

# ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АТОМОВ МЕДИ В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В БЫСТРОМ ПОТОКЕ АЗОТА

П.А. Михеев, А.А. Шепеленко, Н.В. Купряев, А.И. Воронов.

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,  
443011, Самара, ул. Ново-Садовая 221. [mikheyev@fian.smr.ru](mailto:mikheyev@fian.smr.ru), [shepelenko@fian.smr.ru](mailto:shepelenko@fian.smr.ru).

## Введение

Применение продуктов плазмы разряда в азоте для обработки поверхности металлов стимулировало большое количество теоретических и экспериментальных работ, в которых изучалась кинетика элементарных процессов с участием возбуждённых молекул и атомов азота. Результаты последних работ (например, [1, 2]) показывают, что хотя многие физические механизмы к настоящему времени выявлены, полное знание о процессах в послесвечении пока не достигнуто. Особенностью сильноточных тлеющих разрядов постоянного тока с быстрым потоком газа является заметное распыление материала катода и вынос его в область послесвечения. В некоторых случаях в этой области наблюдаются реакции с участием атомов металла, из которого изготовлен катод.

В настоящей работе сообщается об обнаружении эффекта увеличения передачи энергии от возбуждённых молекул азота атомам меди в присутствии кислорода.

## Экспериментальная установка

В экспериментах использовалась разрядная камера, показанная на рисунке 1. Диаметр кварцевой разрядной трубки составлял 3 см. Медные охлаждаемые водой электроды имели форму трубок с внутренними рабочими поверхностями диаметром 18 мм. Расстояние между электродами составляло 7 см. Пройдя через область разряда, газ попадал в зону диагностики, представлявшую собой кварцевую трубку диаметром 17 мм длиной 25 см. Видимое излучение из зоны диагностики направлялось в монохроматор МДР-6У с решеткой 1200 штрихов/мм. В качестве фотоприёмника использовался ФЭУ-69А. Сигнал обрабатывался в режиме синхронного детектирования, реализованного программно. Калибровка положения спектральных линий осуществлялась с помощью неоновой лампы. В экспериментах расход азота составлял от 0.7 до 5 ммоль/сек и измерялся ротаметрами РМ-ГС. Давление в диапазоне от 2 до 8 Тор измерялось прибором ИКД-6ТДа.

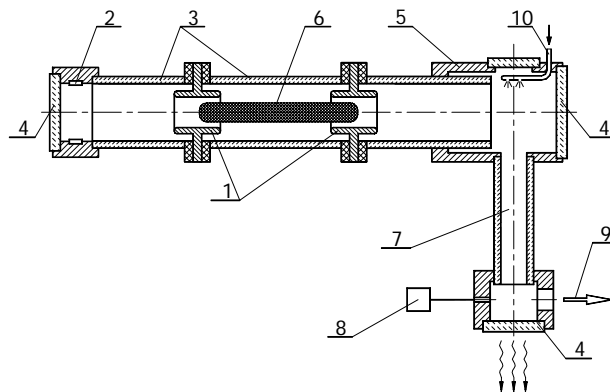


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – электроды, 2 – сопловой аппарат для ввода газа, 3 – кварцевая трубка, 4 – смотровые окна, 5 – корпус, 6 – область разряда, 7 – зона диагностики, 8 – измеритель давления, 9 – откачка, 10 – напуск кислорода.

## Результаты экспериментов

Наблюдалось зелёное потоковое послесвечение разряда в азоте, занимавшее всё пространство зоны диагностики без заметного изменения интенсивности вдоль потока. Проведённые измерения позволили идентифицировать спектр послесвечения с линиями атомов меди Cu I 510.5, 515.3 и 521.8 нм. Наблюдалась так же более слабая линия 578.2 нм. Типичный спектр в области 510-522 нм представлен на рисунке 2.

На рисунке 3 представлены зависимости интенсивностей линий меди от тока.

Характер зависимостей интенсивности линий 521.8 и 515.3 нм практически одинаков и для линии 515.3 нм на рисунках не показан. При добавлении в послесвечение кислорода интенсивность всех трёх линий заметно увеличивалась, что проиллюстрировано на рисунке 3. При этом, для линий 521.8 и 515.3 изменялся и характер зависимости интенсивности от тока. С увеличением давления, как показано на рисунке 4, интенсивность свечения уменьшалась.

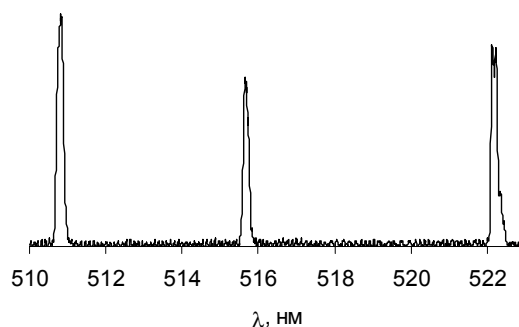
При использовании аргона и кислорода вместо азота заметного послесвечения в области 510-522 нм не наблюдалось, как и при замене медных электродов стальными или алюминиевыми.

### Обсуждение результатов

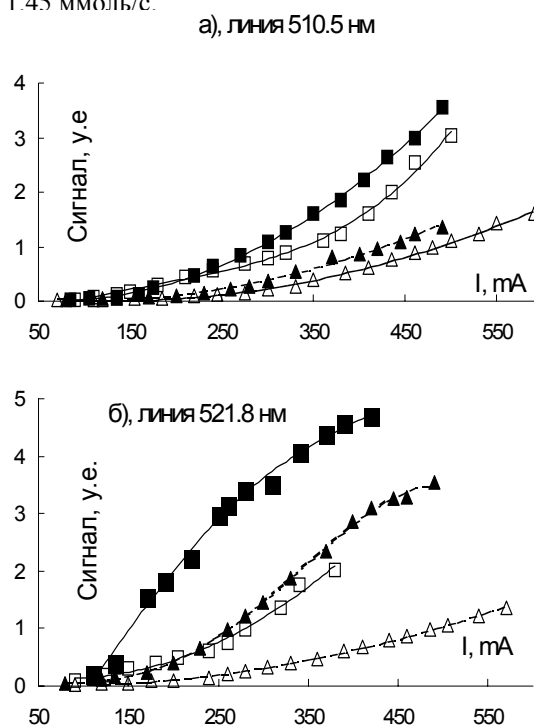
Время жизни возбуждённых уровней меди, переходы с которых наблюдаются в спектре, составляют  $\sim 5 \cdot 10^{-7} \div 10^{-8}$  сек. По оценкам, поток газа попадает в зону диагностики через 4-5 мс после разряда и столько же находится в ней. Таким образом, наблюдаемое во всей зоне диагностики свечение атомов меди связано с передачей энергии от долгоживущих возбуждённых молекул азота. На рисунке 5 изображена упрощённая схема уровней атомов меди, и близко лежащих колебательно и электронно-возбуждённых молекул азота. Видно, что уровни, с которых наблюдается излучение линий Cu, находятся вблизи колебательно-возбуждённых уровней с  $v=14, 15$  и 25 основного электронного состояния молекулы азота и нулевого колебательного уровня долгоживущего состояния  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ . Измерения и расчёты, выполненные в [1, 2] показывают, что концентрация таких колебательно-возбуждённых молекул азота в условиях наших экспериментов составляет  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а молекул  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  –  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Квадратичная зависимость интенсивности линий меди от тока разряда, по-видимому, связана как с увеличением концентрации возбуждённых молекул азота, так и увеличением скорости распыления материала катода. Такая же зависимость интенсивности линий материала катода от тока наблюдалась и в прикатодной области тлеющего разряда в [3] при возбуждении атомов металла электронами разряда.

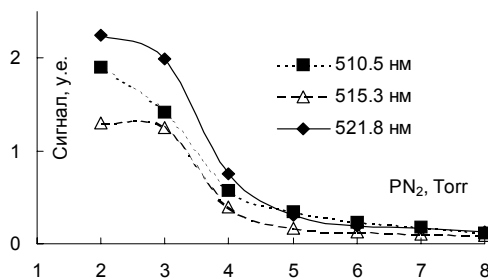
Как следует из рисунка 3 а), б), зависимости интенсивности линий 510.5 и 521.8 нм от тока в послесвечении без добавления кислорода похожи, а сами линии имеют



**Рис.2.** Спектр послесвечения разряда в потоке  $N_2$  с медными электродами при давлении 3 тор, токе 380 мА, расходе  $N_2$  – 1.45 ммоль/с.



**Рис.3.** Зависимости интенсивностей линий Cu I от тока разряда., ■, □ – 6 тор, 3.5 ммоль/с; ▲, △ – 3 тор, 1.4 ммоль/с. ■, ▲ – в послесвечение добавлен  $O_2$  в количестве 10% от расхода  $N_2$ .



**Рис.4.** Зависимость интенсивности линий Cu I от давления  $N_2$  при токе разряда 500 мА. Расход  $N_2$  от 0.7(при 2-х торах) до 5(при 8 торах) ммоль/с.

приблизительно одинаковую интенсивность. Если предположить, что заселение уровня  $\text{Cu I } ^2\text{P}^0_{3/2}$  происходит только за счёт спонтанных переходов с уровня  $^2\text{D}_{5/2}$ , а расселение – только за счёт спонтанного испускания, то условие равновесия населённости уровня  $^2\text{P}^0_{3/2}$  выглядит следующим образом:

$$\frac{dN_{4p}}{dt} = -N_{4p} \cdot A_{4p} \cdot g_{4p} + N_{4d} \cdot A_{4d} \cdot g_{4d} = 0,$$

где  $N$  – концентрации частиц на соответствующих уровнях,  $A$  и  $g$  – их коэффициенты Эйнштейна, и статистические веса. Как следует из этого соотношения, интенсивности линий, пропорциональные произведению  $N \cdot A \cdot g$  в этом случае равны. Отклонение от этого равенства свидетельствует о наличии дополнительных каналов накачки или тушения уровня  $^2\text{P}^0_{3/2}$ , по всей видимости, молекулами  $\text{N}_2$ . В предлагаемом рассмотрении не учитываются эффекты пленения излучения, поскольку при характерной скорости эрозии катода 1-10  $\mu\text{г/с}$  [4] концентрация атомов меди по оценкам в условиях эксперимента составляет  $\sim 10^{12} \text{см}^{-3}$ .

Добавка кислорода в послесвечение приводит, по-видимому, к существенному изменению установившегося распределения молекул азота по возбуждённым состояниям. Это проявляется в том, что увеличивается скорость накачки уровней  $\text{Cu I } ^2\text{D}$ , но вместе с тем увеличивается и скорость безизлучательного тушения уровня  $^2\text{P}^0_{3/2}$ .

Участие возбуждённых молекул кислорода в накачке уровней  $^2\text{D}$  маловероятно. Близкое по энергии состояние  $\text{O}_2(\text{B}^3\Sigma^-_u)$  имеет время жизни 53 пс [5], что много меньше времени между столкновениями частиц в условиях эксперимента.

Быстрое уменьшение интенсивности излучения атомов меди при увеличении давления, по всей видимости, обусловлено снижением интенсивности распыления материала катода. Как известно, интенсивность распыления возрастает при повышении степени аномальности разряда, то есть превышении плотности тока на катоде над нормальной. С увеличением давления  $P$  нормальная плотность тока возрастает как  $P^2$ , и при фиксированном токе степень аномальности быстро снижается, при этом снижается и интенсивности катодного распыления.

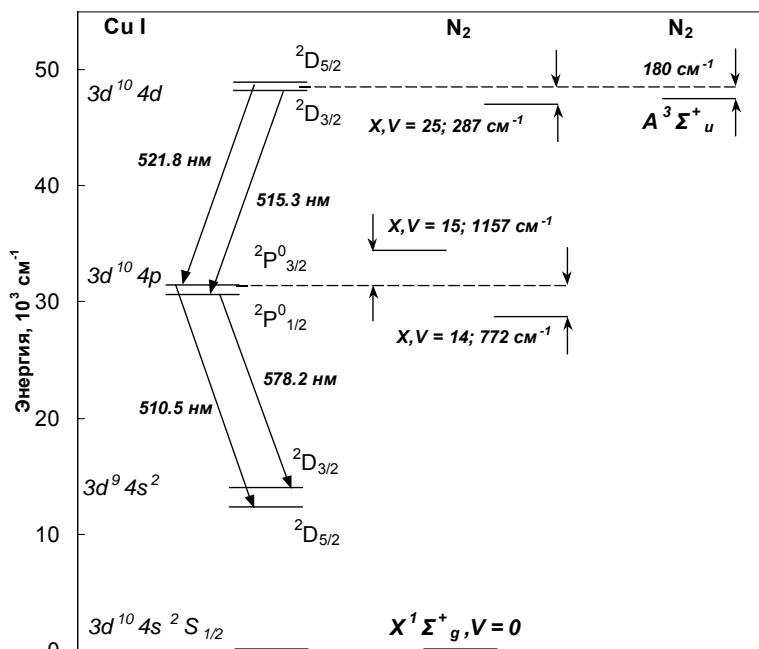


Рис.5. Упрощенная схема уровней атома меди и близких колебательно и электронновозбуждённых состояний азота.

### Выводы

Экспериментально обнаружено сильное в 2-3 раза увеличение интенсивности эмиссионного излучения атомов Си в потоковом послесвечении продуктов разряда в азоте при добавлении в зону послесвечения небольшого,  $\sim 10\%$ , количества кислорода. Предполагается, что причиной такого влияния кислорода является изменение распределения молекул азота по возбуждённым состояниям. В результате этого изменения увеличивается скорость передачи энергии возбуждённых молекул азота атомам меди. Прямое участие молекул кислорода в процессе передачи энергии от молекул азота атомам меди маловероятно.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП “Интеграция”, контракт № А0056.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Sadeghi N., Foissac C., Supiot P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001, V.34, P. 1779.
2. *Levaton J., Amorim J., Souza A. R., et.al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002, V.35, P. 689.
3. *Wronskiy Z., Sielankoy J., Sullivan J. L.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996, V.29, P. 1509.
4. *Bogaertz A., Gijbels R.* // Spectrochimica Acta, Part B, 1997, V.52, P. 553.
5. *Lewis B.R., Berzins R., Carver J.H. et.al.* // Quantum Spectrosc. Radiat. Transfer. 1986, V.36, P. 187.