

В.Г.Пономаренко, Л.Я.Трайнин,
В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий

**Оценка влияния ионизационных потерь
на время удержания электронов,
захваченных в ловушку
с магнитными пробками**

г.Новосибирск 1967

В.Г.Пономаренко, Л.Я.Трайнин,

В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ВРЕМЯ УДЕРЖАНИЯ
ЭЛЕКТРОНОВ, ЗАХВАЧЕННЫХ В ЛОВУШКУ С МАГНИТНЫМИ ПРОБКАМИ

А Н Н О Т А Ц И Я

Проведен анализ влияния ионизационных потерь на вид зависимости токов электронов, выходящих из рабочего объема ловушки от времени. Приведены расчетные соотношения, показывающие, что полное исчезновение тока на коллекторе связано с тем, что электроны за время $\tau_{\text{и}}$ /1/ теряют практически всю энергию на неупругое рассеяние на остаточном газе. Экспериментальные данные находятся в достаточно удовлетворительном соответствии с расчетами.

Известно, что причиной появления тока на коллекторе является энергия, которую электроны передают атомам остаточного газа.

Расчеты, проведенные в настоящей работе, в форме графоаналитического анализа описывают ток первичных и вторичных электронов под действием этих предположений.

Теоретическое рассмотрение

Время жизни $\tau_{\text{и}}$ потерь ионизационности электронов на l см пути определяется согласно формуле, вытекающей из [3]

$$\tau_{\text{и}} = \frac{4\pi N}{mv^2} \cdot Z \left(\frac{mv^2}{2} \right) \sqrt{\frac{e}{2}} \quad (1)$$

где E - средняя энергия ионизации атомов газа

N - число атомов газа в l см³

V.G.Ponomarenko, L.Ja.Traynin,
V.I.Yurtchenko, A.N.Jasnetsky

THE ESTIMATION OF THE INELASTIC SCATTERING INFLUENCE
ON THE ELECTRONS LIFETIME IN THE MAGNETIC MIRROR
MACHINE.

The influence of the inelastic scattering of electrons, captured in a mirror machine on the time dependance of losses is described.

The time of disappearance of the electron current is found as:

$$\tau_n \approx T \frac{X}{e n X}, \text{ where } X = \frac{m}{I} \sqrt{\frac{e}{2}} \cdot T = \frac{\sqrt{2m} I^{3/2}}{e^{3/4} 4\pi \epsilon^4 N Z}$$

$$e = 2,7183...; \epsilon = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ cgsE}$$

The calculations and graphoanalytical treatment of the experimental data shows that disappearance of the electron current can be explained by inelastic losses almost whole energy.

Из вида осциллограмм тока вторичных электронов, выходящих на коллектор установки, описанной в /1/, /2/ видно, что хвосты осциллограмм не уходят экспоненциально на бесконечность, а почти линейно подходят к оси абсцисс.

Особенно хорошо это заметно при усилении, которое в несколько десятков раз больше того, при котором видна вся осциллограмма (рис.1)

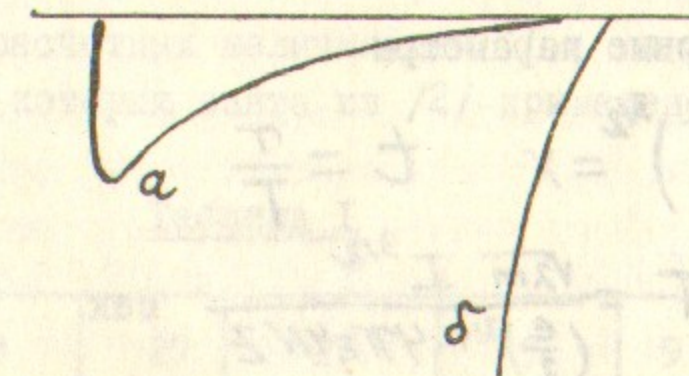


Рис.1. а - вид осциллограммы при нормальном усилении;
б - вид осциллограммы при усилении в 100 раз больше нормального.

Естественно предположить, что причиной подобного вида осциллограмм является потеря энергии на неупругое рассеяние и ионизацию атомов остаточного газа.

Расчеты, проведенные в настоящей работе, а также графоаналитический анализ осциллограмм токов первичных и вторичных электронов подтверждают эти предположения.

Теоретическое рассмотрение

Ионизационные потери нерелятивистских электронов на 1 см пути определяются согласно формуле, приведенной в /3/

$$- \frac{dW}{dx} = \frac{4\pi \epsilon^4 N}{m v^2} \cdot Z e n \frac{m v^2}{2 I} \cdot \sqrt{\frac{e}{2}} \quad (1),$$

где I - средняя энергия ионизации атомов газа

N - число атомов газа в 1 см³

Z - атомный номер рассеивающего газа
 $\varepsilon = 4,8 \cdot 10^{-10}$ - заряд электрона
 $e = 2,7183$ - основание натуральных логарифмов.

Отсюда нетрудно получить выражение для скорости потерь энергии

$$-\frac{dW}{dT} = \frac{4\pi\varepsilon^4 N Z}{\sqrt{2mW}} \ln \frac{W}{I} \cdot \frac{\sqrt{e}}{2}$$

Введем безразмерные параметры

$$\left(\frac{W}{I} \sqrt{\frac{e}{2}}\right)^{3/2} = X \quad t = \frac{T}{T} \quad (2)$$

где $T = \frac{\sqrt{2m} I^{3/2}}{\left(\frac{e}{2}\right)^{3/4} \cdot 4\pi\varepsilon^4 N Z}$ сек

получим

$$\frac{dX}{dt} = -\ln X$$

Откуда

$$t_{X_2 X_1} = \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{\ln X} = \text{li} X_1 - \text{li} X_2 \quad (4)$$

В наших экспериментах при $W \sim 4 + 30$ кв
 $X_1 \sim 500 + 8000 \gg I$

Конечную энергию можно оценить в $300 + 400$ в. При этом время удержания электронов столь малой энергии меньше времени удержания высоковольтных электронов в $30 + 1000$ раз в зависимости от энергии.

При этом $X_2 \sim 8 + 10 \gg I$

Здесь согласно /4/ $I = 80 + 95$ Эв для воздуха.

Время полной потери энергии определится, как

$$T_{\Pi} = t_{X_2 X_1} \cdot T = (\text{li} X_1 - \text{li} X_2) \cdot T$$

Принимая во внимание асимптотическое разложение для $\text{li} X$ при $X \gg I$ /5/

$\text{li} X \approx \frac{x}{\ln x}$, получим

$$T_{\Pi} \approx T \left(\frac{X_1}{\ln X_1} - \frac{X_2}{\ln X_2} \right) \quad (5),$$

где $T = \frac{1,56 \cdot 10^{-10}}{\rho_{\text{тор}}}$ для воздуха.

Сравнение расчетных формул с экспериментальными данными

Сравнение расчетных величин для T_{Π} с экспериментальными данными, часть которых взята из /2/ приведено на табл. I.

Таблица I

W квэ	9	27	27	9	9	9	4
$\rho_{\text{тор}}$	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-10}$	10^{-8}	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-8}$
T_{Π} расчетное сек.	$7 \cdot 10^{-3}$	15	$7,3 \cdot 10^{-3}$	60	3,6	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,375
T_{Π} exper. сек.	$14 \cdot 10^{-3}$	40	$2,5 \cdot 10^{-2}$	1,10	6,5	$4 \cdot 10^{-3}$	1,6

W квэ	18	27
$\rho_{\text{тор}}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
T_{Π} расчетное сек.	1,875	10
T_{Π} exper. сек.	10	27,5

Как видно из сравнения, расчетные величины меньше экспериментальных в $1,5 + 5$ раз, что можно объяснить тем, что неизвестен состав газа.

Однако ясно, что предположение о том, что хвосты осциллограмм линейно подходят к оси абсцисс за счет неупругих потерь получает хорошее подтверждение.

Методика графоаналитического определения ионизационных потерь

Экспериментально ионизационные потери определялись по изложенному ниже графоаналитическому методу по виду совместных осциллограмм первичного и вторичного токов, снятых с разрывом по времени в несколько секунд. При снятии осциллограмм вторичного тока сетки, находящиеся перед коллектором были заземлены, а при снятии осциллограмм первичного тока на сетки ближнюю и дальнюю от коллектора подавались потенциалы соответственно 100 + 200 в для задержания вторичных составляющих общего тока. При расчетах были использованы только осциллограммы, снятые при значениях магнитного поля в области адиабатичности, так как в неадиабатической области имеются дополнительные источники ухода частиц.

Принимая, что время удержания первичных электронов во много раз превосходит время удержания вторичных, получаем:

$$J_2(t) = Q_1(t) \dot{n}(t) \quad (6)$$

где $J_2(t)$ - ток вторичных электронов

$Q_1(t)$ - заряд первичных электронов в рабочем объеме ловушки

$$Q_1(t) = \int_t^{\infty} J_1(t') dt'$$

$\dot{n}(t)$ - среднее число пар ионов, создаваемых одним первичным за 1 сек.

Отсюда

$$\dot{n}(t) = \frac{J_2(t)}{\int_t^{\infty} J_1(t') dt'} \quad (7)$$

Величины $J_1(t)$ и $J_2(t)$ определяются из осциллограмм.

Средние энергетические потери определяются из соотношения

$$W(0) - W(t) = \int_0^t \dot{n}(t') \Delta W_1(W) dt' \quad (8)$$

где $\Delta W_1(W)$ - средняя величина неупругих потерь энергии на образование 1 пары ионов.

Из (8) получается дифференциальное уравнение

$$-\frac{W}{\Delta W_1(W)} = \dot{n}(t) = \frac{J_2(t)}{Q_1(t)} \quad (10)$$

При начальном условии $W(0)$. Графоаналитическое решение этого уравнения позволит найти ионизационные потери.

Известно, что (см., напр. / 6 /), что $\Delta W_1(W) = 55$ Эв для воздуха и очень слабо зависит от энергии.

Поэтому

$$W(0) - W(t) = \Delta W_1(W) \int_0^t \dot{n}(t') dt' \quad (9)$$

Из (9) вытекает первый метод графоаналитического определения потерь энергии.

Второй метод основан на зависимости \dot{n} от энергии. Согласно /7/ число пар ионов, созданных на 1 см пути равно при $\frac{v}{c} \ll 1$

$$\frac{dn}{dx} = \frac{2A}{W} \left[\ln \frac{W}{I_0 z} + \beta \right]$$

где $A = A(z)$ $\beta = \beta(z) = \text{const.} \sim 2$

Отсюда при $W \gg I_0 z$

$$\frac{dn}{dt} = v \frac{dn}{dx} = \frac{A_1(z)}{\sqrt{W}} \left(\ln \frac{W}{I_0 z} + \beta \right) \quad (10)$$

Таким образом $\dot{n} \sim W^{-1/2}$ (11)

Результаты графоаналитической обработки нескольких осциллограмм приведены на рис 2.

Из рис.1 видно, что расчеты по обоим способам указывают на то, что за время T_{π} теряется практически вся начальная энергия, что указывает на то, что время T_{π} является довольно неудачным параметром для оценки неадиабатических эффектов.

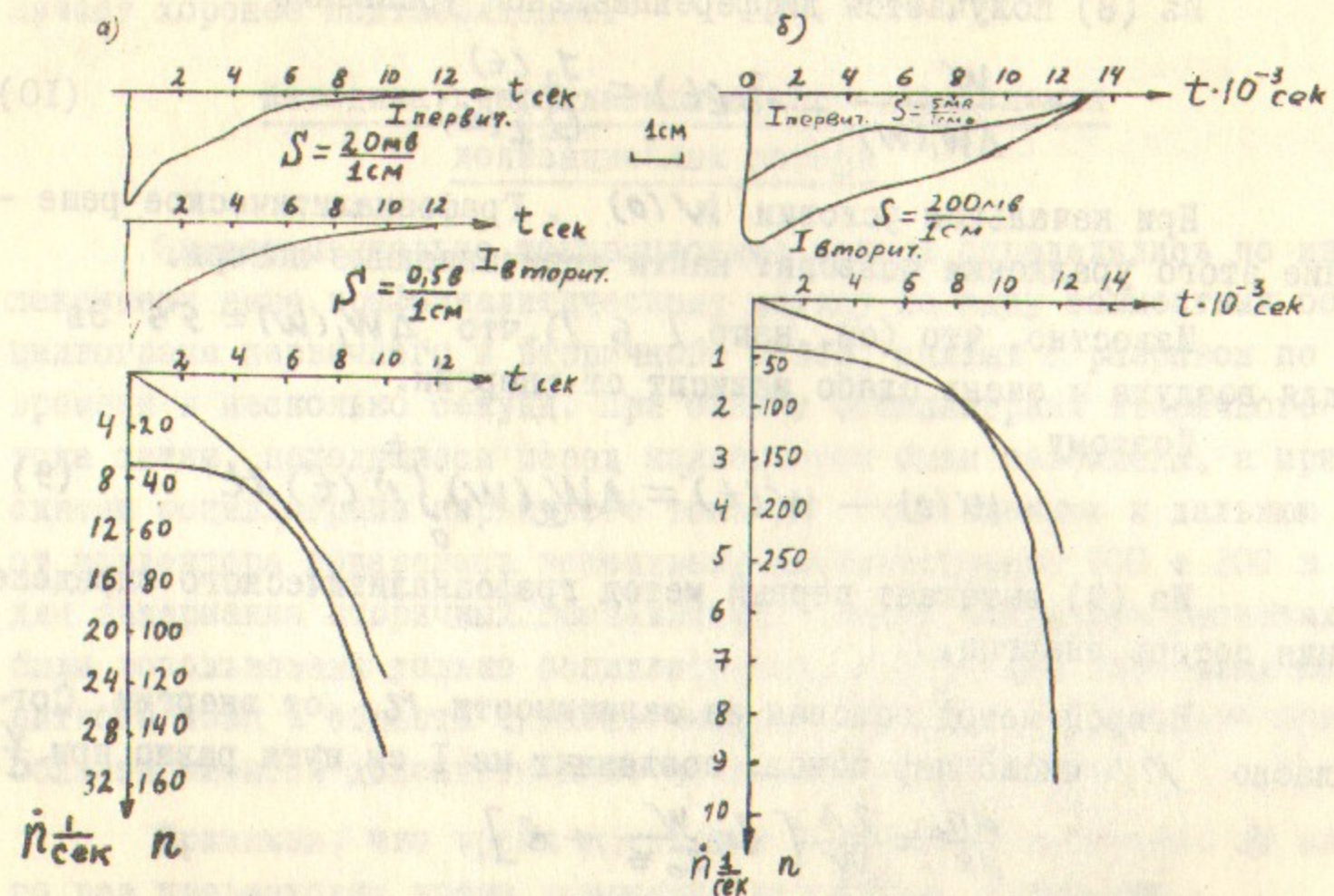


Рис.2. Графоаналитическое определение неупругих потерь энергии электронов, захваченных в магнитную ловушку.

а) Расстояние между центрами пробок = 77 см, U пушки = 4 кв, U кольца = 8 кв, H пробки = 600 э. I в на экране осциллографа соответствует 10-9 см тока коллектора.

б) Расстояние между центрами пробок = 95 см U пушки = 9 кв, U кольца = 4 кв, H пробки = 720 э. I в на экране осциллографа соответствует $2 \cdot 10^{-6}$ а тока коллектора.

Л и т е р а т у р а

1. А.Н.Дубинина, Л.Я.Трайнин, Б.В.Чириков, ЖЭТФ, 49, 373, 1965.
2. В.Г.Пономаренко, Л.Я.Трайнин, В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий. Экспериментальное исследование процессов движения отдельных заряженных частиц в ловушке с магнитными пробками. ИЯФ СО АН СССР, 1967 г.
3. Экспериментальная ядерная физика под ред.Э.Сегре. ИЛ М.1955г.
4. Справочник по ядерной физике. Пер.с англ. под ред.акад. Л.А.Арцимовича. Физматгиз, М. 1963.
5. Н.Н.Лебедев. Специальные функции и их приложения. М.-Л. Физматгиз, 1963.
6. Н.Мотт и Г.Месси. Теория атомных столкновений. ИЛ, 1951.
7. Росси Б., Грейзен К. Взаимодействие космических лучей с веществом. ИЛ, 1948 г.

1. А. А. Дудкина, А. А. Тройкина, Л. С. Фирсова, Ю. В. Яковлев, 1967 г.
2. Л. И. Понкин, Л. А. Тройкина, А. А. Дудкина, Л. С. Фирсова, Ю. В. Яковлев, 1967 г.
3. Экспериментальное исследование процессов взаимодействия нейтронов с ядрами изотопов бор-10 и бор-11. М.: Атомиздат, 1967 г.
4. Сравнение по ядерной физике. Пер. с англ. под ред. Ф. Ф. Зигеля, М.: Атомиздат, 1967 г.
5. В. Н. Седук. Операционные функции и их приложения. М.: Атомиздат, 1967 г.
6. Н. Нотт и Т. Нотт. Теория столкновений. М.: Атомиздат, 1967 г.
7. Робен Э., Трейсон Э. Взаимодействие нейтронов с ядрами. М.: Атомиздат, 1967 г.

Технический редактор Л. Я. ТРАМНИН

Ответственный за выпуск Л. Я. ТРАМНИН
Подписано к печати 21 сентября 1967 г.
Усл. 0,6 печ. л., тираж 250 экз.
Заказ № 154. БЕСПЛАТНО

Отпечатано на роталпринте в Институте ядерной физики СО АН СССР