

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1973

УДК 537.523.74

Г. В. СМЕРНИЦКАЯ, Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ, Г. А. ЕГИАЗАРЯН

О ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИЗЛУЧЕНИИ РАЗРЯДА С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Экспериментально исследуются различные типы колебаний, возникающих в разряде с осциллирующими электронами при низких давлениях газа ($p < 10^{-4}$ мм рт. ст.). Установлено резонансное взаимодействие колебаний, вызванных осцилляцией осевых электронов, с колебаниями, связанными с вращением прианодного слоя электронов. Обсуждается роль резонанса в механизме разряда.

Высокочастотные колебания в разряде с осциллирующими электронами при низких давлениях газа ($p < 10^{-4}$ мм рт. ст.) экспериментально и теоретически исследовались в работах [1—5]. В [1] измерялось излучение, связанное с вращательным движением электронного облака, и излучение, вызванное осцилляцией электронов между плоскостями катодов. В [2—5] изучалась зависимость частоты вращения электронного облака от параметров разряда.

В настоящей работе показано взаимодействие обоих типов колебаний. Обсуждается роль резонанса колебаний в механизме разряда.

Частота колебаний измерялась анализатором спектра С4-8. Напряжение с сопротивления, включенного в цепь катода, подавалось на вход С4-8. Излучение принималось также на штыревую антенну. Частота, связанная с вращательным движением электронов, совпала с частотой, измеренной с сопротивления. Колебания, связанные с осевыми движениями электронов, антенной не регистрировались.

При сильных магнитных полях H и низких давлениях газа ($p < 10^{-4}$ мм рт. ст.) внутри анода преобладает отрицательный пространственный заряд большой плотности, и потенциал центра V_0 разрядной ячейки близок к потенциалу катода. При таких значениях параметров разряда электроны, вышедшие под действием ионной бомбардировки из центральных частей катодов и не испытавшие соударения с атомами газа, могут совершать длительное время колебательное движение около плоскости симметрии разряда. Анализ траекторий осевых электронов [6] показывает, что для данного анодного напряжения V_a имеется определенное значение H , когда траектории прямого потока электронов, вышедших из катода, будут совпадать с траекториями отраженного потока. В разряде устанавливается неравномерное распределение плотности осевых электронов, образуется диполь. При параболическом рас-

пределении потенциала частота колебаний диполя (осевых электронов) равна

$$\nu_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2eV_0}{md^2}}, \quad (1)$$

где d — расстояние от катода до центра.

Наряду с излучением осевых электронов в разряде возможно излучение, вызванное вращательным движением электронного облака, связанное с развитием при сильных H диокотронной неустойчивости [2—4, 7]. В условиях, когда можно пренебречь влиянием положительного пространственного заряда на распределение потенциала, частота вращения электронного облака определяется формулой

$$\nu = c \frac{(V_a - V_0)}{\pi H r_a^2}, \quad (2)$$

где r_a — радиус анода.

Опыты показали, что интенсивность осевых колебаний электронов значительно меньше интенсивности колебаний, связанных с вращательным движением электронов. Последнее объясняется тем, что плотность электронов, участвующих в колебательном движении вблизи оси разряда, мала; основная ионизация при сильных H производится электронами, участвующими в циклоидальном движении, это приводит к образованию вблизи поверхности анода узкого слоя отрицательного пространственного заряда большой плотности. На рис. 1, а даны зависимости частот (ν и ν_z) и соответствующих амплитуд (A и A_z) от H (кривые 1, 2 и 3). Изменение H мало влияет на частоту ν_z и амплитуду A_z в то время как частота ν быстро уменьшается с ростом H , а амплитуда A растет. По мере увеличения H частота ν приближается к частоте ν_z . При некотором значении H частоты этих колебаний становятся равными, наступает резонанс, сопровождаемый значительным увеличением амплитуды A . Резонанс колебаний отражается и на механизме разряда. Электроны, находящиеся вблизи оси, получив компонент скорости по r от переменного поля, начинают ионизацию ближе к оси разряда. Образующиеся в результате ионизации ионы имеют малую скорость ухода на катод, так как при этих значениях параметров разряда осевое падение потенциала мало. Положительный пространственный заряд поднимает кривую радиального распределения потенциала в области, где начинается ионизация осевыми электронами. Радиальное падение потенциала и разрядный ток сильно уменьшаются.

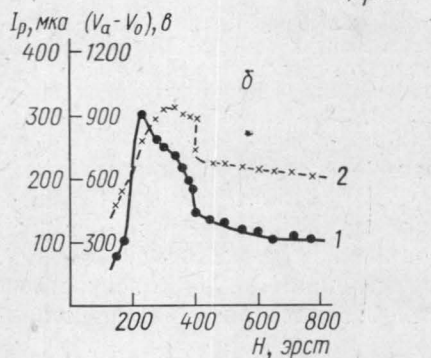


Рис. 1. а — зависимость частот и амплитуд колебаний от H . $V_a = 1$ кв., $r = 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., N_2 , $r_a = 2$ см, $l_a = 2,5$ см, $2d = 4$ см; 1 — ν , 2 — ν_z ; 1' — A , 2' — A_z , 3 — ν_z , 3' — A_z ; б — зависимость $I_p = f(H)$ — кривая 1 и $V_a - V_0 = f(H)$ — кривая 2

тота ν приближается к частоте ν_z . При некотором значении H частоты этих колебаний становятся равными, наступает резонанс, сопровождаемый значительным увеличением амплитуды A . Резонанс колебаний отражается и на механизме разряда. Электроны, находящиеся вблизи оси, получив компонент скорости по r от переменного поля, начинают ионизацию ближе к оси разряда. Образующиеся в результате ионизации ионы имеют малую скорость ухода на катод, так как при этих значениях параметров разряда осевое падение потенциала мало. Положительный пространственный заряд поднимает кривую радиального распределения потенциала в области, где начинается ионизация осевыми электронами. Радиальное падение потенциала и разрядный ток сильно уменьшаются.

Разряд переходит во 2-й режим [8]. На рис. 1, б показано измеренное значение радиального падения потенциала и разрядного тока I_p при различных значениях H . Видно, что скачок в радиальном падении потенциала и переход ко 2-му режиму происходят при равенстве частот обоих типов колебаний. На рис. 2 приведено изменение $(V_a - V_0)$ и частот колебаний ν и ν_z как функции H для разных значений параметров разряда. С увеличением V_a резонанс частот и переход ко второму режиму наступают при больших значениях H . Переход разряда во 2-й ре-

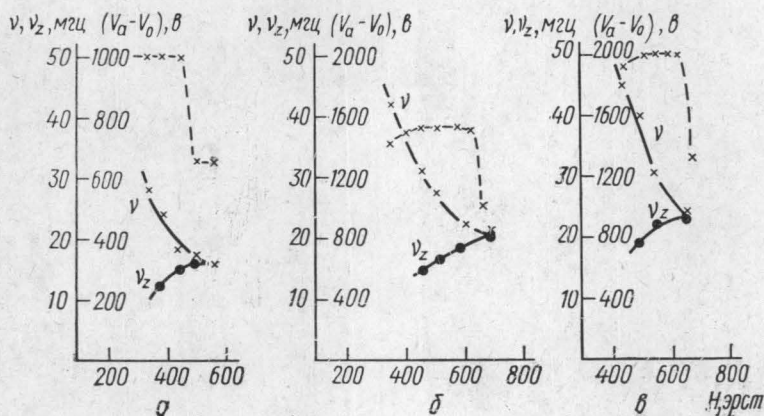


Рис. 2. Зависимость ν , $\nu_z = f(H)$, $V_a - V_0 = f(H)$ при различных значениях параметров разряда $r_a = 1,75$; $l_a = 2$; $2d = 4$ см; $a - V_0 = 1$ кВ, $p = 8 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., б — $V_a = 1,5$ кВ, $p = 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., в — $V_a = 2$ кВ, $p = 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

жим и сильное уменьшение $V_a - V_0$ сопровождаются резким уменьшением частоты ν . При дальнейшем увеличении H радиальное падение потенциала и частота ν мало изменяются, амплитуда же этих колебаний A быстро уменьшается.

Из формул (1) и (2), зная V_0 , можно определить значение H , при котором наступает резонанс для данных значений параметров разряда. Опыты показали, что потенциал центра при резонансе мал, порядка потенциала ионизации данного газа. V_0 может быть также определено из формул (1) или (2) по измерению частот. Например, потенциал центра вблизи резонанса, определенный по формуле (2) для $V_a = 1$ кВ, $r_a = 2$ см, $2d = 4$ см, $l_a = 2,5$ см, $p = 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., равен $V_0 = 14,7$ в. Значение H , соответствующее резонансу, вычисленное с учетом значения V_0 , равно 436 эрст. Измеренное значение H при резонансе равно 400 эрст.

Наличие во 2-м режиме разряда области пониженной ионизации (виртуального катода) вблизи оси разряда и положительного пространственного заряда, образуемого электронами, ионизирующими при движении по r , может привести к появлению новых частот колебаний осевых электронов ν_z , наступающих вследствие взаимодействия пучка электронов с плазмой [6, 7].

Частота этих колебаний (кривая 3, рис. 1, а) также мало зависит от H , амплитуда же колебаний несколько увеличивается с ростом H . При сильных H наблюдается появление гармоник частот ν , имеющих амплитуду того же порядка, что и основная частота. В спектре излуче-

ния появляются также новые частоты, частота колебаний которых определяется уравнением

$$\nu' = n\nu \pm \nu'_z. \quad (3)$$

Колебания ν' являются комбинационными, амплитуда их A' сильно за-

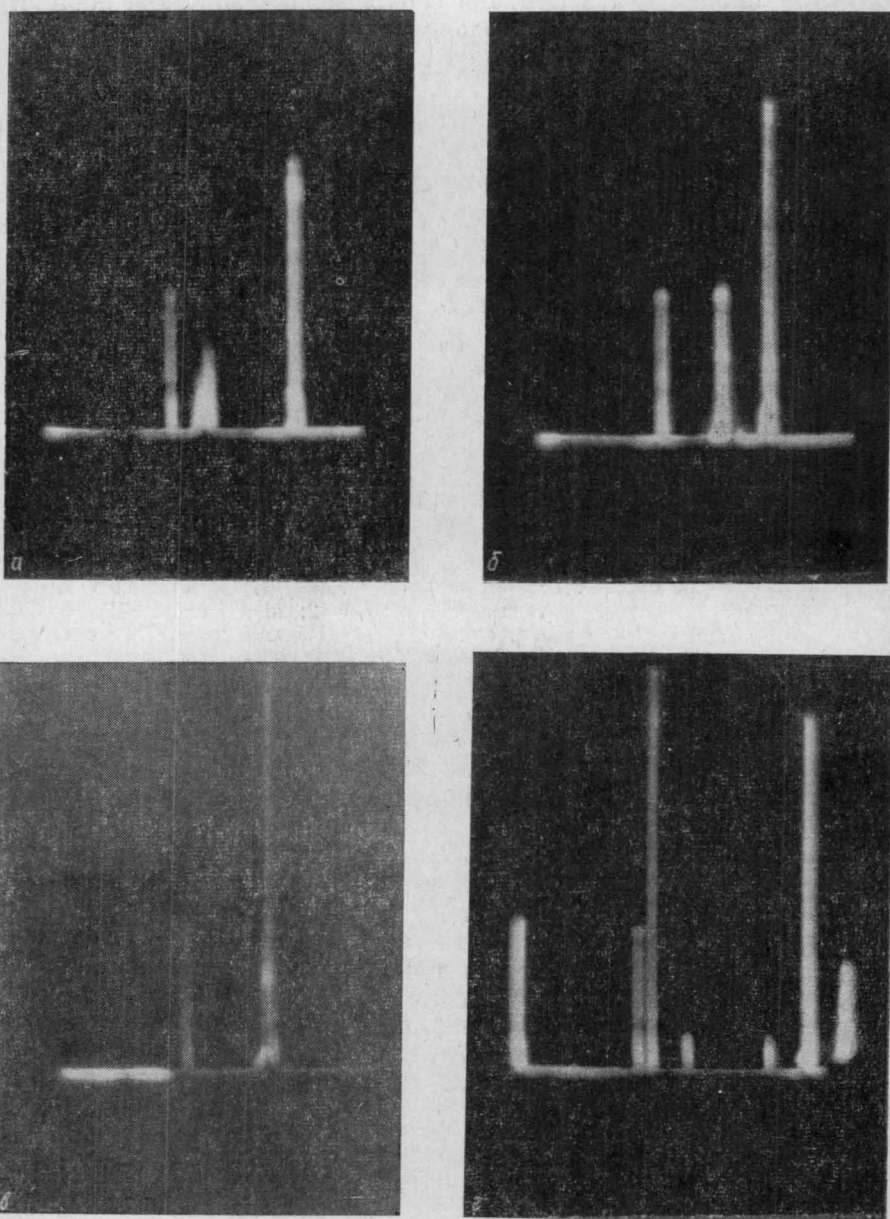


Рис. 3. Спектрограммы наблюдаемых колебаний при различных значениях H . $V_a = 1000$ в, $\rho = 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., $r_a = 2$, $l_a = 2,5$, $2d = 4$ см. а — $H = 360$ эрст, $I_p = 200$ Мка, ν_0 — метка 12 Мгц, $\nu_z = 15$ Мгц, $\nu = 22$ Мгц, б — $H = 380$ эрст, $I_p = 185$ Мка (ν_0 — метка 12 Мгц), $\nu_z = 17$ Мгц, $\nu = 21$ Мгц, в — $H = 400$ эрст, $I_p = 150$ Мка (ν_0 — метка 12 Мгц), $\nu_z = \nu = 18$ Мгц, г — $H = 700$ эрст, $I_p = 110$ Мка, $\nu'_z = 3,7$ Мгц (ν_0 — метка 12 Мгц), $\nu = 13$ Мгц ($n = 1$), $\nu' = 16$ Мгц, $\nu'_z = 22,5$ Мгц, $\nu = 26$ Мгц ($n = 2$), $\nu' = 29,5$ Мгц

висит от амплитуды осевых колебаний A_z' . Она увеличивается с ростом A_z' , при слабых A_z' комбинационные частоты не наблюдаются.

В таблице даны измеренные значения частот колебаний (ν , ν_z и ν') при разных значениях H , соответствующих 2-му режиму разряда.

Появление комбинационных частот можно объяснить следующим образом. Колебания осевых электронов индуцируют в центральной части разрядного промежутка переменное электрическое поле, которое модулирует потенциал центра и радиальное падение потенциала с ча-

H , эрст	ν_z Мгц	ν , $n=1$, Мгц	ν , $n=2$, Мгц	$\nu' = n\nu \pm \nu_z$, Мгц				
440	4,5	17	34	—	29	—	—	—
500	4,1	15,5	31	19,5	—	—	35	—
550	3,7	14,5	30	11	18	—	27	—
600	3,7	14	28	10	17	24	31	—
660	3,7	13	26	9,2	16,5	22,5	30	—
715	3,6	12,5	25	8,5	16	21	29	—
770	3,6	11,5	23,5	6,7	8	14,8	19,8	27
814	3,5	11,2	22,5	14,2	25,5	—	—	—

$$V_a = 1 \text{ кв}, p = 3 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст. } N_2; r_a = 2, 2d = 4 \text{ см}; l_a = 2,5 \text{ см.}$$

стой, равной частоте осевых колебаний. Модуляция колебаний тем сильнее, чем больше интенсивность осевых колебаний, и проявляется она при сильных H , когда интенсивность осевых колебаний велика.

При больших H ($H > 1000$ эрст, $V_a = 1$ кв) амплитуды всех типов рассмотренных колебаний уменьшаются, дискретный спектр колебаний переходит в сплошной спектр (шумы), во всем разрядном промежутке образуется стационарная плазма.

На рис. 3 приведены спектры колебаний, снятые с экрана С4-8 при различных значениях H . Рис. 3, а показывает две частоты колебаний ν и ν_z . С увеличением H частоты ν и ν_z сближаются (рис. 3, б), при некотором значении H наступает резонанс (рис. 3, в), разряд переходит во 2-й режим. При еще больших магнитных полях наблюдается появление осевых частот колебаний ν_z , более высоких гармоник частоты ν , а также комбинационных частот ν' (рис. 3, г). Дальнейшее увеличение H сопровождается переходом к стационарной плазме и к появлению шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Шеретов Э. П. «Радиотехника и электроника», 7, № 10, 1809, 1962.
2. Knauer W. J. Appl. Phys., 33, No. 6, 2093, 1962; 37, No. 2, 602, 1966.
3. Knauer W., Fafarman A., Poeschel R. L. Appl. Phys. Lett., 3, No. 7, 111, 1963.
4. Helmer J. C., Jepsen R. L. Proc. IRE, 49, No. 112, 1920, 1961.
5. Смирницкая Г. В., Носырева И. А. ЖТФ, 15, вып. 11, 2346, 1970.
6. Смирницкая Г. В., Рейхрудель Э. М. ЖТФ, 29, вып. 2, 153, 1959.
7. Тимофеев А. В. «Успехи физических наук», 102, вып. 2, 1970.
8. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. ЖТФ, 39, вып. 6, 1052, 1969.
9. Gregoire M. These doct. sci. phys. Fac. Sci. Univ. Paris, 1965.
10. Bliman S., Bouchoule A., Septier A. Compt. Rend., 260, No. 10, 1965.

Поступила в редакцию
22.7 1971 г.

Кафедра общей физики
для естественных факультетов