

04;07;12

## БИПОЛЯРНЫЙ КОРОННЫЙ РАЗРЯД В РАБОЧИХ СРЕДАХ N<sub>2</sub>- И СО-ЛАЗЕРОВ

© А.К. Шуаибов, А.Й. Миня,  
В.В. Звенигородский, В.С. Шевера

Для эффективной работы импульсно-периодических N<sub>2</sub>- и СО-лазеров применяется принудительная прокачка рабочих смесей, как правило, при помощи компрессоров, вентиляторов или вакуумных насосов [1]. Механической прокачке сопутствует вибрация, возбуждение звуковых колебаний, малый ресурс работы движущихся узлов, что негативно сказывается на работе лазерных излучателей.

В [2] сообщалось о применении электрической прокачки рабочих сред ХеСl\* и N<sub>2</sub>-лазеров при частотах следования импульсов до 70 Гц. Прокачка типа электрический ветер получалась при помощи биполярного коронного разряда. Условия же получения и физические характеристики таких коронных разрядов в рабочих смесях N<sub>2</sub>- и СО-лазеров изучены мало. Нет данных о согласовании условий получения устойчивого коронного разряда с оптимизированными рабочими средами в данных молекулярных лазерах при атмосферных давлениях.

В настоящей работе приводятся результаты исследования характеристик биполярного коронного разряда в системе электродов "иголка-сетка" для рабочих сред лазеров на молекулах азота и окиси углерода. Эксперименты проводились на макете прокачки типа электрический ветер от малогабаритного эксимерного лазера [3].

1. Коронный разряд (КР) исследовался в системе электродов, состоящей из одного ряда иглол и никелевой сетки. Длина системы электродов — 10 см. Межэлектродное расстояние — 2 см. Радиус закругления острия иглол — 0.5 мм, а проволочек сетки — 0.15 мм.

Коронный разряд поджигался при помощи высоковольтного выпрямителя ( $U = -10$  кВ), подключенного к иглолкам через балластное сопротивление. Излучение КР анализировалось с помощью монохроматора МДР-2, фотоумножителя ФЭУ-106, усилителя и самописца. Излучение разряда отбиралось из средней части КР.

2. Вид КР в смесях гелия с молекулами N<sub>2</sub> и СО при давлениях 100–300 кПа сильно зависит от содержания молекул в смеси. При низком содержании молекул (< 1 кПа) КР

перекрывает весь межэлектродный промежуток и характеризуется высокой однородностью, при этом генерационные зоны выражены слабо.

С увеличением содержания молекулярных компонент КР приобретает классическую форму [4]: у иголок появляются генерационные зоны фиолетового ( $\text{He-N}_2$ ) и желтого ( $\text{He-CO}$ ) цветов. Сетка также покрыта однородным свечением этих же цветов, а между отрицательными и положительными генерационными зонами находится "темная" внешняя область биполярного КР.

Этот режим и представляет основной интерес для реализации прокачки газовых смесей типа электрический ветер [5].

3. На рис. 1 приведены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) КР на смесях гелия с молекулами  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}$ . Для всех ВАХ характерно наличие гистерезиса, подобно ВАХ КР в инертных газах [6]. Как видно из рис. 1, в  $\text{N}_2$ -средах наблюдается полная петля гистерезиса, а в  $\text{CO}$ -средах верхняя точка петли не достигалась. Ток КР увеличивается с уменьшением давления смесей. Так как скорость электрического ветра  $v \sim \sqrt{I_{\text{ор}}}$  [5], то для увеличения эффективности прокачки желательно применять рабочие смеси, оптимизированные при давлениях порядка атмосферного.

Так как в условиях данного эксперимента применялись в основном электроположительные смеси, то главными носителями тока являются электроны [4]. Заметим, что при добавлении в смесь  $\text{He-Xe}$ -газов молекул хлористого водорода ток КР уменьшался примерно на два порядка, так как в основном носителями отрицательного заряда становятся отрицательные ионы.

4. В спектрах излучения гелия при давлении 300 кПа регистрируется широкополосное излучение гелия в диапазоне 200–600 нм и интенсивные полосы радикалов  $\text{OH(A-X)}$  в области 306–316 нм. Радикалы  $\text{OH}$  образуются вследствие наличия небольших примесей паров воды в гелии марки "ВЧ". Широкополосное излучение гелия отождествлено в [7] как излучение на переходах  $\text{He}_2^+$  ( $\text{C}^2\Pi_u - \text{A}^2\Sigma_u^+$ ). С уменьшением давления  $\text{He}$  до 150 кПа интенсивность континуума гелия резко падает, а в спектре излучения появляются линии атомов гелия  $3p, 3d, 4s, 4p, 4d$  состояний.

На рис. 2 приведены спектры излучения КР на смесях  $\text{He/N}_2$  и  $\text{He/N}_2/\text{CO}$ . Наиболее интенсивными являются полосы излучения  $\text{N}_2(\text{C-B}), \text{N}_2^+(\text{B-X}), \text{OH(A-X)}, \text{CO(A-X)}, \text{CO}^+(\text{B-X})$  в области 180–250 нм. В  $\text{CO}$ -средах в спектрах излучения отсутствуют полосы  $\text{OH(A-X)}$ , а в спектральной области  $\Delta\lambda > 300$  нм в основном наблюдаются полосы излу-

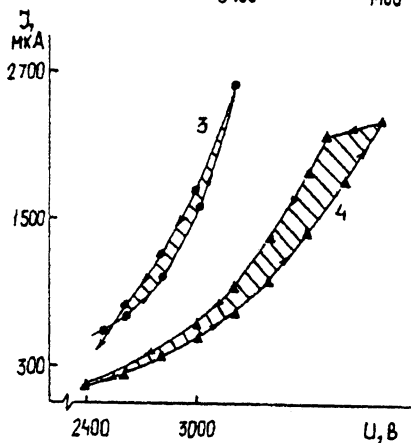
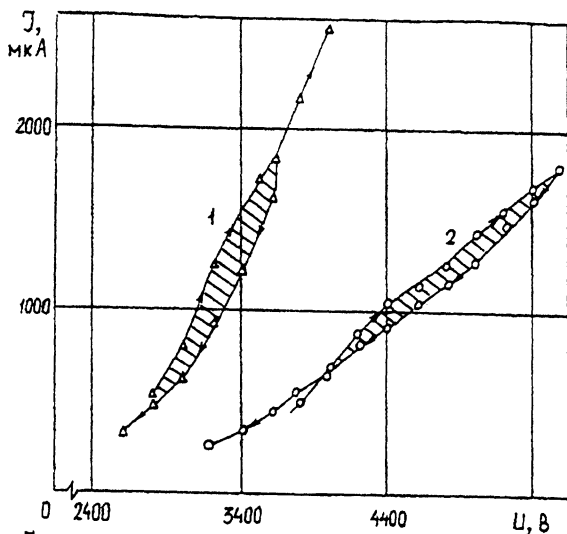


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики коронного разряда на смесях: 1 —  $\text{He}/\text{N}_2 = 150/1.3$  кПа; 2 —  $\text{He}/\text{N}_2 = 300/0.8$  кПа; 3 —  $\text{He}/\text{N}_2/\text{CO} = 136/0.002/1.6$  кПа; 4 —  $\text{He}/\text{N}_2/\text{CO} = 136/2.4/2.4$  кПа.

чения  $\text{N}_2(\text{C}-\text{B})$ ,  $\text{N}_2^+(\text{B}-\text{X})$  и  $\text{CN}(\text{B}-\text{A})$ . В УФ области спектра излучение атомов гелия не наблюдалось.

На основании полученных спектров проведено исследование зависимостей относительных интенсивностей излучения полос  $\text{N}_2(\text{C}-\text{B})$ ,  $\text{N}_2^+(\text{B}-\text{X})$ ,  $\text{OH}(\text{A}-\text{X})$ ,  $\text{CO}(\text{A}-\text{X})$ ,  $\text{CN}(\text{B}-\text{A})$  от величины тока КР, давления и состава рабочих смесей. Относительная интенсивность излучения полосы определялась как площадь соответствующей фигуры на диаграмм-

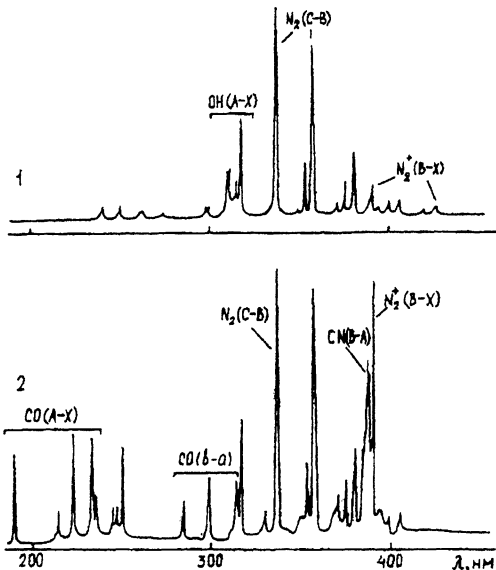


Рис. 2. Спектры излучения плазмы КР на смесях: 1 —  $\text{He}/\text{N}_2 = 300/0.8$  кПа,  $I = 1500$  мкА; 2 —  $\text{He}/\text{N}_2/\text{CO} = 136/0.002/1.6$  кПа,  $I = 2200$  мкА.

ной ленте самописца. На рис. 3 представлены только зависимости относительной интенсивности излучения полосы 337.1 нм  $\text{N}_2$  (С-В) от величины тока КР.

При исследованиях зависимостей интенсивностей излучения полос 337.1 нм  $\text{N}_2$  (С-В), 391.0 нм  $\text{N}_2^+$  (В-Х) и 316 нм ОН (А-Х) при малом содержании азота в смеси  $\text{He}/\text{N}_2$  (рис. 1, кривая 1, на примере  $\text{N}_2$  (С-В)) выявлена ступенчатая зависимость интенсивности от тока КР. С уменьшением давления гелия и увеличения содержания  $\text{N}_2$  в смеси зависимости приобретают плавный характер. Интенсивности излучения полос  $\text{N}_2^*$ ,  $\text{N}_2^{+*}$ ,  $\text{OH}^*$  уменьшаются с понижением давления смеси.

Как известно, в азотосодержащей плазме при комнатных температурах существует четыре типа ионов азота  $\text{N}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{N}_3^+$ ,  $\text{N}_4^+$ , а в плазме высокого давления интенсивно происходят процессы образования кластерных ионов азота [8,9]. При этом увеличение содержания азота в плазме приводит к конверсии ионов  $\text{N}_{1,2,3}^+$  в  $\text{N}_4^+$  [9]. Кроме того, в [10] приводятся данные об ионном составе плазмы послесвечения импульсного разряда на смеси  $\text{He}/\text{N}_2 = 1/1$  при  $P = 0.5$  кПа с малыми примесями паров воды, из которых следует, что в плазме образуются ионы:  $\text{NO}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O}_2)$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}_4^-$ ,

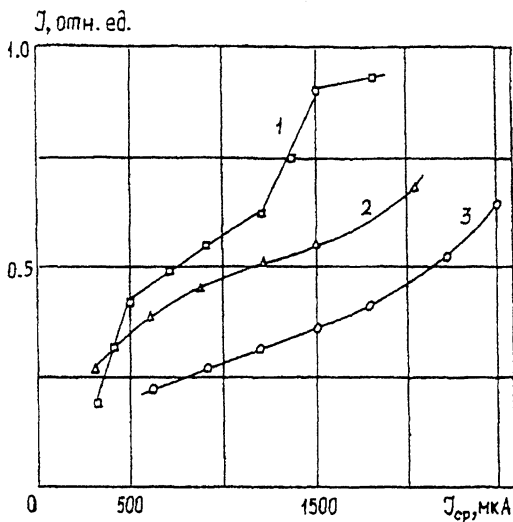


Рис. 3. Зависимости относительных интенсивностей излучения полосы 337.1 нм  $N_2$  (O-B) от величины тока коронного разряда: 1 —  $He/N_2 = 300/1$ ; 2 —  $He/N_2 = 210/3.2$ ; 3 —  $He/N_2 = 110/3.2$ .

ОН<sup>-</sup>. Данные об ионном составе такой плазмы при атмосферных давлениях в настоящее время отсутствуют. КР в гелии характеризуется повышенным содержанием метастабильных частиц [11], что способствует протеканию процессов химионизации между ними. В результате этих процессов в плазме гелия появляются три группы быстрых электронов с энергиями в диапазоне 14–17 эВ [12], которые способны возбуждать молекулы азота в  $S^3P_u$  состоянии. Химионизация молекулярных метастабилей —  $He_2(m)$  приводит к появлению в плазме четырех типов ионов  $He_n$  ( $n = 1 - 4$ ) [13].

Исходя из этого, ломаный характер зависимостей интенсивностей полос от тока можно объяснить участием в процессах образования  $N_2(C)$ ,  $N_2^+(B)$ ,  $OH(A)$  нескольких типов молекулярных ионов азота и гелия.

Наиболее вероятными процессами образования  $N_2(O)$ ,  $N_2^+(B)$ ,  $OH(A)$  в условиях коронного разряда могут быть:

- диссоциативная рекомбинация кластерных ионов азота с электронами [14], взаимодействие  $N_2(A)$  и  $He(m)$  с  $N_2(A)$ ,  $N_2(X, v)$  [15],

- перезарядка ионов  $He_2^+$  на  $N_2$  [16],

- химионизация с возбуждением ионов  $N_2^+(B)$ ,  $CO^+(B)$  [17], рекомбинация  $He_n^+$ ,  $N_n^+$  с  $H_2O^-$ .

Более детально исследование механизмов образования возбужденных молекул ( $N_2$ , CO) и их ионов требует постановки специальных экспериментов по измерению концентраций метастабильных атомов He и молекул в плазме коронного разряда.

Таким образом, эксперименты показали, что коронный разряд, пригодный для получения электрического ветра, реализуется при содержании молекул, больших 1 кПа. Для получения максимальной скорости электрического ветра давление смесей должно быть порядка атмосферного или ниже. Кроме того, в плазме коронного разряда на смесях He/ $N_2$  и He/ $N_2$ CO наблюдается образование возбужденных молекул  $N_2^+(C)$ , OH(A), CO(A),  $CO^+(B)$ , CN(B) и молекулярных ионов  $N_2^+(B)$ .

### Список литературы

- [1] *Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф.* Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 250 с.
- [2] *Баранов А.М., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др.* // ПТЭ. 1994. № 4. С. 108–111.
- [3] *Шуаибов А.К., Неймет Ю.Ю., Ходанич А.И., Шевера В.С.* // Опт. и спект. 1993. Т. 75. В. 4. С. 713–716.
- [4] *Капцов Н.А.* Электрические явления в газах и в вакууме. М.: Гостехиздат, 1950.
- [5] *Верещагин И.П.* Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
- [6] *Белевцев А.А.* // IV Всен. конф. по физ. газ. разряда. Тез. докл. Махачкала, 1988. Ч. 1. С. 15–16.
- [7] *Hill P.C.* // Phys. Rev. A. 1991. V. 43. N 5. P. 2546–2549.
- [8] *Словецкий Д.И.* Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980. 310 с.
- [9] *Смирнов Б.М.* Комплексные ионы. М.: Наука, 1983. 149 с.
- [10] *Голубев В.С., Пашкин С.В.* Тлеющий разряд повышенного давления. М.: Наука, 1990. 334 с.
- [11] *Песков В.В.* // ЖТФ. Т. 45. В. 12. С. 2444.
- [12] *Колоколов Н.Б., Благовоев А.Б.* // УФН. 1993. Т. 163. № 3. С. 55–77.
- [13] *Иванов В.А., Скобло Ю.Э.* Химическая физика, 1989. Т. 8. № 4. С. 454–462.
- [14] *Елецкий А.В., Смирнов Б.М.* // УФН. 1982. Т. 136. В. 1. С. 25–59.
- [15] *Ажаронко В.В., Антипов Е.С., Скотов Д.К., Филатова И.И. и др.* Препринт Инст. физики им. Б.И. Степанова АН БССР. 1989. № 558.
- [16] *Emmett F., Dux R., Langhoff H.* // Appl. Phys. B. 1988. V. 47. N 2. P. 141–148.
- [17] *Иониз Ю.З., Яковичкий С.П.* // Опт. и спект. 1990. Т. 68. В. 2. С. 288–293.

Ужгородский  
державный  
университет

Поступило в Редакцию  
5 мая 1996 г.