

# Оглавление

Интегралл энергии .....	2
Нормальные пучки .....	2
Движение в слабых неоднородных полях .....	2
Уравнение Лагранжа для движения заряженных частиц в э/м поле .....	3
Теорема Буша .....	3
Критический режим работы магнитрона .....	3
Инвариант пуанкаре .....	4
Адиабатическая потеря в магнетронной инжекторной пушке .....	4
Электронно-оптический коэфф. преломления .....	4
Преломление электронных траекторий на границе сред .....	5
Магнитная линза .....	5
Уравнение параксиальных траекторий в эл-стат поле. Классификация эл-стат линз .....	6
Расчет тонкой иммерсионной линзы .....	6
Теория сильных(толстых) иммерсионных линз .....	6
Линзы-диафрагмы .....	7
Фокусное расстояние тонкой линзы-диафрагмы .....	7
Анодное отверстие как рассеивающая линза-диафрагма .....	7
Иммерсиальный объектив .....	7
Прожекторы электронно-лучевых трубок (эл-ные прожекторы) .....	8
Электронно-лучевая технология .....	8
Ур-е параксиальных траекторий в магнитном поле .....	8
Сравнение магн. линз и эл-стат .....	8
Классификация магнитных линз .....	9
Аберрации электронных линз .....	9
Электронные микроскопы .....	10
Эл. микроскопы просвечивающего типа .....	10
Проекционные микроскопы .....	10
Другие эл-ты эл-но оптич. теории .....	10
Электронные зеркала .....	10
Электронный зеркальный микроскоп .....	11
Квадруальные линзы .....	11
Система фокусировки .....	11
Система центробежной эл/стат фокусировки .....	11
Формирование интенсивных электронных пучков .....	11
Плоский идеализированный диод .....	12
Формирование ленточных пучков .....	12
Предельный ток транспортировки .....	12
Система рекуперации энергии .....	13

# Раздел 1

## Электронная оптика

1

### Интеграл энергии

Все  $\gamma$ -кванты, которые формируются пучком - кванты со стат. поведением.  
При движении в эл-стат. поле интеграл энергии  
сохраняется  $m\gamma^2 - e\phi = W = \text{const}$ .

### Нормальные пучки

Опр Нормальный пучок - пучок, у которого средняя скорость  
составляет единичной ф-ей потенциала

Типы пучков:  $e\phi \ll m\gamma^2 c^2$  - нерелятивистские.

$e\phi \sim m\gamma^2 c^2$  - релят. пучки.

$e\phi \gg m\gamma^2 c^2$  - ультрарелят.

### Движение в слабых неоднородных полях

Решение поле всегда неоднородно. Если слабонесодн., то  
движение  $\gamma$  похоже на движение в однородн. поле.

Характерной временной шкалой - это циклотрон-  
ный период  $T_c = 2\pi / \omega_c$ .

Условие слабодн. неодн.:  $T_c \left| \frac{dF_i}{dt} \right| \ll F_i$

↖ в координ. электр.  
или магн. поле.

↖  $F_i$

Опр Слабонесодн. поле - это поле, масштаб которого  $\ll r_L$   
или  $\lambda_{De}$

Это адиабатич. поле.

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2/c^2}}$$

↖ радиус  
Лармора

Слабонесодн., если  $\beta \ll 10^5$

Сильнонесодн., если  $\beta \geq 10^5$

Для описания медленных ф-й можно использовать усреднения.



Ур-е Лагранжа для обобщенных координат в д/м поле. [2]

Система ур-й Лагранжа описывает движение  
 1-ой  $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad \dot{q}_i = \frac{dq_i}{dt}$

$F_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = p_i \quad L = T^{\text{кин}} - U^{\text{пот}}$   
 каноническая обобщенная сила

Из ур-я Лагранжа можно получить ур-е Ньютона для обобщ. координат и обобщ. силы.

### Теорема Бунда

Если аксиально-симм. с-ма статич. поле  
 хотим узнать угловое экваториальное  $\dot{\varphi}$  в этом поле.

$\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_k \frac{\chi_k^2}{\chi^2} + \frac{\chi(\varphi - \varphi_k)}{2\pi\chi^2}$   
 справедлива всегда.

$\Rightarrow \dot{\varphi} = \frac{\chi(\varphi - \varphi_k)}{2\pi\chi^2}$

### Критический режим работы магнитрона

Какие режимы работы магнитрона существуют?

По радиусу

$B = B_0 = 0$

До критич. режима

$B = B_0 \neq 0$

(неинтегральный)

Критический режим

Траектория касания

б. число аргументов

и в конце

закритический режим

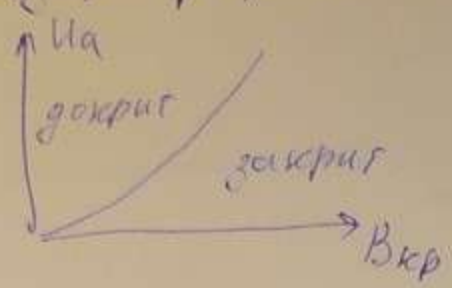
траектория похожа на

уникальную, но

это не так для и для

не обр-но замкнута.

Если угол графика, то наработка:



Рабочий режим манетрона это когда.  
закритический режим  $\Rightarrow$  экстремное  
облако очень мощное, возникают колебания.

### Минвариант Жуанкере.

$\oint \vec{p} d\vec{r} = const.$   
2 (интеграл?)

### Адиабатическая теория в манетронной инжекторной пушке.

Эта пушка применяется в ускорителях. (в тундре,  
кернелинге)

Цель - сфокусировать ил. пучок, выходящий  
из сбр.



### Экстремно-адиабатический ускор. принцип.

- Свойства:
- ①  $B \neq 0$  - среда анизотропная  
 $B = 0$  - среда изотропная
  - ② Если  $B = 0$   $V_0 = 0$  (начальная скорость)  
то траектории не зависят от  
заряда и массы частиц.
  - ③  $B = 0$ ,  $V_0 = 0$ , то пушки в поперечном  
во всех т-ках в к рцу поперечной  
ту же траекторию



④ Если  $U_0 = 0$  и  $\frac{U}{B^2} = \text{const}$  (если так изменить направление [4] и магн. поле), то оптим. траектория не изменится

### Применение электронных траекторий на границе сред

Электронная траектория ведет себя на границе 2х сред так же, как оптический луч (преимущественно так же)

#### Недостатки

1. Различные изображения (т.к. луч сетками пока будет неоднородное)
2. Оптим. если  $\sim (U_2 - U_1) \Rightarrow$  наступит пробой
3. Перехват (сетка не идеальна, с конечной толщиной, часть луча пойдет на сетку, будет ее гресть)

### Минимальная линза

① В-лучи в боч. электрич. поле  
все лучи из  $A_1$  идут в  $B_1$ , из  $A_2$  в  $B_2$

②  $A_1, A_2$  по отношению  $B_1, B_2$

Правильное изображение - то, когда объект обладает

Не в луче можно использовать для  
посредства изображения!

Луч должен быть параксимальным  
т.е. тонким и с малыми углами.



Уравнение параксиальных траекторий  
в оптической системе  
ФН - есть линза.

5

Чтобы была линза поле должно быть неоднородным!!!  
Если поле однородное, луч не отклоняется

- ① Линза в оп. сист. неиз. единичная линза ( $E=0$ )
- ②  $E=\text{const}$  линза-диафрагма.
- ③ линейно-инвариантная объектив.

Все линзы с ограниченной областью поле-собирающей  
Но есть редкий случай, когда линза рассеивающая

Рассеивающая линза

Опр. Линза называется рассеивающей, если радиальное  
поперечное смещение луча внутри нее меньше нуля.  
 $|z_1 - z_2| \ll f$  - фокусное расстояние

Теория сильных (толстых)  
линейно-инвариантных линз

Опр. Сильная линза - линза, в которой  
луч сильно отклоняется.

Опр. Фокус пр-ва изображений (точка, где пересекаются  
все обратные лучи из пр-ва изображений)

Опр. Главное переднее и заднее фокусные расстояния  
и главная плоскость - главная ось  
пересекаются в одной плоскости - главной оптич. осью

В толстых линзах фокусное расстояние - это  
расст. от фокуса до главной плоскости, а  
не до середины линзы!!!



## Линзы-диафрагмы.

[6]

1. Линза будет рассеивающей.  
2. Точка  $F$  в задере - сегнотва.



## Фокусное расстояние точки линзы-диафрагмы

Спр

Точки фокуса линзы-диафрагмы - это точка, где касательная к гиперболам на выходе линзы пересекает оптич. ось.

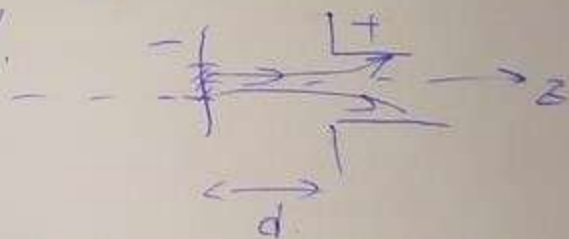
Линза диафрагмы м.б. и рассеивающей  
и собирающей

если  $f_v > 0$  - собир.  
 $f_v < 0$  - расс.

$$f_v = \frac{4U_p}{E_a - E_v}$$

## Относное отверстие как рассеивающая линза-диафрагма

Фокусное расст.  $f_v = -4f$ .



## Шмерсонский объектив

У нас сегнотва точки  $U_m < U_k, U_a$   
и  $U_m$

В начале на всем диапазоне было тортирующее поле, а теперь эквипотенциальными радиусами, поле  $E$  стало ускоряющим, поле  $U_k$  ток.

Линза собирающая, т.к. собирающая

ур-еи параксиальн. часть сближает пучок. нельзя!



Начиная с плоскости  $d$  (мгновенной тангенциальной плоскостью) можно пользоваться параксимальными приближениями

7

Проектора фокусировки  
лучевых пучков (он-носе проекторы).

Кроссовер - область, где пучок почти соприкасается в точку.

Фокусировка-сфокусировка  
технология

Мощность минимальная, а плотность мощности сфокусированная  $\Rightarrow$  меньше размах отклонений пучка и т.д.

Ур-е параксимальных  
траекторий в магнитном  
поле.

$$\begin{cases} \varphi' = \sqrt{\frac{1}{8H}} B_z \\ \frac{d^2\varphi}{dz^2} + \frac{1}{8H} B_z^2 \varphi = 0 \end{cases}$$

① 2-ое ур-е даёт поворот фазы.  
② 1-ое ур-е в области фокусировки (онки-траекторно)

③  $\frac{d^2\varphi}{dz^2} < 0 \Rightarrow$  линза собирающая

④ Свойство фокусировки не зависит от знака  $H$  и  $B_z$  (т.к. входит  $B_z^2$ )

⑤ Если  $\frac{B_z^2}{c^2}$  - константа, то ур-е не меняется

Сравнение магн. линз и  
он-стат.

1) В он-стат. линзах нужна для сильного пучка большая разность потенциалов  $\Rightarrow$  пробой.

2) В он-стат. фокусировке надо помещать в вакуум.

3) В магн. не обратимую.

Итого: сила (1) магн.  $>$  он-стат.



## Классификация оптических линз

8

- а)  $f_0 \gg |z_2 - z_1| \Rightarrow$  тонкая (плотная)
- б)  $f_0 \approx |z_2 - z_1| \Rightarrow$  толстая (сильная)
- в)  $f_0 \ll |z_2 - z_1| \Rightarrow$  длинная.

## Аберрации оптических линз

Аберрации - искажение изображения.

Хроматическая: а) темп скорости

б) в разн. моч.  $f$   $\bar{f}$  разная энергия

в) на выходе разные скорости

Абер. попер. прелом. зарядов

В области, куда сходится все  $\bar{f}$  возникает  
сильная кулоновская пом. Она  
отклоняет траектории.

Геометрическая

примеч.: - нарушение аксиальной симметрии  
и можно убрать

- нарушение параксиальности

Есть всегда, не убрать

Основные виды аберраций:

сферическая, астигматизм, кома,  
дисторсия, кривизна поля изображения

## Электронные микроскопы

Эмиссионный, просвечивающий, отражательный, растровый, проекционный

### Э. микроскоп просвечивающего типа

Принцип: темная точка, вокруг светное поле. Точка с неоднородностью. Там где тонкая часть  $E$  просвечивает  $E$  насквозь, а не утолщением происходит рассеяние.

Но оно не контрастное, лучше на темном фоне светится точка.

Где aberrация больше? В темнопольном, т.к.

- ① лучи больше (еще более нарушена симметрия углов)
- ② рассеяние связано с потерей энергии, в темнопольном почти все  $\Rightarrow$  происходит аб-ция

## Отражательный микроскоп

### Проекционные микроскопы

- ① автоэлектронный
- ② автолюминесцентный

## Другие эл-тоскопические оптич. теории

### Электронное зеркало

Создается область, где потенциал отрицательный, тогда  $e^-$  всегда с каждой стороны отражается от этой области и не идет назад.



## Электронный державный микроскоп [40]

Отражение происходит вблизи пов-ти  $\epsilon$  либо вблизи нафад перед диафрагмой, либо вблизи на экране (сигнал как направи. нормаль по сравнению с  $\epsilon$ )

### Квадратные микроскопы

Продольного пучка нет, оно смотрит поперек пучка. Радиальные отв. за фокусир.  
Матрица: статическая нет  $\Rightarrow$  точка превращ. в линию.

### Система фокусировки

Это в-ва, которая обеспечивает нам заданную ф-цу пучка

Аппарат принимает ф-цу макс. сигнала и миним. какую миним. делаем, делаем и пучок

### Система центростремительной системы фокусировки (УЗФ)

Подбираем пар-ры пучка так, чтобы  $F_p \approx F_E$   
тогда он движется с постоянной радиусом вблизи оси  $z$

### Резонирование интенсивности электронных пучков

Опр. Интенсивный эл. пучок - у ком. собствен. кулоновское поле пучка  $\approx$  поле электронов.

Когда нельзя пренебречь собств. полем пучка? Когда матрица релятивистская



## Плоский идеализированный диод:

11

Решение задачи: Дретины теория ограниченного эмиссии

а) решены ограниченного тока  
простр. зарядов  
(если ток зав. от темп. заряд так  
велик, что сами себе ограничивают)

Микроперверанс - по этой величине вычисляются  
интенсивность пучка  
перверанс  $\cdot 10^{-6}$

$P$  маленькое  $\Rightarrow$  слабый пучок

$P$  больш.  $\Rightarrow$  интенсивный пучок

З-н  $3/2$ -х выполняется для  $V$  диода  $P = \frac{I_2}{1/a_2^{3/2}} = \frac{I_1}{1/a_1^{3/2}}$

## Периодический пучок

Периодический пучок - все электроны движутся в одну сторону с одинаковой скоростью

Если замедляем, то форма эквивалентно не меняется

В области минза-дифракции (рассейваю),  
ее действие компенсируется естественным

## Предельный ток транспорта

Любой ли ток можно провести через этот канал транспорта? Нет, да, если пучок может давать ток, через канал можно пропустить  $I \leq I_{max}$

Спр. плоскость виртуальной катода - и-тб, где  $U=0$  и  $E_z=0$ . Дойдя до нее пучок делится на 2, один вперед, второй обратно



## Сист. регенерации энергии

12

Регенерация - возвращение энергии в источник питания

Как повысить КПД приборов?

1) Улучшить взаимодействие пучка и а/м  
и/или (напр. распространение пучка в объеме и т.д.)

2) Регенерация - попытаться исправить  
интенсивность после взаимодействия

Многое случается, чтобы отобрать всю энергию?

1) Разделить э-ны с разной энергией

2) Посадить эти разные фракции на  
разные электроды в таковых пот-щах, чтобы  
забрать у них всю энергию.

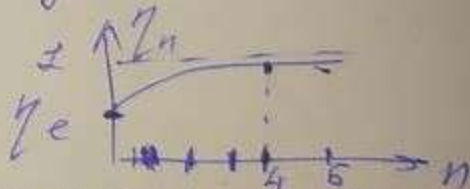
Сколько на самом деле ступенек?  $n \leq 4$

Причины: 1) малое расст. между ступеньками

2) много источников питания

3) трудно сепарировать пучок

4) 
$$\eta_n = 1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i \left( 1 - \frac{\eta_i}{\eta_0} \right)$$



Большее 4 ступенек не имеет смысла

Основная трудность - как разделить пучок в  
пр-ве на отд. фракции.