

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1974

УДК 537.525.

Ф. Х. КИДРАСОВ, Л. М. ВОЛКОВА, А. М. ДЕВЯТОВ, Л. В. АРХИПОВА

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА В МАГНИЕВОМ ПОЛОМ КАТОДЕ С АРГОНЫМ И ГЕЛИЕВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

Используя сканирующий интерферометр Фабри—Перо, исследованы контуры линий MgI , $MgII$, ArI , $ArII$ и HeI , возбуждаемых в разряде в полом катоде. Установлено наличие теплового равновесия между атомами и ионами газа и металла. При увеличении давления газа самообращение резонансной линии MgI $\lambda=2852$ А наступает при больших силах разрядного тока.

Разряд в полом катоде является удобным объектом для получения газоразрядной плазмы в парах тугоплавких и активных веществ и исследования элементарных процессов и свойств этой плазмы.

Для определения концентраций атомов и ионов в плазме абсорбционным методом требуется знание контуров спектральных линий. Этот метод приобретает особенно простой вид для доплеровского профиля линий. Однако наличие только доплеровского механизма уширения линий в разряде в полом катоде не является установленным. Самопоглощение может сильно уширить контура линий [1, 2].

Обычно при абсорбционных измерениях предполагают, что температура атомов металла и температура газа равны, что дает возможность определять температуру разряда по контурам линий газа [3, 4]. Однако, как показано в [5], такое тепловое равновесие не всегда наблюдается, что заставляет при исследовании параметров плазмы полого катода проводить анализ контуров спектральных линий.

В данной работе исследуется характер контуров спектральных линий в разряде в магниевом полом катоде в зависимости от силы разрядного тока и давления газа-наполнителя.

Экспериментальная установка

Измерения проводились в разрядных трубках с полым магниевым катодом, выполненным в виде открытого с концов цилиндра, длиной 5 и диаметром 1,5 см. Анод диаметром 3 см был коаксиален с катодом. Для вывода излучения в разрядную трубку впаивались два плоскопараллельных кварцевых окошка. В качестве наполнителей использовались спектрально чистые газы — аргон и гелий, давление которых

менялось от $3 \cdot 10^{-2}$ до 12 мм рт. ст. для аргона и до 3 мм рт. ст. для гелия. Сила разрядного тока изменялась от 5 до 60 ма.

Производилась фотоэлектрическая запись контуров, получаемых с помощью сканирующего интерферометра Фабри—Перо, скрещенного с монохроматором МДР-2. Сканирование интерференционной картины достигалось изменением давления азота в барокамере. В интерферометре использовались зеркала с диэлектрическим покрытием, коэффициент отражения которых в области длин волн от 4300 до 6200 Å менялся от 0,83 до 0,95 и с металлическим покрытием с коэффициентом отражения 0,87 на длине волны 2852 Å. Расстояние между зеркалами выбиралось 7, 10, 15 и 30 мм. Интерференционные кольца фокусировались объективом с фокусным расстоянием 30 см на щель монохроматора, где помещалась круглая диафрагма диаметром 0,2 мм, которая выделяла часть центрального кольца. Сигнал от фотоумножителя усиливался усилителем постоянного тока и регистрировался самописцем ЭПП-09. Линейность записи проверялась по постоянству расстояний между порядками интерференции, линейность усилителя проверялась при различных напряжениях на ФЭУ.

Для выяснения роли самопоглощения на уширение линий определялся коэффициент поглощения k_0 в центре линии методом одновременной записи контуров с зеркалом и без зеркала [6]. Вогнутое зеркало располагалось за трубкой на двойном фокусном расстоянии от центра катода. Скорость сканирования при этом была настолько малой, что за время записи одного порядка интерференции вращающийся диск с прорезями, помещенный между трубкой и зеркалом, успевал делать достаточное для надежной записи контуров число открываний и закрываний зеркала.

Обработка контуров

Записанные контура линий могли быть представлены сверткой лоренцевской и гауссовской профилей и описывались фойхтовской функцией

$$I(\nu) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-4 \ln 2 (\nu' - \nu)^2 / \Delta\nu_G^2)}{1 + 4\nu'^2 / \Delta\nu_L^2} d\nu',$$

где $\Delta\nu_G$ — полная гауссовская ширина, $\Delta\nu_L$ — полная лоренцевская ширина, I_0 — нормировочная постоянная, ν — частота.

В зависимости от толщины интерферометра для выделения $\Delta\nu_G$ и $\Delta\nu_L$ применялось два метода. При работе по наложению крыльев линий соседних порядков интерференции контура анализировались методом Баллика [7], в случае, когда область дисперсии выбиралась существенно больше ширины контура, обработка производилась по таблицам [8].

Полная лоренцевская ширина может быть представлена суммой

$$\Delta\nu_L = \Delta\nu_a + \Delta\nu_e + \Delta\nu_p, \quad (1)$$

где $\Delta\nu_a = \frac{c}{2t} \cdot \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}$ — аппаратная ширина интерферометра, толщина t и коэффициент отражения зеркал R ; $\Delta\nu_e$ — естественная ширина линии, $\Delta\nu_p$ — величина, обязанная некоторому уширяющему механизму лоренцевского типа, имеющемуся в разряде.

При вычислении температуры разряда необходимо учитывать аппаратные уширения, дающие вклад в полную гауссовскую ширину контура. В данном случае истинная доплеровская ширина, связанная с температурой T и атомным весом M равенством $\Delta v_D = 7,16 \cdot 10^{-7} \frac{c}{\lambda} \sqrt{T/M}$, находилась из полной гауссовской ширины по соотношению

$$\Delta v_r^2 = \Delta v_D^2 + \Delta v_0^2 + \Delta v_H^2,$$

где $\Delta v_0 = \frac{c}{8\lambda} \cdot \frac{d^2}{F^2}$ — апертурная ширина круглой диафрагмы диаметра d , F — фокусное расстояние объектива, Δv_H — эффективная ширина, учитывающая неровности поверхностей зеркал и неточности юстировки, находилась из записанных контуров лазерной линии 6328 Å при толщинах интерферометра 7 и 30 мм.

По экспериментально найденным величинам оптических толщин $k_0 l$ оценивалось максимальное значение отношения ширины самопоглощенной линии Δv к истинной доплеровской ширине Δv_D [9]:

$$\frac{\Delta v}{\Delta v_D} = \frac{1}{\sqrt{\ln 2}} \sqrt{\ln \frac{k_0 l}{\ln \frac{2}{1 + \exp(-k_0 l)}}}. \quad (2)$$

Результаты измерений и их обсуждение

Были записаны и обработаны контура более чем 30 линий MgI, MgII, AgI, AgII и HeI в зависимости от условий разряда. В таблице приводятся некоторые из этих линий указанных элементов.

Линии MgI, MgII и HeI при всех рабочих разрядных токах и давлениях имели доплеровский контур (резонансная линия MgI $\lambda = 2852$ Å исследовалась только на самообращение). При силах разрядного тока больше 30 ма началось самопоглощение триплетных линий магния, оканчивающихся на $3^3 P_{012}$, однако самопоглощение существенно не уширяло контура. Максимальное значение отношения (2) при $i_p = 60$ ма для линий MgI $\lambda \lambda 3829, 3832, 3838$ Å не превышало значения 1,03. Эти линии поглощались сильнее других нерезонансных. Синглетные линии MgI, линии AgI и HeI поглощались незначительно ($k_0 l \sim 0,3$), интеркомбинационная резонансная линия MgI $\lambda = 4571$ Å, линии MgII и AgII в указанных пределах изменения давлений и разрядного тока практически не испытывали самопоглощения.

Температура, определенная по контурам линий магния, совпадала в пределах погрешности измерений с температурой, найденной по контурам линий AgI и AgII, в разряде в аргоне и с температурой, найден-

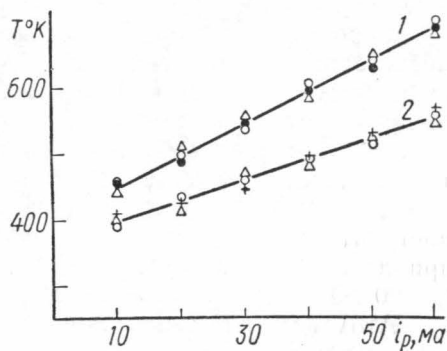


Рис. 1. Температура разряда в полном катоде (1 — разряд в гелии при давлении 1,4 мм рт. ст., 2 — разряд в аргоне при давлении 1,2 мм рт. ст., ● — $\lambda = 4922$ Å HeI, ○ — $\lambda = 5047$ Å HeI, △ — $\lambda = 5184$ Å MgI, + — $\lambda = 4511$ Å AgI

ной по контурам линий HeI, в гелиевом разряде. Это указывает на наличие теплового равновесия между атомами и ионами газа и металла. Для примера на рис. 1 представлено изменение температуры разряда в зависимости от силы разрядного тока, найденной по контурам некоторых линий указанных элементов.

При одинаковых давлениях и силах разрядного тока температура разряда в гелии несколько выше, чем в аргоне.

Резонансная линия MgI $\lambda=2852$ Å испытывает сильное самопоглощение. На рис. 2 представлены контуры этой линии, записанные при различных силах разрядного тока (толщина интерферометра 7 мм).

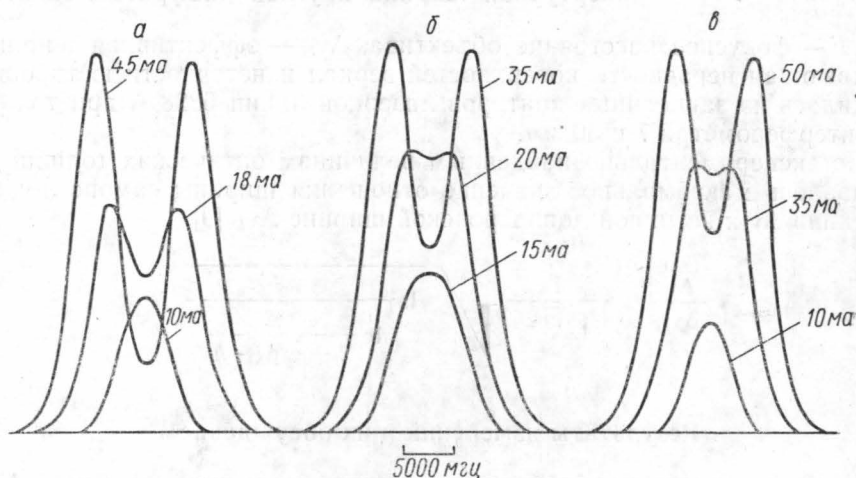


Рис. 2. Контурсы линии MgI $\lambda=2852$ Å: а — в разряде в гелии при давлении 0,6 мм рт. ст., б и в — в разряде в аргоне при давлении соответственно 1 и 1,4 мм рт. ст.

С ростом силы разрядного тока линия сильно уширяется. В разряде в гелии при давлении 0,6 мм рт. ст. (рис. 2, а) при $i_p=15$ ма она начинает самообращаться, а при $i_p=45$ ма провал настолько велик, что линия кажется состоящей из двух. При давлении аргона 0,6 мм рт. ст. $\lambda=2852$ Å в зависимости от силы разрядного тока трансформируется так же, как и в разряде в гелии при том же давлении.

С увеличением давления газа-наполнителя момент самообращения наступает при больших силах разрядного тока. Так, в разряде в аргоне при давлении 1 мм рт. ст. (рис. 2, б) самообращение наступает при $i_p=20$ ма, а при давлении 1,4 мм рт. ст. (рис. 2, в) — при $i_p=35$ ма.

Атомы магния с поверхности катода могут поступать в разряд благодаря термическому испарению и катодному распылению при ионной бомбардировке. За счет диффузии они уходят из разряда. При постоянной силе разрядного тока изменение давления газа в 2—3 раза не приводит к заметному изменению термоиспарения.

С уменьшением давления газа энергия ионов, бомбардирующих катод, растет, что должно сопровождаться более интенсивным выбиванием атомов магния с поверхности катода. Однако уменьшение давления газа облегчает диффузию атомов магния из разряда. Видимо, с уменьшением давления газа равновесие между поступлением атомов магния и их диффузионным уходом наступает при больших значениях концентрации атомов магния в разряде, чем и можно объяснить поведение контуров линии MgI $\lambda=2852$ Å с изменением давления рабочего газа.

Обработка контуров линий AgI $\lambda\lambda$ 4511 и 4703 Å позволила установить, что полные лоренцевские ширины этих линий растут с увеличением давления аргона. Оценки [11] показывают, что это уширение не могло быть вызвано самопоглощением. Эти линии оканчиваются на резонансный уровень и должны быть подвержены резонансному уширению. Рис. 3 иллюстрирует, как изменяется резонансная ширина $\Delta\nu_p$ линии AgI $\lambda=4511$ Å в зависимости от концентрации атомов аргона.

$\lambda, \text{Å}$	Элемент	Переход	J-J
2852	MgI	3^1S-3^1P	0-1
3838	MgI	3^3P-3^3D	2-2,3
4571	MgI	3^1S-3^3P	0-1
5184	MgI	3^3P-4^3S	2-1
5528	MgI	3^1P-4^1D	1-2
4739	MgII	$4^2D-8^2F^0$	$3/2-5/2$
4851	MgII	$4^2F^0-8^2G$	-
4922	HeI	2^1P-4^1D	1-2
5047	HeI	2^1P-4^1S	1-2
4511	AgI	$4s' [^1/2]^0-5p [^1/2]$	1-0
4703	AgI	$4s' [^1/2]^0-5p [^1/2]$	1-1
4765	AgII	$4s^2P-4p^2P^0$	$1/2-3/2$
4806	AgII	$4s^4P-4p^4P^0$	$5/2-5/2$

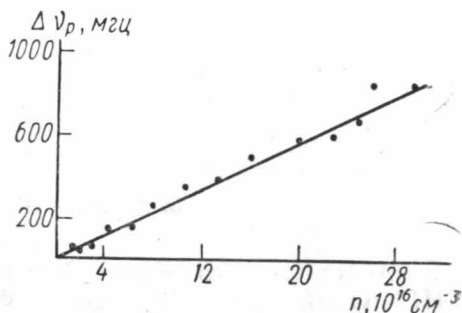


Рис. 3. Резонансная ширина линии аргона $\lambda=4511$ Å (точками обозначены экспериментальные значения, прямая — расчет [10])

Записи контуров производились при силе тока 25 ма. Концентрация атомов аргона в полости катода $n=p/kT$ вычислялась по найденным из контуров линий температурам T , при этом считалось, что давления внутри и вне катода одинаковы.

Для сравнения на рис. 3 приведена резонансная ширина линии AgI $\lambda=4511$ Å, рассчитанная по формуле [10]:

$$\Delta\nu_p (\text{сек}^{-1}) = 3,17 \cdot \frac{e^2 f \lambda}{8 \pi m c} \cdot n,$$

где f — сила осциллятора линии AgI $\lambda=1048$ Å, взятая из таблиц [12]. Как видно из рисунка, согласие между экспериментально найденными и теоретическими значениями резонансных ширин вполне удовлетворительное, что подтверждает предположение о резонансном механизме уширения линий аргона, оканчивающихся на резонансный уровень.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Лебедевой за полезную дискуссию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бодрецова А. И., Львов Б. В. и др. «Журн. прикладной спектроскопии», 2, 97, 1965.
2. Davies D. K. J. Appl. Phys., 38, 4713, 1967.
3. Гофмейстер В. П., Каган Ю. М. «Оптика и спектроскопия», 26, 689, 1969.
4. Десан Ш. К., Каган Ю. М. «Оптика и спектроскопия», 27, 34, 1969.
5. Grege W. C., Roessler F. L. JOSA, 60, 1100, 1970.
6. Луизова Л. А., Хахаев А. Д. «Оптика и спектроскопия», 22, 640, 1967.
7. Ballik E. A. Appl. Opt., 5, 170, 1966.
8. Davies J. T., Vaughan J. M. The Astroph. Journ., 137, 1302, 1963.
9. Burger H., P. van Cittert. Zs. f. Phys., 51, 638, 1928.
10. Методы исследования плазмы. Под ред. В. Лохте-Хольтгрёвена. М., 1971, стр. 98.
11. Биберман Л. М., Новодворская Е. М. ДАН СССР, 106, 35, 1956.
12. Wiese W. L., Smith M. W., Miles B. M. Atomic Transition Probabilities, v. 2. Inst. for Basic Stand., National Bureau of Standards, Washington, 1969.

Поступила в редакцию
21.11 1972 г.

Кафедра
электроники