

УДК 533.95

О КОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАЗРЯДА В НЕОНЕ В ШИРОКОЙ ТРУБКЕ ВЫШЕ ГРАНИЦЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТРАТ**Т.Х.ГУСЕЙНОВ***Бакинский Государственный Университет**htarlan@mail.ru*

В положительном столбе неоновом разряда в широкой трубке измерены частотные зависимости глубины модуляции и фазы колебаний концентрации электронов, напряженности продольного электрического поля и заселенностей метастабильного уровня $1s_5$ атома неона. Обнаружен немонотонный ход в частотных характеристиках. Результаты измерений сравнены с результатами расчетов амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик колебаний параметров разряда в условиях ступенчатой ионизации и объемной рекомбинации. Получено удовлетворительное согласие с результатами линейной теории.

Ключевые слова: динамическая характеристика, плазма газового разряда, объемная рекомбинация

Динамические характеристики газоразрядной плазмы можно определить исходя из элементарных процессов, происходящих в самой плазме [1-5, 8]. Знание динамических свойств помогает в понимании переходных процессов и установлении стационарных состояний [1, 2], а также определению оптимальных режимов условий газоразрядных оптических квантовых генераторов [4, 9].

Вопрос о колебательном режиме разряда при низких давлениях с учетом прямой ионизации рассматривался в работе [1]. Учет ступенчатой ионизации, разработанной в работах [5, 7], привел к существенным изменениям частотных зависимостей глубины модуляции электрических и оптических параметров разряда.

В работе [6] приводится карта областей параметров положительного столба разряда в неоне, где существуют регулярные, нерегулярные, имеющие шумовой характер, стратовые колебания. Работы, посвященные изучению разряда в неоне при отсутствии стратовых колебаний, в основ-

ном выполнены в области параметров, соответствующих значениям ниже границы существования страт. Однако, как следует из этой карты, в широких разрядных трубках при достаточно низких плотностях разрядного тока, выше границы существования страт, также можно получить разряды без стратовых колебаний. При этих условиях имеется довольно обширная область параметров, где разряд не контрагирован и можно применить традиционные методы диагностики плазмы, таких как зондовый, оптический, микроволновый и т. д. Однако с увеличением диаметра разрядной трубки меняется отношение диффузионных и электронных процессов в балансе частиц. Так, в гибели заряженных частиц механизм амбиполярной диффузии заменяется объемной рекомбинацией, в тушении долгоживущих метастабильных уровней диффузия к стенкам переходит в разрушение электронным ударом.

В работах [5, 7] решена задача линейных колебаний параметров разряда с учетом ступенчатой ионизации и рекомбинации. На основе упрощенной трехуровневой модели атома, состоящей из основного, метастабильного уровня и уровня ионизации рассмотрена система уравнений, состоящая из уравнений баланса для метастабильных атомов и электронов и выражения тока в цепи. Из решения этой системы получены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики колебаний концентрации электронов n_e , заселенностей метастабильных атомов N_m и напряженности продольного электрического поля E_z . Эти результаты качественно отличаются от результатов работ [2,3], полученных для диффузионного режима столба.

В данной работе измерены зависимости глубины модуляции и фазы колебаний концентрации электронов, напряженности продольного электрического поля и заселенностей метастабильного уровня $1s_5$ атома неона в положительном столбе разряда в широкой трубке в условиях модуляции разрядного тока. Рассчитаны амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики колебаний концентрации электронов n_e , заселенностей метастабильных атомов N_m и напряженности продольного электрического поля E_z по методу, переложенному в работах [5, 7]. Полученные результаты сравнены с результатами расчетов в линейном приближении.

Эксперименты проводились в разрядной трубке с внутренним диаметром 55 мм, длиной 60 см, снабженной накаливаемым катодом. Для измерения электрических параметров плазмы в трубку были впаяны два зонда, длиной 3,5 мм и диаметром 0,03 мм, ориентированных поперек трубки. Расстояние между зондами было 60 мм. Измерения проводились в спектрально чистом неоне при давлении 10 Тор, и разрядном токе 10 мА. При этих условиях столб не контрагирован и отсутствуют страты [6]. Расчет чисел прямых и ступенчатых ионизаций на основе измеренных функций распределения и концентрации электронов, а также заселенностей уровней системы $2p^5 3s$ показал, что ступенчатая ионизация превали-

рует над прямой ионизацией более чем на порядок. Оценка роли объемной рекомбинации и амбиполярной диффузии в гибели заряженных частиц показал, что ролью амбиполярной диффузии в гибели заряженных частиц можно пренебречь. Следовательно в этих условиях положительный столб разряда описывается системой уравнений [5].

$$J(t) = eb_e n_e(t)E(t) + eb_i n_i(t)E(t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_m}{dt} N_0 \alpha_{0m}(E) n_e(t) - \alpha_{mi} n_e(t) N_m(t) \quad (2)$$

$$\frac{dn_e}{dt} = N_{0m}(t) \alpha_{mi} n_e(t) - \beta n_e^2(t) \quad (3)$$

В формулах (1-3) $J(t)$ – плотность разрядного тока, N_m – концентрация нормальных атомов, α_{0m} – скорость прямого возбуждения, α_{mi} и α_{mi} – скорости разрушения метастабильного уровня электронном ударом и ступенчатой ионизации, β – коэффициент рекомбинации, b_e – подвижность электронов, R – радиус трубки.

Осциллирующее электрическое поле измерялось методом двух зондов. Сигналы от двух зондов при плавающем потенциале подавались в открытый дифференциальный вход осциллографа. Изображение на экране представлял собой изменение во времени разности изолированных потенциалов двух зондов, пропорциональное изменениям продольного электрического поля. На рис.1 приведена зависимость глубины модуляции и фазы колебаний напряженности электрического поля от частоты (точки). На том же рисунке представлены зависимости φ_E и $M_E = \frac{E_1}{E_0}$, полученные из решения линеаризованной системы (1-3) (сплошная кривая).

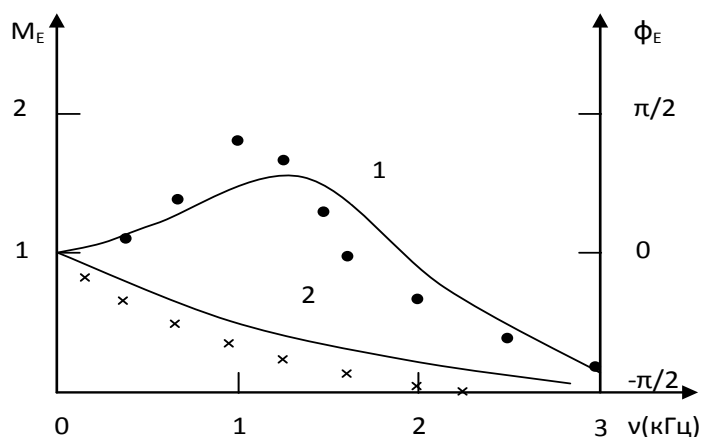


Рис. 1. Измеренные зависимости глубины модуляции и фазы колебаний напряженности продольного электрического поля от частоты (точки). На том же рисунке представлены зависимости φ_E и $M_E = \frac{E_1}{E_0}$, полученные из решения линеаризованной системы (1-3) (сплошная кривая).

Из рисунка следует, что эти кривые качественно согласуются. Некоторые отличия между измеренными и вычисленными кривыми можно объяснить недостаточно точным определением скоростей реакций и их производных по E , входящих в решения этой системы. Абсолютные значения этих величин и их производных, входящие в решения, могут изменяться в широких пределах в зависимости от используемых сечений. Поэтому эти величины имеют порядковый характер.

Колебания концентрации электронов измерялась по величине ионного тока на зонд. В неоне в далекой ионной части характеристики зондовый ток слабо зависит от потенциала. Если пренебречь изменением размеров призондового слоя, связанным с изменением электронной температуры, то в этой части характеристики ионный ток будет пропорциональным концентрации ионов. Поэтому наблюдаемые на экране изменения ионного тока будут пропорциональны изменениям концентрации электронов и ионов. На зонд подавался большой отрицательный потенциал и на экране осциллографа наблюдались колебания ионного тока.

На рис. 2 приведены зависимости глубины модуляции колебаний концентрации электронов и сдвигов фаз от частоты. На том же рисунке представлены рассчитанные зависимости φ_n и $M_n = \frac{n_1}{n_0}$ [5]. Видно качественное согласие измерений с теорией.

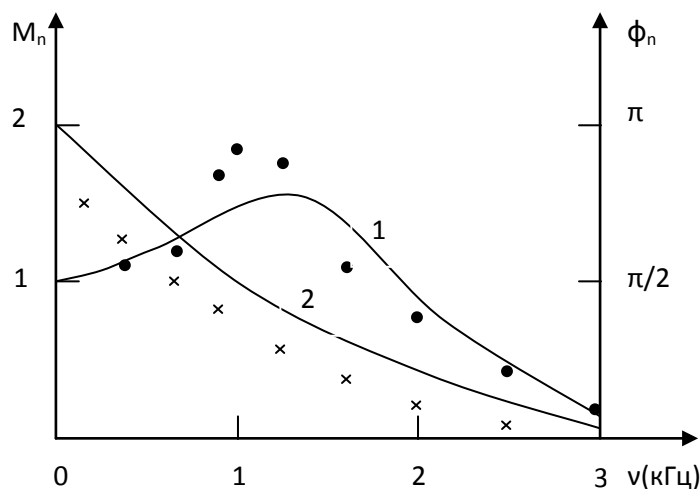


Рис.2. Измеренные зависимости глубины модуляции колебаний концентрации электронов и сдвигов фаз от частоты (точки). На том же рисунке представлены рассчитанные зависимости φ_n и $M_n = \frac{n_1}{n_0}$ полученные из решения линеаризованной (1-3) (сплошная кривая).

Заселенности метастабильных уровней измерялись методом поглощения спектральных линий. Измерялась величина полного поглощения вдоль диаметра разрядной трубки, определялась интегральная по диаметру заселенность метастабильного уровня.

Для измерения глубины модуляции и фазы колебаний заселенностей метастабильных уровней, излучение вспомогательного разряда, модулированного с частотой Ω , пропускалась через измерительную трубку, в которой разрядный ток модулировался с частотой ω . Известно, что по измеренной величине полного поглощения A_g можно определить произведение из сил осциллятора f_{ik} на концентрацию поглощающих атомов $N_i f_{ik}$. В случае доплеровского контура расчетная зависимость A_g от $\alpha_0 l$ представлена на рис. 3 [11]. Как видно из рисунка, при малых значениях $\alpha_0 l$ эта зависимость линейна. При больших значениях оптической толщины

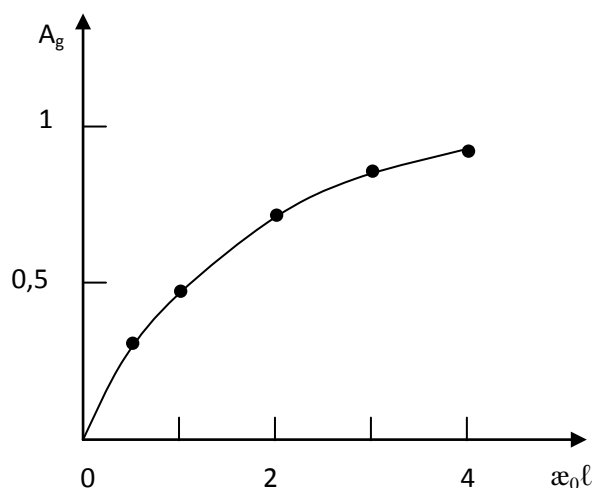


Рис. 3. Зависимость полного поглощения A_g от оптической толщины $\alpha_0 l$ в случае доплеровского контура.

кривая выходит на насыщение. Поэтому при малых значениях $\alpha_0 l$ гармоника на частоте $\Omega - \omega$ пропорциональна полному поглощению. Таким образом измерив амплитуду и фазу гибридной гармоники $\Omega - \omega$, можно определить глубину модуляции и фазу колебаний заселенностей поглощающих уровней.

В условиях эксперимента разряда в неоне заселенность уровня $1s_5$ превосходил суммарную заселенность остальных трех уровней системы $2p^5 3s$ в пять раз. Поэтому этот уровень играет определяющую роль в ступенчатой ионизации и в дальнейшем под N_m будет подразумеваться заселенность $1s_5$ уровня. Для измерения амплитуд и фаз колебаний заселенностей N_m использовались линии $\lambda = 621 \text{ нм}$, $\lambda = 633 \text{ нм}$, $\lambda = 640 \text{ нм}$.

На рис. 4 приведены измеренные зависимости глубины модуляции и сдвига фаз колебаний заселенностей I_{S_5} уровня. На том же рисунке пред-

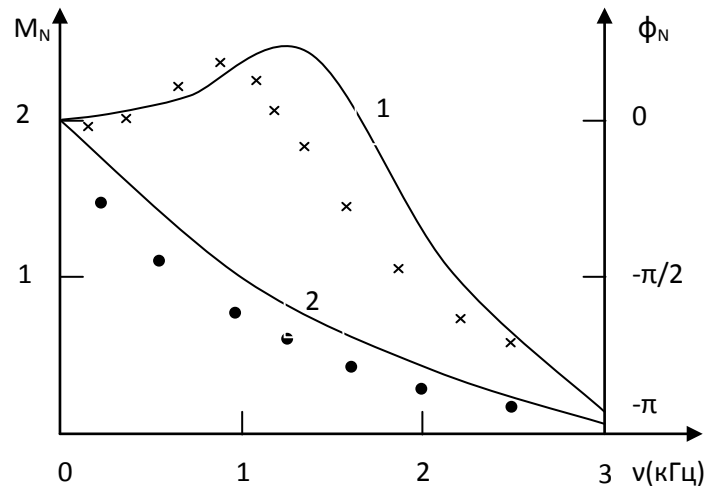


Рис. 4 Измеренные зависимости глубины модуляции амплитуды и сдвига фаз колебаний заселенностей I_{S_5} уровня (точки). На том же рисунке представлены зависимости ϕ_N и $M_N = \frac{N_{m1}}{N_{m0}}$, полученные из решения линеаризованной системы (1-3) (сплошная кривая).

ставлены зависимости ϕ_N и $M_N = \frac{N_{m1}}{N_{m0}}$, рассчитанные по результатам решения системы уравнений (1-3). К сожалению точность вычисления коэффициентов входящих в расчеты не высока, они определяются из эксперимента и имеют порядковый характер. Поэтому количественное сравнение сопоставление рассчитанных и измеренных кривых не имеет смысла. С учетом разброса определяемых из эксперимента коэффициентов, входящих в расчет, полученное согласие можно считать удовлетворительным.

В заключение можно заметить, что разряды в колебательном режиме и модулированные разряды успешно применяются для оценки сечений прямой и ступенчатой ионизации в различного рода разрядах [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В.Л. Электрический ток в газе – России, 1952, т. 1, с. 374.
2. Каган Ю.М., Лягущенко Р.И., Миленин В.М., Мурадов А.Х., ЖТФ, 1973, т.45, с.1019.
3. Polman I., Van der Werf I.F., Drof F.C., J. Phys. D. Appl., 1972, v.5, p.266.
4. Привалов В.Е. Квантовая электроника. 1977, т. 4. № 10, с. 2085.
5. Мурадов А.Х. Изв. ВУЗ-ов Радиофизика, 1988, т. 31, № 6, с. 763.
6. Pfau S., Rutscher A., Wojaczek, Beitrage ausder Plasmaphys, 1969, b9, h4, p.333.

7. Гусейнов Т.Х., Абдуллаев Р.А. Изв. ВУЗ-ов Радиотехника, Киев, 2008, т. 51, №4, с.38.
8. Дейч Г., Голубовский Ю.Б. Радиотехника и электроника. 1978, т. 23, № 6, с. 1206.
9. Привалов В.Е., Шишов С.И. ЖТФ. 1989, т. 59, № 7, стр. 204.
10. Wilke L., Kablan N., Deutsch H. Contribution to Plasma Phys. 1990, v. 30, No4, p. 481.
11. Спектроскопия газоразряной плазмы, под ред. Фриша С.Э., Наука, 1970, с. 7.

**NEON QAZINDA GENİŞ DİAMETRLİ BORUDA ELEKTRİK BOŞALMASININ
STRATLARIN YARANMA OBLASTINDAN YUXARIDA
OSSİLYASIYA REJİMİ HAQQINDA**

T.X.HÜSEYNOV

XÜLASƏ

Neon qazında, böyük diametrlı boruda elektrik boşalmasının müsbət sütununda elektronların konsentrasiyasının, uzununa elektrik sahəsinin intensivliyinin və həyəcanlanmış Is_5 metastabil neon atomlarının məskunlaşmasının konsentrasiyasının rəqslərinin dərinlik əmsallarının və fazalarının tezlikdən asılılığı ölçülmüşdür. Tezlik xarakteristikalarının qeyri-monoton olduğu aşkar edilmişdir. Əldə olunmuş nəticələr ionlaşma - rekombinasiya rejimində olan boşalmanın dinamik nəzəriyyəsi əsasında hesablanmış amplitud – tezlik, faza – tezlik xarakteristikaları ilə müqayisə edilmişdir. Təcrübə nəticələr xətti nəzəriyyədən alınan nəticələrlə qənaətbəxş uyğunluq təşkil edir.

Açar sözlər: dinamik xarakteristika, qaz boşalması plazması, həcmi rekombinasiya

**ON THE NEON DISCHARGE OSCILLATIONS IN A WIDE TUBE HIGHER
OF STRIATION EXISTENCE BOUNDARY**

T.Kh.HUSEYNOV

SUMMARY

The frequency dependence of modulation depth and phase of oscillations of electron concentration, longitudinal electric field strength and the population of the neon atom metastable level Is_5 have been measured in the positive column of a neon discharge in a wide tube. The non – monotony behaviour is obtained in the frequency characteristics. Experimental results are compared with those of calculations from the discharge theory under ionization - recombination conditions. A satisfactory agreement of results is observed.

Key words: dynamical characteristic, gas discharge plasma, volume recombination

Поступила в редакцию: 05.12.2014 г.

Подписано к печати: 13.02.2015 г.