственных за излучение линии H $_{\alpha}$ серии Бальмера.

Константы скоростей тушения метастабильных состояний Ar($^3P_{0,2}$) и H($2^2S_{1/2}$)

	$k_3, \text{cm}^3/\text{c}$	$k_4, \text{cm}^3/\text{c}$	$k_5, \text{cm}^3/\text{c}$	k_8, c^{-1}
Ar($^3P_{0,2}$)	$4 \cdot 10^{-7}$ [11,12,13]	$6 \cdot 10^{-7}$ [11,12,13]	Ar: $3 \cdot 10^{-15}$ [13] CH $_4$: $4 \cdot 10^{-10}$ [11,12]	$(360/\text{PR}^2) \cdot (\text{T}_g/300)^{1/2}$ [16]
H($2^2S_{1/2}$)	$4 \cdot 10^{-7}$ [11,12]	$6 \cdot 10^{-7}$ [11,12]	Ar: $6 \cdot 10^{-10}$ [11,12,14] CH $_4$: $4 \cdot 10^{-9}$ [15]	

R – радиус разрядной камеры, P – давление газа и T $_g$ – температура газа.

Константы k $_1$ и k $_2$ скоростей реакций (1) и (2) под действием электронного удара выражаются через сечения реакций $\sigma(\varepsilon)$ и функцию распределения электронов по энергиям $f(\varepsilon)$

$$k = (2 / m)^{1/2} \int_{\varepsilon_n}^{\infty} \sigma(\varepsilon) \varepsilon^{1/2} f(\varepsilon) d\varepsilon; \quad (9)$$

$$\int_0^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon = 1,$$

где m – масса электрона, ε – его энергия, ε_n – пороговая энергия реакции.

Сечения возбуждения $\sigma_1(\varepsilon)$ для перехода 1S – 3S, 3P, 3D атома водорода взяты из [19], $\sigma_2(\varepsilon)$ для перехода 1S – 2 $^2S_{1/2}$ – из [20], для атома аргона $\sigma_1(\varepsilon)$ (3p 1S_0 – 4p 3P_1 – переход) и $\sigma_2(\varepsilon)$ (3p 1S_0 – 4s $^3P_{0,2}$ – переход) из [21].

Оценки показали, что в диапазоне давлений метана в разрядной камере 1–10 Па, когда метан является основным газом смеси, а аргон составляет небольшую добавку (1÷10 %), заселение излучающих состояний Ar (4p 3P_1) и H (3S, 3P, 3D) в основном осуществляется прямым электронным ударом из основного состояния атомов аргона Ar и водорода H соответственно, а опустошение уровней Ar (4p 3P_1) и H (3S, 3P, 3D) происходит в результате радиационных переходов в нижележащие состояния атомов Ar и H соответственно. При этом метастабильные состояния атомов аргона и водорода эффективно тушатся при столкновениях с молекулами метана. В этом случае по отношению интенсивностей линий H $_{\alpha}$ (656.2 нм) и Ar (696.5 нм) можно вычислить отношение концентраций атомов водорода и аргона в основном состоянии [22]:

$$\frac{[H]}{[Ar]} = \frac{I_H (A_{ki} / \lambda)_H k_{1Ar} \tau_{Ar}}{I_{Ar} (A_{ki} / \lambda)_{Ar} k_{1H} \tau_H} \quad (10)$$

и затем концентрацию атомарного водорода [H] при известной концентрации аргона [Ar] в разрядной камере.

Для отношения констант k_{1Ar}/k_{1H} можно использовать упрощенное соотношение

$$\frac{k_{1Ar}}{k_{1H}} = \frac{\{\sigma_1(\varepsilon)f(\varepsilon)_{\varepsilon=\varepsilon_{n+1}}\}_{Ar}}{\{\sigma_1(\varepsilon)f(\varepsilon)_{\varepsilon=\varepsilon_{n+1}}\}_{H}} \quad (11)$$

В случае же, когда метан составляет лишь небольшой процент смеси CH_4 : Ar (1÷10 %), тушение метастабильного уровня атомов аргона на молекулах метана уже не обеспечивает малую концентрацию атомарного аргона в метастабильном состоянии и заселение возбужденного состояния Ar ($4p^3P_1$) осуществляется ступенчато через метастабильный уровень Ar ($4s^3P_{0,2}$). Оценки показывают, что в диапазоне давлений аргона 1–10 Па и при концентрациях электронов $\geq 10^{10} \text{ см}^{-3}$ в тушении метастабильных атомов аргона конкурируют процессы (3), (4), (5) и (8).

При этом отношение концентраций атомарного водорода и аргона связано с отношением интенсивностей спектральных линий H_α (656.2 нм) и ArI (696.5 нм) соотношением

$$\frac{[H]}{[Ar]} = \frac{I_H(A_{ki}/\lambda)_H}{I_{Ar}(A_{ki}/\lambda)_{Ar}} \left(\frac{1}{k_{1H}} \right) \times \left(\frac{k_2 * k_3 * e}{(k_3 + k_4) * e + k_5[CH_4] + k_8} \right) \frac{\tau_{Ar}}{\tau_H} \quad (12)$$

Для отношения констант k_{2Ar}/k_{1H} можно использовать приближенное соотношение

$$\frac{k_{2Ar}}{k_{1H}} = \frac{\{\sigma_2(\varepsilon)f(\varepsilon)_{\varepsilon=\varepsilon_{n+1}}\}_{Ar}}{\{\sigma_1(\varepsilon)f(\varepsilon)_{\varepsilon=\varepsilon_{n+1}}\}_{H}} \quad (13)$$

Экспериментально были измерены интенсивности спектральных линий ArI (696.5 нм) и H_α (656.2 нм) от мощности, вкладываемой в разряд (W), давления метана в разрядной камере (P) и индукции внешнего магнитного поля (B).

Для спектральных линий аргона ArI (696.5 нм) и водорода H_α (656.2 нм) наблюдалась близкая к линейной зависимость интенсивности от вкладываемой в разряд мощности, с увеличением мощности разряда интенсивность линий возрастала.

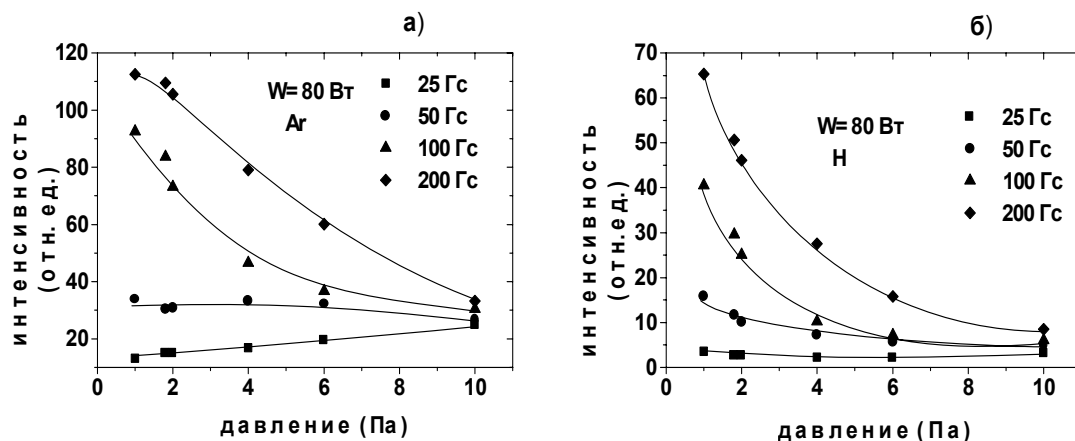


Рис. 1. Зависимости интенсивностей спектральных линий а – ArI (696.5 нм), б – H_α (656.2 нм) от давления газа в разрядной камере и индукции магнитного поля.

На рис. 1 а, б показаны соответственно зависимости интенсивностей спектральных линий AgI (696.5 нм) и H_{α} (656.2 нм) от давления газа в разрядной камере при значениях индукции магнитного поля 25, 50, 100 и 200 Гс.

Интенсивность обеих линий растет с ростом индукции магнитного поля, что также связано с увеличением скоростей возбуждения излучающих состояний, обусловленным замагничиванием электронов в магнитном поле. Спад интенсивности спектральных линий AgI (696.5 нм) и H_{α} (656.2 нм) с ростом давления обусловлен уменьшением концентрации электронов с ростом давления в разрядной камере и не связан с тушением излучающего или метастабильного состояний молекулами газа, поскольку эти процессы в условиях нашего эксперимента пренебрежимо малы.

На рис. 2 а, б показаны зависимости концентрации электронов, измеренные в замагниченной плазме ВЧ разряда в чистом аргоне в зависимости от величины магнитного поля (а) и давления аргона (б).

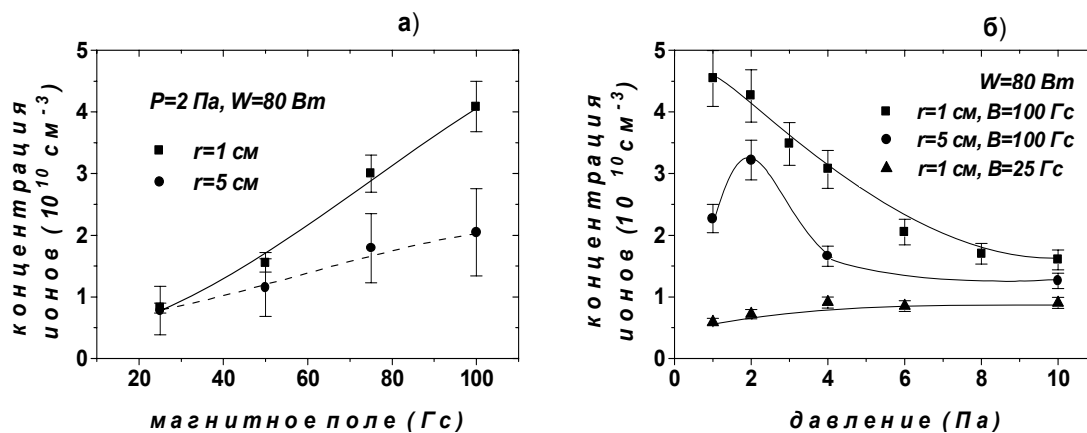


Рис. 2. Зависимости концентрации заряженных частиц
а – от индукции магнитного поля, б – давления газа в разрядной камере.

Концентрация электронов определяется балансом процессов генерации и потерь заряженных частиц. В разряде в магнитном поле большое влияние на скорости этих процессов оказывает магнитное поле. Вследствие замагниченности электронов их потери на стенках уменьшаются, а частота столкновений с атомами увеличивается, приводя к увеличению частоты ионизации, концентрация электронов увеличивается. Как видно из рис. 2, увеличение индукции магнитного поля приводит к росту концентрации электронов в межэлектродном промежутке и мало влияет на температуру электронов. Рост давления способствует уменьшению концентрации электронов при среднем магнитном поле (100 Гс) и увеличению концентрации электронов при слабом магнитном поле (25 Гс). На расстоянии 5 см от катода на зависимости концентрации электронов от давления наблюдается максимум при давлении $\sim 2 \text{ Pa}$. Температура электронов принимает значения в диапазоне (5–10) эВ и уменьшается с ростом давления. Для замагниченных электронов фактор Холла уменьшается с ростом давления, что приводит к увеличению потерь электронов на стенках, концентрация электронов также уменьшается.

Зависимости концентрации заряженных частиц от давления аргона в разрядной камере (P) и индукции внешнего магнитного поля (B) хорошо коррелируют с аналогичными зависимостями для интенсивности спектральной линии аргона AgI 696.5 нм. Добавление к аргону небольшого количества метана не изменяет ход зависимостей концентрации электронов от давления газа в разрядной камере (рис. 1 а).

Значения концентрации атомарного водорода в замагниченной плазме ВЧ разряда в смеси аргона с метаном в зависимости от давления газа в разрядной камере (P), рассчитанные без учета и с учетом ступенчатого заселения состояния аргона $Ag(4p^3P_1)$ через метастабильный уровень $Ag(3P_{0,2})$, показаны на рис. 3 а, б. Расчет концентрации атомарного водорода проводился согласно выражению (10) (без учета ступенчатого заселения) и (12) (с учетом ступенчатого заселения). При расчетах функция распределения электронов по энергиям предполагалась максвелловской с температурой электронов ~ 5 эВ. Учет ступенчатого заселения состояния аргона $Ag(4p^3P_1)$ через метастабильный уровень $Ag(3P_{0,2})$ приводит к изменению рассчитанной концентрации атомарного водорода примерно в 1–5 раз. Как видно из рис. 2, концентрация атомарного водорода растет с ростом давления аргона в разрядной камере и увеличением индукции магнитного поля. В то же время концентрация электронов с ростом давления аргона в разрядной камере уменьшается (рис. 2).

В общем случае изменение температуры электронов должно учитываться при расчете концентрации атомарного водорода как согласно выражению (10), так и выражению (12), поскольку изменение температуры влечет за собой изменение отношений констант k_{1Ar}/k_{1H} , k_{2Ar}/k_{1H} , определяемых выражениями (11) и (13) соответственно. Оценки показывают, что увеличение температуры электронов от 5 до 10 эВ при неизменной концентрации заряженных частиц приводит к увеличению концентрации атомарного водорода, рассчитанной в соответствии с (12), в $\sim 1,8$ раз. Поскольку при расчете концентрации атомарного водорода использовалось постоянное значение температуры электронов 5 эВ, концентрации атомарного водорода, представленные на рис. 3 б, дают нижний предел для концентрации атомарного водорода.

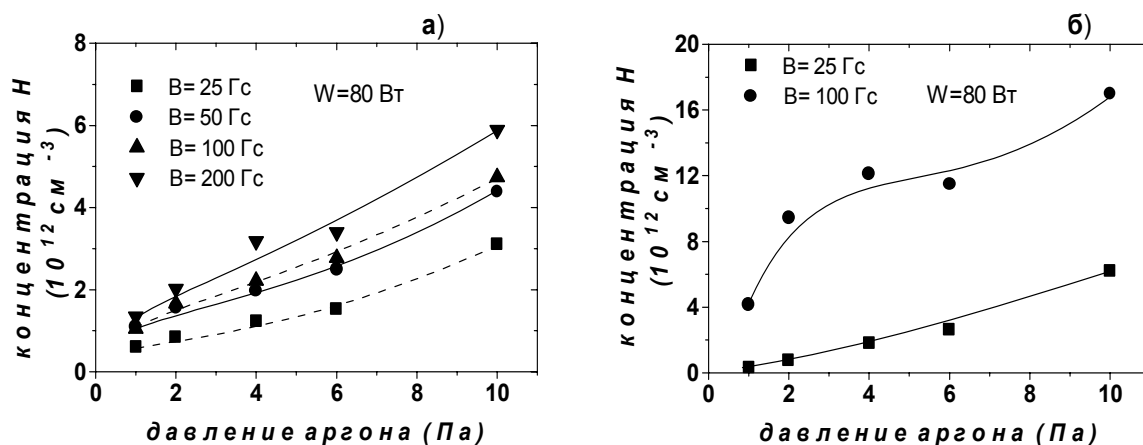


Рис. 3. Концентрации атомарного водорода в ВЧ разряде в смеси аргон + метан в зависимости от давления газа в разрядной камере.

а – ступенчатое возбуждение через метастабильные уровни не учитывается;
б – учитывается заселение излучающего состояния аргона через метастабильный уровень.

Проанализируем возможные механизмы образования атомарного водорода в замагниченной плазме ВЧ разряда в смеси аргона с метаном. Образование атомарного водорода в высокочастотном разряде в смеси аргона с метаном при отрыве электронной температуры от газовой может протекать путем диссоциации метана при столкновениях с электронами и последующей диссоциации радикалов также при столкновениях с электронами:



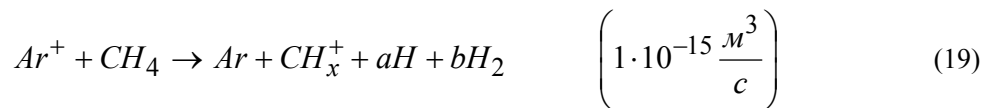


где $(x = 1, 2, 3)$.

Константы скоростей процессов (14)–(18) зависят от вида функции распределения электронов по энергиям и в случае максвелловской ФРЭЭ это функции температуры электронов. Для оценок использовались значения констант скоростей процессов (14)–(16) из работы [23], где исследовался ВЧЕ разряд ($f = 2$ МГц) в метане при давлении ~ 40 Па и мощности 15 Вт. Авторы приводят следующие значения констант скоростей $45 \times 10^{-15} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $32 \times 10^{-15} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $3.7 \times 10^{-15} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ для процессов (14), (15), (16) соответственно. Однако при преимущественном образовании атомарного водорода в процессах (14)–(18) зависимость концентрации атомарного водорода от давления газа в камере должна коррелировать с аналогичной зависимостью для концентрации заряженных частиц. Из рис. 1, 2 б, 3 видно, что при величине магнитного поля > 25 Гс наблюдаются противоположные зависимости.

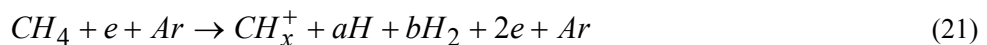
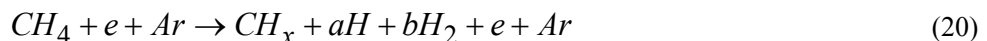
Термическое разложение метана при температурах газа, характерных для плазмы исследуемого высокочастотного разряда магнетронного типа (< 1000 К), невелико. Взаимодействие радикалов метана между собой приводит к образованию более тяжелых углеводородов и их радикалов и также не способствует повышению концентрации атомарного водорода.

К образованию атомарного водорода также приводит реакция диссоциативной ионизации молекулы метана в процессе перезарядки на ионах аргона [24]



Энергия ионизации атома аргона $Ar \rightarrow Ar^+ + e$ 15.8 эВ [25], энергия диссоциации молекулы метана $CH_4 \rightarrow CH_3 + H$ равна 4.51 эВ [25], энергия ионизации радикала CH_3 ($CH_3 \rightarrow CH_3^+ + e$) – 9.86 эВ [26]. Таким образом, дефект энергии данной реакции составляет $\Delta E = -1.43$ эВ. Однако константа скорости резонансной перезарядки (19), как видно, существенно меньше скорости диссоциации молекул метана при столкновениях с электронами (14, 15) и при условии примерного равенства концентраций электронов и ионов процесс (19) не может конкурировать с процессами (14, 15).

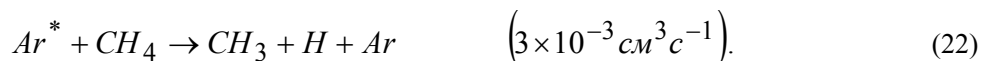
С ростом давления увеличивается вероятность тройных столкновений и соответственно вероятность реакций



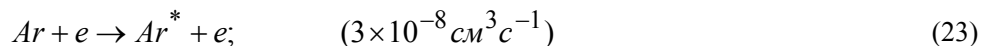
Однако при низких давлениях, характерных для настоящего эксперимента, эти процессы также не могут конкурировать с процессами (14)–(19).

Следует отметить, что скорость образования атомов водорода в процессах дальнейшей диссоциации радикалов CH_x (17, 18) и молекулярного водорода ($e + H_2 \rightarrow H + H$) также пропорциональна концентрации заряженных частиц, учет этих процессов не может существенно повлиять на характер зависимости концентрации атомарного водорода от давления аргона в разрядной камере.

В обзоре [27] отмечается, что в тлеющих разрядах в смеси метана с аргоном при давлении ≈ 10 Па, когда концентрация метастабильных атомов аргона достигает величины $\approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$, основной вклад в диссоциацию вносит тушение метастабильных атомов аргона в процессе пеннинговской диссоциации молекулы метана



Метастабильный аргон Ar^* образуется при столкновениях с электронами



и его концентрация N_{Ar^*} пропорциональна произведению $N_{Ar}N_e$. При этом концентрация атомарного водорода, образующегося в процессе (22), $\sim N_{Ar^*}N_{CH_4} \sim N_{Ar}N_eN_{CH_4}$. При увеличении давления газа от 1 Па до 10 Па концентрация аргона N_{Ar} увеличивается в 10 раз, при этом концентрация электронов при $V = 100$ Гс, $W = 80$ Вт уменьшается примерно в 2,5 раза (рис. 2 б). Поскольку давление метана поддерживалось постоянным, концентрация атомарного водорода при увеличении давления газа от 1 Па до 10 Па должна увеличиться примерно в 4 раза при преимущественном образовании атомарного водорода в процессе (22). Как видно из рис. 3, наблюдаемое экспериментально увеличение концентрации атомарного водорода с увеличением давления аргона в разрядной камере близко к полученной выше оценке.

Таким образом, образование атомарного водорода в высокочастотном разряде магнетронного типа в смеси аргона с метаном ($1 \div 10\% \text{ Ar} + \text{CH}_4$) в диапазоне давлений $1 \div 10$ Па не объясняется диссоциацией метана при столкновениях с электронами и последующей диссоциации радикалов также при столкновениях с электронами – процессы (14)–(18). Увеличение концентрации атомарного водорода при увеличении давления аргона в условиях уменьшения концентрации заряженных частиц в разряде (рис. 2) возможно при образовании атомов водорода в процессе пеннинговской диссоциации молекул метана через метастабильное состояние атомов аргона $Ar(4s)$ – процесс (22). Активация плазмы магнитным полем приводит к смещению роли этого процесса в область более низких давлений.

Литература

1. Mitomo T., Ohta T., Kondoh E. and Ohtsuka K. // J. Appl. Phys. – 1991. – V.70. – N.8. – P. 4532–4539.
2. Lipp M.J. and O'Brien J.J. // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V. 65. – N. 10. – P. 1317–1319.
3. Eguchi K., Yata S. and Yoshida T. // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V.64. – N. 1. – P. 58–60.
4. Gielen J.W.A.M. Plasma beam deposition of amorphous hydrogenated carbon // Thesis. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1996. – 151 p.
5. Avtaeva S. V., Otorbaev D. K., Mamyrbekov M.Z. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1997. – V. 30. – № 21. – P. 3000.
6. Gielen J.W.A.M., Kessels W.M.M., van de Sanden M.C.M. and Schram D.C. // J. Appl. Phys. – 1997. – V. 82. – N. 5. – P. 2643–2654.
7. Angus J. C., Koidl P. and Domitz S. In Plasma deposited thin films, edited by Mort J. and Jansen F. // CRC Press. Boca Raton. – Florida, 1986. – P. 89.
8. Prince E.T. // J. Appl. Phys. – 1991. – V.70. – P. 4903.
9. Rother B., Siegel J., Muhling I. et. al. // Mater. Sci. and Eng. A. – 1991. – V.140. – N. 1–2. – P. 780–783.
10. Beulens J. Surface modification using a cascaded arc plasma source // Thesis. Eindhoven: Eindhoven: Technological University, 1992.
11. Гальцев В.Е., Иванов Ю.А., Словецкий Д.И., Рытова Н.М., Тимакин В.Н. // ХВЭ. – 1983. – Т.17. – № 2. – С. 164–166.
12. Иванов Ю.А., Рытова Н.М., Солдатова И.В., Тимакин В.Н. и др. // Физико-химические процессы в низкотемпературной плазме. – М.: ИХХС АН СССР, 1985. – С. 140–167.
13. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. – М.: Наука, 1980.
14. Kas R. S. and Williams W. L. // Phys. Rev. – 1973. – A. 7. – P. 10.

15. *Tochikubo F., Makabe T., Kakuta S., Suzuki A.* // J. Appl. Phys. – 1992. – V. 71. – N. 5. – P. 2143.
16. *Смирнов Б.М.* Ионы и возбужденные атомы в плазме. – М.: Атомиздат, 1974.
17. *Груздев П.Ф.* Вероятности переходов и радиационные времена жизни уровней атомов и ионов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
18. *Verolainen Ya. F. and Osherovich A. A.* // Opt.Spectrosc. – 1968. – V. 25. – P. 466.
19. *Calloway J.* // Phys. Rev. A. – 1988. – V. 37. – P. 3692.
20. *Hills D., Kleinpoppen H., Koschmieder H.* // Proc. Phys. Soc. – 1966. – V. 89. – P. 35.
21. *Chutjon A., Cartwright D.C.* // Phys.Rev. A. – 1981. – V. 23. – P. 2178.
22. *Avtaeva S.V., Mamytbekov M.Z., Otorbaev D.K.* // Proc. of the 12th Int. Symposium on Plasma Chemistry. Minneapolis, Minnesota, USA. – 1995. – V.1. – P. 409.
23. *Kline L.E., Partlow W.D. and Bies W.E.* // J. Appl. Phys. – 1989. – V. 65. – N.1. – P. 73.
24. *de Graaf A.* Deposition of CNH materials: plasma and film characterization // Thesis. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2000. – 59 p.
25. *Радицг А.А., Смирнов Б.М.* Справочник по атомной и молекулярной физике. – М.: Атомиздат, 1978.
26. *Веденеев В.И., Гурвич Л.В., Кондратьев В.Н. и др.* Энергии разрыва химических связей: Справочник АН СССР. – М.: Физматгиз, 1962.
27. *Иванов Ю.А.* // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. / Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2000. – Т. 3. – С. 330–345.