

полях; при дополнительном использовании одновременной обработки растущей пленки потоком ионов аргона.

В первом случае для осаждения пленок *i*-углерода использовалось планарное магнетронное распылительное устройство, конструкция которого мало отличалась от описанных в литературе [4, 5]. Во втором случае для напыления пленок использовалось специальное устройство, в котором разряд происходил в дополнительной камере, соединенной с основной небольшим отверстием. В дополнительной камере поддерживалось давление циклогексана приблизительно на порядок больше, чем в основной, а параметры разряда подбирались так, что из отверстия в результате деструкции циклогексана истекал поток ионов, из которых осаждалась пленка. В третьем случае в дополнительную камеру напускалась смесь аргона и циклогексана, так что растущая пленка углерода подвергалась также непрерывной бомбардировке ионами аргона.

Измерение плотности пленок осуществлялось с помощью взвешивания образцов большой площади на весах ВЛР-20М и измерения толщины пленок на микроинтерферометре МИИ-11. При весе образцов не менее 0.2 г и толщине пленок не менее 0.4 мкм ошибка измерения плотности пленок составила не более 4 %.

В результате исследований установлено, что первым методом можно получить углеродные пленки плотностью 1.0—1.5 г/см<sup>3</sup>, а вторым и третьим — 1.6—2.2 г/см<sup>3</sup>.

Отметим, что в [3] были получены алмазоподобные пленки с плотностью 0.9—1.6 г/см<sup>3</sup> при значительном содержании водорода.

Авторы благодарны В. И. Жилиной за помощь в изготовлении образцов и М. И. Рогайлину за обсуждение работы.

#### Литература

- [1] Виноградов А. В., Сагитов С. И. — Квант. электрон., 1983, т. 10, № 11, с. 2152—2165.
- [2] Готт Ю. В., Явлинский Ю. Н. Взаимодействие медленных частиц с веществом и диагностика плазмы. М., 1973. 128 с.
- [3] Craig S., Sharding G. L. — Thin Sol. Films, 1984, N 97, p. 345—361.
- [4] Данилин Б. С., Сыргин В. К. Магнетронные распылительные системы. М., 1982. 73 с.
- [5] Герасимович С. С., Елинезон В. М., Зубков Л. В. и др. — В кн.: IV Всесоюз. конф. «Оптика лазеров»: Тез. докл. Л., 1983, с. 277—278.

Поступило в Редакцию 23 января 1985 г.

УДК 537.52

Опт. и спектр., т. 59, в. 3, 1985

### ЭМИССИОННЫЕ СПЕКТРЫ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА И СВЧ РАЗРЯДА ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ В СМЕСИ Ag+CH<sub>4</sub>. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Герасимов Ю. А., Лебедев Ю. А.

Прошло более 25 лет с тех пор как в [1] отмечалось, что «вопрос о влиянии частоты генератора на возбуждение аналитических линий и характеристики газового разряда все еще недостаточно изучен». К сожалению, в настоящее время ситуация изменилась незначительно. Расширение перспективных областей использования СВЧ разряда (СВЧР) требует выяснения особенностей СВЧР по сравнению с другими типами разрядов. Экспериментальные работы такого рода периодически появляются, однако обычно не ясно, что было неизменным при сравнении. Одним из немногих исключений является [2], в которой изменялась частота электрического поля  $\omega$  и поддерживалась неизменной напряженность поля у поверхности разрядной трубки. Из [2] следует, что при увеличе-

нии  $\omega$  растут энерговклад в плазму и концентрация электронов  $n_e$ , что ведет к изменению спектров излучения разряда.

Ниже приведены некоторые результаты исследования излучения ( $\lambda=850.0 \div 430.0$  нм) СВЧР и положительного столба разряда постоянного тока (РПТ) при одинаковых энерговкладах в плазму ( $W_{\text{погл}}=0.5 \div 10$  Вт) в смеси  $\text{Ar}+1$  об %  $\text{CH}_4$  при давлениях 0.34—1.1 кПа. Разряды зажигались в кварцевых разрядных трубках с диаметром 21 мм и были сконструированы таким образом, чтобы объемы резонаторного СВЧР [3] и положительного столба РПТ [4] были одинаковы (длина  $\sim 3.5$  см). Энерговклад в СВЧР измерялся калориметрическим методом [3], а в РПТ — по разрядному току ( $I_p=0.05 \div 0.4$  А) и напряженности продольного электрического тока, измеренному нагреваемыми электрическими зондами [4]. Регистрировалось излучение через торцы разрядных трубок вдоль направлений, параллельных осям разрядов (приведенные далее результаты относятся к области максимума интенсивности излучения разрядов), а также изучалось изменение интенсивности излучения вдоль оси разряда.

Сведения о газофазных продуктах разложения  $\text{CH}_4$  в РПТ и СВЧР при тех же условиях приведены в [3, 4].

Основные результаты спектральных измерений в РПТ и СВЧР можно сформулировать следующим образом.

1. Спектральный состав излучения РПТ и СВЧР одинаков. Зарегистрировано излучение интенсивной группы линий  $\text{Ar}$  ( $2p_j-1s_k$ ,  $j=1 \div 10$ ,  $k=2-5$ ), а также линий с более высокими потенциалами возбуждения. Продукты разложения  $\text{CH}_4$  представлены линиями  $H_\alpha$  (656.2 нм),  $H_\beta$  (486.1 нм), а также полосу Свана  $\text{C}_2$  ( $d^3\Pi_g-a^3\Pi_u$ ) с длинами волн около 516.5 нм ( $\Delta v=0$ ), 473.7 нм ( $\Delta v=+1$ ), 563.5 нм ( $\Delta v=-1$ ) и полосой излучения  $\text{CH}$  ( $A^2\Delta-X^2\Pi$ ) при 431.4 нм.

2. Распределение интенсивностей излучения линий  $\text{Ar}$  в СВЧР и РПТ незначительно отличаются. Так, в СВЧР более интенсивно, чем в РПТ, излучение с уровня  $\text{Ar}$  ( $2p_1$ ) и с некоторых высоколежащих уровней (например,  $4d_s$ ). Систематического увеличения интенсивности излучения линий в СВЧР по сравнению с РПТ при увеличении потенциала возбуждения не наблюдается.

3. Относительные интенсивности линий излучения  $H_\alpha$  (по сравнению с линией  $\text{Ar}$  (696.5 нм)) в РПТ и СВЧР и их зависимости от давления и  $W_{\text{погл}}$  близки (отношение  $I_{H_\alpha}/I_{696.5}$  растет при увеличении  $W_{\text{погл}}$  и остается меньше 0.5 для всех режимов). Относительные интенсивности излучения радикалов  $\text{C}_2$  и  $\text{CH}$  в РПТ существенно выше, чем в СВЧР: в СВЧР  $I_{\text{C}_2}/I_{696.5} < 0.5$ , а  $I_{\text{CH}}/I_{696.5} \leq 0.6$  во всех режимах, в то время как в РПТ эти отношения могут достигать значений 2 и 1.5 соответственно.

4. Абсолютные интенсивности излучения линий и полос в РПТ выше, чем в СВЧР. Отношения  $I_{\text{РПТ}}/I_{\text{СВЧР}}$  для некоторых линий и полос приведены в таблице.

5. Распределения излучения продуктов реакций в СВЧР и РПТ различаются, но абсолютные интенсивности линий и полос сходным образом зависят от величин, с которыми прямо связана  $n_e$ : в РПТ — это  $I_p$ , а в СВЧР —  $W_{\text{погл}}$  (см. рисунок). При давлении 1.1 кПа зависимости аналогичны приведенным. Отметим линейную зависимость  $I_{\text{CH}}$  и близкую к квадратичной зависимость  $I_{H_\alpha}$  от  $I_p$  и  $W_{\text{погл}}$ . При давлении 0.34 кПа  $I_{\text{CH}}$  остается линейной функцией

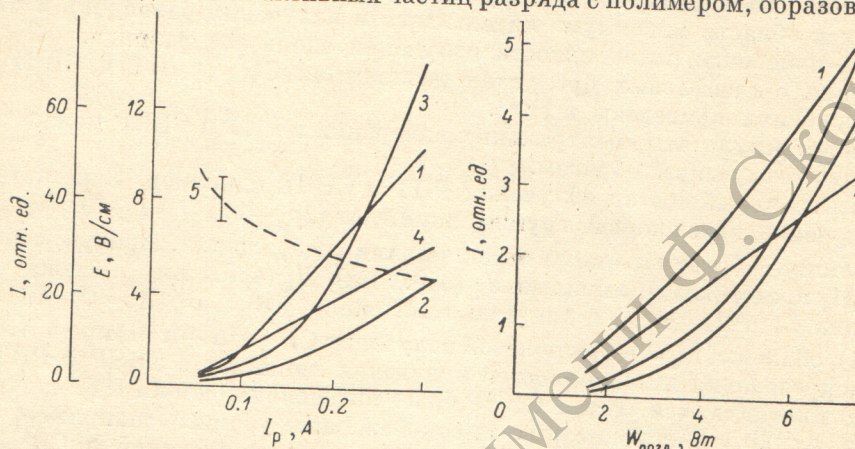
Давление, кПа	Источник излучения	$W_{\text{погл}}, \text{Вт}$								
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
0.34	Ar (696.5)	3.3	7.5	8.7	10.7	11	—	—	—	—
	$\text{C}_2$ (516.5)	22	40	40	32	22	—	—	—	—
	CH (431.4)	8.3	12.5	14.5	15	13	—	—	—	—
	$H_\alpha$ (656.2)	5.8	9.7	10	14	—	—	—	—	—
1.1	Ar (696.5)	—	—	1.7	1.7	2.2	2.7	2.8	2.9	2.9
	$\text{C}_2$ (516.5)	—	—	17	16	15	15	17	13	10
	CH (431.4)	—	—	5.8	6.2	7.0	7.3	6.3	6.6	6.3
	$H_\alpha$ (656.2)	—	—	2.7	2.5	3.3	4.0	5.0	4.7	3.8

$I_p$  и  $W_{\text{полг}}$ , а  $I_{H_\alpha}$  и  $I_{C_2}$  при  $W_{\text{полг}} \geq 2$  Вт становятся линейными функциями  $I_p$  в РПТ и  $W_{\text{полг}}$  в СВЧР.

6. Колебательные температуры  $C_2$ , определенные по относительным интенсивностям полос (0—0) и (1—1), в РПТ и СВЧР равны  $2500 \pm 500$  К.

Линейная зависимость  $I_{\text{СН}}$  от  $I_p$  и  $W_{\text{полг}}$  качественно может быть объяснена, если, как и в [5], принять, что разложение  $\text{СН}_4$  идет в объеме по схеме  $\text{СН}_4 \rightarrow \text{СН} (A^2\Delta) + \text{Н}_2 + \text{Н}$  (пороговая энергия 12 эВ). В разряде эта реакция может инициироваться электронным ударом. Аналогичная схема использовалась в [6] для объяснения излучения  $\text{SiH}$  в разряде в  $\text{SiH}_4$ . Возбуждение образовавшегося атома  $\text{H}$  электронным ударом приводит к излучению  $H_\alpha$  и квадратичной зависимости  $I_{H_\alpha}$  от  $n_e$ , а следовательно, и от  $I_p$  и  $W_{\text{полг}}$ .

При меньших давлениях образование атомов  $\text{H}$  может происходить в основном при взаимодействии активных частиц разряда с полимером, образовавшимся



Зависимости интенсивностей излучения линий  $\text{Ag}$  (696.5 нм) (1),  $\text{H}_\alpha$  (656.2 нм) (2) и полос  $\text{C}_2$  (516.5 нм) (3),  $\text{СН}$  (431.4 нм) (4) от разрядного тока в РПТ (а) и от  $W_{\text{полг}}$  в СВЧР (б). 5 — напряженность продольного электрического поля в РПТ.

на стенке разрядной трубки. Активными частицами могут быть метастабильные атомы  $\text{Ag}^*$ , концентрация которых испытывает насыщение [7], поэтому концентрация атомов  $\text{H}$  не зависит от  $n_e$ , а  $I_{H_\alpha}$  — линейная функция  $n_e$ , а также  $I_p$  и  $W_{\text{полг}}$ .

Большая интенсивность РПТ может быть связана с тем, что при одинаковых  $W_{\text{полг}}$  удельные энерговыделения в РПТ и СВЧР различны: с ростом  $W_{\text{полг}}$  РПТ контрагируется к оси, где растет энерговыделение и интенсивность излучения, а СВЧР более равномерно заполняет трубку [8]. При уменьшении  $W_{\text{полг}}$  различия в интенсивностях излучения  $\text{Ag}$  и  $\text{H}_\alpha$  в РПТ и СВЧР уменьшаются (см. таблицу). Кроме того, в РПТ и СВЧР различаются распределения интенсивностей излучения по длине: в СВЧР оно распределено по синусоидальному закону, а РПТ более однороден.

Таким образом, излучение РПТ и СВЧР обладает рядом как общих, так и отличительных черт, причем отличия могут быть связаны с различной пространственной структурой разрядов.

#### Литература

- [1] Вашман А. М., Минис С. И., Тетерина О. Л. — Опт. и спектр., 1959, т. 6, в. 2, с. 260.
- [2] Моторненко А. П. — Опт. и спектр., 1967, т. 23, в. 4, с. 528.
- [3] Герасимов Ю. А., Грачева Т. А., Лебедев Ю. А. — Химия высоких энергий, 1983, т. 17, № 3, с. 270.
- [4] Герасимов Ю. А., Грачева Т. А., Лебедев Ю. А. — Химия высоких энергий, 1984, т. 18, № 4, с. 363.
- [5] Suzuki K., Kuchitsu K. — Chem. Phys. Lett., 1978, v. 56, N 1, p. 50.
- [6] Ermi D., Bourguard S., Kosian P., Bugmann G. — Proc. VI Int. Symp. Plasma Chem. Montreal, 1983, p. 722.
- [7] Moisan M., Ricard A. — Can. J. Phys., 1977, v. 55, N 9, p. 1010.
- [8] Лебедев Ю. А. — VI Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы: Тез. докл. Л., 1983, т. 2, с. 125.

Поступило в Редакцию 29 января 1985 г.