

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Э. М. Рейхрудель, Г. В. Смирницкая

Экспериментально исследуется газовый разряд, возникающий при низких давлениях под действием внешнего магнитного поля в трубках с кольцевым анодом и двумя холодными катодами. Получены зависимости разрядного тока от напряженности магнитного поля при различных параметрах разряда. Измерено продольное и радиальное распределение потенциала для разных значений магнитного поля. Установлены области возникновения пространственных зарядов. Выяснены условия возникновения в разряде низкочастотных колебаний и шумов.

Электрический разряд с осциллирующими электронами во внешнем магнитном поле находит широкое применение. Такой разряд применяется в источниках ионов [1,2], в ионном насосе [3], в магнитном ионизационном манометре [4,5,6] с пределами измерения от 10^{-1} до 10^{-8} мм рт. ст. Недавно было показано, что этот разряд возможно использовать как генератор высокочастотных шумов [7,8,9], у которого полоса частот шире, а уровень шумов выше по сравнению с другими газоразрядными источниками шума.

Широкое применение данного разряда повышает интерес к изучению его механизма, отдельные стороны которого рассмотрены в ряде работ [1—9]. Однако, из-за сложности этого типа разряда, многие вопросы остаются невыясненными. В работах [7—9] авторы, исследуя динамические характеристики разряда, пытаются выяснить причину возникновения высокочастотных шумов, но единой точки зрения на природу колебаний здесь нет. Так, Хониг и Парзен рассматривают наблюдаемые колебания как колебания плазмы, в то время как Дюма объясняет их как гиromагнитное излучение электронов, вращающихся в плоскости анода. Исследование колебательных характеристик разряда в указанных работах проводилось при относительно высоких давлениях $10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., когда в разряде существует плазма и оба типа колебаний могут иметь место.

Настоящая работа является экспериментальным исследованием статических и динамических характеристик разряда при более низких давлениях $10^{-4} \div 10^{-6}$ мм рт. ст., когда в разряде нет полноценной плазмы, когда преобладает направленное движение заряженных частиц и имеются резко выраженные области пространственного заряда.

Параллельное изучение статических характеристик разряда при использовании метода двойных зондов и динамических характеристик дает более полную картину процессов, происходящих в разряде, и позволяет лучше понять его механизм.

1. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА

Отличительной чертой изучаемого разряда при давлениях ниже 10^{-3} мм рт. ст. является распространение катодных частей почти на весь разрядный промежуток и отсутствие полноценной плазмы.

Измеренное распределение плотности тока по радиусу секционированного катода [3] указывает на то, что в разряде имеет место аномальное катодное падение. Хотя ток идет на всю поверхность катода, однако его плотность максимальна в центральной области диаметром $\sim 6 \div 10$ м.м. Следовательно, основные области ионизации, благодаря действию магнитного поля, лежат вблизи оси.

Своебразие данной формы разряда проявляется и в том, что электрон может производить ионизацию не обязательно возле того катода, из которого он вылетел. Электроны, вылетевшие из катода, участвуя в колебательном и вращательном движении между плоскостями катодов и, таким образом, набирая длину свободного пробега, будут производить максимальную ионизацию при энергиях $100 \div 200$ эв.

При достаточно больших напряжениях возможность ионизировать газ получают также те электроны, которые образовались в различных местах разрядного промежутка. Область ионизации с ростом приложенного напряжения расширяется в сторону катодов. Однако максимум ионизации будет вблизи плоскости анода, так как с приближением к этой плоскости все большее число электронов принимает участие в ионизации газа. Образовавшиеся в объеме ионы движутся по силовым линиям к катодам, приобретая энергию ($\sim 100 \div 1000$ эв) в области катодного падения потенциала. Благодаря большим энергиям ионов, коэффициент вторичной эмиссии электронов из катодов велик ($0,1 \div 1$). Таким образом, существование разряда при низких давлениях возможно благодаря действию магнитного поля, затрудняющего уход электронов на анод, благодаря многократной ионизации колеблющимися электронами в разряде и большому коэффициенту вторичной эмиссии.

Удерживая электроны в объеме, магнитное поле приводит к образованию отрицательного пространственного заряда в плоскости анода, плотность которого различна в зависимости от приложенного напряжения, давления и магнитного поля; различно будет и искажение потенциала, вызванное им. Эти искажения поля вблизи анода отражаются на характеристиках разряда, например, на зависимости тока от магнитного поля. Опыты показали, что ход кривой тока как функции магнитного поля имеет сложный характер: наблюдается ряд максимумов (рис. 1). Такая зависимость тока от магнитного поля отмечалась и ранее [5, 7, 8]. Однако в этих работах не выяснена причина образования максимумов, не исследовано их поведение при различных напряжениях и давлениях. Можно предположить, что такая зависимость I от H связана с изменением распределения потенциала в разряде из-за искажения пространственными зарядами. Для доказательства этого при давлении $3 \cdot 10^{-4}$ м.м рт. ст. (которое поддерживалось строго постоянным) было снято распределение потенциала по оси и по радиусу

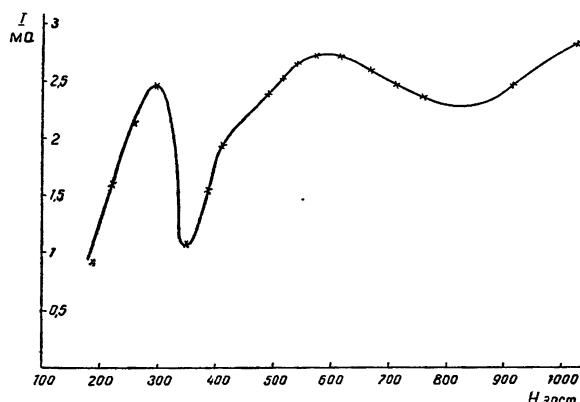


Рис. 1. Зависимость тока от магнитного поля
 $p = 3 \cdot 10^{-4}$ м.м рт. ст., $V_a = 3000$ в.

методом двойных симметричных зондов [1] с компенсационной схемой при различных значениях магнитного поля. Зонды могли перемещаться как по оси трубки, так и по радиусу в противоположные стороны от центра, благодаря продольным прорезям в катодах. Параллельное магнитному полю положение зондов и их подводок не нарушало разряда. Лишь при помещении зондов вблизи самой поверхности анода, на расстоянии около 4 мм, наблюдалось уменьшение зарядного тока, а иногда гашение разряда. Поэтому потенциал вблизи поверхности анода получен экстраполяцией. Хотя точность метода не превышает $15 \div 20\%$, он правильно отображает изменение распределения пространственного заряда в зависимости от магнитного поля. Кривые распределения потенциала по оси и по радиусу для разных значений H представлены на рис. 2. Сравнивая рисунки 1 и 2, мы видим, что при увеличении магнитного поля рост тока до первого максимума сопровождается

воздрастанием ионизации за счет колебательных и вращательных движений электронов в разряде. При этом положительный пространственный заряд около анода увеличивается, растет потенциал в центре трубки V_o (см. кривые на рис. 2 для $H = 280$ эрст и $H = 315$ эрст). Дальнейшее увеличение магнитного поля затрудняет уход электронов на анод, увеличивает отрицательный пространственный заряд в плоскости анода и в центре трубки. Поэтому около плоскости анода будут колебаться только электроны, вышедшие из катода. Электроны, возникшие в промежутке, не будут обладать достаточной энергией, чтобы преодолеть минимум потенциала, они могут колебаться между местом их образования и минимумом потенциала в центре трубки до тех пор, пока не произойдет ионизация, что приведет к возникновению новых областей пространственных зарядов. Как видно из кривой распределения потенциала, при $H = 350$ эрст появляются несколько резко выраженных областей ионизации на оси трубки, расстояние между которыми соответствует энергиям электронов $200 \div 300$ эв, т. е. максимуму функции ионизации.

Образование новых областей ионизации

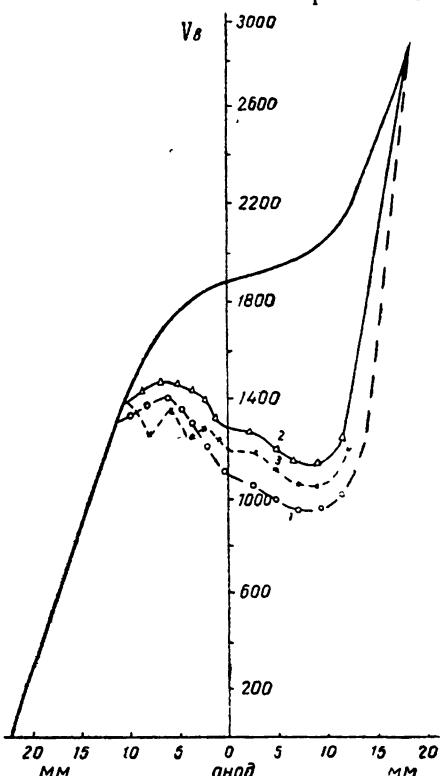


Рис. 2. Распределение потенциала по оси трубки (влево от оси ординат) и по радиусу трубки (вправо от оси ординат) при различных значениях магнитного поля. Кривая без точек изображает распределение потенциала в отсутствии разряда.

1 — 280 эрст, 2 — 315 эрст, 3 — 350 эрст,
 $r = 3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., $V_a = 3000$ эв.

зации увеличивает число электронов, врачающихся в плоскости анода, и приводит к резкому минимуму потенциала в анодной плоскости. Наличие большого отрицательного заряда около поверхности анода понижает потенциал в центре трубки и затрудняет поступление электронов из разряда на анод. На кривой тока (рис. 1) в данный момент наблюдается минимум тока. Остаточный ток на анод образуется преимущественно быстрыми электро-

нами, участвовавшими в упругих столкновениях, а также электронами, приобретшими достаточную энергию из-за имеющих место в разряде колебаний [7].

Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к росту отрицательного объемного заряда вблизи плоскости анода и приближению виртуального катода к поверхности анода. Последний, как показывают вычисления, находится на расстоянии $1,5 \rightarrow 2$ мм от поверхности анода при различных значениях H и достаточно небольшого смещения (на доли мм) для того, чтобы электроны могли уйти на анод.

В компенсации отрицательного объемного заряда в плоскости анода некоторую роль играют положительные ионы, образовавшиеся здесь и удерживаемые полем в этой области. Поэтому при дальнейшем увеличении H , как показали эксперименты по измерению распределения потенциала, наблюдается уменьшение отрицательного объемного заряда в плоскости анода, сглаживание областей ионизации вдоль оси трубы, которое сопровождается ростом тока. Наблюдаемый второй минимум тока объясняется аналогичным образом, однако виртуальный катод будет находиться в этом случае ближе к поверхности анода.

Таким образом, сложный ход кривой тока можно объяснить изменением распределения потенциала из-за наличия объемных зарядов. Приведенные кривые относятся к воздуху, аналогичный ход наблюдается также и в инертных газах.

На рис. 3 представлено семейство характеристик $I=f(H)$ для разных напряжений. При увеличении приложенного напряжения максимум кривых смещается в сторону больших магнитных полей, так как для достижения максимума ионизации при больших напряжениях нужны большие магнитные поля.

Искажения, вносимые объемными зарядами, будут различны при разных давлениях, поэтому зависимость разрядного тока от магнитного поля также будет различна (рис. 4). При малых давлениях $10^{-7} \rightarrow 10^{-6}$ мм рт. ст. и плотностях тока пространственные заряды малы и искажения, вносимые ими в

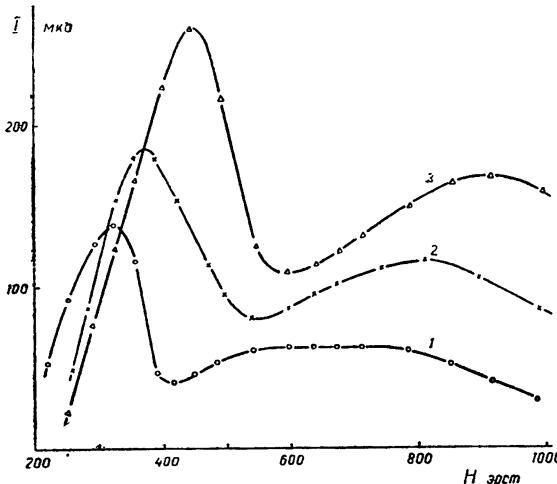


Рис. 3.

Рис. 3. Зависимость кривой $I=f(H)$ от анодного напряжения:
1— $V_a = 2000$ в, 2— $V_a = 3000$ в, 3— $V_a = 4000$ в.

Рис. 4. Зависимость кривой $I=f(H)$ от давления:
1— $p=2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.; 2— $p=4 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.; 3— $p=1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.; 4— $p=2,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

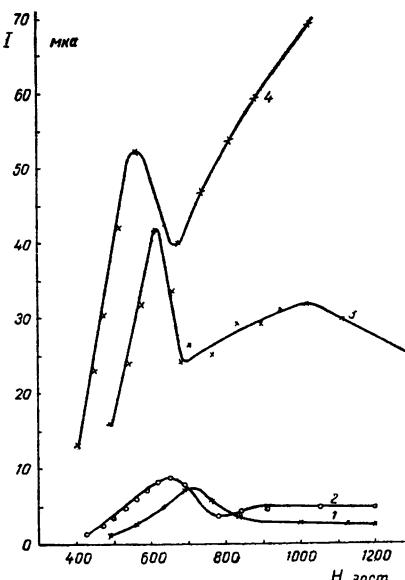


Рис. 4.

распределение потенциала, незначительны. Кривая $I=f(H)$ имеет при этих условиях один максимум. С ростом давления ($10^{-4} \div 10^{-5}$ мм рт. ст.) в связи с увеличением плотности отрицательного пространственного заряда имеют место искажения потенциала, которые сопровождаются появлением нескольких максимумов в кривой $I=f(H)$. Первый максимум кривой с ростом давления смещается в сторону меньших значений магнитного поля, так как увеличение давления компенсирует действие магнитного поля. Второй максимум увеличивается и становится более широким. При еще больших давлениях $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст. отдельные области ионизации перекрывают друг друга, распределение потенциала приближается к распределению без разряда, разрядный ток как функция H опять обнаруживает один слабый максимум.

Итак, эксперименты показывают, что зависимость тока от магнитного поля имеет сложный характер с несколькими максимумами, положение и величина которых изменяются в зависимости от приложенного напряжения и давления. Измерение распределения потенциала в промежутке показало, что такой ход кривой связан с наличием пространственных зарядов, вызывающих перераспределение потенциала.

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА

Наличие объемных зарядов и искажений, вносимых ими, подтверждается также изучением высокочастотных и низкочастотных характеристик исследуемого разряда.

Причиной возникновения высокочастотных колебаний в разряде при низких давлениях могут быть следующие явления:

1. Колебания электронов около областей положительных пространственных зарядов; по расчетам они должны иметь частоту $10^8 \div 10^{10}$ гц.

2. Колебания электронов около плоскости анода между катодами; частоты этих колебаний $10^8 \div 10^{10}$ гц.

3. Гиромагнитное излучение электронов, вращающихся по круговым орбитам в плоскости анода; частота этих колебаний также должна быть порядка 10^9 гц.

Рассмотренные типы колебаний имеют различную поляризацию. Прием высокочастотной мощности осуществлялся нами на штыревую антенну, помещенную вне трубы, в непосредственной близости от разряда, и ориентированную вдоль оси трубы. Высокочастотное излучение наблюдалось при помощи двух волномеров с диапазоном частот $1000 \div 6000$ мгц и $347 \div 510$ мгц. Токи через детектор волномеров измерялись микроамперметром. Высокочастотные колебания наблюдались в диапазоне давлений $10^{-6} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. и могли существовать также одновременно с низкочастотными колебаниями, наблюдаемыми осциллографом. Эксперименты показали, что высокочастотные колебания сопровождались спадом кривой тока и появлялись всегда после первого максимума тока. Выявить частотные границы спектра при имеющихся в распоряжении волномерах не удалось.

Как видно из рис. 5 и 6, амплитуда высокочастотных шумов сильно изменяется в зависимости от приложенного напряжения и магнитного поля и как функция H имеет максимумы в местах минимума тока.

Появление высокочастотных колебаний при больших значениях магнитных полей в минимумах тока указывает на то, что это наблюдаемое нами высокочастотное излучение связано с возникновением согласованных колебаний электронов около положительных объемных зарядов. Частота этих колебаний пропорциональна корню

квадратному из плотности объемного заряда. Этот заряд не постоянен, а сильно меняется по длине трубы, что приводит к шуму. Кроме того, ионизация в различных точках разрядного промежутка и существование пучков электронов, двигающихся с различной скоростью вдоль оси трубы, приводят к взаимодействию и обмену энергиями между ними. При этом кинетическая энергия переходит в энергию электромагнитного излучения. Неоднородность электронного потока по скоростям также ведет к появлению шума. Взаимодействие между группами электронов может привести к тому, что некоторые из них приобретут значительную энергию и смогут достигнуть анода при значениях магнитных полей больших, чем критические. Периодический ход амплитуды колебаний как функции приложенного напряжения, по-видимому, можно объяснить тем, что при определенных значениях V_a появляются резко выраженные области пространственного заряда, около которых происходят колебания электронов*.

Итак, наблюдаемые высокочастотные колебания свидетельствуют о наличии в разряде областей пространственных зарядов, о существовании пучков электронов различной скорости и о взаимодействии между ними.

Наряду с высокочастотными колебаниями в разряде при более

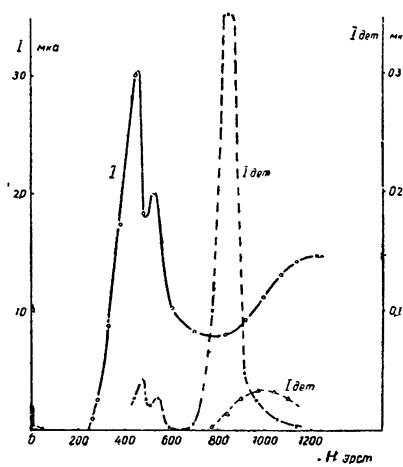


Рис. 5. Сопоставление кривой $I=f(H)$ с ходом интенсивности высокочастотных шумов:

$V_a = 4000$ в, $p = 3.5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., расстояние между катодами 23 мм, I дет — ток детектора,

— x — x — x — $\lambda = 70$ см,

— Δ — Δ — Δ — $\lambda = 10$ см.

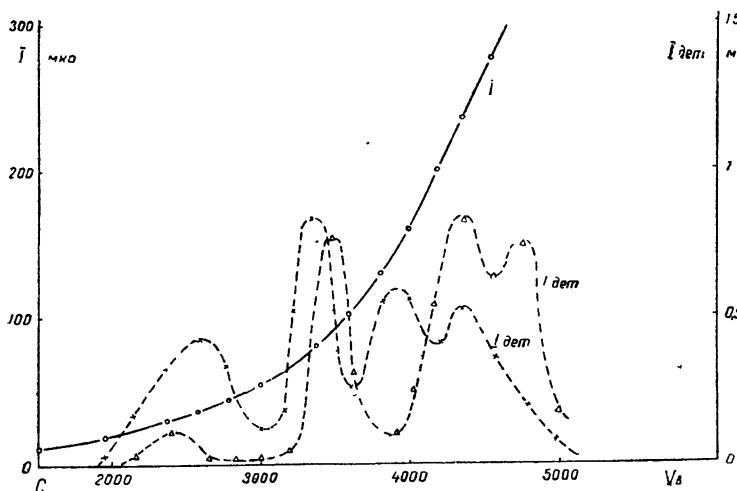


Рис. 6. Кривые интенсивности излучения в зависимости от приложенного напряжения:

$H = 560$ эрст, $p = 1.1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., I дет — ток детектора,

— x — x — x — $\lambda = 70$ см,

— Δ — Δ — Δ — $\lambda = 10$ см.

* В некоторых опытах колебания принимались на антенну, ориентированную перпендикулярно к оси; периодичность хода интенсивности шумов при изменении магнитного поля и напряжения аналогична полученным с антенной, ориентированной вдоль оси.

высоких давлениях $10^{-4} \div 10^{-5}$ мм рт. ст. имеют место низкочастотные колебания и шумы. Колебания разрядного тока снимались или с сопротивления $10\text{ к}\Omega$, или с зонда, передвигающегося внутри разрядной трубки, и подавались на вход осциллографа ЭО-4. Измерения с помощью зонда показали, что амплитуда колебаний максимальна около поверхности анода. Закономерности и условия существования этих колебаний позволяют отнести их к анодным колебаниям.

Рассмотрение зависимости $I=f(H)$ (рис. 7) показывает, что места возникновения периодических колебаний совпадают с минимумами

тока, т. е. когда около анода образуется значительный отрицательный объемный заряд и возникает сильное анодное падение потенциала. Эти колебания затем при преобразовании объемного заряда с ростом H переходят в шумы, сменяющиеся при втором уменьшении тока вновь синусоидальными колебаниями меньшей частоты, так как нейтрализация отрицательного объемного заряда повышенной плотности происходит медленнее.

Опыты показали, что периодические колебания наблюдаются в определенном диапазоне давлений. В области давлений $\sim 10^{-4}$ мм рт. ст. существуют колебания с частотой $\omega \sim 10^5$ гц значительной амплитуды (несколько вольт), при этом энергия излучения достигает таких значений, что наблюдается свечение

неоновой лампочки, находящейся на расстоянии ~ 10 см от трубки. На рис. 8 показано развитие низкочастотных колебаний в зависимости от давления в диапазоне $\sim 10^{-4}$ мм рт. ст. Увеличение давления приводит к появлению слабого шума (рис. 8, 2), переходящего при дальнейшем повышении давления в синусоидальные колебания значительной амплитуды (рис. 8, 3). При еще больших давлениях наблюдается уменьшение амплитуды колебаний и переход в шумы значительной амплитуды.

При более низких давлениях $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст. также наблюдаются низкочастотные колебания (10^4 гц) значительно меньшей амплитуды и с хуже выраженной периодичностью. Очевидно, при этих условиях, вследствие уменьшения плотности пространственного заряда, уменьшается также анодное падение потенциала.

Эксперимент показывает также, что с увеличением магнитного поля амплитуда колебаний и шумов сначала растет, а затем падает, что связано с увеличением отрицательного объемного заряда в плоскости анода и последующим его рассасыванием. При увеличении приложенного напряжения амплитуда колебаний растет в связи с общим ростом плотности тока.

Из рассмотренных зависимостей мы видим, что низкочастотные колебания ($10^4 \div 10^5$ гц) еще раз подтверждают существование отрицательных объемных зарядов вблизи плоскости анода, приводящих к большому анодному падению потенциала и к анодным колеба-

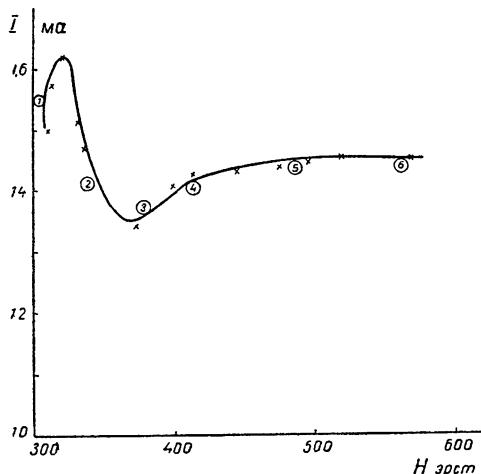


Рис. 7. Появление периодических колебаний и шумов при изменении магнитного поля:

$V_a = 1750$ в; $p = 5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.; 1—нет колебаний; 2—периодические колебания с частотой $2 \cdot 10^4$ гц; 3—периодические колебания, переходящие в шум; 4—шум; 5—шум, переходящий в периодические колебания; 6—периодические колебания с частотой $1.2 \cdot 10^5$ гц.

ниям. Зависимость этих колебаний от параметров разряда указывает на зависимость геометрии областей пространственного заряда, а следовательно, и распределения потенциала от параметров разряда.

При исследовании низкочастотных колебаний было замечено интересное явление: низкочастотное излучение разряда одной трубы гасило разряд другой трубы. Опыт ставился следующим образом: две одинаковые разрядные трубы, оси которых были параллельны, помещались рядом в общем поле электромагнита. Трубы

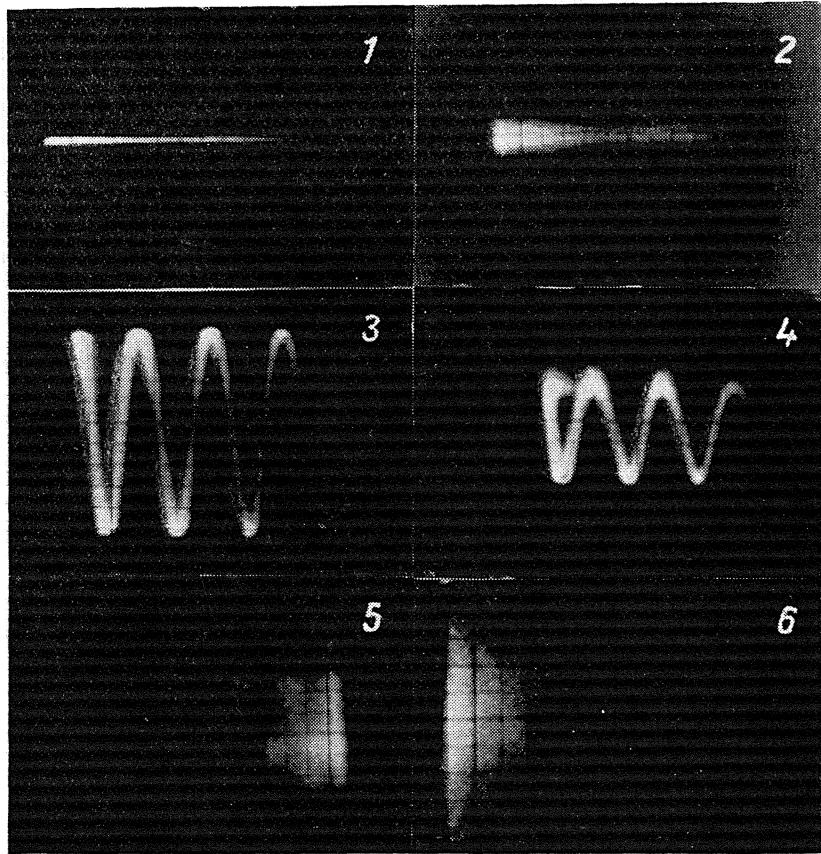


Рис. 8. Осциллограммы низкочастотных колебаний при разных давлениях:

$V_a = 3000$ в, $H = 500$ эрст, $\omega \sim 10^5$; 1— $p = 2.5 \times 10^{-4}$ мм рт. ст.; 2— $p = 2.8 \times 10^{-4}$ мм рт. ст.; 3— $p = 4 \times 10^{-4}$ мм рт. ст.; 4— $p = 4.5 \times 10^{-4}$ мм рт. ст.; 5— $p = 5 \times 10^{-4}$ мм рт. ст.; 6— $p = 5.5 \times 10^{-4}$ мм рт. ст.

питались от разных выпрямителей, по вакуумной системе трубы также были разделены. В одной трубке давление было $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст., напряжение 1500—2000 в, в другой давление было более высокое. При изменении давления во второй трубке в момент возникновения низкочастотных колебаний в первой трубке наблюдалось резкое уменьшение тока, а иногда и гашение разряда. Эффект зависел от приложенного напряжения и давления газа. При помещении между трубками металлического экрана явление пропадало. Возможное объяснение этого интересного явления следующее: при низких давлениях и напряжениях катодные части разряда расположены в плоскости анода. Генерируемое второй трубкой интенсивное излучение низкой частоты оказывало влияние на ки-

нетику электронов в катодных частях первой трубки, что приводило к гашению разряда.

Исследование частотных характеристик также подтверждает существование областей пространственных зарядов, перестройка которых при изменении параметров разряда ведет к изменению интенсивности излучения и частоты колебаний.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Э. М. Рейхрудель, А. В. Чернетский, В. В. Михневич, И. А. Васильева, ЖТФ, 1952, 22, 12, 1945.
2. J. Kistemakeg, J. Snieder, Physica, 1953, 19, 10, 950.
3. Э. М. Рейхрудель, Г. В. Смирницкая, А. И. Борисенко, Радиотехника и электроника, 1956, 1, 2, 253.
4. E. Evans, K. Wigmaster, Proc. IRE, 1950, 38, 6, 651.
5. G. K. T. Conn, M. A., H. N. Daghish, Vacuum, 1953, 3, 1, 24.
6. J. Leck, A. Riddoch, J. Appl. Phys., 1956, 7, 4, 153.
7. G. Dumas, Revue générale de l'électricité, 1955, 64, 7, 331.
8. Mivacawa Reports of the Scient. Research inst., Tokio, 1955, 31, 4, 248.
9. W. Honig, P. Parzen, IRE Convention Record, 1955, 3, 3, 3.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
24 декабря 1957 г.