

## СПЕКТРОСКОПИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ. РОЛЬ ИОНОВ $Ne_2^+$ , $Ne^+$ и $Ne^{++}$ В ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ

Важными для данной работы свойствами диэлектрического барьерного разряда *DBD* (Рис.1) являются способность генерировать двукратно заряженные ионы [1] и создавать почти однородное в пространстве [2] и достаточно протяженное плазменное образование в широком диапазоне давлений газа. В эксперименте (давление неона 1.3 Torr) при отношении чисел витков  $N_2/N_1=10$  напряжение на электродах могло регулироваться в пределах 1000 - 6000 V, что позволяло создавать плазму с плотностью электронов в центре трубки [e]  $\approx 10^{10} - 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . Плотность [e] оценивалась по отклику населенности уровня [ $^3P_1$ ] конфигурации  $Ne(2p^53s)$  на импульсный «подогрев» электронов распадающейся плазмы высокочастотным полем [1] (*RF Pulse*, Рис.1).

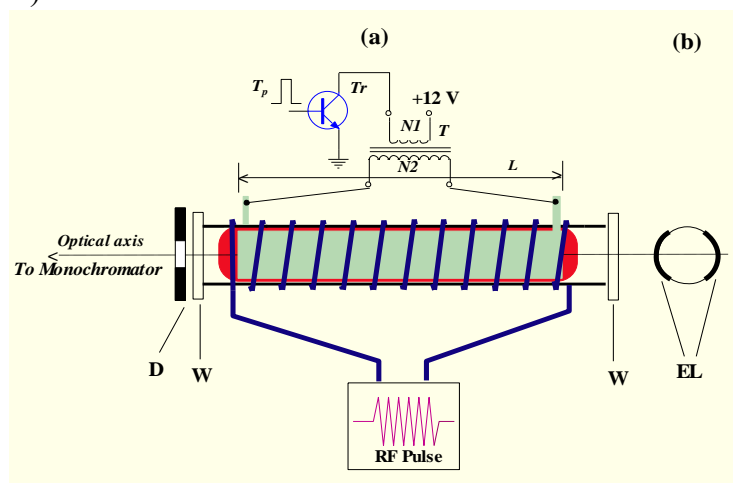


Рис.1. а) Совмещение барьерного и импульсного *HF*- разряда (*RF Pulse*). *D*-диафрагма диаметром 5 mm. *W* –кварцевые окна, б) –электроды *DBD* (*EL*) на поверхности разрядной трубки длиной 20 см.

Послесвечение линий атома  $Ne^*$  и иона  $Ne^{+*}$  в показано на Рис. 2. Измерения выполнены методом счета фотонов. Видно, что интенсивности  $J(t)$  формируют три характерные группы, отражающие три процесса образования возбужденных частиц. Первый из них- диссоциативная рекомбинация (*DR*) молекулярного иона



С появлением атомов  $Ne^*$  в процессе *DR* (самый быстрый процесс деионизации плазмы [3]) связаны  $J(t)$  1-5 Рис.2. Для *DR* характерна селективность, выражающаяся в ограниченном количестве выходных каналов процесса. Конкурирующий механизм - ударно- радиационная рекомбинация (*CRR*) атомарного иона с электроном



<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

На Рис.2 этот процесс как источник возбужденных атомов представлен линией 576.4nm. Согласно теории [4] рекомбинационный поток создается преимущественно неупругими столкновениями  $Ne_i^* + e \rightarrow Ne_k^* + e, k < i$ , так что в плазме с атомарными ионами возможно появление возбужденных атомов в любых состояниях.

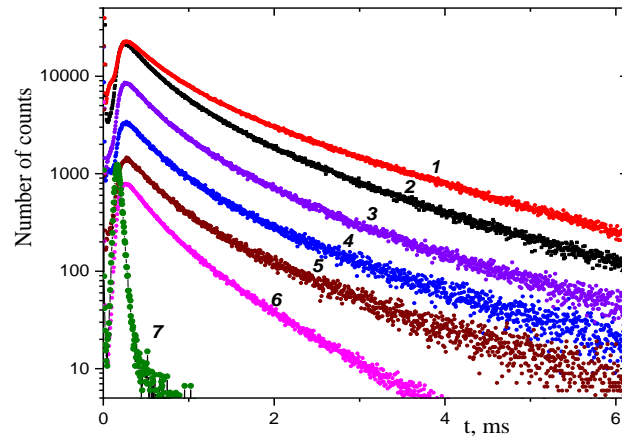


Рис.2  $t=0$  соответствует началу разряда. Плотность электронов  $[e](t=0) \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . 1, 3, 4, 5, 6 - интенсивности линий 585.2 (переход  $3p-3s$ ), 344.7 ( $4p-3s$ ), 345.4, ( $4p-3s$ ), 705.9 ( $3d-3p$ ) и 576.4 nm ( $4d-3p$ ) nm; 2 – «белый» свет, 7 – ионная линия 333.5 nm .

Третий процесс, являющийся источником ионных линий, – **CRR** двукратно заряженных ионов



Кинетику плотности  $[Ne^{++}](t)$  отражает ионная линия 333.5 nm (кривая 7 на Рис.2). Механизм (3) тождественен (2), но процесс протекает намного быстрее, его константа скорости  $\alpha_{2CR}$  в 8 раз превышает  $\alpha_{1CR}$  (согласно [4]  $\alpha_{CR} \sim Z^3$ , где  $Z$  - заряд иона). Именно этот процесс и являлся основной целью данной работы как наименее исследованный из цепочки (1) - (3). Как видно из данных Рис.2, вклад процесса (2) ионов  $Ne^+$  на фоне **DR** ощущается на всех линиях, излучаемых  $3p$ ,  $4p$  и  $3d$  - уровнями, а также в «белом» свете, в то время как уровни  $4d$  недостижимы для механизма **DR**, и, соответственно, интенсивность  $J_{576.4}(t)$  линии 576.4 nm характеризует исключительно процесс (2). При этом в наименьшей степени подвержена влиянию **CRR** линия 585.2 nm. Ее мы и используем в реализации следующего алгоритма. Подберем коэффициент  $k$  таким образом, чтобы сумма квадратов разностей интенсивностей  $\sum_i (J_{585.2} - J_W * k)_i^2$  линии 585.2 nm и «белого» света, регистрируемого в нулевом порядке дифракционной решетки монохроматора, была минимальной для точек  $i$  при временах в послесвечении  $t > 4.5 \text{ ms}$ , когда вкладом **CRR** в обе рассматриваемые интенсивности можно пренебречь. На Рис.3 разность  $D_1(t) = J_W - J_{585.2}$  представлена вместе с  $J_{585.2}(t)$  и  $J_W(t) * k$ , а также  $J_{576.4}(t)$ , совмещенной с  $D_1$  таким же способом, что и  $J_W$  с  $J_{585.2}$ , но, начиная с  $t > 1 \text{ ms}$ . Видно, что исключение вклада **DR** из «белого» света дало разность  $D_1(t)$  практически тождественную потоку ударно-радиационной рекомбинации ионов  $Ne^+$ . Очевидно, если рассматриваемая модель формирования потока излучения распадающейся плазмы верна, т.е. он содержит только три составляющих (1) - (3), то полученный результат означает, что вклад процесса (3) в интегральное излучение плазмы мал по сравнению с (1) и (2). В ранней стадии послесвечения ситуация может оказаться иной. Действительно, вычисляя разность  $D_2(t)$  совмещенных  $D_1(t)$  и  $J_{576.4}(t)$  и, располагая ее на Рис.4 вместе с ионной линией  $J_{333.5}(t)$  (нормируя ее интенсивность на  $D_2$  в области максимума), видим, что  $D_2(t)$  оказывается весьма близкой к  $J_{333.5}(t)$ . Основываясь только на результатах изложенного в данной работе эксперимента, мы не

можем утверждать, является ли выходящее за рамки статистической погрешности различие  $D_2(t)$  и  $J_{333.5}(t)$  следствием несовершенства системы регистрации излучения, или отражает реальные процессы в плазме, но, во всяком случае, изложенное показывает, что анализ в спектроскопическом эксперименте «белого» света наряду с линейчатым излучением известного происхождения с помощью несложных процедур

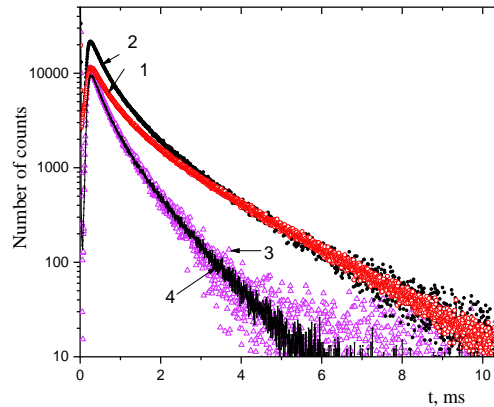


Рис.3. 1,2 - интенсивность  $J_{585.2}$  линии  $585.2 \text{ nm}$  и  $J_W$  («белый» свет), 3 – разность  $D_1$ , 4-интенсивность линии  $576.4 \text{ nm}$ , совмещенная с  $D_1$ .

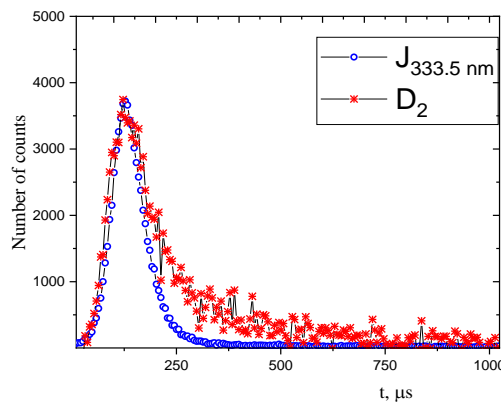


Рис.4. Совмещенные в максимуме разность  $D_2$  и интенсивность ионной линии  $333.5 \text{ nm}$ . Давление  $P_{Ne}=1.3 \text{ Torr}$ , плотность электронов  $[e](t=0) \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ .

может быть использован для разделения вкладов, а, значит, и исследования, различных процессов заселения возбужденных состояний атомов в плазме сложного ионного состава. В этом и заключается основной результат работы.

Ключевые слова: барьерный разряд, послесвечение, процессы электрон-ионной рекомбинации, ионный состав

### Список литературы

1. V.A Ivanov. Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. 045022. doi org/10.1088/1361-6595/ab7f4c.
2. В.А. Иванов. Опт. и спектр., **130** (7), 996 (2022).
3. Б.М. Смирнов. УФН, 133 (4), 569 (1981).
4. A.V. Gurevich, L.P. Pitaevskii. Sov. Phys. JETP. **19** (4), 870 (1964).