61, № 3. С. 323—326; Логунов А. А., Мествиришвили М. А.//ТМФ. 1984. 61, № 3. С. 327—346; Logunov A. A., Mestvirishvili M. A.//Found. Phys. 1986. 16, N 1. P. 1—26. [5] Rosen N.//Found. Phys. 1985. 15, N 10. P. 997—1008. [6] Thirring W.//Ann. of Phys. (N. Y.) 1961. 16, N 1. P. 96—117; Туняк В. Н.// // Изв. АН БССР, физ.-мат. сер. 1983. № 5. С. 98—102.

Поступила в редакцию
13.02.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 1

РАДИОФИЗИКА

УДК 533.9.082.5

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В КАНАЛЕ СТИМУЛИРОВАННОГО СВЧ РАЗРЯДА В АЗОТЕ

В. В. Злобин, А. А. Кузовников, В. М. Шибков

(кафедра электроники)

По штарковскому уширению спектральной линии водорода H_β определена зависимость концентрации электронов в канале стимулированного СВЧ разряда от давления азота. При атмосферном давлении азота концентрация электронов в канале достигала величины $(1\div2)\cdot10^{15}$ см$^{-3}$.

Газовый разряд при высоком давлении, возбуждаемый электромагнитным излучением СВЧ диапазона, может быть применен в плазмохимии, как активная среда в мощных молекулярных лазерах, в воздушно-реактивных двигателях [1], для создания в атмосфере Земли радиоотражающих плазменных слоев, используемых для дальней связи [2].

Мощность используемых в лабораторных экспериментах СВЧ генераторов недостаточна для самостоятельного пробоя газа при атмосферном давлении, однако если разряд стимулирован, например, с помощью резонансных диполей на диэлектрической подложке или лазерного факела [1], то он может поддерживаться длительное время в условиях сильных подпороговых полей. При этом, как показано в [1], СВЧ разряд при давлении газа (азот, воздух, гелий, аргон) больше 200 Тор пространственно неоднороден. Плазменное образование состоит из множества тонких нитей (каналов) диаметром $0{,}1\div0{,}3$ мм, вытянутых вдоль вектора напряженности электрического поля в падающей СВЧ волне. Для построения теоретической модели данного типа разряда необходимо определить концентрацию и температуру электронов в плазме. В [3] изучался СВЧ разряд при атмосферном давлении, возбуждаемый на частоте ~3 ГГц между двумя заостренными стержнями, введенными внутрь волновода в середине широкой стенки и расположенных друг против друга. Концентрация электронов в канале СВЧ разряда вычислялась по измеренной проводимости плазмы на постоянном токе. В [3] получено, что область значений n_e лежит в пределах $3\cdot10^{16}\div3\cdot10^{17}$ см$^{-3}$. Для измерения концентрации электронов данным методом необходимо знать поперечные размеры канала и температуру электронов и газа. К тому же данный метод является контактным и может вносить неконтролируемые возмущения.

Спектроскопическая диагностика плазмы имеет важные преимущества. Главные из них — отсутствие возмущений исследуемой плазмы и дистанционный характер измерений. Для широко используемых оптических методов диагностики необходимы дополнительные сведения о физических процессах, протекающих в плазме. При концентрации электронов $n_e>10^{14}$ см$^{-3}$ штарковское уширение линий водорода значительно больше, чем уширение за счет других факторов. В данной работе концентрация электронов в канале стимулированного СВЧ разряда измерялась по штарковскому уширению [4] спектральной линии водорода H_β ($\lambda=4861$ Å). Выбор линии H_β обусловлен тем, что она лежит в спектральной области, где обычные приемники излучения имеют высокую чувствительность. Точность теоретических расчетов ширины линии H_β высока ($\sim5\%$), и данная линия соответствует переходу между сравнительно низко лежащими уровнями, поэтому она хорошо возбуждается в плазме, даже если водород присутствует в качестве малой примеси.

Для создания СВЧ разряда в виде одиночного канала использовалась следующая схема. В стеклянную колбу диаметром 5 и длиной 15 см с плоскими торцевыми окошками были впаяны навстречу друг другу две металлические проволочки. Расстояние между их концами было фиксировано и равно ~10 мм. Колба помещалась

около рупора СВЧ тракта. Использовался СВЧ генератор двухсантиметрового диапазона длин волн, работающий в импульсном режиме. Длительность импульса 25 мкс, частота повторения 20 Гц, мощность изменялась от 50 до 200 кВт. Вакуумная система позволяла откачивать камеру до давления $\sim 10^{-2}$ Тор и производить напуск либо водорода, либо смеси водорода с азотом. Для стимулирования СВЧ разряда на проволочки подавалось импульсное ($t \sim 1$ мкс) высоковольтное напряжение, осуществляющее пробой разрядного промежутка. СВЧ импульс подавался спустя 10 мкс после высоковольтного импульса. Излучение от разряда проецировалось с помощью системы линз и зеркал на входную щель монохроматора ДФС-12. Сигнал с выхода ФЭУ-79 подавался либо на вход запоминающего осциллографа, либо на систему [5], состоящую из временного селектора, двух узкополосных усилителей, синхронного детектора, усилителя постоянного тока и самописца. Система позволяла осуществлять запись контура спектральной линии при импульсном разряде.

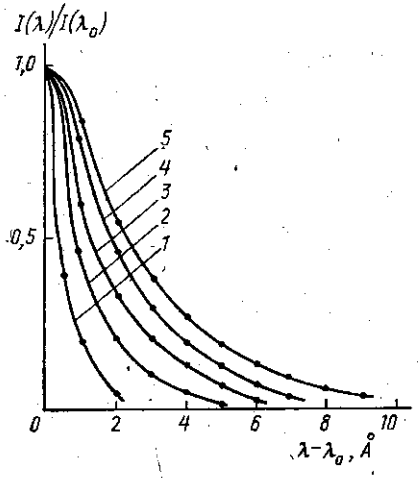

Рис. 1. Контур линии H_β при различных давлениях азота: $p=100$ (*1*), 500 (*2*), 760 (*3*), 1000 (*4*) и 1500 Тор (*5*)

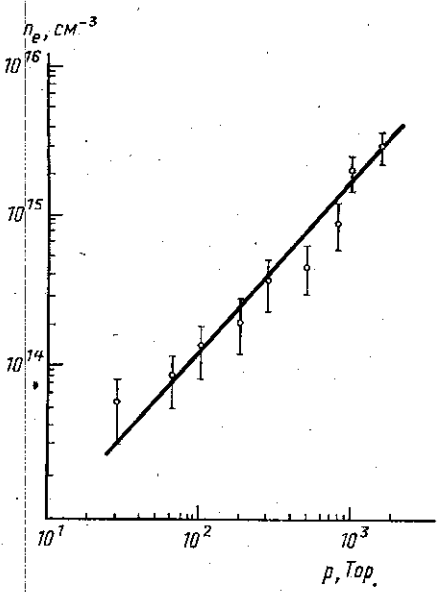

Рис. 2. Зависимость концентрации электронов в канале стимулированного СВЧ разряда от давления азота

Регистрация контура линии H_β осуществлялась в диапазоне давлений газа $30 \div 1500$ Тор. При низких давлениях ($p=30 \div 70$ Тор) СВЧ разряд представлял собой плазменное образование, заполняющее всю разрядную камеру. При давлениях $100 \div 200$ Тор разряд существовал в виде канала диаметром ~ 1 мм, а при $p > 200$ Тор — в виде канала с поперечными размерами порядка 0,1 мм.

На рис. 1 представлены профили линии H_β, нормированные на максимальные значения в зависимости от давления газа. Видно, что с увеличением давления контур уширяется: так, если при $p=100$ Тор полуширина $\Delta\lambda$ равна 0,7 Å, то при $p=1500$ Тор $\Delta\lambda=5{,}4$ Å. Концентрация электронов, полученная из этих данных с учетом уширяющих факторов, обязанных аппаратной функции ($\sim 0{,}1$ Å), доплеровскому эффекту ($\sim 0{,}1$ Å), внешнему эффекту Штарка ($\sim 0{,}1$ Å) и конечности ширины щели монохроматора, приведена в двойном логарифмическом масштабе на рис. 2. Видно, что в пределах точности эксперимента ($\sim 40\%$ при $p \leqslant 10^2$ Тор и $\sim 20\%$ при $p \geqslant 10^3$ Тор) концентрация электронов растет от величины $\sim 6 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$ при $p=30$ Тор до $3{,}5 \times 10^{15}$ см$^{-3}$ при $p=1500$ Тор. При этом для атмосферного давления $n_e \sim (1 \div 2) \times 10^{15}$ см$^{-3}$.

В [1] приводится оценка параметров среды в канале СВЧ разряда на основании того, что для беспрепятственного проникновения поля волны в плазму необходимо, чтобы концентрация электронов удовлетворяла неравенству

$$n_e < 2 \frac{c}{\omega^2} \frac{n_{ec}}{r} \nu_{\text{eff}},$$

где $n_{ec}=m\omega^2/(4\pi e^2)$, r — радиус канала, ν_{eff} — эффективная частота столкновений электрон—нейтральный атом. Тогда при $r\sim0{,}1$ мм, $n_{ec}\sim2\cdot10^{12}$ см$^{-3}$, $\nu_{eff}\sim10^{12}$ с$^{-1}$ $n_e<2{,}5\cdot10^{15}$ см$^{-3}$, что близко к экспериментально зарегистрированной величине.

Измеренная величина концентрации электронов является интегральной по времени и средней по сечению канала стимулированного СВЧ разряда. Определение локального значения концентрации электронов, особенно при атмосферном давлении, когда диаметр канала ~0,1 мм, с помощью преобразования Абеля является сложной экспериментальной задачей и в данной серии экспериментов не проводилось. Предварительные результаты по измерению временного хода $n_e(t)$ показали, что в течение СВЧ импульса длительностью 25 мкс концентрация электронов постоянна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Батанов Г. М. и др.//Тр. ФИАН СССР. 1985. 160. С. 174—203. [2] Гуревич А. В.//УФН. 1980. 132, № 4. С. 685—805. [3] Булкин П. С., Солнцев Г. С., Двинин С. А., Шкрадюк И. Э.//Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физ. Астрон. 1986. 27, № 5. С. 15—21. [4] Методы исследования плазмы/Ред. В. Лохте-Хольтгревен. М., 1971. [5] Волкова Л. М., Девятов А. М., Шибков В. М., Шибкова Л. В.//Физика плазмы. 1981. 7, № 2. С. 296—302.

Поступила в редакцию
20.04.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 1

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.315.592

К РАСЧЕТУ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ НА БЕНЗОЛЕ ПО МЕТОДУ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

М. Ю. Николаев, С. С. Семенов

(кафедра магнетизма)

Сделан точный (в рамках металлической модели) расчет недиагональных компонент тензоров проводимости и поляризуемости молекулы бензола, знание которых в свою очередь позволяет определить эффект Фарадея.

Металлическая модель молекулы неоднократно применялась к расчету основных характеристик молекул — частот электронных переходов, сил осцилляторов [1], поляризуемостей [2], интенсивностей комбинационных спектров [3], анизотропии диамагнитной восприимчивости [4, 5]. В основе этой модели лежит представление о свободном передвижении π-электронов вдоль цепочки сопряженных связей.

В данной заметке предпринята попытка теоретически рассчитать угол поворота плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея). Будем исходить из того, что шесть π-электронов бензола способны свободно передвигаться по периметру молекулы. Тем самым молекула представляется одномерным замкнутым потенциальным ящиком. Без потери общности шестиугольник бензола можно заменить окружностью с радиусом $R=6\cdot1{,}34$ Å$/(2\pi)$ [5]. Уравнение Шрёдингера для свободного электрона в магнитном поле, перпендикулярном к плоскости молекул, имеет вид

$$\frac{1}{2m}\left(\mathbf{p}-\frac{e}{c}\mathbf{A}_{\text{вн}}\right)^2\Phi=E\Phi, \tag{1}$$

$$\mathbf{A}_{\text{вн}}=\left(-\frac{yH_1}{2},\ \frac{xH_1}{2},\ 0\right),$$

$$\mathbf{H}=\nabla\times\mathbf{A}_{\text{вн}}.$$