

03;04

## Исследование характеристик поперечного объемного разряда в смеси гелия с пропаном

© А.К. Шуаибов, И.И. Сабов, З.Т. Гомоки, Л.Л. Шимон

Ужгородский национальный университет, Украина

E-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

Поступило в Редакцию 20 февраля 2006 г.

Приводятся результаты исследования электрических и эмиссионных характеристик плазмы поперечного объемного разряда в смесях гелия с молекулами пропана при общем давлении 3–15 кПа. Изучены пространственные характеристики разряда, спектры излучения плазмы, осциллограммы напряжения и тока поперечного объемного разряда, а также выход углеродсодержащего сырья, получаемого при распаде пропана при разных давлениях и составах смеси He–C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>.

PACS: 52.80.-s

Актуальность исследований плазмы поперечного объемного разряда (ПОР) в газовых средах на основе пропана и некоторых других водородсодержащих соединений связана с применением этих молекул в электроразрядных химических лазерах, работающих на колебательно-вращательных переходах молекул HF и HD. Излучение этих лазеров попадает в окно прозрачности атмосферы, а их длины волн генерации в несколько раз меньше, чем у лазеров на основе молекул CO<sub>2</sub> и CO. Поэтому в последнее время интенсивно изучаются такие лазеры как на уровне экспериментальных разработок [1,2], так и в теоретическом плане [3,4]. Ресурс работы электроразрядных HF-, HD-лазеров в газостатических условиях сравнительно низкий (10<sup>2</sup>–10<sup>3</sup> импульсов) и определяется скоростью деградации молекул элегаза и пропана в плазме ПОР. Для поиска путей увеличения эффективности и ресурса работы химических лазеров на нецепных реакциях необходимо более детальное экспериментальное изучение плазмы ПОР на основе смесей элегаза и пропана. Одним из возможных методов диагностики такой плазмы является спектроскопический метод излучения с временным

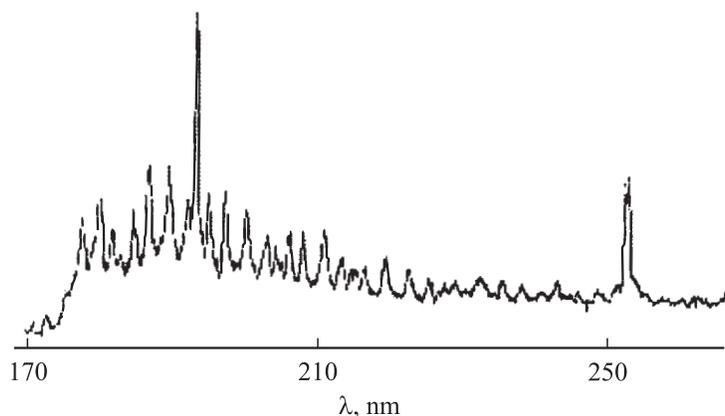
разрешением. Он позволяет установить качественный состав плазмы и основные направления скорости деградации молекул. На первом этапе исследований необходимо провести изучение продуктов распада молекул пропана, которые проявляются в излучении плазмы ПОР. Деградация молекул азелага в ПОР нами изучалась раньше, и основные результаты этих исследований опубликованы в работах [5–7]. Таким способом также была исследована деградация молекул фреона в импульсно-периодических эксимерно-галогенных лампах [8,9].

Кроме этого, плазма ПОР на основе молекул пропана может представлять интерес для получения фуллеренсодержащего сырья и нанопорошков. Использование плазмохимического реактора на основе ПОР для синтеза материалов, которые используются в нанотехнологиях, имеет ряд преимуществ по сравнению с дуговым разрядом и лазерной плазмой.

В настоящей статье представлены результаты исследования эмиссионных характеристик плазмы поперечного объемного разряда в смесях гелия с молекулами пропана.

Поперечный объемный разряд зажигался в ячейке из капролактама. Ячейка представляла собой цилиндр диаметром 4 см и длиной 12 см. Излучение регистрировалось из торцевого участка ячейки, которая отделялась от вакуумного монохроматора окном из LiF. Внутри ячейки установлены электроды ПОР длиной 10 см, у которых радиус кривизны составлял 4 см. Межэлектродное расстояние в ячейке составляло 1.5 см. Для УФ-предыонизации использовалась система из двух искровых линеек, установленных возле одного из электродов ПОР. Коммутатором в системе питания служил водородный тиратрон ТГИ-1000/25. Основная и накопительная емкости LC-инвертора изготовлены из малоиндуктивных конденсаторов КВИ-3. Величина емкости накопительного и обострительного конденсаторов составлял 32 и 6.5 нФ.

Излучение плазмы ПОР анализировалось в спектральном диапазоне 130–550 нм. Излучение поступало на входную щель вакуумного монохроматора с дифракционной решеткой на 1200  $\text{лп/мм}$  и обратной линейной дисперсией 0.7  $\text{нм/мм}$ . Для детектирования излучения применялись фотоумножители ФЭУ-142 и ФЭУ-154, сигнал с которых поступал на усилитель постоянного тока, и регистрировались на диаграммной ленте самописца. Частота следования импульсов накачки составляла 10  $\text{Гц}$ . Осциллограммы импульсов напряжения и тока ПОР регистрировались с использованием малоиндуктивного делителя и токового шунта, сиг-

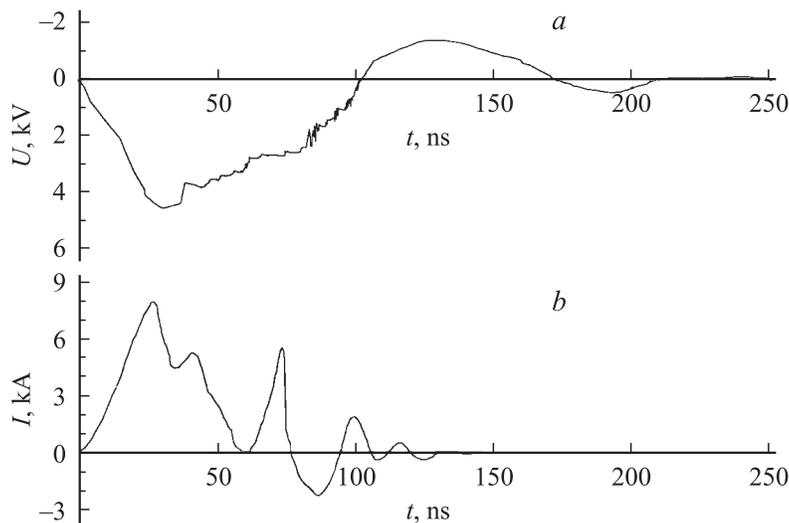


**Рис. 1.** Спектр излучения плазмы ПОР на смеси  $\text{He}-\text{C}_6\text{H}_{14} = 100-3$  при общем давлении 66.5 кПа.

налы с которых поступали на вход быстродействующего импульсного осциллографа С1-108.

Объем плазменной среды на смеси  $\text{He}-\text{C}_6\text{H}_{14}$  между электродами был максимальным в начальной стадии горения разряда на свежеприготовленной смеси. Разряд при этом имел ширину до 0.8 см и светился зеленым цветом, что определялось полосой излучения 516.5 нм молекулы  $\text{C}_2(d-a)(0,0)$ , которая нами ранее также наблюдалась и при исследовании ПОР в фреонсодержащих средах [10]. При содержании пропана в смеси 300–500 Па и общем ее давлении 10–15 кПа после  $(1-1.5) \cdot 10^3$  импульсов цвет разряда определялся уже излучением синей полосы 468 нм молекулы  $\text{C}_2(d-a)(5-6)$ . Это указывает на образование значительного количества молекул углерода на высоковозбужденных колебательных уровнях электронных состояний  $d$  и  $a$ . Ширина разряда в этом случае уменьшалась до 0.4 см. После наработки  $(3-5) \cdot 10^3$  импульсов ширина разряда уменьшалась до 0.2 см.

Типичный спектр излучения плазмы ПОР в УФ–ВУФ области на смеси гелия с пропаном представлен на рис. 1. Он полностью определяется продуктами разрушения пропана, среди которых возможно выделить соединения  $\text{CH}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_4\text{H}_2$  и др. В качестве реперных полос, по которым возможно контролировать деградацию пропана по



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения (*a*) и тока (*b*) ПОР на смеси  $P(\text{He})-P(\text{C}_6\text{H}_{14}) = 13.3-0.5 \text{ kPa}$  при зарядном напряжении основного накопительного конденсатора 4.5 kV.

излучению плазмы в УФ–ВУФ диапазоне длин волн, могут быть выбраны полосы 193 и 248 nm. Яркости этих полос уменьшались при увеличении пропана в смеси. Так, при  $P(\text{He}) = 13.3 \text{ kPa}$  и парциальном давлении пропана 133 Pa яркость полосы 248 nm составляла 120 а.е., а при увеличении парциального давления пропана до 670 Pa она уменьшалась в 2.4 раза.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке и тока ПОР в смеси He–C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>. В диапазоне зарядных напряжений 4–16 kV при парциальных давлениях гелия 3–15 kPa и пропана 0.1–1.0 kPa заигался устойчивый ПОР. Длительность первой (основной) полуволны импульсов напряжения и тока находилась на уровне 100 ns. Максимальная величина тока ПОР достигалась на уровне 10–16 kA. По времени она была сдвинута относительно максимума первой полуволны напряжения между электродами на 20–30 ns. В эксперименте достигались пиковые мощности, которые вкладывались в плазму, в диапазоне 10–50 MW. В результа-

те такой интенсивной накачки наблюдалось достаточно эффективное разрушение молекул пропана. При этом  $P(\text{He})-P(\text{C}_6\text{H}_{14})$  все внутренние поверхности разрядной ячейки покрывались мелкодисперсной углеродистой пленкой черного цвета. После отработки на 5–7 месяцев  $P(\text{He})-P(\text{C}_6\text{H}_{14}) = (10 \dots 15) - (1.0 \dots 1.5)$  кПа в течение 1.5–2.0 h (на каждой свежеприготовленной смеси при  $f = 10$  Hz) выход углеродсодержащего сырья достигал 0.3–0.5 см<sup>3</sup>.

Таким образом, исследование характеристик ПОР в смеси He–C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> показало, что при умеренном зарядном напряжении ( $U = 4-16$  kV) пиковая электрическая мощность разряда достигает 50 MW, что приводит к распаду молекул пропана вплоть до выпадения в осадок мелкодисперсного углеродистого сырья, которое может представлять интерес для современных нанотехнологий. В качестве диагностических полос в УФ–ВУФ диапазоне спектра, по излучению которых возможен контроль за работой импульсного реактора в режиме реального времени, могут быть использованы полосы продуктов распада пропана с длиной волны в максимуме при 193 и 248 nm.

## Список литературы

- [1] Алексеев С.Б., Wan Lijun, Ерофеев М.В., Lin Jingru и др. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 90–92.
- [2] Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 2. С. 136–139.
- [3] Ястремский А.Г., Ямпольский С.А. // Изв. вузов. Физика. 1999. № 8. С. 63–66.
- [4] Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В. и др. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 7. С. 629–633.
- [5] Шуаибов А.К. // Теплофиз. выс. темп. 1998. Т. 36. № 6. С. 883–888.
- [6] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Миня А.И. // ЖПС. 1999. Т. 66. № 3. С. 412–415.
- [7] Шуаибов А.К., Миня А.И., Дащенко А.И. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. № 3. С. 1–5.
- [8] Шуаибов А.К. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 23. С. 30–34.
- [9] Шуаибов А.К. // ЖПС. 1999. Т. 66. № 2. С. 241–246.
- [10] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 12. С. 1149–1151.