

### ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Ю. А. Бувевич, В. М. Николаев, Ю. А. Пластинин, Г. Ф. Сипачев,  
М. И. Якушин

(Москва)

Приведены результаты спектроскопического исследования излучения воздушной плазмы: описание и идентификация спектра в диапазоне 0.2—0.8 мк, относительная интенсивность излучения в характерных линиях при температуре плазмы 9800° К и давлении 1 кГ/см<sup>2</sup>.

Безэлектродный разряд в потоке газа представляет собой перспективный источник получения устойчивой низкотемпературной плазмы. В нашей установке, основанной на использовании высокочастотного безэлектродного разряда, температура плазмы достигает 10 000° К; это значение совпадает по порядку величины с расчетом [1].

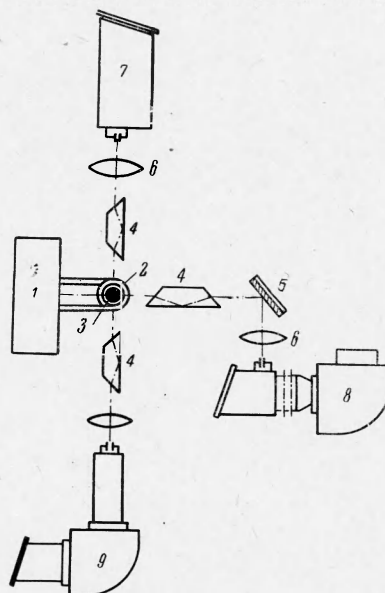
Существенное преимущество указанного источника плазмы состоит в том, что безэлектродный разряд позволяет получить спектрально чистую плазму, в которой отсутствует излучение продуктов разрушения электродов и т. п. В этом отношении он выгодно отличается от таких хорошо известных источников плазмы как ударная труба, различные дуговые установки и т. д.

Спектроскопические исследования были проведены, насколько известно авторам, лишь для плазмы безэлектродного разряда в аргоне [2-4].

Наши исследования заключались в фотографировании и отождествлении спектра воздушной плазмы в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях, определении абсолютной интенсивности излучения, а также вращательной, колебательной и электронной температур, в определении эффективных сечений соударений молекул и атомов и концентрации электронов в плазме по линиям и сплошному спектру атомов кислорода и азота. В этой работе представлены результаты отождествления спектра воздушной плазмы и измерений относительной интенсивности излучения в некоторых характерных длинах волн.

Источником разряда служил высокочастотный безэлектродный плазматрон, конструкция которого описана в [6]. Основным элементом плазматрона — ламповый генератор ЛГД-32 с модифицированным колебательным контуром. Мощность в разряде определялась по измеренным напряжению и току в цепи анодного питания генераторной лампы. При этом потери в различных элементах генератора учитывались балансовым методом. Таким образом, полезная мощность в разряде составляла 27 квт при давлении 1 кГ/см<sup>2</sup>, расходе газа 0.2 г/сек и частоте 17.7 мегц. Разрядное устройство состояло из кварцевого канала внутренним диаметром 60 мм, вокруг которого был навит двухвитковый индуктор 2, питаемый от генератора 1 (фиг. 1). Форкамерная часть разрядной камеры имела устройство для гидродинамической стабилизации плазменной струи и охлаждения внутренних стенок разрядного канала.

Оптическая схема представлена на фиг. 1. Спектры излучения фотографировались в области длин волн от 0.22 до 0.8 мк при помощи стеклянного спектрографа ИСП-51 (камера 8 на фиг. 1 с  $f = 1300$  мм и 9 с  $f = 270$  мм) и кварцевого спектрографа ИСП-30 (см. 7 на фиг. 1). При фотографировании в спектральном интервале 0.22—0.65 мк использовались входные щели спектрографов шириной 0.0145 мм, а в диапазоне 0.65 мк и выше — щели шириной 0.05 мм. Кроме спектрографов в оптическую схему эксперимента входили конденсоры 6 и призма Дове 4. При помощи призмы Дове вдоль щелей спектрографов проектировали изображения источника, развернутые на 90°, так что на щель попадали участки плазмы, расположенные в поперечном к оси разряда сечении на расстоянии около 30 мм от верхнего витка индуктора 2 на срезе канала разрядного устройства 3. Предварительные исследования показали, что на расстояниях 30 мм и больше от среза интенсивность излучения плазменного столба имеет аксиальную сим-



Фиг. 1

## Характеристики атомного и молекулярного

Символ ( $m, n$ ) обозначает переход, соответствующий изменению колебательного Интенсивность линий дана относительно интенсивности линии ОI 5330 Å при в ангстремах, в колонке 2 — тип соответствующего перехода,

1	2	3	1	2	3
<i>NO</i> ( $\gamma$ )	${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Pi$		$N_2^+$ ( $1^-$ )	${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$	
2263.0	(0,0)		4957.9	(4,7)	
2269.4	(0,0)		5076.6	(2,5)	
2363.2	(0,1)		5148.8	(1,4)	
2370.2	(0,1)		5228.3	(0,3)	0.4
2471.1	(0,2)				
2478.7	(0,2)				
<i>CI</i>	$2p^1S_0 \rightarrow 3s^1P_1^0$		<i>OI</i>	$3p^5P_{1,2,3} - 5d^5D_{0,1,2,3,4}^0$	
2478.6			5328.98		
			5329.59		1.0
			5330.66		
<i>NO</i> ( $\gamma$ )	${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Pi$		<i>OI</i>	$3p^5P_{1,2,3} - 6s^5S_2^0$	
2551.0	(1,4)		5435.2		
2558.6	(1,4)		5435.8		0.4
2587.5	(0,3)		5436.8		
2595.7	(0,3)				
2671.0	(1,5)				
2680.0	(1,5)		$N_2^+$ ( $1^-$ )	${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$	
2713.2	(0,4)			(4,8)	
2722.2	(0,4)		5485.5		
2810.4	(1,6)				
2849.8	(0,5)		$N_2$ ( $1^+$ )	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$	
$N_2$ ( $2^+$ )	$C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi$		5755.2	(12,8)	
2953.2	(4,2)		5804.3	(11,7)	
2962.0	(3,1)		5854.4	(10,6)	
2976.8	(2,0)		5906.0	(9,5)	
			5959.0	(8,4)	
<i>NO</i> ( $\gamma$ )	${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Pi$		<i>NI</i>		
2997.6	(0,6)		6008		2.1
3008.8	(0,6)				
$N_2$ ( $2^+$ )	$C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi$		<i>OI</i>	$3p^3P_{0,1,2} - 6s^3S_1^0$	
3136.0	(2,1)		6048		0.6
3159.3	(1,0)		$N_2$ ( $1^+$ )	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$	
$N_2^+$ ( $1^-$ )	${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$		6069.7	(6,2)	
3293.4	(4,2)				
3298.7	(3,1)		<i>OI</i>	$3p^5P_{1,2,3} - 4d^5D_{0,1,2,3,4}^0$	
			6156.0		2.6
$N_2$ ( $2^+$ )	$C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi$		6156.8		3.4
3371.3	(0,0)		6158.2		6.6
$N_2^+$ ( $1^-$ )	${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$		$N_2$ ( $1^+$ )	$B^3\Pi - A^3\Sigma$	
3538.3	(4,3)		6394.7	(9,6)	
3548.9	(3,2)				
3563.9	(2,1)		<i>OI</i>	$3p^5P_{1,2,3} - 5s^5S_2^0$	

метрию, и поэтому для получения радиального распределения интенсивности излучения можно применять расчетные методы, основанные на интегральных соотношениях Абеля [6]. На фиг. 2 показан осесимметричный профиль излучения кванта полосы (1.3) системы  $N_2^+$  ( $1^-$ ) и линии кислорода ОI 4368.3 Å.

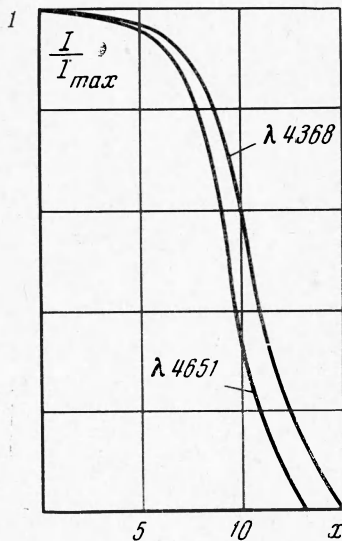
## спектров воздушной плазмы

квантового числа  $m \rightarrow n$ . Звездочкой отмечены реабсорбированные линии и канты. 9800 °К. В колонке 1 таблицы приведена идентификация линий и их длина волны в колонке 3 — относительная интенсивность

1	2	3	1	2	3
$N_2(2+)$	$C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi$	6453.7			
3576.9	(0,1)	6454.6			1.7
		6456.0			
$N_2^+(1-)$	$^2\Sigma \rightarrow ^2\Sigma$	$N_2(1+)$	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$		
3582.1	(1,0)	6468.5	(8,5)		
$N_2(2+)$	$C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi$	<i>NI</i>			
3641.7	(4,6)	6484.9			3.4
3671.9	(3,5)	$N_2(1+)$	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$		
3740.5	(2,4)	6544.8	(7,4)		
$N_2^+(1-)$	$^2\Sigma \rightarrow ^2\Sigma$	$H_\alpha$	$\begin{cases} 2s-3p \\ 2p-3s \\ 2p-3d \end{cases}$		
3857.9	(2,2)	6562.8 *			
3884.3	(1,1)	$N_2(1+)$	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$		
3914.4 *	(0,0)	6623.6	(6,3)		
$N_2^+(1-)$	$^2\Sigma \rightarrow ^2\Sigma$	<i>NI</i>	$3p^4D^0_{1/2,3/2,5/2,7/2} - 5sP^4_{1/2,3/2,5/2}$		2.2
4166.8	(3,4)	6644.9			
4199.1	(2,3)	$N_2(1+)$	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$		
4236.7 *	(1,2)	6704.8	(5,2)		
4278.1 *	(0,1)	<i>NI</i>			
$H_\gamma$	$\begin{cases} 2s-5p \\ 2p-5s \\ 2p-5d \end{cases}$	6723.1			9.3
4340.5		0.7			
<i>OI</i>	$3s^3S^0_1 - 4p^3P_{0,1,2}$	2.8			
4368.3		$N_2(1+)$	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$		
$N_2^+(1-)$	$^2\Sigma \rightarrow ^2\Sigma$	6788.6	(4,1)		
4490.3	(5,7)	7386.6	(5,3)		
4515.9	(4,6)	<i>NI</i>	$3s^4P_{1/2,3/2,5/2} - 3p^4S^0_{1/2}$		
4554.1	(3,5)	7423.9			
4599.7	(2,4)	7442.6			
4651.8	(1,3)	7468.8			
4709.2	(0,2)	1.2			
$H_\beta$	$\begin{cases} 2s-4p \\ 2p-4s \\ 2p-4d \end{cases}$	0.7	$N_2(1+)$	$B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$	
4861.3		7503.9	(4,2)		
		7626.2	(3,1)		
		7753.2	(2,0)		
		<i>OI</i>	$3s^5S^0_2 - 3p^5P_{1,2,3}$		
		7771.9			
		7774.1			
		7775.4			
		<i>OI</i>	$3^1s^3D^0_{3,2,1} - 3^1p^3F_{4,3,2}$		
		7947.6			

Фотографирование спектра в различных участках длин волн производили на специально подобранные сенсibilизированные в этих участках фотоматериалы. В диапазоне 0.22—0.38 мк использовались фотопластинки УФС-4, в диапазоне 0.38—0.42 мк — WU-1, в диапазоне 0.42—0.65 мк — WP-1, в диапазоне 0.65—0.8 мк — J-750.

Для отождествления спектров на фотоматериалы впечатывали также спектры железа и ртутной лампы ПРК-2. Для определения абсолютной интенсивности излучения по спектру были получены кривые почернения от эталонных вольфрамовых ламп СИ-8-200 (со стеклянным окном) и ЛИС-7 (с кварцевым окном). Интенсивности излучения определяли путем обработки спектрограмм методом гетерохромной фотометрии, микрофотометрирование спектрограмм производили при помощи МФ-4.



Фиг. 2

Спектры излучения воздушной плазмы на режиме работы разряда, описанном выше, представлены на фиг. 3. Для температурных измерений были сфотографированы спектры с учетом радиального распределения интенсивности излучения плазменной струи. Пример такой спектрограммы приведен на верхнем кадре фиг. 4. Результаты отождествления спектра сведены в таблицу.

Как легко видеть из фиг. 3 и 4, спектры излучения воздушной плазмы в исследованном диапазоне длин волн содержат большое число атомных линий (в основном линий кислорода) и разветвленные системы полос двухатомных молекул. На фиг. 3 и 4 в таблице использованы следующие обозначения:  $N_2^+(1-)$  — первая отрицательная система полос молекулы  $N_2^+$ ,  $N_2(1+)$  и  $N_2(2+)$  — первая и вторая положительные системы полос молекулы  $N_2$ ,  $NO(\gamma)$  —  $\gamma$  — система полос окиси азота  $NO$ . В спектре плазмы наблюдаются линии  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  и линия нейтрального углерода  $CI\ 2478\ 6\ \text{\AA}$ , что указывает на присутствие в плазме продуктов разложения водяных паров и углекислого газа, содержащегося в лабораторном воздухе в виде примеси. Как видно из спектрограммы на фиг. 4, примеси  $C$ ,  $CO_2$  и  $H_2O$  в области вблизи  $5330\ \text{\AA}$ , в которой производилась оценка температуры, отсутствуют. В то же время в спектре отсутствуют линии, принадлежащие элементам материалов разрядного устройства или элементов, которые обычно попадают со стенок плазматронов (линии  $K$ ,  $Na$ ,  $Ba$ ,  $CaO$  и др.).

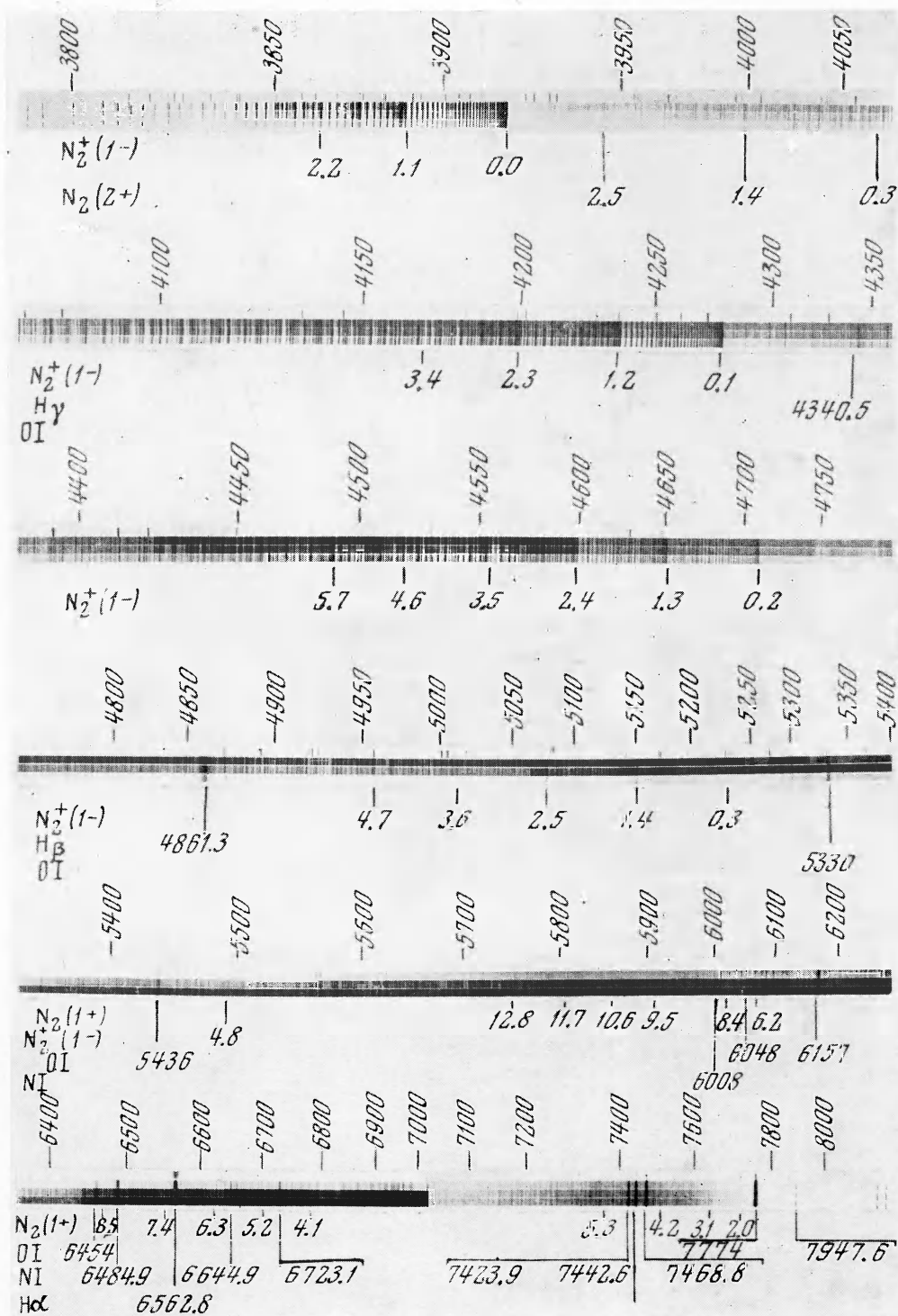
Наиболее интенсивна в спектре первая отрицательная система молекулы  $N_2^+$ , для которой наблюдаются последовательности полос  $+1, +2, 0, -1, -2, -3$ . Система полос второй положительной системы молекулы  $N_2$  представлена последовательностями  $+2, +1, 0, -1, -2$ . В спектре видны двойные канты полос  $\gamma$ -системы окиси азота, принадлежащие последовательностям  $+6, +5, +4, +3, +2, +1, 0$ . Спектр первой положительной системы молекулы азота представлен сложным набором вращательных линий. В кантах полос  $N_2(2+)$ ,  $N_2^+(1-)$ ,  $NO(\gamma)$  имеется полное перекрытие вращательных линий, в то время как в хвостах полос наблюдаются отдельно стоящие линии. Между линиями заметно непрерывное излучение, весьма значительное по интенсивности.

Предварительная оценка температуры, измеренной по абсолютной интенсивности линии кислорода  $OI\ 5330\ \text{\AA}$ , показала, что температура на оси струи была равна  $9800^\circ\text{K}$ .

Поступила 2 VII 1968

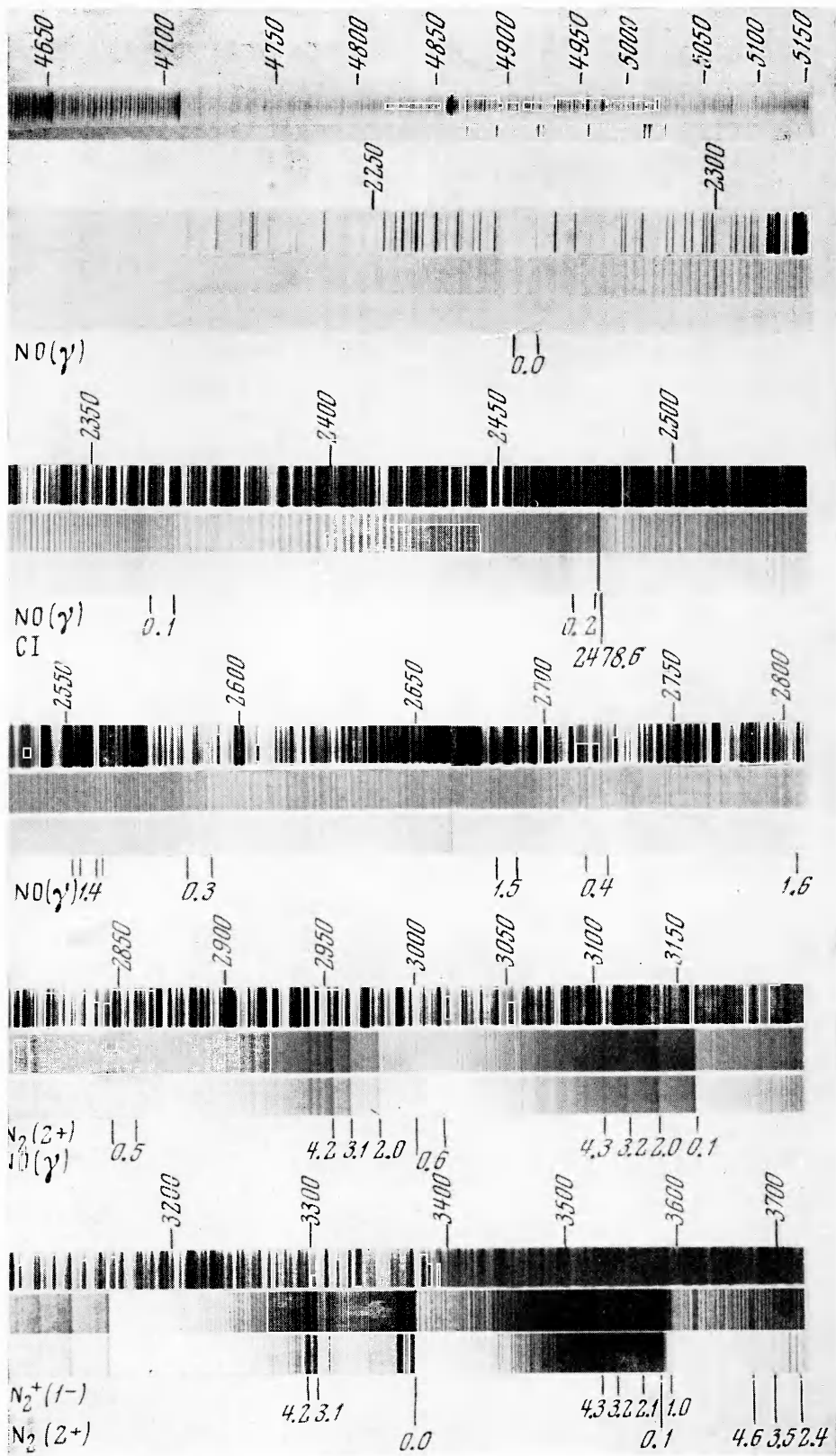
#### ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю. П. Высокочастотный разряд высокого давления в потоке газа как процесс медленного горения. ПМТФ, 1968, № 3.
2. Гольдфарб В. М., Дресвин С. В. Оптическое исследование распределения температуры и электронной концентрации в аргоновой плазме. Теплофизика высоких температур, 1965, № 3.
3. Смелянский М. Я., Кононов С. В., Якушин М. И. Некоторые энергетические характеристики высокочастотного безэлектродного разряда в аргоне и воздухе. Электротермия, 1967, № 58.
4. Hughes D. W., Wooding E. R. The Temperature Distribution in an H — Mode R. F. Plasma Torch. Phys. Lett., 1967, vol. 24A, p. 21.
5. Кононов С. В., Якушин М. И. К определению интенсивности удельных тепловых потоков к поверхности в струях высокочастотного безэлектродного плазматрона на воздухе, ПМТФ, 1966, № 6.
6. Nestor O. H., Olsen H. N. Numerical Methods for Reducing Line and Surface Probe Data. SIAM Review., 1960, vol. 2, p. 200.



Фиг. 3

ПМТФ, № 6 (К ст. Ю. А. Буевича и др.)



Фиг. 4