

В. И. ВОЛОСОК

ОБ ОДНОМ ТИПЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 27 V 1959)

Известно, что в электронном пучке при больших плотностях тока могут возникать релаксационные колебания, связанные с наличием в пучке виртуального катода ⁽¹⁾. В процессе компенсации объемного заряда электронов ионами остаточного газа виртуальный катод исчезает, причем в момент его исчезновения происходит очень быстрое уменьшение потенциала пучка, и из него на стенки может уходить значительная часть накопившихся ионов. В результате снова образуется виртуальный катод и процесс повторяется. Необходимым условием для существования подобных колебаний является достаточно большой ток i_1 в пучке: $i_1 > i_{\text{кр}}$ ($i_{\text{кр}}$ — минимальный ток, при котором образуется виртуальный катод).

Однако колебания могут возникать в электронных пучках и при $i_1 < i_{\text{кр}}$ за счет того, что наряду с первичным пучком электронов обычно имеется поток вторичных электронов, идущих с анода (коллектора) и заполняющих ту же область. Средняя энергия этих электронов слабо зависит от энергии первичных и равна 10—30 эВ ⁽²⁾. Обозначая ток вторичных электронов через i_2 , имеем условие возникновения релаксационных колебаний в потоке вторичных $i_2 > i_{2\text{кр}}$. Считая (для оценки) вторичные электроны моноэнергетическими и выражая i_2 и $i_{2\text{кр}}$ через i_1 и $i_{1\text{кр}}$, получаем то же условие в виде

$$i_1 > i_{1\text{кр}} \frac{1}{\delta} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{3/2}, \quad (1)$$

где δ — коэффициент вторичной эмиссии; V_2 — средняя энергия вторичных, V_1 — энергия первичных электронов. Величина δ для большинства металлов близка к 1 (при $100 \text{ в} < V_1 < 5 \text{ кВ}$) ⁽²⁾.

Отсюда видно, что даже в случае очень небольших токов в электронном пучке могут возникать релаксационные колебания. Они имеют ряд особенностей по сравнению с релаксационными колебаниями в пучке первичных электронов при больших i_1 :

1. Пучок вторичных электронов немоноэнергетичен, поэтому условия возникновения колебаний и в некоторой степени характер колебаний

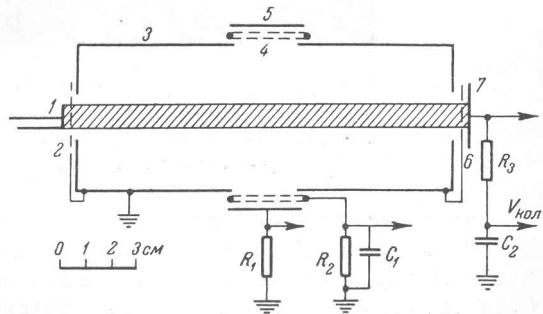


Рис. 1. Схема установки. 1 — вольфрамовый катод; 2 — 1-я сетка; 3 — молибденовый анод; 4 — сетчатый зонд; 5 — токовый зонд; 6 — 2-я сетка; 7 — коллектор из меди; $R_1 = 5 \text{ ком}$, $R_2 = 1 \text{ Мом}$, $R_3 = 7 \text{ ом}$, $C_1 = 1000 \text{ пф}$, $C_2 = 100 \text{ мф}$ (область пучка заштрихована)

отличаются от колебаний в пучке первичных электронов и существенно зависят от спектра вторичных электронов.

2. Период колебаний определяется скоростью ионизации остаточного газа первичными электронами, так как вторичные за счет малой энергии ионизируют слабо.

3. Скачок потенциала в пучке при исчезновении виртуального катода $V_{ск}$, так же как и скорости разлетающихся при этом ионов, могут быть значительными, если время скачка значительно меньше времени разлета.

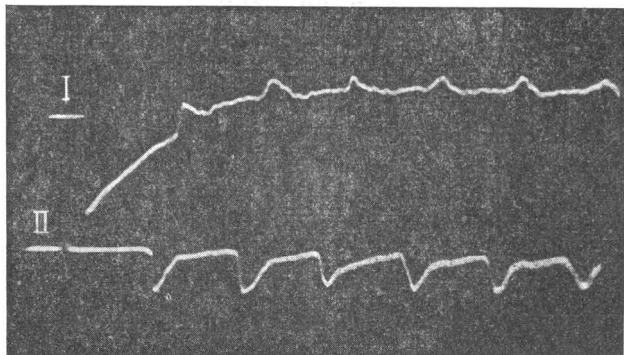


Рис. 2. Осциллограммы: I — с сетчатого зонда ($V = 160$ мв); II — с токового зонда максимальный ток $+7$ μ а, (ось y перевернута), $V_a = 1$ кв; $i_1 = 90$ ма, $p = 2 \cdot 10^{-6}$ мм, длительность 250 μ сек.

Это связано с тем, что средняя скорость электронов после скачка возрастает и их объемный заряд значительно уменьшается, в то время как объемный заряд ионов остается неизменным⁽³⁾. Потенциал, создаваемый объемным зарядом ионов, образовавшихся при компенсации тока вторичных электронов, равно $i_{2кр}$, будет порядка V_2 ; для тока вторичных электронов δi_1 он в $\delta i_1 / i_{2кр}$ раз больше, откуда

$$V_{скII} \approx V_2 \frac{\delta i_1^{*n}}{i_{2кр}} = V_1 \frac{\delta i_1}{i_{1кр}} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Экспериментально изучался электронный пучок в цилиндрической системе (см. рис. 1). На катод подавались прямоугольные импульсы напряжения V_a с фронтом $\sim 10^{-7}$ сек., длительностью $> 10^{-3}$ сек. и временем повторения 1,5 сек. Параллельно пучку было приложено магнитное поле, изменявшееся от 200 до 2000 эрст. (обычно измерения велись при $H = 600$ эрст.). Потенциал в центре пучка контролировался по изменению напряженности электрического поля у стенки анода с помощью зонда, измеряющего напряженность поля⁽³⁾. Чтобы отделить ионные токи, идущие на зонд и искажающие его показания, зонд был выполнен в виде двухслойной вольфрамовой сетки ($d = 0,01$ мм, шаг 1,5 мм), которая захватывала $\sim 3\%$ ионов. Вокруг сетчатого зонда находился кольцевой токовый зонд, регистрировавший ионный ток на стенке. Этот зонд экранировался сетчатым зондом от электрических полей, которые ослаблялись в 50 раз.

Типичные осциллограммы, снятые одновременно с обоих зондов ($i_{2кр} \ll \ll i_1 < i_{1кр}$), приведены на рис. 2. Потенциал в центре пучка непосредственно после включения высокого напряжения определяется объемным зарядом первичных электронов и убывает по мере его компенсации ионами. При потенциале пучка, близком к нулю, компенсация несколько замедляется, после чего виден быстрый скачок потенциала вверх и несколько более медленный спад. Эти скачки повторяются далее с периодом, обратно пропорциональным давлению в системе (при $V_a = 1$ кв; p от $1,4 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ мм

рт. ст.; $t_{\text{повт}}$ [сек.] = $120 \cdot 10^{-12}/\rho$ мм. рт. ст.). В отличие от приведенных выше оценок (2) скачки невелики. Это связано, возможно, с тем, что в данной системе время ухода ионов на стенки соизмеримо со временем скачка потенциала. На токовый зонд в моменты скачков потенциала идет ионный ток. При пересчете его на всю систему оказывается, что в это время значительная часть ионов уходит из пучка. В те же самые моменты времени осциллограмма тока на коллектор показывает уменьшение электронного тока,

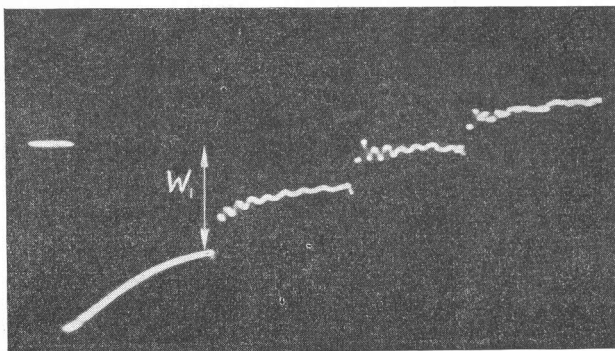


Рис. 3. То же, что на рис. 2Г, при $V_{\text{кол}} = -180$ в; длительность 200 мсек, $V_{\text{нач}} = 160$ мв

а осциллограмма тока на 1-ю сетку — возрастание тока. Этот эффект объясняется тем, что часть вторичных электронов не возвращается на коллектор, а теряется на сетках. При изменении минимального потенциала пучка изменяется ток вторичных электронов, пролетающих через 1-ю сетку, а следовательно и токи, идущие на эту сетку и на коллектор.

Для более полной проверки механизма наблюдавшихся колебаний был поставлен ряд дополнительных экспериментов:

1. На коллектор подавался постоянный потенциал $V_{\text{кол}}$. Так как коллектор экранирован сеткой, то это влияло лишь на скорости вторичных электронов внутри анода. С помощью сетчатого зонда изучался потенциал пучка.

При отрицательных потенциалах на коллекторе вид колебаний несколько изменяется (см. рис. 3)*. Величина W_1 , пропорциональная потенциалу в центре пучка, перед первым скачком потенциала меняется линейно с ростом $V_{\text{кол}}$ (см. рис. 4) в соответствии с ростом энергии вторичных электронов внутри анода.

При положительных потенциалах на коллекторе ($V_{\text{кол}} > 30$ в) амплитуда колебаний заметно убывает и не зависит от $V_{\text{кол}}$, что связано с наличием вторичных электронов, идущих с сеток. В этом режиме токи вторичных электронов малы, и потому малы энергии ионов, вылетающих из пучка (см. (2)). Увеличивая магнитное поле до 2000 эрст., удалось полностью прекратить колебания за счет того, что ионы удерживались полем в пучке.

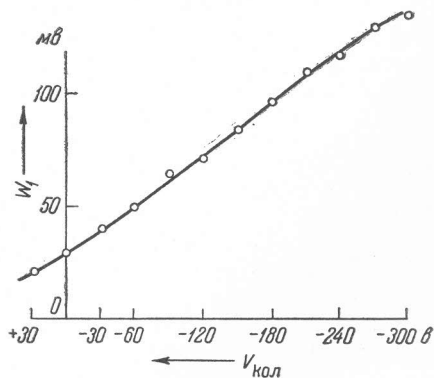


Рис. 4. Зависимость W_1 от $V_{\text{кол}}$. $V_a = 1$ кв; $i_1 = 90$ ма

* За счет возрастания ионных токов в этом режиме на осциллограмме заметен подъем средней линии, так как зонд интегрирует ток.

2. Наблюдающиеся колебания и, в частности, величина W_1 слабо зависят от остальных параметров системы (измерения проводились при $V_{\text{кол}} \leq 0$). При изменении магнитного поля от 200 до 2000 эрст., V_a от 1 до 3 кв и давления в несколько раз величина W_1 изменялась не более чем на 10% и характер колебаний не менялся.

3. Колебания исчезали при уменьшении тока первичных электронов (и соответственно вторичных) до величины, определяемой условием (1). При этом $V_2 \simeq V_{\text{кол}} + 10$ в. Для $V_{\text{кол}} = -90$ в это наблюдалось при $i_1 \simeq 3$ ма; расчет дает $i_1 \simeq 4$ ма (учитывая, что $i_{\text{кр}} = 150$ ма при $V_a = 1$ кв, и предполагая, что $\delta = 1$).

В некоторых случаях релаксационные колебания возбуждают колебания с более высокой частотой (см. рис. 3), однако механизм этих колебаний подробно не изучался.

В ряде экспериментальных работ, где изучались подобные пучки, наблюдались различные виды колебаний. (⁴⁻⁹). Возможно, что некоторые из них объясняются рассмотренным выше механизмом.

Институт физики
Сибирского отделения
Академии наук СССР

Поступило
23 III 1959

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Д. Гвоздовер, В. Н. Слудский, Вестн. МГУ, № 2, 37 (1956).
² Г. Брюининг, Физика и применение вторичной электронной эмиссии, М., 1958.
³ В. И. Волосок, Б. В. Чириков, ЖТФ, 27, 2624 (1957). ⁴ E. Linder, K. Herqvist, J. Appl. Phys., 21, 1088 (1950). ⁵ Д. Пирс, Теория и расчет электронных пучков, М.—Л., 1956. ⁶ K. Herqvist, J. Appl. Phys., 26, 544 (1955).
⁷ T. Mihran, Inst. Rad. Eng. Trans., ED-3, № 3, 117 (1956). ⁸ C. C. Cutler, Proc. Inst. Rad. Eng., 44, 61 (1956). ⁹ T. Jose, J. Appl. Phys., 29, № 5, 839 (1958).