

04;12

## СВЧ и ВЧ возбуждение разряда в парах серы с неоном

© А.Н. Козлов, Г.А. Ляхов, Ю.В. Павлов,  
А.Е. Резников, Р.М. Умарходжаев, Э.Д. Шлифер

Научный центр волновых исследований института общей физики РАН,  
Москва

Поступило в Редакцию 2 ноября 1998 г.

Экспериментально исследовано нестационарное свечение разряда, возбуждаемого микроволновым излучением в смесях серы с благородными газами. Выделено несколько характерных спектральных типов свечения, сменяющих друг друга во времени.

1. Схема безэлектродного, использующего внешнее электромагнитное поле, возбуждения газового разряда была реализована гораздо позднее классической схемы с внешним источником тока [1]. Плодотворным оказалось обращение к микроволновому диапазону. Этому способствовали предшествующие разработки мощных и экономичных микроволновых источников. С другой стороны, была установлена высокая эффективность преобразования энергии электромагнитных волн этого диапазона в кинетическую энергию частиц ионизированного газа и далее в энергию их излучения.

По-видимому, наиболее продвинутое к настоящему времени приложение здесь — это мощный и эффективный источник света с высоким качеством спектра излучения [2] (детальную схему см. в [3]).

Эта схема включает в себя магнетрон, в резонатор которого помещена запаянная кварцевая колба с порошком серы (и/или селена) и буферным газом (аргон) низкого давления. Физические механизмы возбуждения разряда в этой схеме в основных чертах установлены [4]. Микроволновое поле вызывает тлеющий разряд в буферном газе, имеющем при низком исходном давлении низкий порог пробоя. Одновременно поле нагревает — вплоть до испарения — порошок серы. В образовавшейся газовой смеси уже высокого давления микроволновое поле переводит атомы (а также димеры и т. д.) серы в возбужденные

состояния. При этом действует и канал непосредственного атомарного и молекулярного поглощения, и столкновительный механизм. Наконец, переизлучение из возбужденных состояний формирует наблюдаемый спектр свечения.

Экспериментальные измерения энергетического баланса для этого нового источника света проведены весьма детально [5]. Этого набора данных, относящихся, что существенно, к стационарному режиму, недостаточно, чтобы сформулировать количественную модель. Построение теории здесь необходимо не только для оптимизации этого перспективного прототипа целого класса приборов, но и с точки зрения общей физики плазмы. Процессы, определяющие эффективность микроволнового разряда в смесях исследуемого типа, характерны как для тлеющего разряда низкого давления, так и для пробоя при высоком давлении. Это, с одной стороны, усложняет задачу (не удастся указать малые в течение всего процесса параметры), с другой стороны, расширяет круг возможных приложений.

Очевидный следующий шаг в ее решении — исследование кинетики развития микроволнового разряда. Различные элементарные процессы, дающие вклад в его развитие, имеют, вообще говоря, различные интенсивности и скорости установления, поэтому разделение их по времени позволило бы получить оценки, по крайней мере, относительных значений этих характерных параметров.

Цель поставленной работы составило наблюдение нестационарной картины свечения для разряда, возбуждаемого микроволновым излучением в смесях серы с благородными газами. Здесь действительно удалось выделить определенное число характерных спектральных типов свечения разряда, сменяющих друг друга во времени.

2. Первая серия измерений была проведена со смесью сера + неон при высокой мощности СВЧ возбуждения. Это обеспечивало условия, близкие к условиям функционирования источника света [2]. Неон был выбран в качестве буферного газа потому, что его характерные линии существенно разнесены с линиями серы.

Кварцевая колба сферической формы с диаметром 30 mm, заполненная неоном при давлении 4 Torr с 30 mg порошка серы, помещалась в резонатор волноводной системы, возбуждаемой магнетроном М-155. Мощность излучения магнетрона на частоте 2.45 GHz составляла 800 W. Спектральные измерения были проведены спектрографом СП40 с рабочим диапазоном 3600–12 500 Å. Параметры неравномерности кривой

чувствительности таковы: на длине волны  $11\,000\text{ \AA}$  неравномерность составляет 10%, при  $3600\text{ \AA}$  достигает 70%.

Роль временного параметра кинетики в измерениях играла температура внешней поверхности колбы. Связь ее с реальным временем в процессе нагрева смеси микроволновым излучением нелинейна, но однозначна. Использование этого приема было вынужденным: временные масштабы кинетики спектрального состава свечения существенно различны на разных этапах изменения качественной картины спектра. В этой кинетике наличествуют как плавные (на масштабах порядка 100 s), так и скачкообразные (на временах менее десятой доли секунды) изменения. Измерения температуры внешней поверхности колбы проводились дистанционным пирометром "Кельвин" с лазерным прицелом. Его рабочий диапазон  $50\text{--}1000^\circ\text{C}$ . Относительная погрешность измерений температуры в условиях эксперимента, когда тепловой поток снимается с области диаметром не менее 20 mm, не хуже  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Абсолютная погрешность при высоких температурах достигает  $\pm 3\text{--}5\%$  из-за неточности определения испускательной способности поверхности.

Для более детального наблюдения была проведена вторая серия измерений. Электромагнитное возбуждение разряда в них осуществлялось, вместо магнетрона, более длинноволновым (рабочая частота 100 MHz) и менее мощным (100 W) генератором-индуктором.

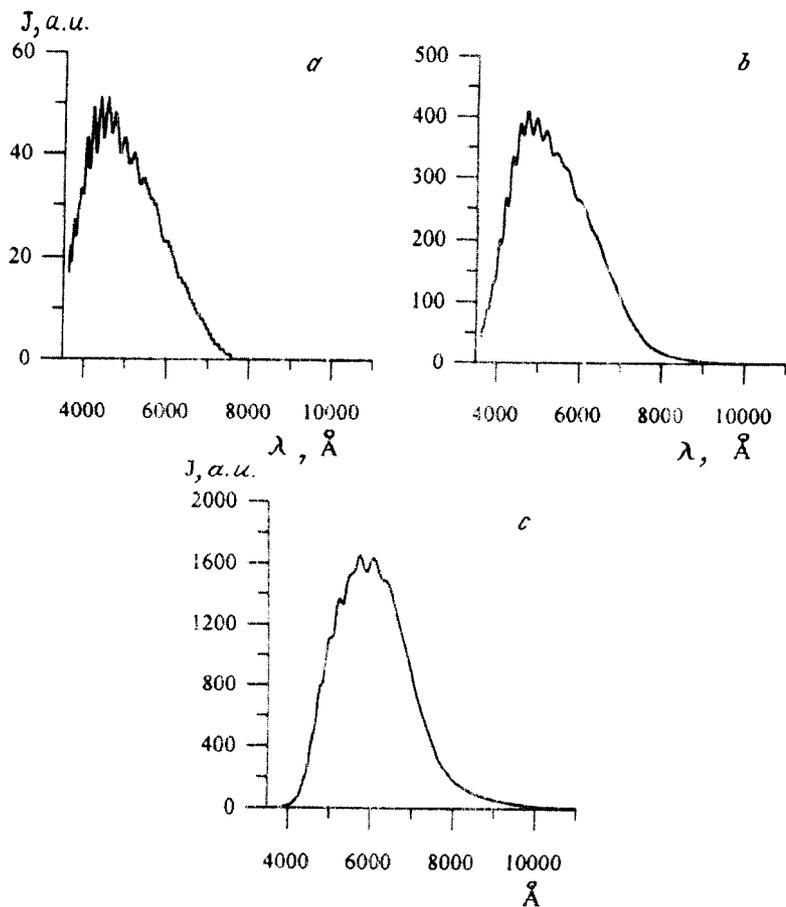
3. В серии спектральных измерений с СВЧ полем возбуждения большой мощности развитие свечения смеси сера + неон обнаруживает три стадии (рис. 1).

1. Практически с момента подачи микроволнового излучения в газовой смеси возникает свечение относительно невысокой интенсивности. Максимум спектральной интенсивности лежит около  $4500\text{ \AA}$  (рис. 1, *a*), спектр простирается — по половинному уровню — от  $3700$  до  $5900\text{ \AA}$ .

2. Когда температура наружной поверхности колбы достигает примерно  $500^\circ\text{C}$ , излучение увеличивает свою максимальную интенсивность в 7–9 раз. Максимум спектра сдвигается к  $4700\text{ \AA}$ , спектр занимает диапазон от  $3900$  до  $6500\text{ \AA}$  (рис. 1, *b*).

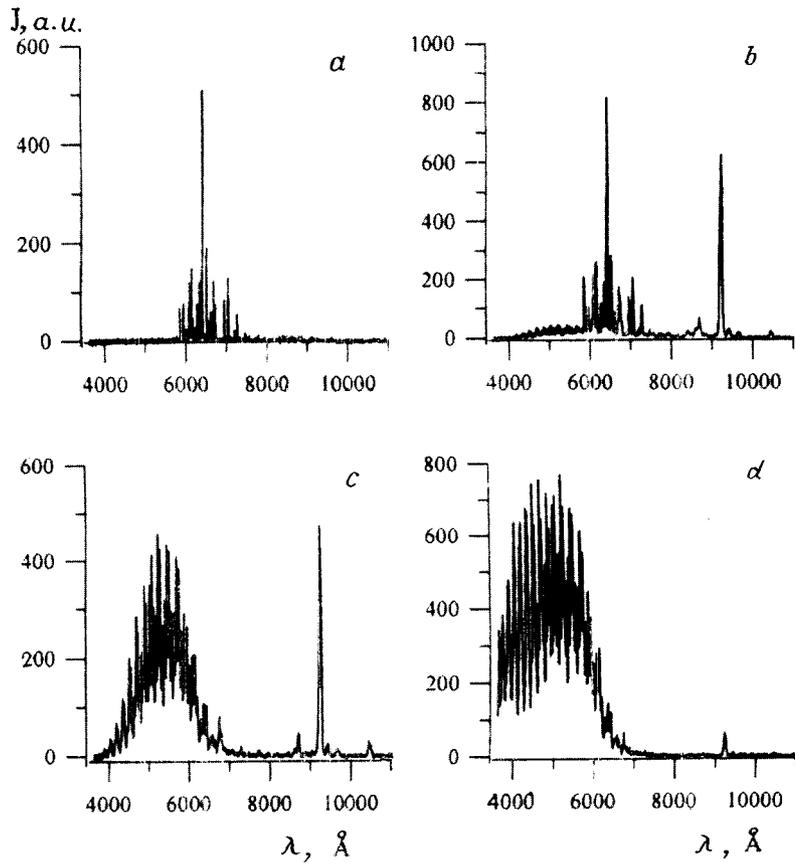
3. Второй скачок — при температуре около  $600^\circ\text{C}$  — формирует квазисолнечный спектр (рис. 1, *c*). Максимальная интенсивность возрастает еще в 3–5 раз. Нерезкий максимум лежит теперь около  $5800\text{ \AA}$ , полуширина спектра составляет  $2400\text{ \AA}$ .

4. Снижение частоты и мощности электромагнитного возбуждения позволяет замедлить развитие разряда в той же смеси сера + неон. Обна-



**Рис. 1.** Спектры свечения разряда, возбуждаемого мощным (800 W) СВЧ (2.45 GHz) излучением в смеси сера + неон. Температура наружной поверхности колбы равна 450 (a), 580 (b) и 640°C (c).

руживаемая при этом более детальная картина изменения спектрального состава свечения включает дополнительные характерные стадии, время жизни которых в мощном поле не превосходит долей секунды.



**Рис. 2.** Спектры свечения разряда в ВЧ (100 МГц) поле относительно невысокой (100 W) мощности. Температура поверхности колбы: 34 (*a*), 55 (*b*), 78 (*c*) и 145° C (*d*).

1) В холодной колбе (температура ниже 35–40°С) высвечивается характерный набор линий неона с наиболее интенсивной линией 6400 Å [6]. Лампа излучает красно-оранжевый свет высокой интенсивности (рис. 2, *a*).

2) Разряд в буферном неоне нагревает колбу до температуры выше  $45^{\circ}\text{C}$ , одновременно создавая заметную концентрацию паров серы. Линии неона ослабляются относительно резко растущей линии  $9200 \text{ \AA}$  атомарной серы [6] (рис. 2, *b*).

3) Линия  $9200 \text{ \AA}$  атомарной серы ослабляется начиная с момента, когда температура колбы превосходит примерно  $65^{\circ}\text{C}$ . Одновременно вырастает полоса видимого излучения от  $4500$  до  $6500 \text{ \AA}$ , а также линия  $4690 \text{ \AA}$  серы [6] (рис. 2, *c*). Появляется синий ореол, переходящий в стабильное бело-голубое свечение.

4) Одновременно с повышением температуры колбы до  $120\text{--}130^{\circ}\text{C}$  интенсивность бело-голубого свечения резко падает. Спектр свечения (рис. 2, *d*) сдвигается в синюю и ультрафиолетовую области (при этом ощущается характерный запах озона). Линия  $9200 \text{ \AA}$  практически исчезает, линия  $4690 \text{ \AA}$  остается еще заметной на фоне молекулярного спектра.

5) При температуре около  $160^{\circ}\text{C}$  разряд срывается. Его поддержание требует увеличения мощности генератора-индуктора. Температура срыва разряда зависит как от мощности генератора, так и от размеров колбы. При постоянной мощности температура срыва растет с уменьшением объема колбы.

5. Развитие свечения в смеси сера + аргон, возбуждаемой ВЧ полем невысокой интенсивности, в основных чертах повторяет картину разряда с буферным неонем.

При температурах колбы до  $60^{\circ}\text{C}$  высвечиваются известные линии аргона —  $7630$ ,  $8100$  и  $8400 \text{ \AA}$  [6] вместе с атомарным спектром серы. Это количественное отличие от начальной стадии разряда в неоне указывает на более высокую эффективность аргона в роли буфера. С ростом температуры линии аргона становятся менее интенсивными, в то же время в ультрафиолетовой области высвечиваются линии молекулярного спектра серы. Это указывает на то, что в присутствии аргона эффективней (чем в неоне) идет и испарение серы, и возбуждение коротковолновой области ее спектра. А именно этот процесс, по видимому, отвечает за формирование ее квазисолнечного спектра при высоких уровнях микроволнового возбуждения.

6. Представленные результаты, на наш взгляд, существенно расширяют набор экспериментальных данных, необходимых для построения количественной модели разряда, возбуждаемого электромагнитным полем диапазона  $0.1\text{--}10 \text{ GHz}$ , в смеси буферного газа низкого

давления с испаряемым компонентом, обладающим развитым спектром излучения в видимом диапазоне. Ввиду очевидной сложности системы представляется непродуктивной постановка здесь задачи теоретического описания на основе точных кинетических уравнений. С другой стороны, известных данных о параметрах стационарного разряда недостаточно даже для оптимизации по частоте электромагнитного источника, геометрии газового объема и компонентному составу смеси. Задача такой оптимизации, решение которой, хотя бы по частоте, было намечено в [7], до сих пор фактически не была поставлена. Выбор длины волны в цикле работ, начатых в [2], в частности, основывался на экономических соображениях.

На основе полученных данных уже можно выделить наиболее эффективные на каждой стадии разряда каналы передачи энергии, оценить, по крайней мере приближенно, скорости передачи энергии и соответствующие уровни насыщения. При этом, разумеется, полученные данные должны быть подвергнуты пересчету из-за нелинейной зависимости температуры на поверхности разрядной колбы от времени. Соответствующая теоретическая задача уже может быть сформулирована.

## Список литературы

- [1] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
- [2] *Dolan J.T., Ury M.G., Wood C.H.* // In: Sixth International Symposium on the Science and Tecnology of Light Sources. Technical University of Budapest Publisher. 1992. P. 301–302.
- [3] *Dolan J.T., Ury M.G., Wood C.H.* Lamp including sulfur. US Patent N 5404076. 1995.
- [4] *Warmby D.O.* // IEE Proc. A. 1993. V. 140. P.465–473.
- [5] *MacIennan D.A., Dolan J.T., Ury M.G.* // Society for Information Display International Symposium. Digest of Technical Papers. 1992. V. 23. P. 460–463.
- [6] *Зайдель А.Н., Прохоров В.И., Райский С.М., Шрейдер Е.Я.* Таблицы спектральных линий. М.: Физматгиз, 1962.
- [7] *Диденко А.Н., Виноградов Е.А., Ляхов Г.А., Шипилов К.Ф.* // Докл. РАН. 1995. Т. 334. № 2. С. 182–183.