

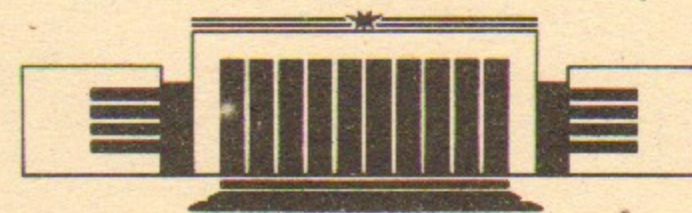


58
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

М.А. Завражнов, Р.М. Лапик, И.Н. Мешков,
В.Н. Поляков, А.В. Смирнов, И.А. Селезнев,
Е.М. Сыресин, Ж. Боссер, Ж. Транквиль

ИЗМЕРЕНИЕ
ПОПЕРЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ
В ИНТЕНСИВНЫХ ХОЛОДНЫХ ПУЧКАХ

ИЯФ 93-103



НОВОСИБИРСК

Измерение поперечной энергии электронов
в интенсивных холодных пучках

М.А. Завражнов, Р.М. Лапик, И.Н. Мешков
В.Н. Поляков, А.В. Смирнов, И.А. Селезнев
Е.М. Сыресин, Ж. Боссер, Ж. Транквиль

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
630090, Новосибирск 90, Россия

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Формирование холодных интенсивных электронных пучков одна из основных проблем в методе электронного охлаждения [1–3]. Величина поперечной энергии электронов в пучке определяет скорость охлаждения и температуру ионов в накопителе.

В настоящем сообщении обсуждаются методы и результаты измерений поперечной энергии электронов с энергией до 20 кэВ при токе пучка до 2.5 А. Особенностью данных экспериментов по сравнению с аналогичными [4–5] является измерение поперечной энергии электронов в высокоэнергетичных пучках с большим первеансом $P_b = 1 \div 5 \mu\text{A}/V^{3/2}$, когда существенны эффекты объемного заряда.

Эксперименты проведены с двумя типами пушек: "пушкой ФТЦ" и "пушкой LEAR" [6–8].

1. ПАРАМЕТРЫ ПУШЕК

Пушки имеют адиабатическую оптику, позволяющую генерировать пучок в широкой области значений параметров. Обе они трехэлектродные—наличие управляющего электрода позволяет варьировать ток пучка при постоянном потенциале катода

Таблица 1.

Параметры электронных пушек

	Пушка LEAR		
Энергия электронов, кэВ	≤ 2.3	7	20
Ток пучка, А	0.01 - 0.53	0.07 - 2.93	0.35 - 2.8
Первеанс $\mu A/V^{3/2}$	0.125 - 5	0.125 - 5	0.125 - 1
Диаметр пучка, мм	50	50	50
	Пушка ФТЦ		
Энергия электронов, кэВ	10	20	
Ток пучка, А	1	1	
Первеанс $\mu A/V^{3/2}$	1	0.35	
Диаметр пучка, мм	30	30	

Схема пушки LEAR приведена на рис.1. Особенностью данной конструкции является возможность ее использования в относительно низком магнитном поле [6], что отличает ее от ранее известных [2-3, 5].

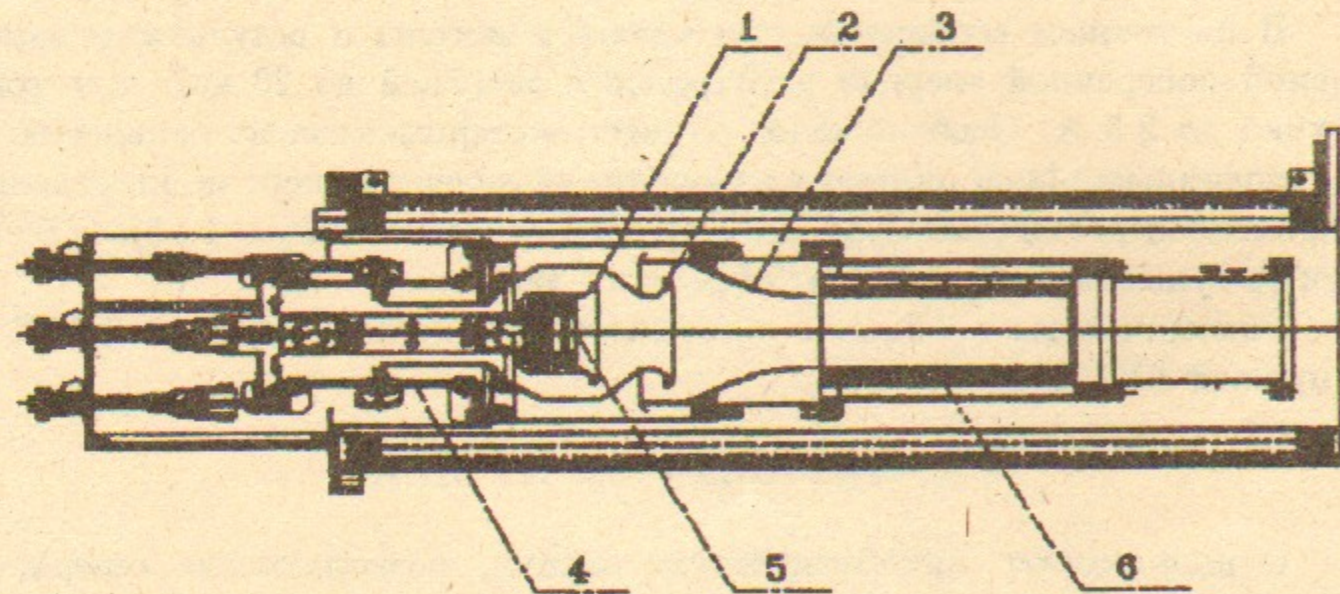


Рис. 1. Конструкция электронной пушки LEAR. 1—фокусирующий электрод 2—управляющий электрод, 3—анод, 4—высоковольтный керамический изолятор, 5—катод, 6—насосы типа "нераспыляемый геттер".

2. ПОПЕРЕЧНАЯ СКОРОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ

Поперечная скорость электронов пучка, сформированного пушкой с адиабатической оптикой, определяется тремя эффектами: тепловой скоростью на катоде v_T , дрейфовой скоростью v_d в радиальном электрическом поле пучка и продольном магнитном поле системы электронного охлаждения и скоростью v_{\perp} , обусловленной неадиабатичностью движения электрона в пушке. Поперечные компоненты скорости v_r и $2 v_{\theta}$ равны соответственно [6-7]

$$v_r = v_T \cdot \sin(\omega_H t + \varphi_0) + v_{\perp} \cdot \sin \omega_H t \quad (1)$$

$$v_{\theta} = v_T \cdot \cos(\omega_H t + \varphi_0) + v_{\perp} \cdot \cos \omega_H t + v_d,$$

где φ_0 —начальная фаза электрона на катоде, $\omega_H = eH/mc$ —циклотронная частота в дрейфовой камере, v_d есть

$$v_d = \frac{2I}{\beta \gamma^2 H c} \cdot \frac{r}{a^2}, \quad (2)$$

где r, a —радиальная координата электрона и радиус сечения пучка, I —ток пучка, $\beta = v/c$, $\gamma = \sqrt{1 - \beta^2}$, v —продольная скорость электронов. Для адиабатической оптики v_{\perp} порядка [7]

$$v_{\perp} \approx v \cdot \frac{r \rho_H}{\Delta^2} \cdot e^{-\Delta/\rho_H}, \quad (3)$$

где Δ —характерный масштаб изменения электрического поля в пушке, $\rho_H = v/\omega_H$ —ларморовский радиус. Для "идеальной" пушки поперечная скорость, обусловленная неадиабатичностью движения v_{\perp} , равна нулю. В этом случае электроны в дрейфовой камере имеют минимально возможную поперечную скорость при заданном токе пучка и их энергии. Поэтому амплитуда v_{\perp} в (1) характеризует неидеальность электронной оптики пушки. Если оптика достаточно совершенна, преобладающей является дрейфовая скорость

$$v_d \gg v_{\perp}, \quad (4)$$

и это—критерий качества оптики пушки.

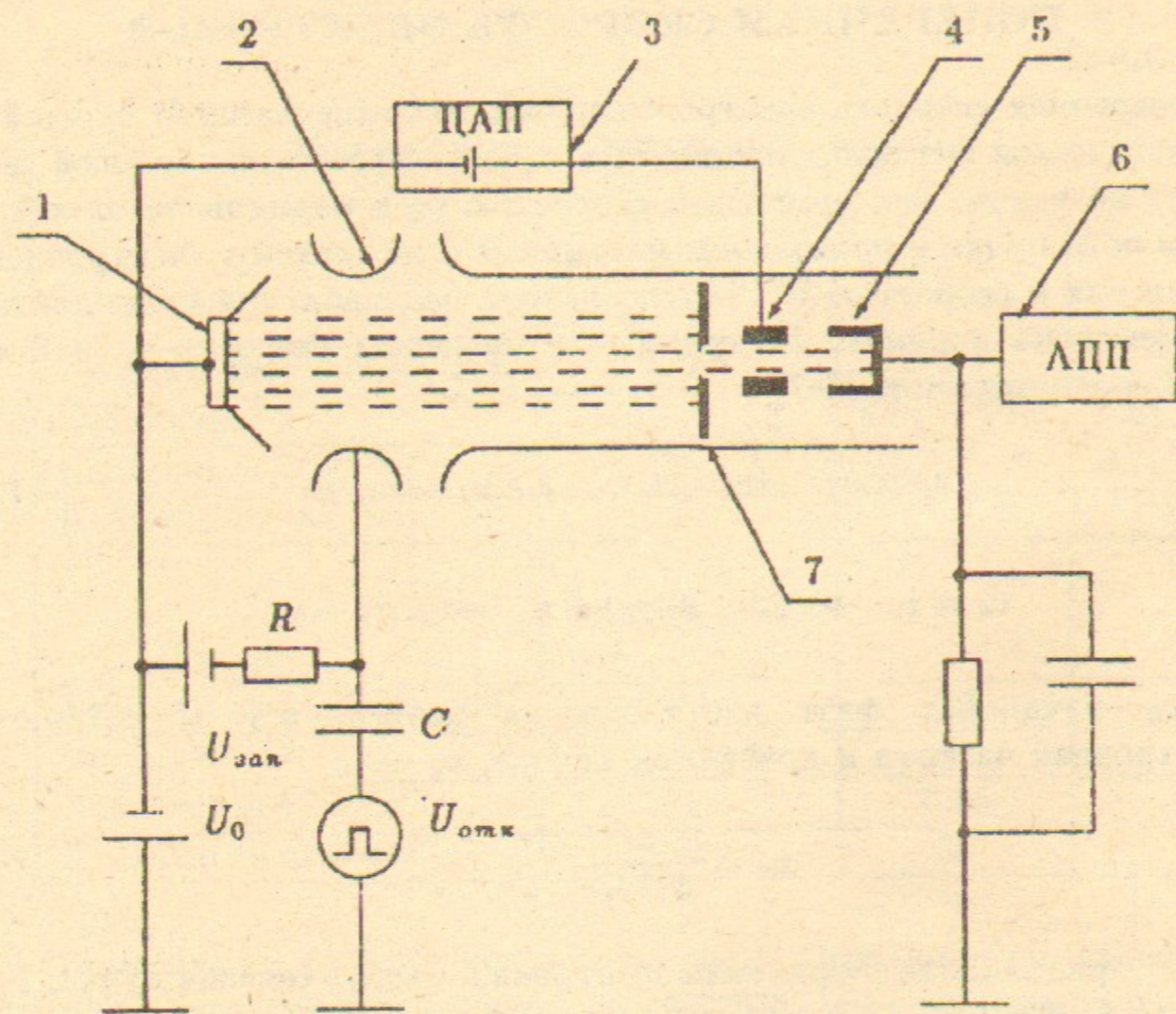


Рис. 2. Схема энергетического анализатора. 1—катод пушки, 2—управляющий электрод, 3—источник питания анализирующего напряжения вместе с управляющим ЦАПом, 4—анализирующая диафрагма, 5—коллектор, 6—интегратор и АЦП, 7—вырезающая диафрагма.

3. СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Для проведения экспериментов по измерению поперечной энергии электронов создан специальный стенд "Анализатор" (рис.2).

Стенд имеет вакуумную камеру длиной 2 м, диаметром 20 см. Вакуум в камере во время экспериментов составлял $10^{-8} \div 10^{-6}$ Торр. Камера помещена в магнитное поле с напряженностью до 700 Гс. Неоднородность магнитного поля на расстоянии 2.5 см от оси системы в области пушки составляет $1 \div 3\%$, в области анализатора 0.3% . Формирование электронного пучка проводится двумя типами пушек: пушкой системы

электронного охлаждения LEAR [6] и пушкой ФТЦ, разработанной для проведения тестовых испытаний на стенде. Эксперименты проведены в импульсном режиме работы пушек. Схема измерений показана на рис.2.

Во время измерений потенциал катода поддерживается постоянным, а на управляющий электрод подается запирающее напряжение. Пушка открывается во время подачи положительного импульса напряжения на управляющий электрод. Длительность импульса составляет $20 \div 50 \mu$ сек, частота следования $1 \div 3$ Гц.

Для измерения поперечной энергии электронов пучка на стенде использованы два типа анализаторов: энергетический [4,5] и оптический [9]. Энергетический анализатор позволяет измерить поперечную энергию электронов и среднеквадратичный разброс их продольной энергии. Метод [4,5] основан на анализе энергетического разброса в тонком пучке электронов, вырезанном из основного с помощью малого отверстия в вырезающей диафрагме (рис.2). Вырезанный пучок тормозится в электрическом поле анализирующей диафрагмы, находящейся под потенциалом U_A относительно катода. Изменяя этот потенциал и одновременно измеряя ток пучка, принимаемый коллектором, можно получить интегральную, а по ней и дифференциальную функции распределения электронов по продольной энергии. Наличие поперечной энергии при постоянстве полной энергии приводит к смещению центра тяжести дифференциальной функции распределения на величину, зависящую от расстояния между вырезанным пучком и осью системы. Для нахождения поперечной энергии электронов была проанализирована зависимость смещения положения максимума дифференциальной функции распределения от радиуса траектории электронов.

Оптический анализатор (рис.3) позволяет измерить поперечную энергию по величине поперечного ларморовского радиуса. Как и в энергетическом анализаторе, здесь из электронного пучка вырезается тонкий пучок, который сбрасывается на люминесцентный экран. Размер светящегося пятна на экране измеряется с помощью микроскопа. Положение пятна и его размер определяется поперечным ларморовским радиусом электрона.

Детальный анализ принципов работы анализаторов рассмотрен в следующих параграфах.

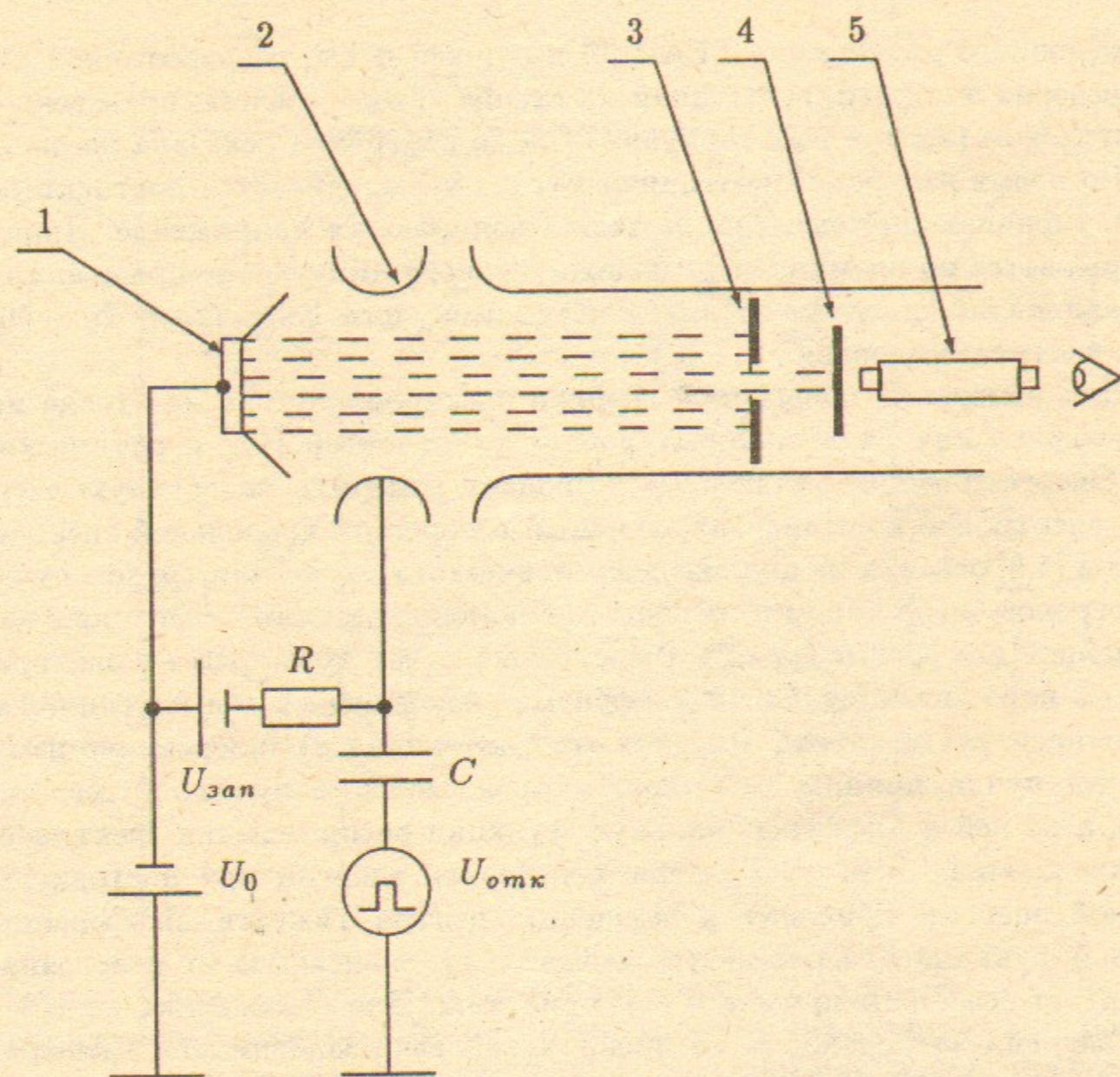


Рис. 3. Схема оптического анализатора. 1—катод пушки, 2—управляющий электрод, 3—вырезающая диафрагма, 4—люминесцентный экран, 5—микроскоп.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР

Схема энергетического анализатора приведена на рис.2. Электроны эммитируются катодом, потенциал которого равен $-U_0$. Затем пучок сбрасывается на коллиматор (поз.7), находящийся под нулевым потенциалом. Благодаря объемному заряду электроны в дрейфовой камере имеют различную кинетическую энергию в зависимости от радиуса их траекторий. Разница энергии электронов между центром и краем

пучка составляет $0.5 \div 1.5$ кВ. На коллиматоре кинетическая энергия электронов выравнивается, достигая величины $\epsilon_0 \simeq eU_0$. Здесь же адиабатически выключается дрейфовая скорость электронов, обусловленная радиальным электрическим полем. Компонента радиального электрического поля перед коллиматором переходит в продольную на масштабе порядка радиуса пучка. В коллиматоре на разных радиусах сделаны отверстия диаметром $0.03 \div 0.2$ мм. Тонкие пучки, пройдя через коллиматор, анализируются по продольной энергии в тормозящем поле анализирующей диафрагмы. Тонкий пучок, вырезанный из основного, несет информацию о тепловой скорости электронов на катоде и поперечной когерентной скорости v_{\perp} , связанной с оптикой пушки. Соосно отверстиям коллиматора сделаны отверстия в анализирующей диафрагме диаметром $D = 4$ мм. Толщина анализирующей диафрагмы равна 4 см. Выбор диаметра каналов в анализирующей диафрагме определяется адиабатическим торможением электронов в канале. Радиальное электрическое поле на входе в канал может приводить к увеличению поперечной энергии электронов, что осложняет анализ углового разброса в пушке. Толщина анализирующей пластины h_1 выбрана из условия $h_1 = 10D$, чтобы избежать провисания силовых линий электрического поля в средней плоскости анализирующего канала и обеспечить эквипотенциальность канала при смещении осей тонкого пучка и канала. Разность потенциалов между катодом и анализирующими каналами варьируется в пределах $-5 \div +15$ В источником, "подвешенным" под потенциал катода вместе с управляющим ЦАПом. Связь с ЭВМ осуществляется через оптронную развязку. В зависимости от потенциала анализирующей диафрагмы измеряется ток пучка I_A , прошедший через анализирующий канал.

С помощью интегратора с эффективной емкостью C ток интегрируется за время подачи положительного импульса на управляющий электрод Δt . Напряжение на интеграторе $U_{коА} = I_A \Delta t / C$ измеряется АЦП и запоминается. К следующему импульсу тока пучка напряжение на анализирующей диафрагме изменяется ЦАПом на малую величину ΔU_A и цикл повторяется. В результате получаем интегральную вольтамперную характеристику тока пучка, прошедшего через анализирующий канал, от напряжения на нем для каждого из каналов. Принцип измерения ее во времени иллюстрируется на рис.4. Интегральная вольтамперная характеристика анализируется специальной программой, где методом наименьших квадратов она аппроксимируется аналитической функцией (см. п.5), которая затем дифференцируется.

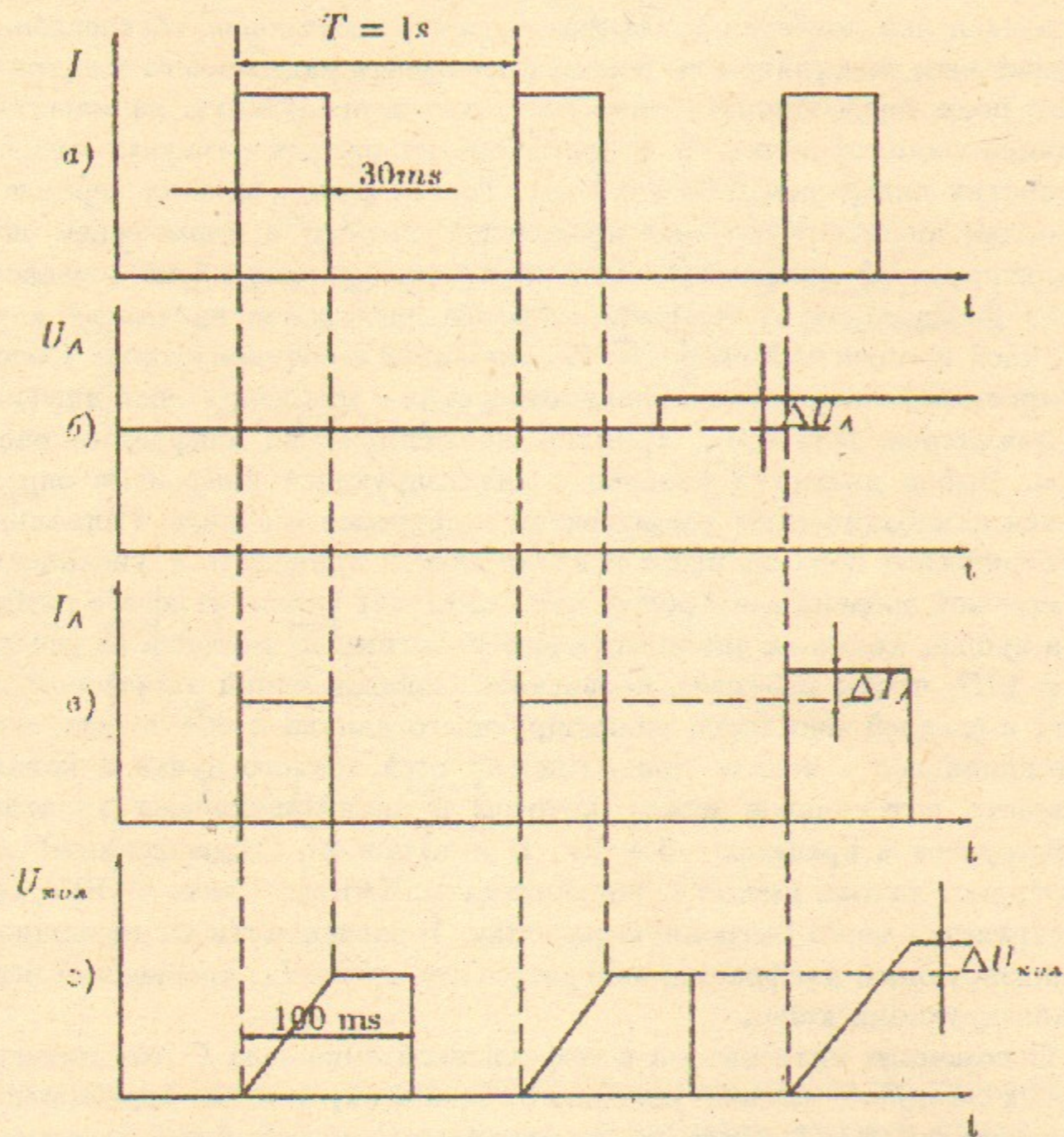


Рис. 4. Осциллограммы сигналов в экспериментах с анализатором энергии а) I —ток пучка, б) U_A —напряжение на анализирующей диафрагме, в) I_A —ток, прошедший через вырезающее отверстие в коллекторе, г) U_{col} —сигнал с коллектора после интегратора. ΔU_A —шаг изменения напряжения на анализирующей диафрагме; ΔI_A —приращение коллекторного тока при изменении анализирующего напряжения на ΔU_A ; ΔU_{col} —приращение измеряемого напряжения с коллектора при изменении анализирующего напряжения на ΔU_A .

Аналитическая интегральная функция распределения имеет два свободных параметра: полуширину и сдвиг максимума дифференциальной функции распределения. Измерение этих двух параметров и является целью экспериментов. Результаты измерений и аппроксимации для интегральной и дифференциальной функций распределения представлены на рис.5.

5. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛИЗАТОРА

Вольтамперная характеристика анализатора определяется функцией распределения электронов на катоде

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi T_c} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2T_c}}, \quad (5)$$

где T_c - температура катода. После ускорения электронов в пушке их продольная температура в собственной системе становится существенно меньше чем поперечная, а их функция распределения представляет собой половину от максвелловской функции распределения. Наличие продольно-продольной и продольно-поперечной релаксаций температуры [4] приводит к максвеллизации функции распределения по продольным скоростям в собственной системе отсчета. После релаксации функция распределения в собственной системе симметрична и имеет вид

$$f(v_x, v_y, v'_z) = \left(\frac{m}{2\pi} \right)^{3/2} \cdot \frac{1}{T_c^2 T_{||}} \cdot e^{-\frac{m(v_x^2 + v_y^2)}{2T_c}} \cdot e^{-\frac{mv_z'^2}{2T_{||}}}, \quad (6)$$

где $T_{||}$ - продольная температура в собственной системе после релаксации, v'_z - разброс по продольным скоростям в собственной системе отсчета.

Ток электронов, прошедших через анализирующий канал, равен

$$I_A = I_r \frac{m^2}{2\pi T_c T_{||}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{mv_x^2}{2T_c}} dv_x \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{mv_y^2}{2T_c}} dv_y \int_0^{\infty} e^{-\frac{mv_z'^2(v_A)}{2T_{||}}} v_A dv_A, \quad (7)$$

где функция $v'_z(v_A)$ зависит от величины анализирующего потенциала (см. ниже). Здесь I_r - ток пучка, прошедший через отверстие в вырезающей диафрагме, v_A - скорость электронов в анализирующем канале. Величина этой скорости определяется напряжением на ЦАПе

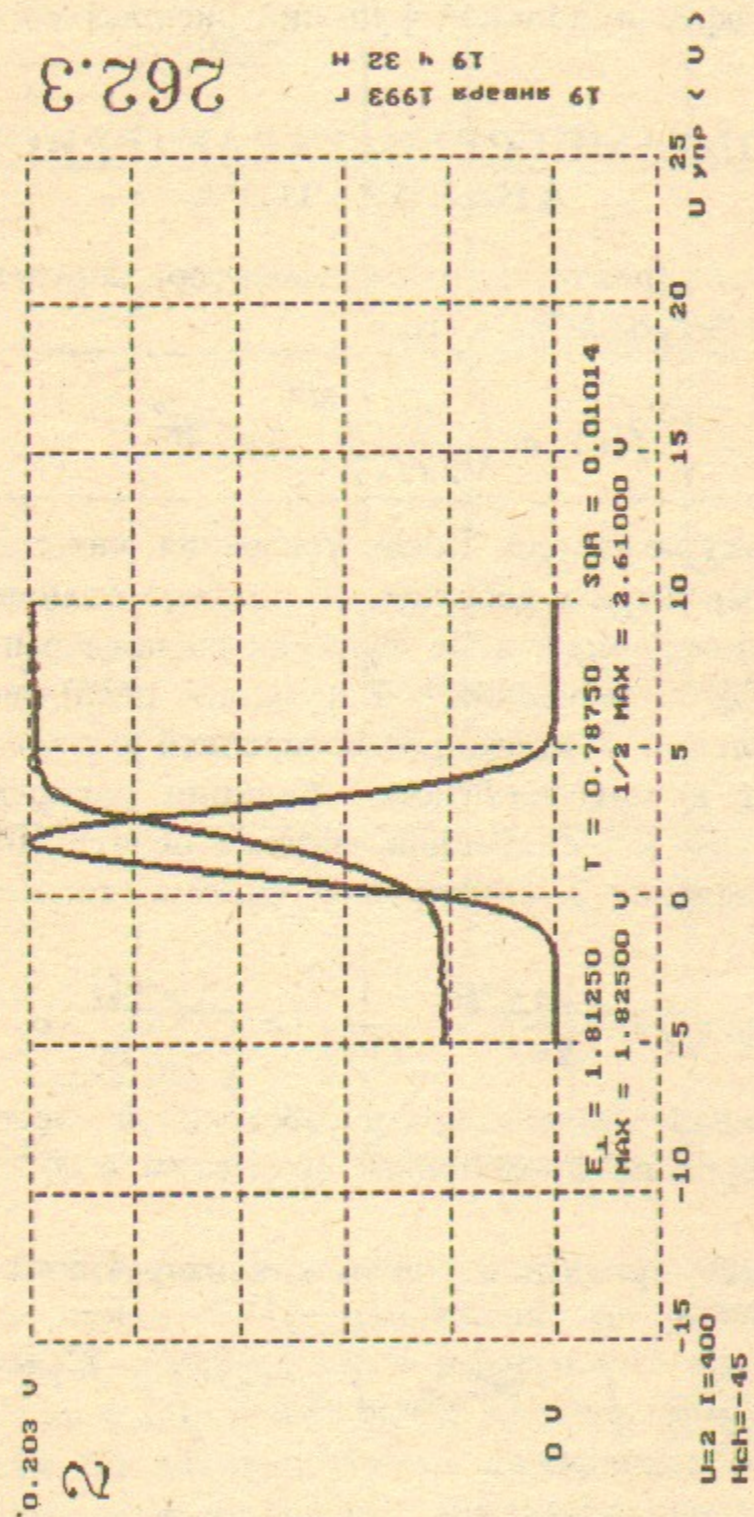


Рис. 5. Интегральная и дифференциальная функции распределения энергии электронов, регистрируемых анализатором.

U_A и поперечной скоростью, которую приобрел электрон в пушке. За вырезающей диафрагмой поперечная скорость электронов, усредненная по циклотронному вращению, равна (см. (1))

$$v_{1c}^2 = v_T^2 + v_{\perp}^2 + 2v_{\perp}v_x, \quad (8)$$

где $v_x = v_T \cos \varphi_0$ - x-компонента скорости электрона на катоде. Продольная скорость электрона равна

$$v_{\parallel}^2 = \frac{2eU_0}{m} - v_{1c}^2 + v_T^2, \quad (9)$$

где U_0 - ускоряющее напряжение на катоде.

Скорость электронов в анализирующем канале равна

$$\frac{mv_A^2}{2} + e(U_0 - U_A) = \frac{m(v_{\parallel} + v'_z)^2}{2}, \quad (10)$$

где U_A - потенциал анализирующей диафрагмы относительно катода. Отсюда следует, что разброс по продольным скоростям в собственной системе отсчета v'_z и скорость в анализирующем канале v_A связаны соотношением

$$v'_z = (v_A^2 + v_{\perp}^2 + 2v_{\perp}v_x - \frac{2eU_A}{m}) \frac{1}{2v_0}, \quad (11)$$

где $v_0^2 = \frac{2eU_0}{m}$. Подставив $v'_z(v_A)$ в формулу (7), получаем интегральную вольтамперную зависимость тока пучка I_A от напряжения на анализирующей диафрагме

$$I_A = I_r \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{x_0}^{\infty} e^{-x^2} dx, \quad (12)$$

$$x_0 = \frac{\epsilon_{\perp} - eU_A}{2\sqrt{T_{\parallel}eU_0 + \epsilon_{\perp}T_c}}$$

где $\epsilon_{\perp} = mv_{\perp}^2/2$ - поперечная энергия электронов пучка. Дифференцируя функцию $I_A(U_A)$, приходим к следующему результату

$$\frac{dI_A}{dU_A} = \frac{I_r}{\delta U} \cdot \exp \left[- \frac{(\epsilon_{\perp} - eU_A)^2}{\delta U^2} \right], \quad (13)$$

$$\delta U = 2\sqrt{T_{\parallel}eU_0 + \epsilon_{\perp}T_c},$$

Положение максимума функции dI_A/dU_A определяет поперечную энергию электронов, а ее ширина дает информацию о среднеквадратичном разбросе по продольной энергии электронов.

6. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МЕТОДА

Сдвиг максимума функции распределения dI_A/dU_A определяется несколькими эффектами, часть из которых (п.п.1÷4) исследована в работе [4]:

1. Наличие когерентной поперечной скорости у электронов v_{\perp} (см.(1)), возникающей из-за неидеальности оптики пушки

$$\Delta U_{\theta} = \epsilon_{\perp}, \quad (14)$$

2. Работа выхода электронов для эмиттирующего материала катода

$$\Delta U_{\varphi} = W_{\varphi}/e \approx 2B, \quad (15)$$

3. Активное сопротивление эмиттирующего слоя катода

$$\Delta U_R = RI, \quad (16)$$

где I —ток пучка, $R \approx 1,4$ Ом.

4. Виртуальный катод, образующийся вблизи поверхности катода

$$\Delta U_j = -\frac{T_c}{e} \cdot \ln \frac{I_c}{I} \approx 0.5 \div 1B, \quad (17)$$

где T_c, I_c — температура и ток эмиссии катода

5. Перекося силовых линий магнитного поля относительно оси анализатора и неадиабатичность движения электронов на входе в анализирующую диафрагму

$$\Delta U_{\alpha} \approx U_0 \alpha^2 \cdot e^{-\frac{2\sqrt{DL}}{\rho}} = U_0 \alpha^2 \cdot e^{-\frac{2.2}{\rho c m}} \approx 2 \div 10B, \quad (18)$$

$\rho = v_0/\omega_H$ — ларморовский радиус, D — диаметр анализирующего канала, L — расстояние между вырезающей и анализирующей диафрагмой.

6. Пространственный заряд вырезанного пучка в анализирующем канале

$$\Delta U_I = \frac{30I}{\beta_1} \cdot \left(1 + 2 \ln \frac{D}{h}\right) \cdot \frac{h^2}{a^2} = IR_I, \quad (19)$$

где $R_I \approx 0.2$ Ом, $\beta_1 = v_1/c$, $v_1 = \sqrt{\frac{2eU_{\Delta}}{m}}$ — скорость электронов в анализирующем канале, h, a — диаметр вырезанного и основного пучков.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ АНАЛИЗАТОРОМ

Область параметров, в которой производились измерения представлена в Табл.2

Таблица 2.

Основные параметры эксперимента

Энергия электронов, кэВ	1 - 8
Ток пучка, А	0.025 - 2.5
Магнитное поле, Гс	380 - 700
Вакуум, Торр	$2 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-7}$
Диаметр отверстий в вырезающей диафрагме, мкм	
канал 1	30
канал 2	80 × 120

7.1. Поперечная энергия электронов

Для определения смещения центра тяжести ΔU_{θ} , связанного с угловым разбросом, (14) проанализирована зависимость смещения ΔU от радиальной координаты пучка (рис.6). Разность смещения осевых и краевых электронов ΔU_d для интенсивных пучков с первеансом $P = 1.5 - 5 \mu A/B^{3/2}$ составляет $0.3 \div 1$ В, что соответствует углам $\theta = \sqrt{\Delta U_d/U_c} = 6 \div 15$ мрад. в магнитном поле $H \approx 350 - 450$ Гс (таблица 3).

Таблица 3.

Поперечная энергия электронов

Напряженность магнитного поля, Гс	450	450	380
Энергия электронов, кэВ	5	8	8
Ток пучка, А	0.2 1.2 2	1 2.5	1 2.5
Разность величины смещения ΔU для осевых и краевых электронов, эВ	0.3 0.9 0.8	0.75 0.5	0.3 1.0
Угол электронов пучка θ , мрад			
эксперимент	7.7 13.4 12.6	9.7 8	6.1 11
расчет	1.0 3.3 10.0	2.6 7.8	2.5 15.5

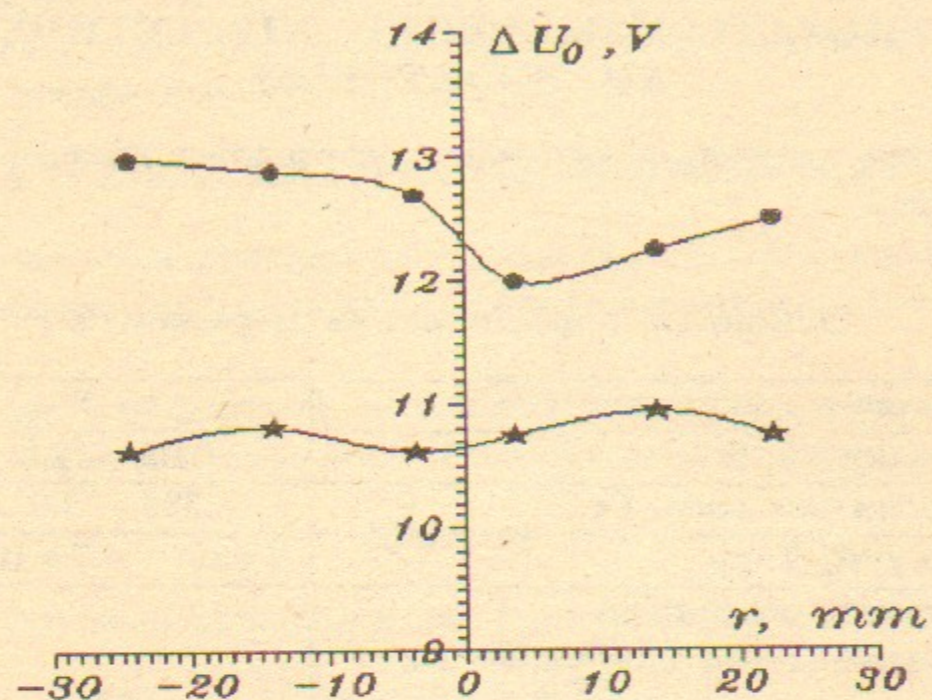


Рис. 6. Зависимость смещения максимума дифференциальной функции распределения от радиальной координаты электронов пучка $\epsilon_0 = 8$ кэВ, $H = 380$ Гс, $\bullet - I = 2.5$ А, $\star - I = 1$ А.

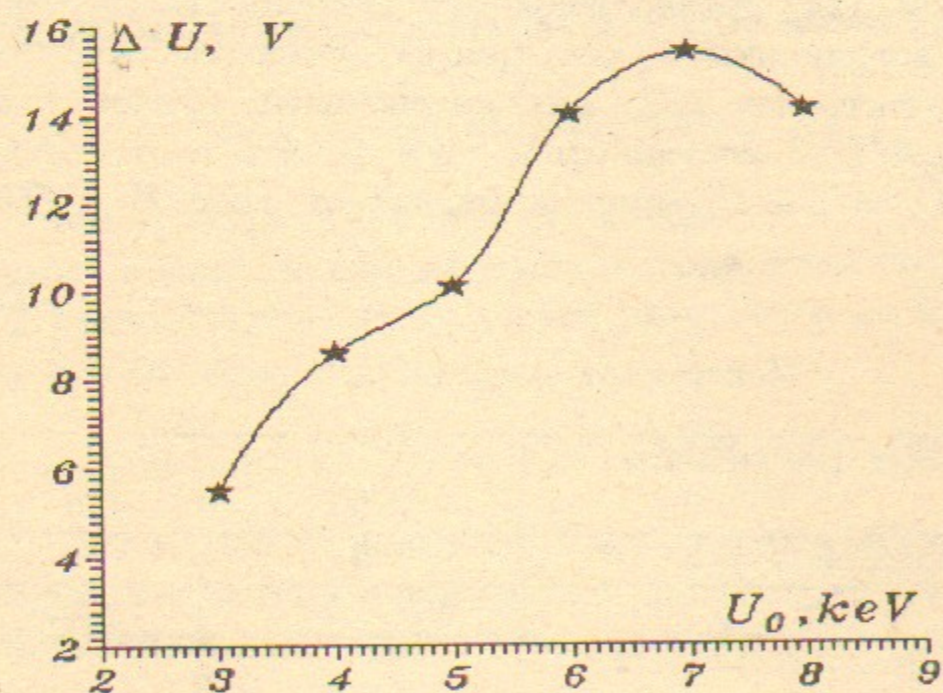


Рис. 7. Зависимость смещения ΔU от энергии электронов $I = 1$ А, $H = 450$ Гс

Зависимость смещения ΔU от радиуса не всегда представляет функцию, соответствующую парааксиальному приближению. Основная проблема регистрации поперечной энергии пучка заключается в том, что она измеряется на фоне других эффектов (15)–(19), суммарный уровень которых выше ΔU_θ , что ограничивает точность метода. На рис.7 приведена зависимость смещения от энергии электронов.

Несмотря на то, что первенс пучка при снижении энергии возрастает, смещение резко уменьшается со снижением энергии. Это обусловлено влиянием электрических полей анализатора (формула (18)) и непараллельностью силовых линий электрических и магнитных полей. Зависимость смещения от энергии имеет экспоненциальный характер, влияние этого эффекта особенно существенно при больших энергиях электронов. С ростом тока пучка линейно возрастает смещение, что соответствует эффективному сопротивлению $R = 1.5 \div 1.7$ Ом (рис.8). Эта величина включает активное сопротивление эммитирующего слоя катода $R_R \approx 1.4$ Ом (формула 16) и учитывает влияние объемного заряда вырезанного пучка $R_I \approx 0.2 \div 0.3$ Ом (формула 19). Кривые на рис.6–7 имеют общий сдвиг $\Delta U = 1.5 \div 2.5$ В, что может быть связано с работой выхода (формула 15).

Увеличение тока накала с 30А до 35А приводит к уменьшению

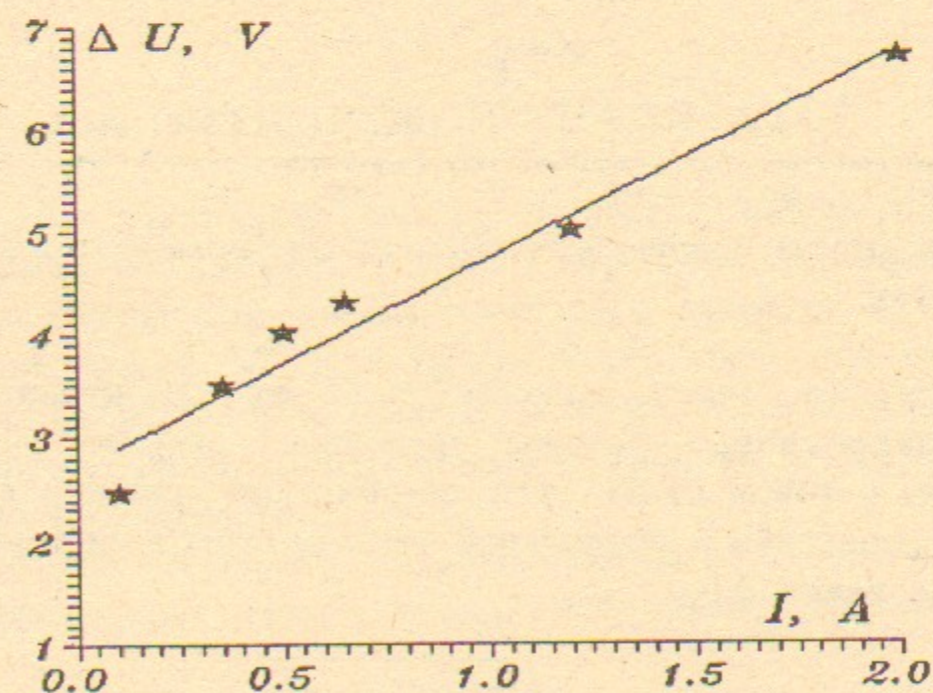


Рис.8. Зависимость смещения ΔU от тока пучка. $H = 450$ Гс, $\epsilon_0 = 5.2$ кэВ.

сдвига ΔU на 0.5 В, что связано с уменьшением сопротивления эммитирующего слоя. Проведенные измерения функции распределения с выключенным током накала показали, что при работе катода в термоинерционном режиме не происходит изменения величины смещения. Это говорит об отсутствии заметного влияния магнитного поля тока накала на угловые характеристики пушки.

7.2. Среднеквадратичный разброс продольной энергии

На рис.9 приведены зависимости среднеквадратичного разброса продольной энергии δU (13) от радиуса.

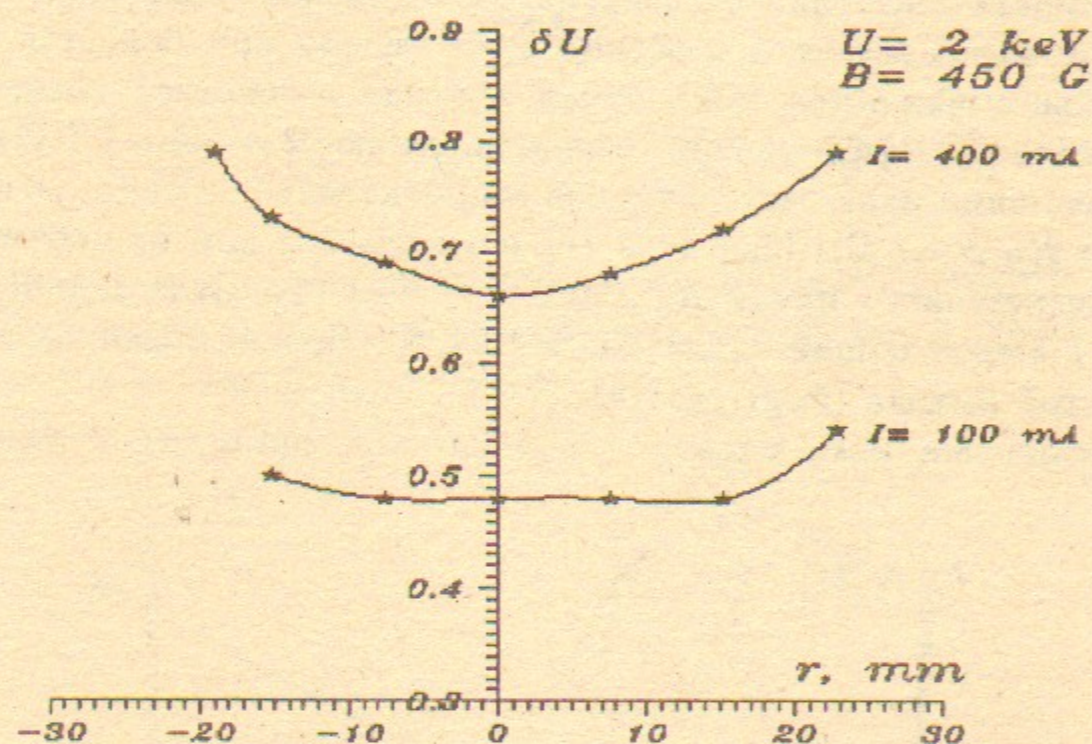


Рис. 9. Зависимость среднеквадратичного разброса продольной энергии δU от радиуса.

На рис.10 представлена зависимость δU от тока пучка.

Среднеквадратичный разброс продольной энергии растет корнем с током пучка, что, по-видимому, связано с продольно-поперечной релаксацией продольной температуры в системе частиц T_{\parallel} и ростом смещения ΔU_{θ} :

$$\delta U = 2\sqrt{\frac{T_{\parallel}U_0 + \Delta U_{\theta}T_c}{e}}, \quad (20)$$

$$T_{\parallel} = \frac{T_c^2}{4eU_0} + \frac{\pi c^3 j L_{\perp} \Lambda}{eU_0} \cdot \sqrt{\frac{m}{T_c}},$$

j —плотность пучка, L_{\perp} —длина системы, Λ —кулоновский логарифм. На рис.10 приведена зависимость $(\delta U)^2$ от смещения ΔU . Приведенные результаты указывают на линейную связь между $(\delta U)^2$, ΔU и током пучка I .

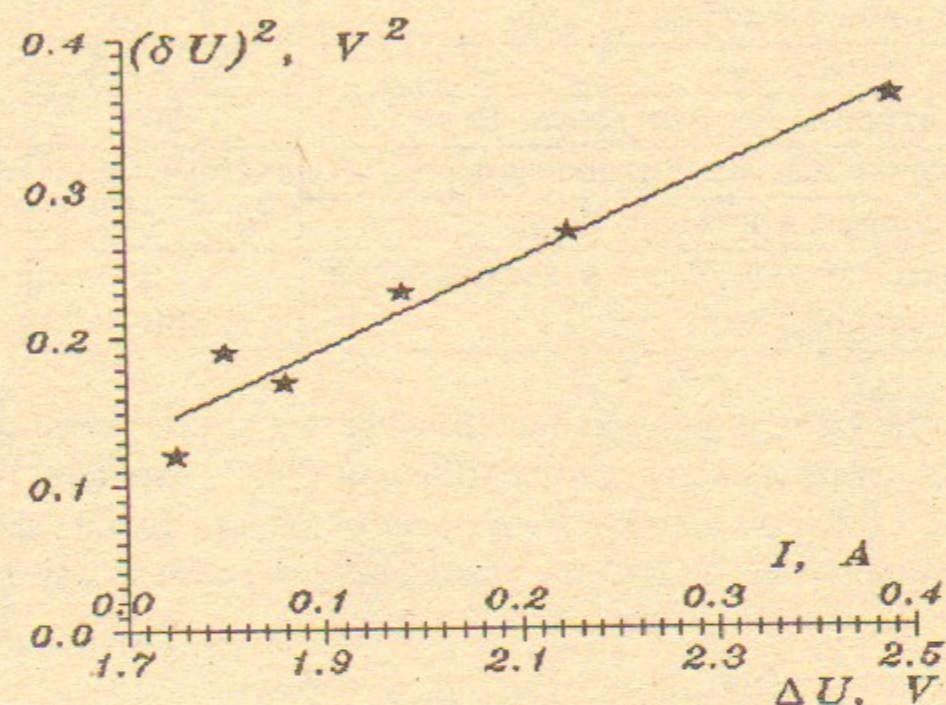


Рис. 10. Зависимость энергетического разброса электронов от тока пучка I и смещения максимума дифференциальной функции распределения.

8. ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР

Оптический анализатор (рис.3) позволяет измерять поперечную энергию электронов по величине их поперечного ларморовского радиуса. Анализ поперечной энергии электронов проведен для двух типов пушек: новой пушки LEAR и пушки ФТЦ, созданной для этих экспериментов. Эксперименты проведены в импульсном режиме работы пушек с параметрами, приведенными в таблице 4. Метод измерения заключается в следующем.

При скорости электронов v_0 , такой что на расстоянии d от вырезающей диафрагмы до экрана укладывается целое число циклотронных длин волн

$$d = 2\pi n \rho_0, \quad \rho = v_0/\omega_H \quad n = 1, 2, 3... \quad (21)$$

Таблица 4.

Основные параметры экспериментов с оптическим анализатором

Энергия электронов, кэВ	2 – 18
Ток пучка, А	0.2 – 2.5
Длительность импульса, мсек	50
Продольное магнитное поле, Гс	150 – 700
Давление в камере, Торр	$10^{-7} - 10^{-6}$
Диаметр отверстия в вырезающей диафрагме, мкм	30

изображение отверстия в вырезающей диафрагме без искажения переносится электронами на люминесцентный экран ("фокусировка") (рис.11). При изменении скорости электрона до величины v_1 , такой что на расстоянии d укладывается полуцелое число циклотронных длин волн

$$d = 2\pi \left(n + \frac{1}{2} \right) \rho_1, \quad \rho_1 = v_1 / \omega_H, \quad (22)$$

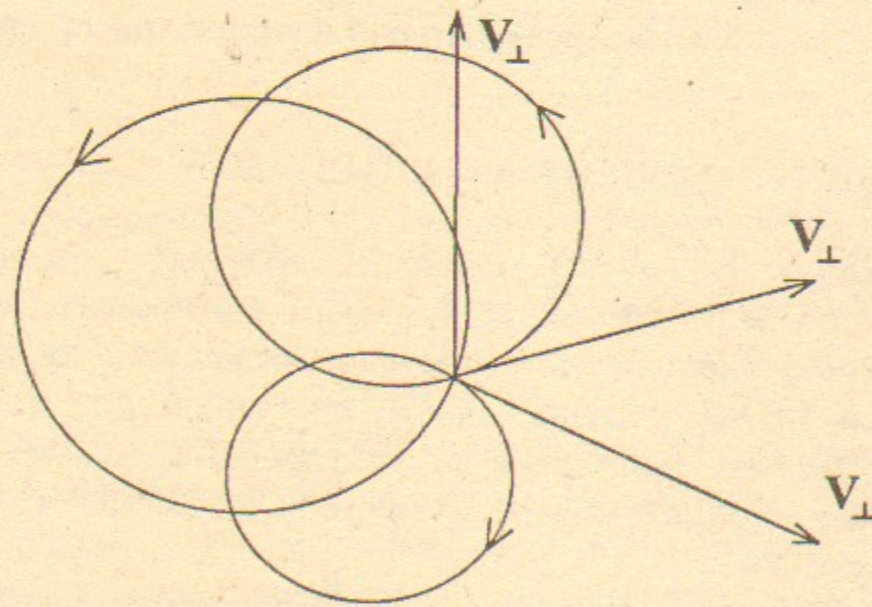


Рис. 11. Оптическое изображение в режиме фокусировки.

$$d = 2\pi n \rho_0$$

$$\rho_0 = \frac{v_0}{\omega_n}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \omega_n = \frac{eH}{mc}$$

на экране наблюдается пятно, смещенное относительно оси изображения, максимального размера ("дефокусировка") (рис.12). Амплитуда смещения пятна b позволяет определить поперечную скорость и угол θ , связанные с оптикой пушки,

$$\theta = \frac{v_{\perp}}{v} = \frac{b}{2\rho_1}, \quad (23)$$

где v — продольная скорость электрона.

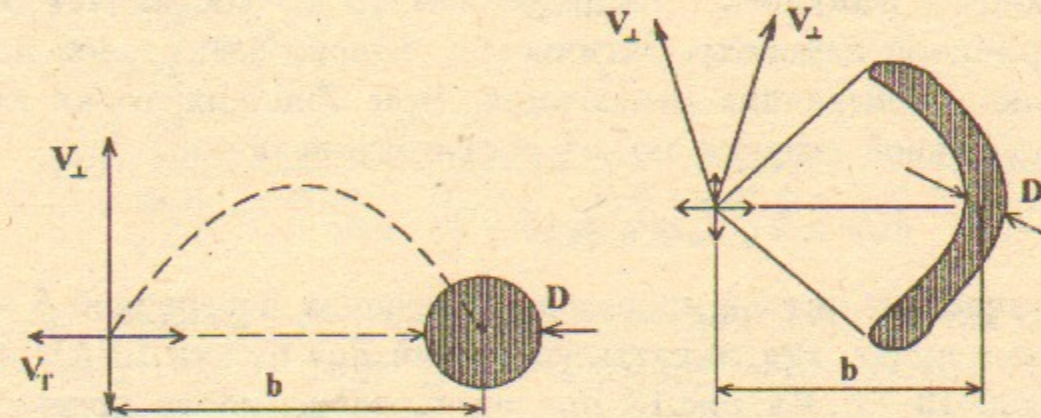


Рис. 12а. Высокая когерентность. Рис. 12б. Низкая когерентность.

Для выделения угловых характеристик пучка исследована зависимость θ от радиальной координаты электронов. В измерениях это достигалось сканированием основного пучка по вырезающей диафрагме. По результатам измерений находилась поперечная энергия электронов

$$\epsilon_{\perp}(r) = eU_0\theta^2(r), \quad (24)$$

где eU_0 — энергия электронов пучка.

Размеры и форма пятна при дефокусировке определяется лармовским радиусом ρ_1 и когерентностью фазы, которую приобретает электрон на расстоянии L_2 от катода до вырезающей диафрагмы,

$$\varphi = \omega L_2 / v.$$

Как показали эксперименты, при малых токах пучка фаза электронов φ когерентна. В режиме дефокусировки пятно имеет круглую форму, смещенное относительно положения фокуса (рис.12а). Его диаметр D определяется тепловыми скоростями. Некогерентный угловой разброс $\delta\theta$ может быть определен из соотношения

$$\delta\theta = \frac{D - h}{4\rho_1}, \quad (25)$$

где h —диаметр отверстия в вырезающей диафрагме, $h \approx 0.06$ мм. При увеличении тока пучка во время ускоряющего импульса фаза электронов φ на вырезающей диафрагме не является строго когерентной. В результате происходит расплывание светящегося пятна, и оно приобретает форму "банана" (рис.126). Одной из причин, приводящей к изменению фазы во время ускоряющего импульса, является уменьшение напряжения на катоде вследствие разрядки емкости катодного источника. При токе пучка 1А немонохроматичность энергии электронов во время ускоряющего импульса с напряжением 10 кВ составляет около 1%. Другой причиной немонохроматичности энергии электронов может быть продольно - поперечная релаксация. При больших токах пучка разброс по продольной энергии может достигать величины δU_0

$$\delta U_0 \approx 2\sqrt{T_c e U_0} \approx 10 \div 30 \text{ эВ.}$$

На основе оптического метода проведены измерения поперечной энергии электронов в пучке. Результаты измерений для пушки LEAR представлены на рис.13-14. На рис.13 приведена зависимость поперечной энергии от радиуса траектории электронов при различных токах пучка.

Как видно из рис.13, существует некоторый уровень поперечной энергии $\epsilon_{\perp} \approx 0.5 \div 1 \text{ эВ}$ для приосевых электронов. Его наличие не

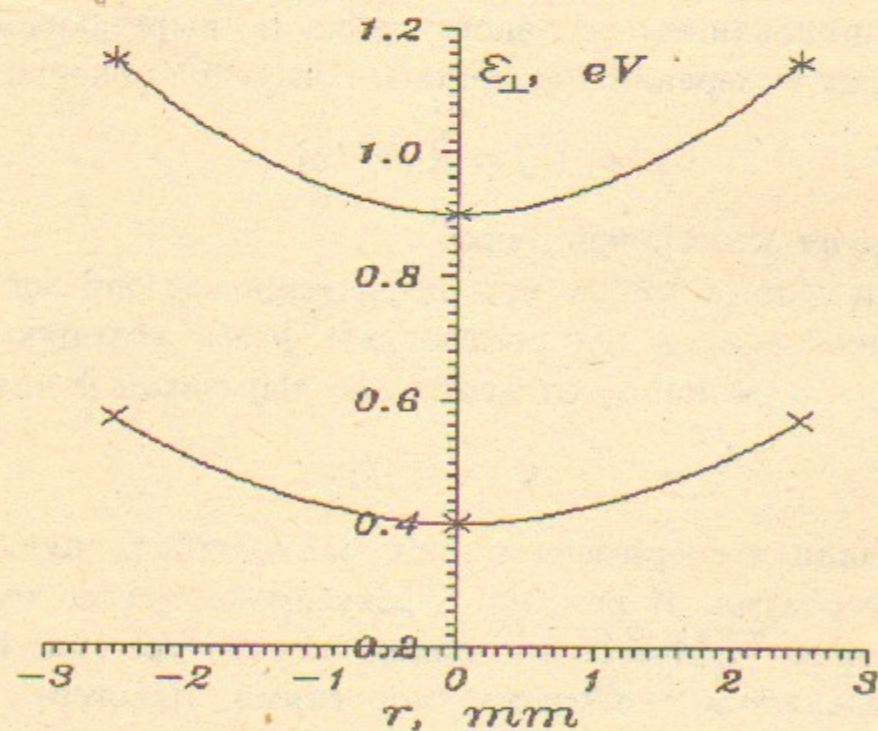


Рис. 13. Зависимость поперечной энергии электронов от радиальной координаты для пушки LEAR $\epsilon_0 = 5.7$ кэВ, $H = 600$ Гс; \times — $I = 1$ А, \star — $I = 1.5$ А.

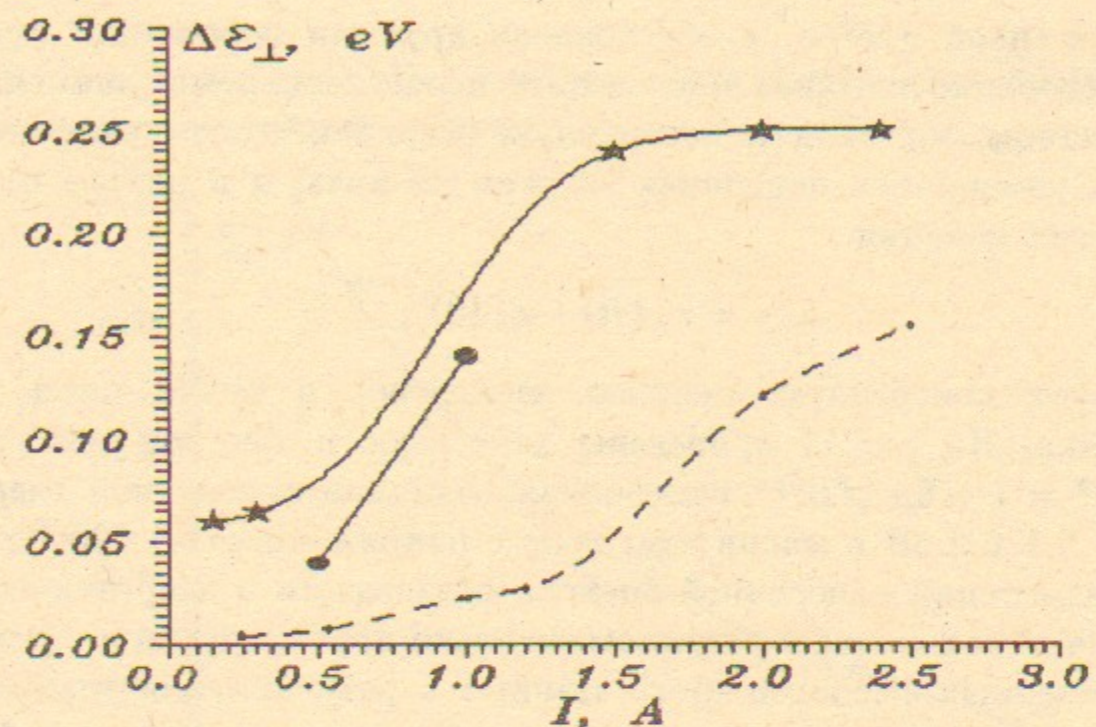


Рис. 14. Зависимость разности поперечной энергии для осевых и краевых электронов от тока пучка, формируемого пушкой LEAR. эксперимент \star — $\epsilon_0 = 5.7$ кэВ, $H = 600$ Гс, \bullet — $\epsilon_0 = 13$ кэВ, $H = 600$ Гс, расчет --- $\epsilon_0 = 5.7$ кэВ, $H = 600$ Гс.

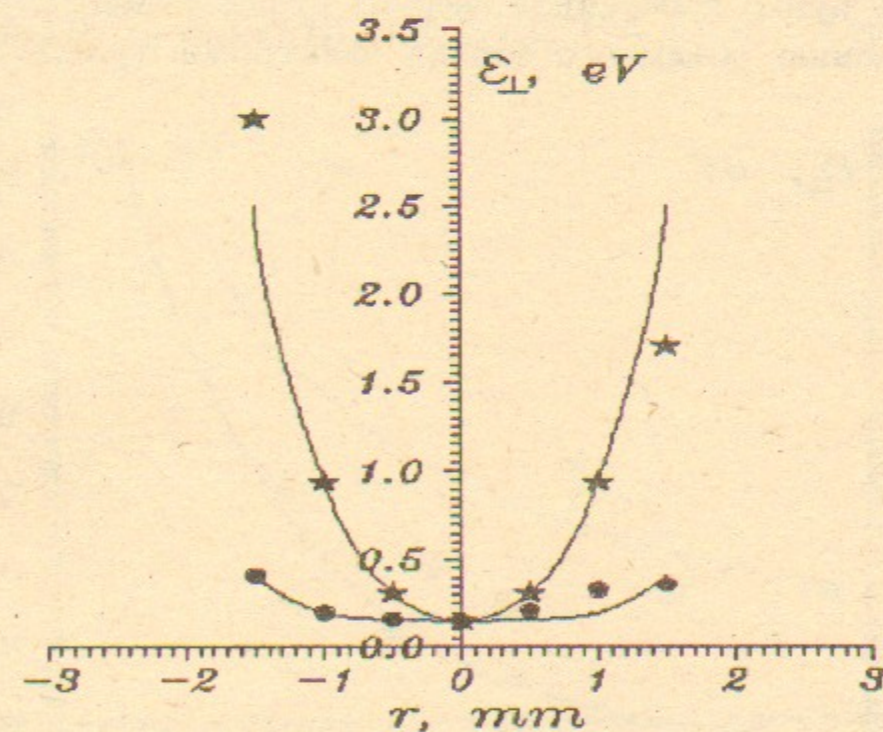


Рис. 15. Зависимость когерентной поперечной энергии от радиальной координаты электронов для пушки ФТЦ. $H = 450$ Гс, $\epsilon_0 = 6.9$ кэВ; \bullet — $I = 0.3$ А, \star — $I = 0.5$ А.

связано с оптикой пушки, а обусловлено другими побочными эффектами, исследование которых проведено с использованием пушки ФТЦ. Для того чтобы определить поперечную энергию, связанную с оптикой пушки, измерялись поперечная энергия на краю и в центре пучка. Разность этих величин

$$\Delta \epsilon_{\perp} = \epsilon_{\perp}(R) - \epsilon_{\perp}(0), \quad (26)$$

характеризует поперечную энергию электронов в пучке, здесь R — радиус пучка. На рис.14 приведены зависимости $\Delta \epsilon_{\perp}$ от тока пучка. Для $\mu P = 1 \div 5 \mu A / B^{3/2}$ измеренная величина поперечной энергии составляет 0.1–0.3 эВ в магнитном поле с напряженностью 600 Гс. Результаты измерений поперечной энергии оптическим и энергетическим анализаторами находятся в разумном согласии друг с другом и с результатами численных расчетов [6–7]. Данные с результатами измерений поперечной энергии электронов в пучках, формируемых пушкой ФТЦ, представлены на рис.15–16. На рис.15 приведена зависимость поперечной энергии от радиальной координаты для различных значений тока пучка. Поперечная энергия квадратично растет с радиусом траектории электронов, что соответствует параксиальному приближению (рис.15). С ростом тока пучка поперечная энергия существенно возрастает благодаря увеличению объемного заряда электронов (рис.16). Снижение

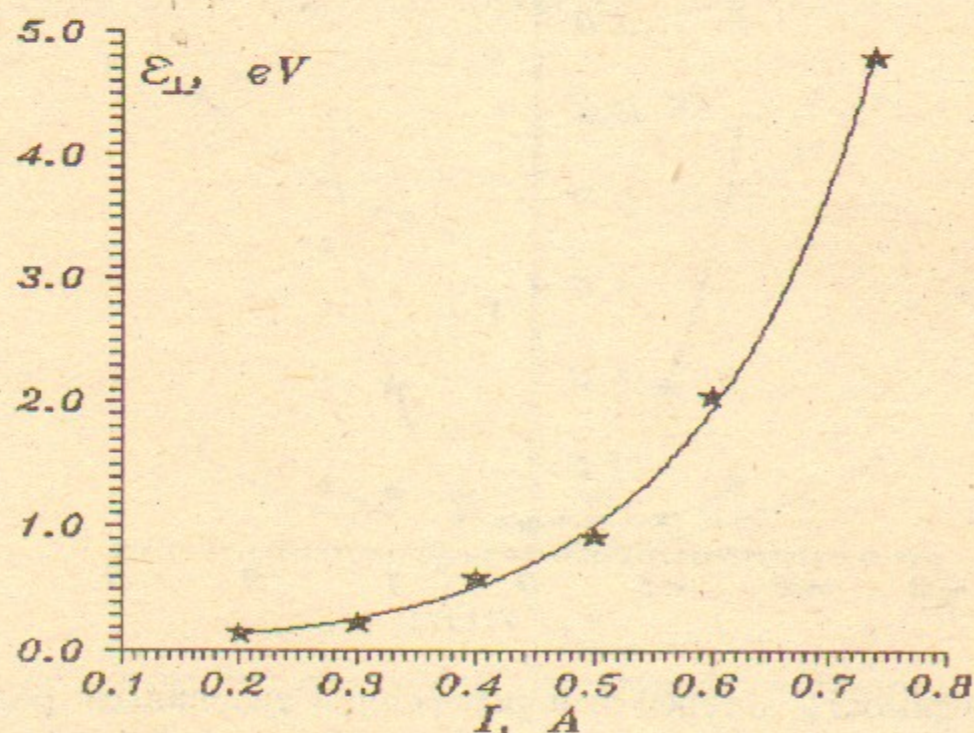


Рис. 16. Зависимость поперечной энергии электронов пучка, формируемого пушкой ФТЦ от тока пучка : $\epsilon_0 = 6.9$ кэВ, $H = 450$ Гс, $P = 7 - 8 \cdot 10^{-7}$ Торр, $r = 1$ см.

магнитного поля (рис.17) и энергии электронов (рис.18) приводит к увеличению поперечной энергии.

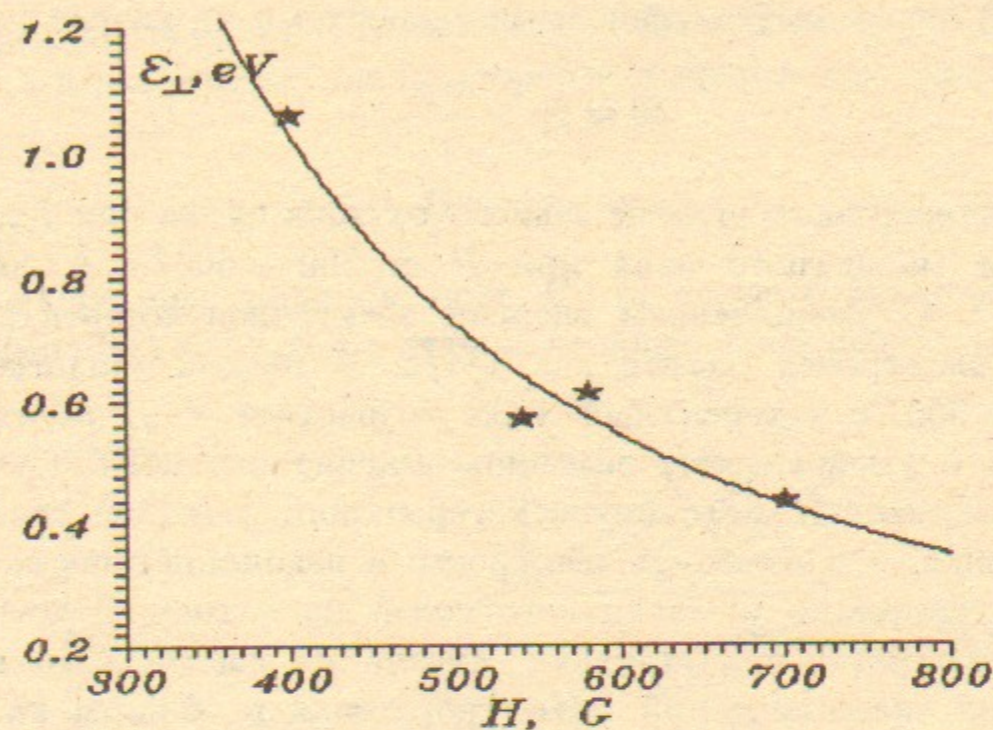


Рис. 17. Зависимость поперечной энергии от величины магнитного поля для пушки ФТЦ: $\epsilon_0 = 6.9$ кэВ, $I = 0.5$ А; $P = 8 \cdot 10^{-7}$ Торр, $r = 1$ см.

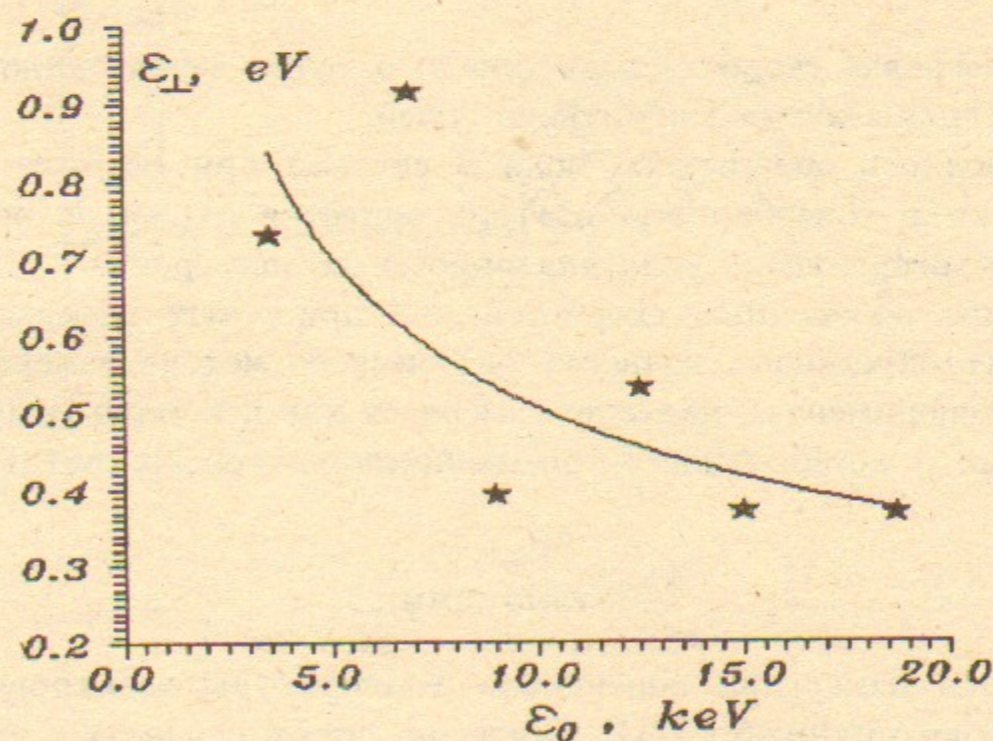


Рис. 18. Зависимость поперечной энергии от энергии электронов для пушки ФТЦ: $I = 0.5$ А, $H = 450$ Гс; $P = 5 - 8 \cdot 10^{-7}$ Торр, $r = 1$ см.

Детальный анализ по измерению когерентной поперечной скорости и их углового разброса проведены для приосевых электронов. Их угловой разброс (25) определяется тепловыми скоростями на катоде v_T

$$\delta\theta \approx \theta_T = \frac{v_T}{v}, \quad (27)$$

Величина когерентного угла не зависит от тока пучка при $I \simeq 0.2 \div 1A$ и величины магнитного поля при $H \simeq 300 \div 600 Гс$ и составляет $\theta \simeq 5 \cdot 10^{-3}$. С уменьшением энергии электронов когерентный угол приосевых электронов растет как $\sqrt{1/\epsilon}$. В низком магнитном поле $H \simeq 100 \div 300 Гс$ когерентный угол возрастает с увеличением тока пучка и с уменьшением величины магнитного поля. Существует несколько возможных источников когерентного угла, не связанных с оптикой пушки: это перекосы электродов и неколлинеарность силовых линий электрического и магнитного полей на катоде. В конструкции катода пушки ФТЦ присутствуют детали из ковара. Это приводит к искажению силовых линий магнитного поля в области катода и к появлению когерентного угла

$$\theta_0 = \frac{2v_d}{v} \cdot \frac{\rho}{a} \cdot \sin\alpha, \quad (28)$$

где v_d —дрейфовая скорость электронов, α —угол между силовыми линиями электрического и магнитного полей.

Неоднородность магнитного поля в системе при переходе из соленоида пушки в соленоид анализатора является одним из возможных источников когерентного угла для приосевых электронов.

Измерение поперечных скоростей для приосевых электронов дает возможность определить точность оптического метода измерения. Как показали эксперименты, надежно измеряется как некогерентный угловой разброс, так и когерентный угол, величина которого составляет $\theta \geq 2 \div 3 \cdot 10^{-3}$.

Заключение

Проведены измерения поперечной температуры электронов пучка, сформированного пушкой LEAR. Показано, что в режимах с первеансом $1 \div 5 \mu A/B^{3/2}$ она составляет $0.1 - 0.3 эВ$ при $H \simeq 600 Гс$ и $0.3 - 1 эВ$ при $H \simeq 450 Гс$.

Исследованы возможности использования энергетического и оптического анализаторов для измерения поперечной энергии и разброса

продольной энергии электронов в интенсивных высокоэнергетических пучках. Показано, что могут быть измерены как когерентный угол, так и угловой разброс, величины которых составляют $\theta \geq 2 \div 3 \cdot 10^{-3}$.

Авторы благодарны В.А.Голубеву, В.Н.Мозгунову, М.А.Протасову за помощь в разработке анализаторов и в проведении экспериментов.

9. Приложение

Поперечное электрическое поле E_{\perp} на входе в анализирующее отверстие (рис.П1) является источником поперечной скорости электронов [7]

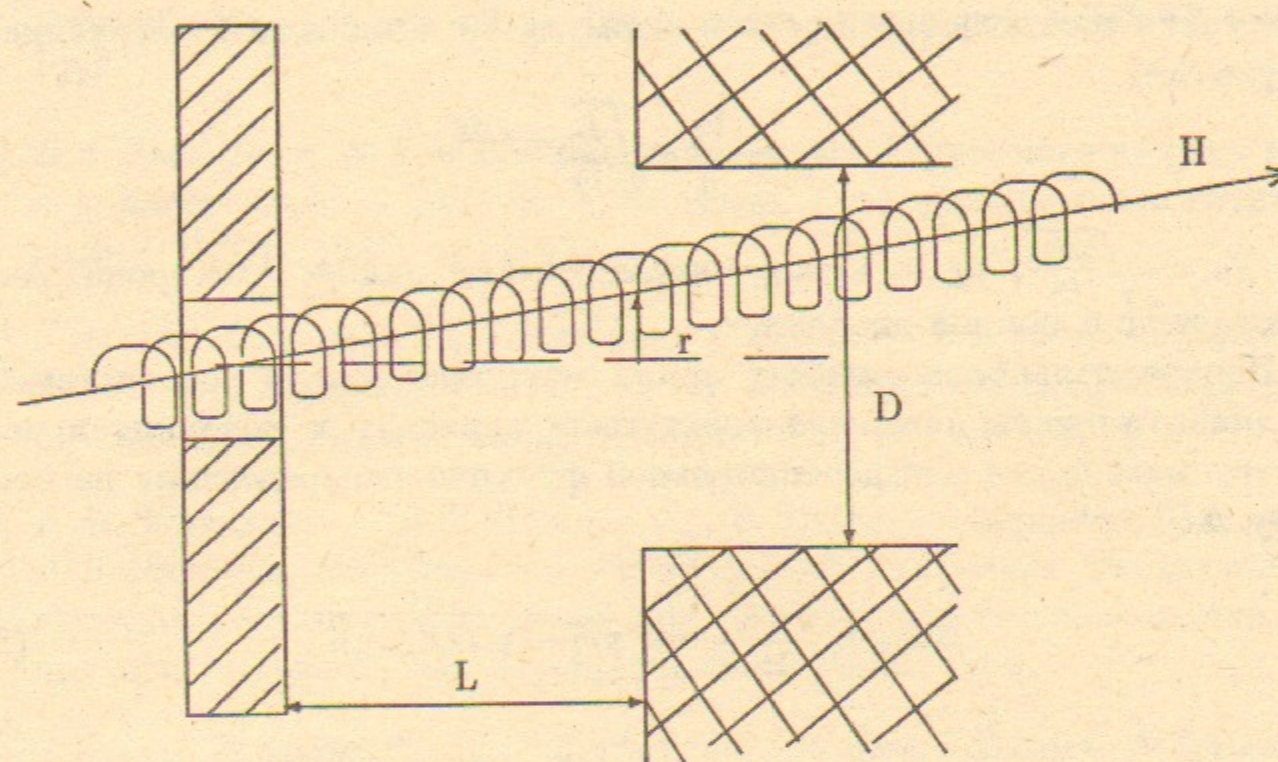


Рис. П1. Геометрия анализатора энергии.

$$V_{\perp} = \int \frac{e}{m} E_{\perp} \frac{dz'}{V_{\parallel}} e^{i \int_0^z \frac{\omega H dz''}{V_{\parallel A}}} \simeq \frac{e E_{\perp}}{m} \cdot \frac{D}{V_{\parallel A}} \cdot e^{-\frac{\omega H D}{V_{\parallel A}}} \quad (29)$$

где

$$E_{\perp} = \frac{r}{2} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial z} \simeq \frac{r}{2D} \cdot \frac{U_0}{L} \quad (30)$$

L —расстояние между вырезающей и анализирующей диафрагмами, D —диаметр отверстия в анализирующей диафрагме, r —радиус траектории электрона относительно оси анализирующего отверстия, U_0 —потенциал катода. Непараллельность силовых линий магнитного поля оси системы приводит к смещению электрона на величину

$$r = L\alpha \quad (31)$$

Скорость электрона на входе в анализатор определяется соотношением

$$\frac{mV_{||A}^2}{2} \simeq e\varphi_A \simeq \frac{eU_0}{L} \cdot D \quad (32)$$

Подставив соотношения 30, 32 в формулу 29, приходим к следующему результату

$$V_{\perp} \simeq \frac{V_0}{4}\alpha \sqrt{\frac{L}{D}} e^{-\frac{\sqrt{DL}}{\rho_L}} \quad (33)$$

где $V_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$, $\rho_L = V_0/\omega_H$ —ларморовский радиус электрона, соответствующий полной энергии.

Непараллельность силовых линий магнитного поля оси системы и неадиабатичность движения электронов приводят к дополнительному сдвигу максимума дифференциальной функции распределения на величину ΔU_{α} , равную

$$\Delta U_{\alpha} \simeq \frac{U_0\alpha^2}{10} \cdot \frac{L}{D} \exp[-2\sqrt{DL}/\rho_L]. \quad (34)$$

Список литературы

- [1] Г.И.Будкер, А.Н.Скринский. Электронное охлаждение и новые возможности в физике элементарных частиц. УФН, 1978, N124, с.561.
- [2] В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, Р.А.Салимов. Формирование интенсивного электронного пучка в продольном магнитном поле. ЖТФ, 1971, т.41, N11, с.2294.
- [3] H.Poth. Theory, experiment, application. CERN - EP, 90-04 (1990).
- [4] Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен, В.А.Лебедев и др. Предельные возможности электронного охлаждения. Препринт ИЯФ 88 - 61, 1988.
- [5] В.А.Лебедев, А.Н.Шарана. Формирование электронного пучка с малой поперечной скоростью в системах с продольным магнитным полем. ЖТФ, 1987, N5, с.975.
- [6] J.Bosser, G.Tranquille, I.Meshkov, V.Poljakov, I.Selesnev, E.Syresin, A.Smirnov, A.Zapunjako. Project for a variable current electron gun for the LEAR electron cooler. CERN/PS 92-03 (AR), 1992.
- [7] А.М.Запуляко, И.Н.Мешков, В.Н.Поляков, И.А.Селезнев, А.В.Смирнов, Е.М.Сырессин, Ж.Боссер, Ж.Транквиль. Электронная пушка с регулируемым током для системы электронного охлаждения накопителя LEAR. Препринт ИЯФ 92-40, 1992.
- [8] J.Bosser, R.Lapic, R.Ley, I.Meshkov, V.Poljakov, I.Selsnev, A.Smirnov, E.Syresin, G.Tranquille, A.Zapunjako. The first result of electron cooling at LEAR with the variable current electron gun. CERN/PS 93-41 (AR) Workshop on beam cooling and related topics. 1993, Montreux, Switzerland.
- [9] В.П.Гинкин, И.Н.Мешков, А.Н.Скринский, В.Г.Файнштейн. ПТЭ, N6, стр.26, 1972.