

**А.Г. Гриднев**, Д.Ю. Шестаков

## ФОТОРЕЗОНАНСНАЯ ПЛАЗМА, СОЗДАННАЯ ОТКРЫТЫМ РАЗРЯДОМ В ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск  
Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 2.09.99 г.

Импульсный открытый разряд создает фоторезонансную плазму вне разрядного канала. Описаны результаты исследований фоторезонансной плазмы в смеси Zn–He. Сравниваются осциллограммы импульсов излучения из открытого разряда и из среды вблизи него. Обнаружена пиковая структура импульсов излучения некоторых линий. Обсуждаются важнейшие процессы, приводящие к ионизации атомов металла и к заселению излучающих уровней.

### Введение

Резонансная оптическая накачка (РОН) является одним из первых способов создания активной среды газовых лазеров. В ряде практически важных случаев РОН приводит к ионизации газовой среды и к появлению фоторезонансной плазмы (ФРП), которая, как и газоразрядная, в свою очередь может служить активной средой лазеров. ФРП привлекает внимание исследователей своими необычными свойствами и возможностью использования этих свойств в плазмохимии, квантовой электронике и спектроскопии [1, 2]. Для нее характерны низкая температура электронов при высокой заселенности уровней, отсутствие неустойчивостей, существенно неравновесное распределение по энергетическим уровням [2].

Фоторезонансная плазма со сравнительно высокой плотностью впервые исследовалась в работе Моргулиса, Корчезова и Пржонского [3]. Пары цезия накачивались в ней резонансной цезиевой лампой, т.е. имела место многолинейчатая резонансная оптическая накачка. Для средних и высоких давлений, а также для газов и паров с высоким потенциалом ионизации создание ФРП наталкивается на трудности. (Накачка паров свинца резонансными линиями свинца из импульсной кварцевой лампы изучалась в работе [4]). Часто стенка резонансной лампы не пропускает излучение ультрафиолетовой (УФ) и ВУФ-областей спектра. В этих областях лежат резонансные линии, способные поглощаться атомами в основном состоянии и накачивать высоковозбужденные уровни, лежащие вблизи границы ионизации и выше нее. Несмотря на слабую интенсивность этих линий, они, на наш взгляд, в ряде случаев могут играть важную роль в образовании фоторезонансной плазмы.

Для того чтобы излучение спектральных линий, лежащих в области вакуумного ультрафиолета, не поглощалось стенкой, ограничивающей накачивающий разряд, в работе [5] описано применение импульсного открытого газового разряда (ОГР) для создания ФРП. В них же исследованы возможности импульсного ОГР для создания фоторезонансной плазмы в смесях инертных газов и в смесях инертных газов с водородом. В работе [6] измерена концентрация электронов в фоторезонансной плазме, создан-

ной при резонансной оптической накачке мощным импульсным ОГР, которая оказалась порядка  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Использование фоторезонансной плазмы для создания активных сред лазеров предложено в [2]. Отметим, что ОГР накачивает окружающую его среду всем спектром, начиная от линий, лежащих в инфракрасной области спектра, и кончая линиями в вакуумном ультрафиолете, способными возбуждать уровни около границы ионизации и выше ее. При высокой заселенности нижних состояний поглощение с них может играть важную роль в энергетическом балансе ФРП. Недостатками ОГР для резонансной оптической накачки газовых и парогазовых сред с целью создания фоторезонансной плазмы и лазерных активных сред (ЛАС) являются трудности его зажигания при высоком давлении газа и управления параметрами разряда.

В настоящей статье рассматривается ФРП в смеси паров цинка с гелием. ФРП создается при облучении среды в камере резонансным излучением открытого газового разряда.

### Газоразрядная и измерительная аппаратура

Установка содержала источник плазмы, блок питания и схему регистрации. Источник плазмы изображен на рис. 1. Кварцевая камера (труба внутренним диаметром 35 мм и длиной 960 мм) помещалась в печь (на рисунке не показана). Торцы трубы закрывались кварцевыми окнами. Длина горячей зоны печи равнялась 320 мм. Расстояние между электродами 1 и 2 составляло 420 мм. Электрод 1 был изогнут для того, чтобы удобно было вставлять кварцевую камеру в печь. Электрод 2 служил катодом. Температура в печи контролировалась хромель-алюмелевой термомпарой. К наружной стенке трубы по линии, соединяющей электроды, прижат вспомогательный электрод 3, соединенный с катодом 2 как в [7]. Наружный вспомогательный электрод производил предпробойную ионизацию и по этому пути после пробоя проходил ток основного разряда, не распространяясь в стороны и не изгибаясь. Испытывались два вида наружных электродов: полоска медной фольги и круглый стальной стержень. В кварцевую трубу помещался цинк в танталовых лодочках 4 (жидкий цинк может повредить кварц). После предварительных экспери-

ментов выбрали давление буферного газа гелия 100 торр. Давление паров цинка в камере могло изменяться от 0,01 до 1 торр и выше при увеличении температуры печи.

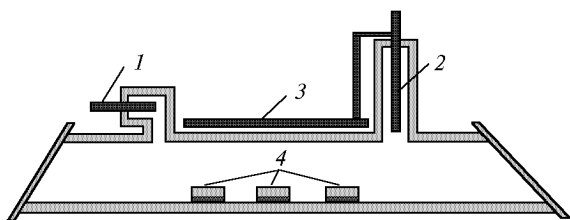


Рис. 1. Схема газоразрядной трубки для получения фоторезонансной плазмы

Источник импульсного питания газоразрядной трубки (ГРТ) состоял из высоковольтного блока и разрядной цепи с накопительным конденсатором емкостью 0,1 мкФ. Разрядная цепь коммутировалась разрядником РУ-62 в режиме самопробоя при напряжении 11 кВ. При необходимости два разрядника РУ-62 могли включаться последовательно. В этом случае напряжение самопробоя достигало 22 кВ.

Исследовались осциллограммы импульсов тока и спектральных линий. Регистрация спектра излучения ГРТ производилась при помощи монохроматора, ФЭУ и осциллографа. Выделение нужных порядков производилось светофильтрами.

#### Экспериментальные данные и их обсуждение

Для создания ФРП и активной среды на ее основе предполагалось разрядный шнур открытого газового разряда, диаметром значительно меньше диаметра кварцевой трубы, локализовать вблизи стенки по линии, соединяющей электроды так, чтобы он облучал остальной объем трубы резонансным УФ- и ВУФ-излучением, способным возбудить высоколежащие уровни, в том числе и смещенные, лежащие выше границы ионизации. Использовалось свойство шнура мощного разряда к самостягиванию, чтобы разрядный ток не распространялся по всему сечению кварцевой камеры. Как отмечено в обзоре [7], при одинаковом пробойном поле существуют токовая область (шнур) и бестоковое окружение. В изучаемом приборе авторы стремились максимально уменьшить продольное поле при удалении от шнура. Естественно, при подаче напряжения на электроды перед основным разрядом в объеме камеры всегда возникает разряд типа коронного и создает слабую предварительную ионизацию.

Обычно в трубке большого диаметра при средних и высоких давлениях разряд начинает шнуроваться, шнур не идет по прямому пути, а изгибается и перемещается, вызывая неоднородности в плазме. Для устранения этих явлений снаружи разрядной трубки помещали между электродами полоску медной фольги, соединенную с катодом, как делалось при работе с инертными газами [5]. Однако (может быть, вследствие большего, чем в [5], диаметра трубы) качество разрядного шнура при этом было недостаточным, форма разрядного шнура при наблюдении с торца становилась неправильной. Наилучших результатов добились, заменив фольгу стальным стержнем. При этом разряд стелется вдоль верхней стенки трубки ровно, по прямому пути. Шнур импульсного разряда имеет поперечные размеры в пределах 5–8 мм. Такая конструкция помогает до некоторой степени локализовать предпробойные электри-

ческое поле и вызванный им коронный предпробойный разряд в области расположения электродной системы.

Ток ОГР измерялся с помощью пояса Роговского и представлял собой затухающую синусоиду с длительностью первого полупериода 3 мкс. При облучении резонансным излучением ОГР (в том числе и ВУФ) пространства камеры вне разрядного шнура создается ФРП, о чем свидетельствует наличие линий иона цинка (в частности, 491,1 и 492,4 нм). Длительность свечения этих линий в той зоне трубки, где локализован импульсный разряд, значительно больше (около 60 мкс), чем в зоне, облучаемой ОГР (около 4–5 мкс). В парах металлов разряд с такими свойствами реализован, по-видимому, впервые.

При изучении суммарного излучения из всех зон трубки обнаружено, что формы осциллограмм свечения различных спектральных линий принципиально различаются. На рис. 2 изображены осциллограммы свечения спектральных линий атома и иона цинка, снятых в одинаковых условиях. Осциллограммы атомных линий цинка имеют ярко выраженную пиковую структуру, на осциллограммах же ионных линий такой структуры не наблюдается. Осциллограммы гелиевых линий тоже не имеют пиковой структуры. Имеет место корреляция пиков на осциллограммах свечения атомных линий цинка с полупериодами разрядного тока, однако механизм возбуждения этих линий требует дальнейшего изучения. При малых давлениях паров цинка (до 0,1 торр) в камере вне зоны разрядного шнура наиболее интенсивен первый пик. При увеличении давления паров цинка (больше 0,1 торр) интенсивность первого пика уменьшается относительно второго и даже третьего. При приближении к зоне разряда амплитуда первого пика еще более уменьшается относительно второго и третьего.

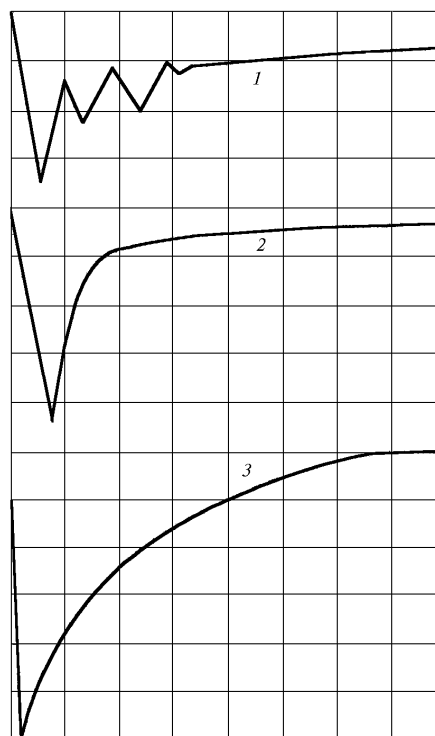


Рис. 2. Осциллограммы импульсов излучения спектральных линий: 1 –  $\lambda = 468,15$  нм (ZnI), 2 мкс/дел {полная длительность 25 мкс}; 2 –  $\lambda = 491,15$  нм (ZnII), 2 мкс/дел {полная длительность 60 мкс}; 3 –  $\lambda = 587,6$  нм (HeI), 10 мкс/дел

Синглетные линии атомов цинка значительно слабее триплетных, хотя они могут возбуждаться оптически при поглощении из основного состояния с большей вероятностью.

Осциллограммы излучения атомных линий цинка из различных зон камеры на одной и той же длине волны качественно различны. На рис. 3 изображены такие осциллограммы, снятые через щелевую диафрагму шириной 3 мм (длина волны 468 нм). Меньшая величина первого пика по сравнению с остальными, вероятно, связана с преобладанием ступенчатых процессов в возбуждении атомов цинка, хотя нельзя исключить и «выгорание» (т.е. почти полную ионизацию) атомов цинка под действием возбуждающего импульса, наиболее сильного в первый полупериод тока.

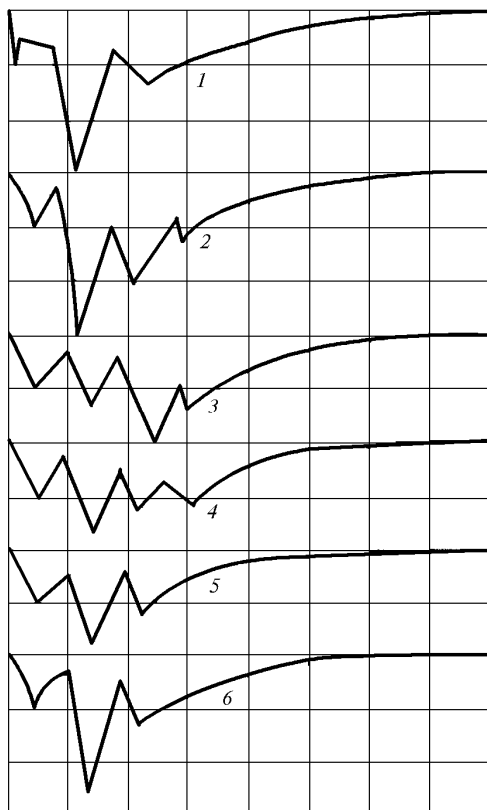


Рис. 3. Осциллограммы излучения линии  $\lambda = 468,15$  нм (ZnI) из разных областей камеры, выделяемого щелевой диафрагмой 3 мм (2 мкс/дел): 1 – разрядный канал (PK); 2, 3, 4, 5, 6 – 2, 7, 12, 18, 22 мм от PK

Качественное различие осциллограмм импульсов излучения цинка и гелия, в частности отсутствие у осциллограмм линий гелия пиковой структуры, говорит о том, что прямая или косвенная роль уровней гелия в заселении уровней атома цинка невелика.

В области разрядного шнура длительное (до 50 мкс и более) слабое излучение спектральных линий иона цинка (у атомов цинка слабое свечение наблюдаемых линий длится не более 25 мкс) после интенсивной передней части импульса вызвано, скорее всего, процессами столкновения ионов гелия с атомами цинка и последующими процессами релаксации.

Укажем некоторые важные процессы, приводящие к ионизации и образованию ФРП в смеси паров цинка и гелия, а также к возбуждению уровней атома цинка.

### I. Первичные прямые процессы

Процесс поглощения резонансного излучения с переходом:

а) на низколежащие состояния



б) на состояния, лежащие ниже границы ионизации на величину электронной температуры:



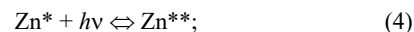
в) на смещенные состояния, лежащие выше границы ионизации:



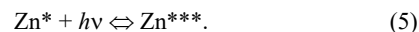
### II. Ступенчатые процессы

Поглощение резонансного излучения с низколежащих сильнозаселенных уровней:

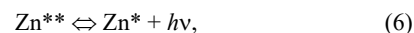
а) с переходом в состояния вблизи границы ионизации



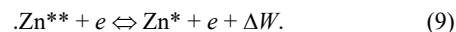
б) с переходом в смещенные состояния выше границы ионизации



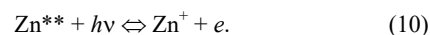
### III. Каскадные процессы



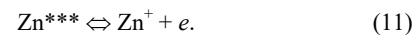
### IV. Удары второго рода



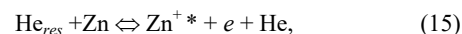
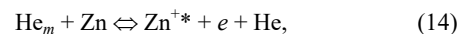
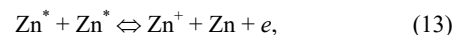
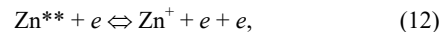
V. Ионизация при поглощении уровнями, лежащими ниже границы ионизации на величину электронной температуры, излучения со сплошным спектром



VI. Автоионизация со смещенных уровней, лежащих выше границы ионизации атома цинка



### VII. Процессы столкновений, приводящие к ионизации



Здесь  $\text{Zn}$ ,  $\text{Zn}^*$ ,  $\text{Zn}^{**}$ ,  $\text{Zn}^{***}$ ,  $\text{Zn}^+$ ,  $\text{Zn}^{+*}$  – атом цинка, атом цинка в нижнем сильнозаселенном состоянии, атом цинка в состоянии вблизи границы ионизации, атом цинка в смещенном состоянии, ион цинка, ион цинка в возбужденном состоянии;  $\text{He}$ ,  $\text{He}_m$ ,  $\text{He}_{res}$  – атом гелия, атом гелия в

метастабильном состоянии, атом гелия в резонансном состоянии;  $e$  – электрон;  $\Delta W$  – кинетическая энергия электрона. В стационарном и квазистационарном состояниях ФРП каждый процесс уравновешен обратным.

### Выводы

Процесс столкновения с возбужденными атомами гелия в заселении излучающих уровней атома цинка в пределах интенсивных максимумов импульсов излучения не играет основной роли. Это справедливо как для зоны разрядного шнура, так и для остальной части кварцевой камеры.

Процессы возбуждения уровней атома цинка в камере (при давлении паров цинка больше 0,1 торр) носят ступенчатый характер. Основная часть процессов (ступенчатых), приводящих к ионизации атомов цинка, действует в триплетном спектре.

В начальный период образования ФРП большее значение имеют прямые процессы (3), (11) и процессы с участием уровней атома цинка, лежащих ниже границы ионизации на величину электронной температуры (вернее, на две-три величины электронной температуры). Затем по

мере накопления заряженных и возбужденных частиц в ФРП основную роль начинают играть ступенчатые процессы с участием низколежащих сильнозаселенных состояний.

1. Бетеров И.М., Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Плазма резонансного излучения // УФН. 1988. Т. 155. Вып. 2. С. 265–298.
2. Gridnev A.G. Photoresonant plasma as laser active medium // Proc. SPIE. 1998. V. 403. P. 233–240.
3. Моргулис Н.Д., Корчевой Ю.П., Пржонский А.М. Получение цезиевой плазмы методом облучения резонансной радиацией и некоторые ее физические свойства // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. С. 417.
4. Gridnev A.G., Евтушенко Г.С., Клишкин В.М. Экспериментальные особенности накачки паров свинца резонансными импульсными лампами // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. Вып. 2–3. С. 269.
5. Gridnev A.G., Муравьев И.И. Инфракрасные лазеры с активной средой на основе протяженных открытых неоднородных разрядов в инертных газах // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 672–678.
6. Gridnev A.G., Евтушенко Г.С. Концентрация электронов в разлетной гелиевой плазме // Изв. вузов. Физика. 1994. Рук. депонир. в ВНИИЦ. 22.11.94, рег. № 2676-В94. 11 с.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.

**A.G. Gridnev**, D.Yu. Shestakov. **Photoresonant Plasma Produced by Open Discharge in Metal Vapour.**

Pulsed open discharge produces photoresonant plasma outside discharge channel. The results of investigation of a photoresonant plasma in Zn–He mixture are described. The oscillograms of pulses of radiation from open discharge and the medium near it are compared. Spiking structure of pulses of some lines radiation has been discovered. The most important processes leading to ionization of metal atoms and to population of radiation levels are discussed.