

Федеральное агентство по образованию
Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ УСКОРИТЕЛЕЙ**

Под ред. Б.Ю. Богдановича

*Рекомендовано УМО "Ядерные физика и технологии"
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2007

УДК 621.384.6(076.5)

ББК 32.85я7

Л 12

Лабораторный практикум по физике ускорителей: *Учебное пособие* / В.К. Баев, В.А. Дворников, А.П. Игнатьев, И.А. Кузьмин, В.М. Лубков, А.В. Нестерович, А.Н. Пучков, В.А. Сенюков, В.В. Яненко; под ред. Б.Ю. Богдановича. – М.: МИФИ, 2007. – 64 с.

Практикум содержит описания четырех лабораторных работ, проводимых на установках Радиационно-ускорительного центра (РУЦ) и Малой ускорительной лаборатории (МУЛ) МИФИ. Цель проведения лабораторного практикума состоит в углубленном изучении студентами теоретических разделов физики и техники ускорителей, практическом освоении работы реального электрофизического комплекса и приобретении навыков работы с такой установкой.

Лабораторные работы предназначены для студентов старших курсов МИФИ, изучающих физику и технику ускорителей, но могут быть полезны и для студентов других вузов и родственных специальностей.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент д-р техн. наук К.Г. Симонов

ISBN 978 5-7262-0844-2 © Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный практикум содержит описания четырех лабораторных работ, проводимых на установках Радиационно-ускорительного центра и Малой ускорительной лаборатории МИФИ. Лабораторные работы и описания подготовлены преподавателями и сотрудниками кафедры "Электрофизические установки", РУЦ и МУЛ МИФИ и предназначены для студентов 4 – 5 курсов, изучающих физику и технику ускорителей.

Цель проведения лабораторного практикума состоит в углубленном изучении студентами теоретических разделов физики и техники ускорителей, ознакомлении их с работой реальной физической установки и приобретении навыков работы с такой установкой. В практикум включены описания лабораторных работ, связанных с изучением работы линейных ускорителей электронов и методов измерения параметров пучка. Одна из работ посвящена изучению устройства и принципа работы классического источника ионов типа "дуоплазматрон". Большое внимание уделено системам ВЧ-питания ускорителей.

Описание лабораторных работ содержит краткое изложение теоретических основ, описание установки и измерительного оборудования, правил работы с ней, порядок выполнения работы, требования к оформлению отчета, контрольные вопросы.

Следует отметить, что данные лабораторные работы проводятся в МИФИ уже более 30 лет. В 1983 г. был выпущен первый лабораторный практикум с описанием работ. Однако за прошедшее время лабораторные работы были значительно модернизированы, введены новые. В рамках Инновационной образовательной программы МИФИ был значительно обновлен парк контрольно-измерительного оборудования, используемого при проведении работ. В связи с этим возникла необходимость подготовки и издания данного лабораторного практикума.

Авторский коллектив благодарит заведующего кафедрой ЭФУ члена-корреспондента РАН А.Н. Диденко, научного руководителя МУЛ доцента И.С. Щедрина, сотрудников кафедры ЭФУ доцента М.В. Лалаяна и доцента С.М. Полозова, сотрудников РУЦ А.А. Макарова и С.В. Острикова за помощь в подготовке к изданию лабораторного практикума.

Работа 1

СИСТЕМА ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ СВЧ-ВОЛНЫ С НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Цель: ознакомление с принципом устройства одной из систем повышения мощности импульсного СВЧ-питания линейного ускорителя электронов с помощью накопления энергии, исследование характеристик системы и приобретение навыков в работе с соответствующей радиоэлектронной аппаратурой.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Использование линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) в производстве и научных исследованиях определяется их технико-экономическими показателями (стоимостью, экономичностью и т.п.). Эти показатели, в частности, определяются стоимостью системы СВЧ-питания, которая составляет заметную часть стоимости всего ускорителя, доходящую в ряде случаев до половины общей стоимости. По этой причине перспективным является применение специальных систем, которые не имеют активных элементов (генераторов, усилителей) и позволяют повышать импульсную мощность СВЧ-волны. Использование таких систем дает возможность получить ускоренный пучок с большей энергией или применять менее мощные источники СВЧ-мощности для достижения той же энергии ускоренного пучка. В обоих случаях достигается вполне ощутимый экономический эффект, который может составлять значительную долю от стоимости ускорителя с традиционными системами питания.

Кроме получения чисто экономического эффекта, применение систем повышения мощности СВЧ-волны может оказаться практически единственным возможным способом достижения необходимого уровня мощности ускоряющей СВЧ-волны. Так, при создании

линейных коллайдеров на энергию порядка 2×1 ТэВ в проектах, которых в настоящее время разрабатываются в нашей стране, США, Японии и в ряде других стран, предполагается использовать системы повышения мощности СВЧ-волны для достижения требуемого темпа ускорения. Он должен составлять не менее 100 МэВ/м, чтобы линейные размеры установки не превышали разумных пределов. Однако даже в этом случае общая длина установки составит более 20 км. Потребуется источники СВЧ-питания, обеспечивающие уровень мощности около 150 – 200 МВт/м. Это означает, что, если ускоритель состоит из ускоряющих секций длиной по одному метру, то на вход каждой секции необходимо подать СВЧ-волну с мощностью 150 – 200 МВт. Такие источники мощности промышленностью не выпускаются. Можно, конечно, использовать несколько параллельно включенных мощных усилителей. Однако в этом случае цена такого ускорителя с учетом стоимости высоковольтных модуляторов, необходимых для работы усилителей, превзойдет всякие разумные пределы и вряд ли сможет быть чем-либо оправдана. В то же время применение систем повышения мощности СВЧ-волны, в которых используются только пассивные элементы и которые имеют относительно низкую стоимость, позволяет не только получить требуемую мощность, но даже и превысить ее. При этом один мощный усилитель может быть использован для питания нескольких ускоряющих секций.

Какой же основной принцип положен в основу работы таких систем? Идея достаточно проста. Мощность СВЧ-волны определяется как отношение энергии СВЧ-поля, заключенной "внутри" высокочастотного импульса, к длительности этого импульса. Следовательно, если растянуть во времени какой-либо СВЧ-импульс (при отсутствии потерь во время такого преобразования), то мощность волны в течение этого импульса уменьшится, а если, наоборот, сжать его – то мощность возрастет. При этом во сколько раз уменьшится длительность импульса, во столько же раз возрастет его мощность. В реальном случае, однако, приходится учитывать конечный КПД такого преобразователя. Система повышения мощности (импульсной мощности) СВЧ-волны и является этим преобразователем, увеличивающим мощность волны за счет сокращения длительности импульса. Для осуществления этого производится промежуточное накопление энергии СВЧ-поля в накопи-

тельных элементах в течение всего СВЧ-импульса или большей его части с последующим использованием (выводом из системы) за более короткий промежуток времени.

Известно достаточно много различных типов и конструкций систем компрессии энергии СВЧ-поля генератора, отличающихся принципами работы, методами изменения режима работы, формой выходного импульса, а также конструктивными особенностями.

По типу используемых накопительных элементов все системы можно разделить на две большие группы: системы с накопительными резонаторами и с линиями задержки. В первой группе для накопления энергии используются объемные высокодобротные резонаторы. Как правило, это цилиндрические или сферические резонаторы. В системах второй группы накопление энергии осуществляется в линиях задержки. Эти накопители принципиально отличаются друг от друга, различны принципы работы систем, выходные импульсы имеют разные характеристики. Хотя могут быть и комбинированные системы, сочетающие свойства тех и других.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Данная лабораторная работа посвящена изучению систем повышения мощности СВЧ-волны с накоплением энергии в объемных резонаторах. Эти системы можно условно разделить на две группы по способу их перевода из режима накопления энергии в режим ее использования. В первую группу входят системы, в которых изменение режима осуществляется увеличением коэффициента связи накопительного резонатора с трактом (рис. 1.1).

Существенным недостатком таких систем является принципиальное наличие коммутатора, работающего на высоком уровне мощности. Практически такой коммутатор должен выдерживать максимальный уровень мощности, который создается на выходе системы. В настоящее время для этого могут быть использованы только газовые разрядники. Однако разрядник на уровень мощности в сотни мегаватт, обеспечивающий надежную работу и долговечность, представляет собой достаточно сложную систему. Его конструкция содержит высоковольтный модулятор, систему запуска, устройство регенерации газового заполнения и др. В

целом может оказаться, что такой коммутатор сложнее и дороже, чем вся система повышения мощности. Кроме того, все газовые разрядники имеют весьма ограниченный ресурс работы, который, в лучшем случае, не превышает нескольких сотен часов.

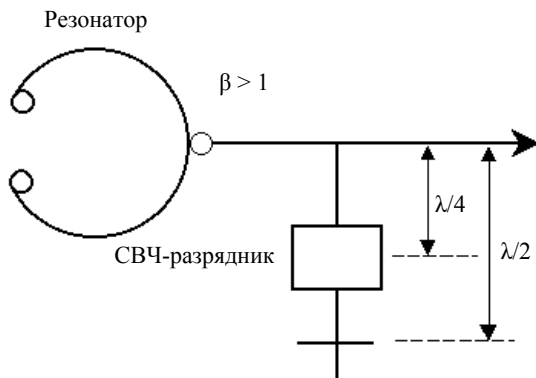


Рис. 1.1. Схема резонатора с изменяемым коэффициентом связи

По этой причине вполне определенный практический интерес представляют системы второй группы, в которых параметры накопительного резонатора не изменяются при переходе из режима накопления энергии в режим использования, а необходимые коммутации осуществляются на низком уровне мощности. Здесь рабочие уровни мощности коммутатора не превышают единиц киловатт в импульсном режиме. В этом случае могут быть применены полупроводниковые коммутирующие элементы. Такая система впервые была разработана и создана для повышения энергии линейного ускорителя электронов с энергией пучка 50 ГэВ в Стэнфордском университете (США) и получила название SLED (Stanford Linac Energy Doubler). Структурная схема системы SLED приведена на рис. 1.2.

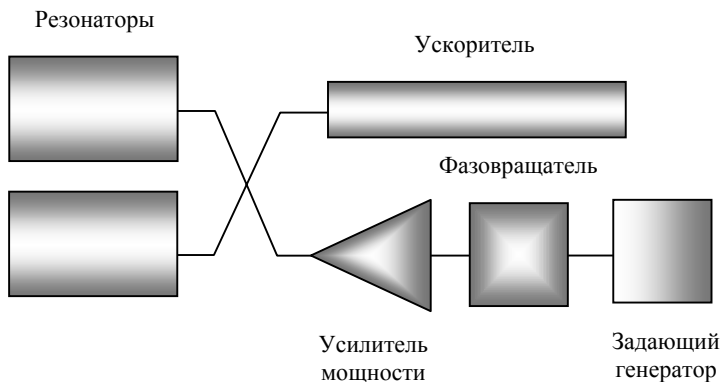


Рис. 1.2. Система питания типа SLED

Основными элементами системы являются: задающий генератор, быстродействующий фазовращатель, усилитель мощности и два накопительных резонатора, подключенных к СВЧ-тракту с помощью высокочастотного моста. Подключение накопительных резонаторов к СВЧ-тракту через высокочастотный мост позволяет осуществить развязку входа и выхода системы так, чтобы волна с выхода усилителя мощности поступала только на элементы связи резонаторов, а отраженная от них волна так же, как и излученная из них, поступала только на выход системы. Аналогичное разделение высокочастотных волн может быть получено и при использовании одного резонатора и циркулятора. Однако в настоящее время не удастся создать циркулятор, способный надежно работать на уровне мощности несколько десятков и сотен мегаватт.

В системе с постоянными параметрами накопительных резонаторов изменение режима работы осуществляется за счет фазовой модуляции СВЧ-колебаний генератора. Возможны комбинированные системы, у которых совместно с изменением коэффициента связи модулируется амплитуда волны СВЧ-генератора.

В лабораторной работе изучается система типа SLED. Работа системы основана на том, что фаза волны, излучаемой из резонатора, противоположна фазе волны генератора (точнее, противоположна фазе волны генератора, отраженной от элемента связи резонатора с трактом). Если коэффициент связи резонатора с трак-

том много больше 1 ($\beta \gg 1$), то амплитуда волны (здесь и далее – амплитуда напряженности электрического поля волны), излучаемой из резонатора $E_{\text{И}}$, может почти в 2 раза превышать амплитуду волны генератора E_0 . Напомним, что фаза волны, излучаемой из резонатора, противоположна фазе волны генератора. Поэтому если в какой-то момент времени быстро изменить фазу волны генератора на противоположную, то амплитуда результирующей волны на выходе системы $E_{\text{В}}$, образованной сложением волн $E_{\text{И}}$ и E_0 , превысит амплитуду волны примерно в 3 раза. Таким образом, мощность этой волны возрастет в 9 раз. Это максимальная величина повышения мощности, которую может обеспечить данная система.

Работу системы рассмотрим с помощью временных диаграмм, приведенных на рис. 1.3. Здесь изменение знака амплитуды волны означает изменение фазы на 180° .

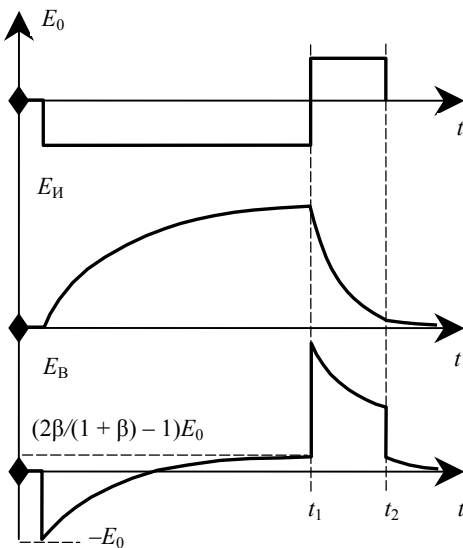


Рис. 1.3. Временные диаграммы работы системы типа SLED

В первой, большей части СВЧ-импульса генератора (усилителя), происходит накопление энергии СВЧ-поля в резонаторах. Это

интервал времени от 0 до t_1 . В этом интервале амплитуда волны $E_{И}$ возрастает. Результирующая волна на выходе системы $E_{В}$, образованная сложением волн E_0 и $E_{И}$ в этом интервале времени, изменяет свою фазу на 180° . При этом амплитуда волны меняется от $-E_0$ до $(2\beta/(1 + \beta) - 1) \cdot E_0$ (если длительность импульса достаточна для выхода на установившийся режим), где β – коэффициент связи резонаторов с трактом.

В момент времени t_1 начинается переходный процесс, во время которого фаза волны изменяется на 180° . После момента времени t_1 фазы волн E_0 и $E_{И}$ совпадают. В результате амплитуда суммарной волны на выходе системы $E_{В}$ возрастает. В идеальном случае, как уже отмечалось, она может повышаться в 3 раза с соответствующим увеличением мощности в 9 раз. В реальном случае этот рост оказывается несколько ниже. Среди причин, не позволяющих достигнуть максимально возможного повышения мощности СВЧ-волны, можно выделить следующие. Во-первых, это – конечная величина коэффициента связи накопительных резонаторов с трактом. Для реальных накопительных резонаторов с собственной добротностью около 10^5 коэффициент связи обычно не превышает 10 – 15. При этом амплитуда излучаемой из резонатора волны в установившемся режиме (когда длительность СВЧ-импульса значительно больше постоянной времени резонатора) не превышает 1,8 – 1,9. Во-вторых, это – конечное время переходного процесса при изменении фазы волны генератора. Практически это приводит к тому, что за период переходного процесса часть накопленной в резонаторах энергии успевает рассеяться и в самих резонаторах и во внешних цепях. После окончания импульса генератора (момент времени t_2) амплитуда суммарной волны на выходе системы $E_{В}$ определяется оставшейся в резонаторах СВЧ-энергией.

Системы повышения мощности СВЧ-волны с постоянными параметрами накопительного резонатора реально позволяют увеличивать мощность СВЧ-импульса в 5 – 7 раз. Это значительно меньше, чем повышение, которое могут обеспечить системы с изменением коэффициента связи накопительного резонатора. При необходимости получить большое увеличение мощности системы этого типа не могут конкурировать. Однако, когда требуется повысить мощность волны не более 8 раз, предпочтение, несомнен-

но, стоит отдать рассмотренной системе с постоянными параметрами накопительных резонаторов.

На рис. 1.4 представлена схема лабораторной установки. Она состоит из накопительного цилиндрического резонатора с видом колебаний H_{015} . Между высокочастотным генератором Г4-80 и накопительным резонатором включена ферритовая развязка (ферритовый вентиль Э8-18) и управляемый импульсным генератором Г5-15 быстродействующий фазовращатель. Второй импульсный генератор Г5-54 служит для модуляции СВЧ-сигнала, поступающего из питающего генератора в накопительные резонаторы. Таким образом, моделируется импульсный режим работы системы. Отраженный от резонатора СВЧ-сигнал через направленный ответвитель, усилитель СВЧ-мощности (лампа бегущей волны – ЛБВ) и СВЧ-детектор поступает на осциллограф (С1-70). Синхронизация работы схемы осуществляется сигналом генератора Г5-54.

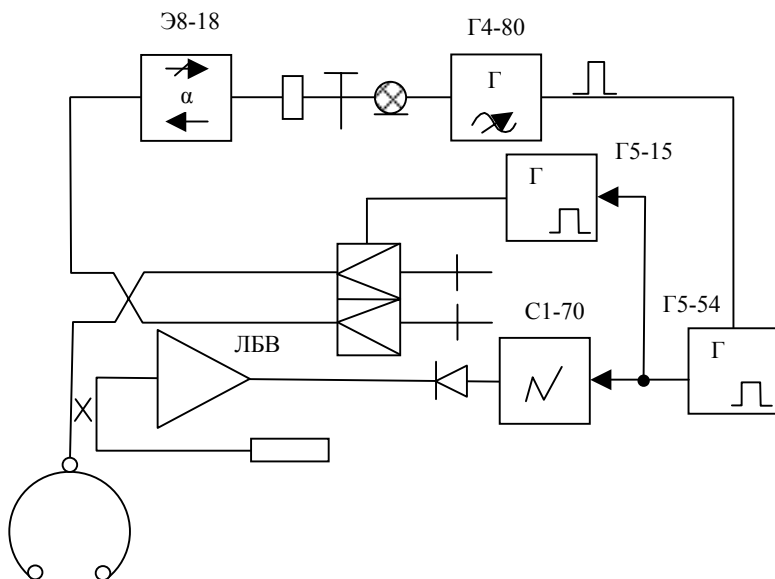


Рис. 1.4. Структурная схема лабораторной установки

3. РАБОЧЕ ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности в лаборатории.

2. Включить приборы установки.

3. Зарисовать огибающую сигнала без резонатора (отстроив частоту генератора от резонансной на несколько мегагерц) и фазовращателя (уменьшив до нуля уровень сигнала).

4. Зарисовать огибающую сигнала, включив фазовращатель (уровень сигнала максимальный).

5. Зарисовать огибающую сигнала со слабым сигналом на фазовращателе.

6. Экспериментально определить собственную частоту колебаний резонатора, выключив фазовращатель. Зарисовать осциллограмму импульса.

7. Подать сигнал на фазовращатель, зарисовать осциллограмму импульса.

8. Снять зависимость амплитуды сигнала от частоты генератора Г4-80 (по три точки от резонансной вверх и вниз с шагом 2 МГц).

9. Снять зависимость амплитуды сигнала от момента включения фазовращателя.

10. Снять зависимость амплитуды сигнала от длительности импульса.

11. Измерить амплитуды сигнала генератора E_0 и $E_B(t_1)$ (см. рис. 1.3). Рассчитать коэффициент связи резонатора с внешней цепью (β).

12. Измерить постоянную затухания резонатора (переключив множитель развертки осциллографа с $\times 1$ в значение $\times 0,1$, растянуть кривую по вертикали на весь экран и измерить время, за которое сигнал уменьшается в 2,7 раза (до $8 / 2,7 = 3$ делений). Рассчитать величину нагруженной и собственной добротностей резонатора.

13. Оценить эффективность работы системы. Коэффициент полезного действия можно рассчитать как отношение площади под участком осциллограммы, соответствующим полезному сигналу, к площади под осциллограммой импульса генератора (рис. 1.5).

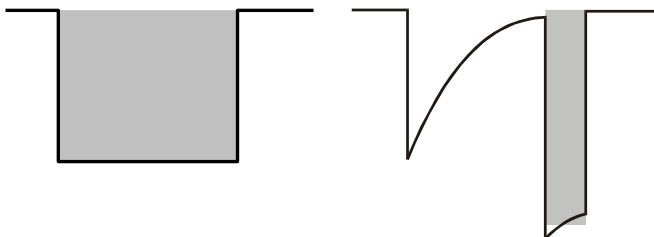


Рис. 1.5. К определению эффективности работы системы

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

1. Отчет должен содержать принципиальную схему установки с перечнем основных ее узлов.

2. Результаты измерений привести в виде таблиц, графиков и зарисованных осциллограмм импульсов.

3. По результатам измерений вычислить коэффициент связи β накопительных резонаторов с трактом, используя формулу

$$E_B(t_1)/E_0 = 2\beta/(1 + \beta) - 1, \quad (1.1)$$

где $E_B(t_1)$ – амплитуда результирующей волны на выходе системы в момент времени t_1 (см. рис. 1.3).

4. По результатам измерений оценить внешнюю, нагруженную и собственную добротности накопительного резонатора по формулам

$$\tau = Q_0/\pi f_0(1 + \beta), \quad (1.2)$$

$$Q_{\text{вн}} = Q_0 / \beta, \quad (1.3)$$

где Q_0 , $Q_{\text{вн}}$ – собственная и нагруженная добротности накопительных резонаторов соответственно; τ – постоянная времени резонаторов; f_0 – собственная частота резонаторов.

5. Оценить КПД установки как отношение полезной мощности, выделяющейся в нагрузке, к полной мощности питающего генератора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит принцип повышения СВЧ-мощности с помощью накопления энергии?
2. Какие знаете основные схемы повышения СВЧ-мощности с накоплением энергии?
3. Укажите области применения систем повышения СВЧ-мощности с накоплением энергии.
4. В чем состоят достоинства и недостатки изученной в работе системы повышения СВЧ-мощности?
5. Объясните принцип работы и устройства узлов СВЧ-тракта, используемых в системе повышения СВЧ-мощности: ферритовой развязки, управляемого фазовращателя, высокочастотного моста.
6. Объясните вид осциллограмм, зарисованных в процессе выполнения работы.
7. Объясните вид графиков, полученных в процессе выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.1. Богданович Б.Ю., Сенюков В.А. Системы повышения мощности ВЧ-волны с накоплением энергии для питания ЛУЭ. – М.: МИФИ, 1991.
- 1.2. Богданович Б.Ю., Сенюков В.А., Шальнов А.В. Линейный ускоритель электронов с накоплением энергии в системе ВЧ-питания: препринт 039-88. – М.: МИФИ, 1988.
- 1.3. Милованов О.С, Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980.

Работа 2

ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ ТИПА
«ДУОПЛАЗМАТРОН» В СОСТАВЕ ИНЖЕКТОРА ИОНОВ

Цель: ознакомление с конструкцией и принципом действия плазменного источника ионов типа "дуоплазматрон" в составе импульсного инжектора ионов на энергию $W = 100$ кэВ, исследование токовых характеристик источника и фокусирующего действия одиночной электростатической линзы.

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИОННЫМ
ИСТОЧНИКАМ

Источники ионов плазменного типа широко используются в современной науке и технике. Необходимо указать следующие основные области их применения в настоящее время [2.1]:

1) в ускорителях заряженных частиц, предназначенных для исследований в области ядерной физики, а также используемых в прикладных целях;

2) в инжекторах быстрых атомов, используемых в исследованиях по термоядерному синтезу;

3) в ракетных двигателях космических кораблей;

4) в установках для электромагнитного разделения изотопов;

5) для различного рода научных исследований – взаимодействия ионных пучков с плазмой или поверхностью твердого тела, в области сверхпроводимости и высокотемпературной химии, микроанализа поверхности твердого тела и т.д.;

6) для осуществления различных технологических процессов – размерной обработки материалов, легирования полупроводников и поверхности металлов и т.д.

Естественно, что каждое из перечисленных применений выдвигает специфические требования к ионным источникам. В частнос-

ти, ионные источники, используемые в электростатическом ускорителе, не рассчитаны на получение ионных пучков с очень большим током, но имеют большой срок службы. Важность большого срока службы связана с тем, что в этих ускорителях источники ионов, как правило, располагаются под высоковольтным электродом в сжатом газе и для замены или ремонта источника приходится вскрывать генератор, что весьма нежелательно. В тандем-генераторах, напротив, источник ионов не находится под высоким потенциалом, что облегчает подвод энергии, охлаждение источника, его разборку и ремонт. Специфичным для этих ускорителей является источник отрицательных ионов, которые после ускорения теряют два электрона в перезарядной камере и снова ускоряются уже в виде положительных ионов.

В циклотроне источник ионов обычно находится в сильном магнитном поле и ограниченном пространстве, а извлечение ионов производится перпендикулярно магнитному полю. Из этого, в частности, следует, что в источнике должны быть предусмотрены форсированное охлаждение и достаточная прочность катода, который может деформироваться при взаимодействии тока накала катода и внешнего магнитного поля.

Один из способов получения трансурановых элементов состоит в бомбардировке разных мишеней многозарядными ионами. Разработка источников интенсивных потоков ионов с большим зарядовым числом Z является важной, но весьма трудной задачей.

В некоторых случаях ионный источник, как составная часть инжектора заряженных частиц, должен поставлять пучок ионов с большим током, например порядка ампера. Ионная оптика таких инжекторов обрабатывается особенно тщательно. В этой связи в ряде случаев актуальной может быть проблема уменьшения "температуры" ионов, извлекаемых из источника. Аналогичные или еще более трудно выполнимые требования к величине ионного тока возникают при использовании плазменных ионных источников для введения ионов или быстрых нейтральных атомов в магнитные ловушки, разрабатываемые в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза. В обоих случаях, когда речь идет, например, о получении ионных пучков с током около 1 А, возникает проблема рассеяния тепла, выделяющегося непосредственно в разрядной камере источника или на поверхности различ-

ных электродов. Если в ускорительной технике часто требуются источники протонов, то при введении ионов в магнитные ловушки возникает необходимость в мощном источнике молекулярных ионов водорода или в источнике быстрых возбужденных нейтральных атомов.

Источники для электромагнитного разделения изотопов тугоплавких элементов в конструктивном отношении существенно отличаются от других источников. Газоразрядной средой в них служат не чистые газы, а пары тугоплавких элементов, для получения которых иногда приходится поддерживать разрядную камеру при температуре выше 2000 °С. Специфические источники ионов тугоплавких элементов нужны и для ряда важных технических применений, в частности для микроэлектроники.

Во многих случаях желательно, чтобы извлекаемые из плазмы ионы обладали минимальной начальной энергией. Однако в некоторых случаях требуется, чтобы начальная энергия ионов, покидающих источник, была бы, напротив, максимальной; при этом, например, оказывается возможным создание реактивной тяги. В последние годы начали разрабатываться также способы получения интенсивных пучков ионов с малой энергией. Наконец, при использовании ионных источников для различных исследовательских целей возникают специфические требования, например необходимость получения кратковременных импульсов ионного тока или нежелательность применения источника, внутри которого было бы сильное магнитное или высокочастотное поле.

Таким образом, требования, предъявляемые к ионному источнику, определяются его конкретным назначением и условиями работы. Несмотря на разнообразие применений и характерных условий, в которых должен работать ионный источник, можно в общем виде сформулировать следующие основные требования к этим приборам.

1. Ионный источник с устройством для формирования ионного пучка должен дать стационарный или импульсный пучок с необходимым током и такими ионно-оптическими параметрами, которые позволили бы использовать его наилучшим образом.

2. Ионный источник должен дать пучок ионов определенного состава, т.е. должен поставлять ионы с заданной массой и зарядом. Другие компоненты в ионном пучке нежелательны, так как они

"загрязняют" пучок, увеличивают нагрузку источников тока, ослабляют электрическую прочность ускорительной трубки и т.д.

3. Ионный пучок, извлекаемый из источника, должен обладать заданной средней энергией ионов и допустимой величиной разброса их скоростей.

4. Ионный источник должен работать стабильно. Модуляция тока ионного пучка, как правило, нежелательна.

5. Ионный пучок с заданными параметрами необходимо получать при минимальном расходе рабочего вещества. Это важно, в первую очередь, потому, что в области первичного формирования и ускорения пучка надо поддерживать высокий вакуум для повышения электрической прочности. В случае применения ценных газов (например, трития) важность этого требования определяется еще и экономическими соображениями.

6. Желательно, чтобы расходуемая мощность, в первую очередь рассеиваемая в источнике, была минимальной. В тех случаях, когда подвод энергии к ионному источнику затруднен, это требование особенно важно.

7. Источник должен быть достаточно надежным в работе, максимально простым по конструкции, питанию и управлению.

8. Источник должен иметь достаточный срок непрерывной работы без смены расходующих элементов, а также максимальный срок службы в целом.

В соответствии с перечисленными требованиями, ионный источник характеризуется рядом параметров, в частности следующими, наиболее важными.

1. Величиной ионного тока I_+ и соответствующей плотностью ионного тока $j_+ = I_+/S_0$, где S_0 – сечение выходного отверстия ионного источника.

2. Экономичностью, или величиной ионного тока, приходящегося на единицу мощности, подводимой к источнику:

$$H = \frac{I_+}{W} \text{ [мА/Вт]}. \quad (2.1)$$

В эту величину входят разрядная мощность, мощности, расходуемые на накал катода и на поддержание магнитного поля, и т.п. Иногда представляет интерес экономичность, которая оценивается

по выходу ионного тока на единицу мощности, рассеянной в самом источнике.

3. Газовой экономичностью, которая представляет собой отношение числа атомов, превращаемых в ионы пучка, к числу атомов, подводимых к источнику:

$$\eta = \frac{v_a^+}{v_a} = \frac{3600I_+}{eQ_a n_0} = \frac{0,8I_+}{Q_a} \times 100 \% . \quad (2.2)$$

Здесь $n_0 = 3,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – число частиц в 1 см^3 при давлении 1 мм рт. ст. и температуре 0°C ; Q_a – расход рабочего газа при нормальных условиях, $\text{см}^3/\text{ч}$; I_+ – ток пучка, мА. В случае протонных источников правая часть умножается на коэффициент $\beta/2$, который при полной диссоциации водорода в разряде равен $0,5$.

4. Относительным содержанием протонов в пучке водородных ионов (для протонных источников)

$$\beta = \frac{I_{H_1^+}}{\sum_{i=1,2,3} I_{H_i^+}} = \frac{I_{H_1^+}}{I_+} \cdot 100 \% , \quad (2.3)$$

где $I_{H_1^+}$, $I_{H_2^+}$, $I_{H_3^+}$ – основные компоненты пучка водородных ионов.

5. Коэффициентом модуляции ионного пучка

$$M = \frac{\Delta I_+}{I_+} \cdot 100 \% , \quad (2.4)$$

где ΔI_+ – переменная составляющая тока ионного пучка.

Одной из важнейших характеристик источника и связанной с ним системы формирования ионного пучка является эмиттанс пучка ионов.

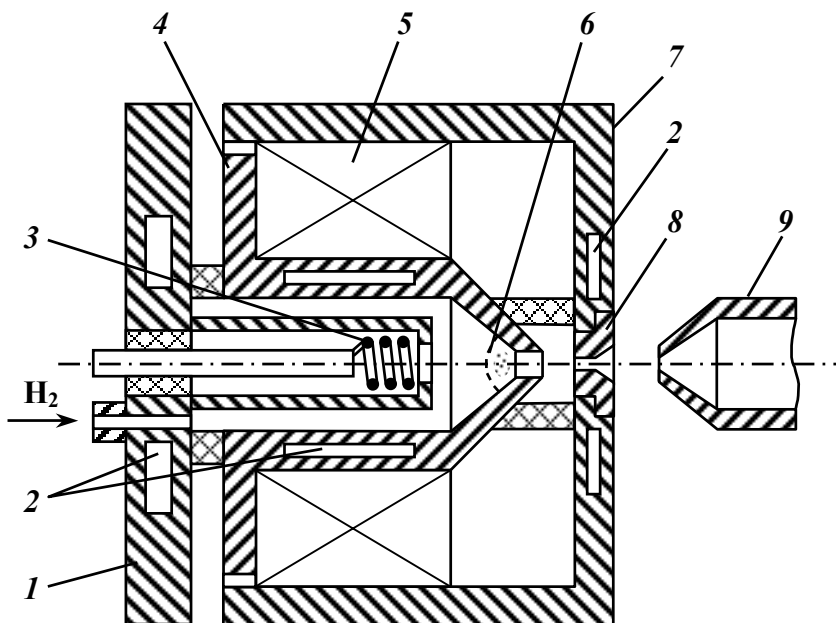


Рис. 2.1. Устройство дуоплазматрона: 1 – катодный фланец; 2 – каналы системы водоохлаждения; 3 – прямонакальный спиральный катод; 4 – промежуточный электрод; 5 – электромагнитная катушка; 6 – плазменный пузырь; 7 – анод; 8 – немагнитная жаростойкая вставка; 9 – вытягивающий электрод

2. ДУОПЛАЗМАТРОН

Плазменный источник ионов "дуоплазматрон" был разработан немецким физиком фон Арденне в 50-х годах прошлого века в г. Сухуми. В РУЦ МИФИ первый дуоплазматрон (используемый в лабораторной установке) был запущен в 1971 г. Устройство этого источника представлено на рис. 2.1.

Промежуточный электрод 4 имеет канал, соединяющий катодную и анодную части газоразрядного промежутка. Анод 7 и промежуточный электрод 4 изготовлены из ферромагнитного материала (Fe) и являются частями магнитной цепи, в которой с помощью электромагнитной катушки 5 возбуждается магнитное

поле. При достаточной толщине промежуточного электрода магнитное поле в катодной части разряда отсутствует. В области же канала промежуточного электрода и в зазоре между промежуточным электродом и анодом возникает сильно сходящееся магнитное поле. Качественное представление магнитного поля в этой области дано на рис. 2.2 [2.2].

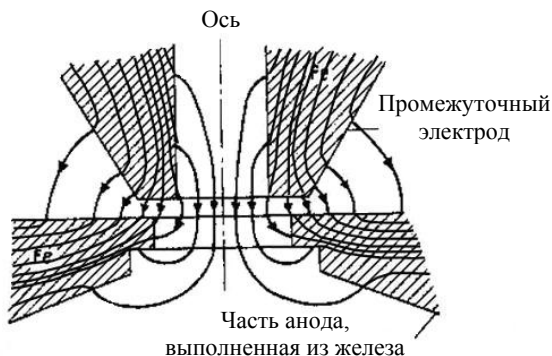


Рис. 2.2. Качественная картина силовых линий магнитного поля в области между полюсными наконечниками (промежуточный электрод и анод) дуоплазматрона

В дуоплазматроне между катодом и анодом зажигается дуговой разряд ($I_p \sim 20 \text{ A}$, $U_p \sim 200 \text{ В}$) в газе при давлении $10^{-1} \div 10^{-2}$ мм рт. ст. Уменьшение сечения разряда при входе в канал промежуточного электрода приводит к возникновению сферического двойного слоя, окружающего плазменный "пузырь" и являющегося источником быстрых электронов. Поток этих электронов, ускоренных в поле двойного слоя, приводит к значительному повышению концентрации зарядов в "пузыре". Этот механизм повышения плотности плазмы в канале промежуточного электрода называют "геометрическим" контрагированием плазмы.

Специфично для дуоплазматрона то, что после "геометрического" контрагирования плазмы вступает в действие сильное неоднородное магнитное поле в зазоре между промежуточным электродом и анодом, которое осуществляет "магнитное" контра-

гирование плазмы. Действительно, при таком движении газа, когда с известным приближением можно рассматривать свободное движение электронов без учета их столкновений с ионами, эффект неоднородного магнитного поля следует из того, что электроны "замагничены" и их траектории навиты на силовые линии магнитного поля. Если частицы плазмы движутся внутри силовой трубки с напряженностью магнитного поля на торцах H_1 и H_2 , то сечение плазмы уменьшается в H_1/H_2 раз и при заданном потоке частиц плотность их увеличивается в таком же отношении. При этом имеет место и другой эффект: в движущейся системе координат неоднородное магнитное поле является переменным во времени и создает вихревое электрическое поле, которое ускоряет или замедляет вращение движущихся электронов. Если изменение магнитного поля за время одного оборота электрона невелико (величину dH/dt можно заменить величиной $\Delta H/T$, где ΔH – изменение напряженности магнитного поля за период вращения электрона $T = 2\pi m\gamma/(eB)$), то отношение энергии вращательного движения электрона к напряженности магнитного поля W_{\perp}/H инвариантно.

В виду того, что постоянное магнитное поле не изменяет полной энергии электрона, рост H по мере приближения к отверстию эмиссии в аноде приводит к увеличению поперечной скорости электрона, т.е. к уменьшению его продольной скорости. При заданном потоке электронов снижение их продольной скорости компенсируется увеличением плотности плазмы. В случае большого давления газа или возникновения турбулентности в плазме эта относительно простая картина движения частиц усложняется диффузией. В таких реальных условиях магнитное поле ослабляет радиальную диффузию частиц, способствует их направленному движению к эмиссионному отверстию, приводит к контрагированию плазмы.

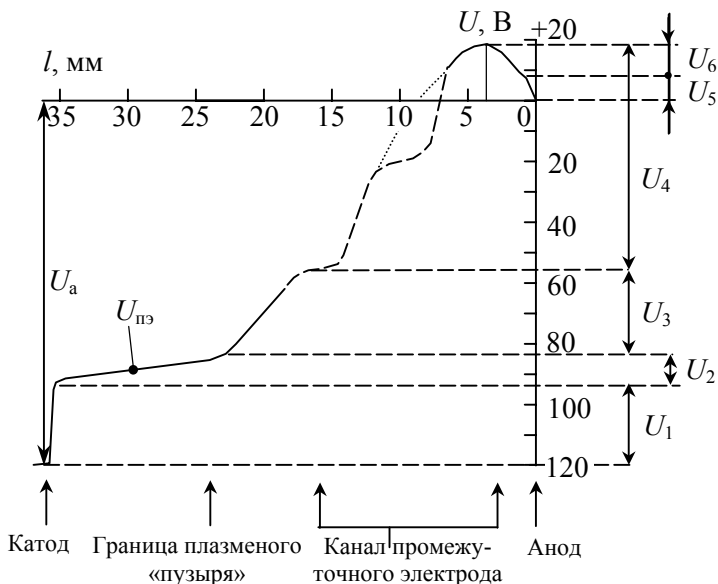


Рис. 2.3. Аксиальное распределение потенциала в дуоплазматроне: U_1 – катодное падение; U_2 – падение в прикатодной области плазмы; U_3 – падение в двойном слое; U_4 – падение в канале; U_5 – анодное падение; U_6 – падение в прианодной плазме; $U_{пэ}$ – потенциал промежуточного электрода; U_a – разрядное напряжение

Следует также упомянуть о том, что неоднородное магнитное поле приводит к возникновению скачка потенциала в контрагированной плазме (в канале промежуточного электрода) и, следовательно, к образованию здесь плотного пучка электронов с большими, направленными к аноду, скоростями (рис. 2.3). Последнее способствует, в частности, существованию характерного для дуоплазматрона большого отрицательного анодного падения потенциала (рис. 2.3). Согласно закону Ома для плазмы, градиент потенциала в ней зависит от градиента давления газа, проводимости плазмы, сечения разряда, неоднородности магнитного поля. Из этого следует, что скачок потенциала может возникнуть не только в месте сужения разряда, но и в области действия неоднородного магнитного поля. Сочетанием плазмы с высокой концентрацией заряженных частиц и отрицательным падением

потенциала разряда у анода, способствующего движению ионов к выходному отверстию в аноде, можно объяснить большие плотности ионной эмиссии дуоплазматрона и его высокую газовую экономичность [2.1].

3. ИНЖЕКТОР ИОНОВ

Инжектор ионов предназначен для получения пучка протонов с энергией 100 кэВ, который может быть инжектирован в линейный ускоритель для дальнейшего ускорения или использован для облучения внутренних мишеней. Необходимо отметить, что в пучке кроме протонов будут присутствовать и ионы молекулярного водорода H_2^+ и H_3^+ .

Номинальные параметры инжектора

Используемый источник ионов.....	дуоплазматрон
Максимальная энергия протонов, кэВ.....	0 ÷ 100
Импульсный ток пучка ионов (регулируемый), мА.....	0 ÷ 50
Состав пучка ионов, %	
H_1^+	80
H_2^+	15
H_3^+	5
Энергетический спектр протонов на полувысоте, %.....	5 ÷ 10
Диаметр пучка на выходе инжектора (регулируемый), мм.....	5 ÷ 20
Длительность вершины импульса высокого Напряжения мкс.....	100
Частота следования импульсов, Гц.....	1
Потребляемая мощность, кВт.....	10
Газовая экономичность источника, %.....	50

Схема инжектора ионов водорода приведена на рис. 2.4. Плазменный источник ионов типа "дуоплазматрон" 1 электрически развязан от заземленного вакуумного корпуса установки 3 с помощью высоковольтного изолятора 2. Импульсное высоко-

вольтное напряжение на источнике ионов формируется модулятором с частичным разрядом емкости 10 ($U \sim 5$ кВ) и импульсным трансформатором 12 ($n_{тр} = 22$). Контроль за амплитудой и формой импульса высокого напряжения осуществляется посредством использования калиброванного омического делителя с коэффициентом деления $k_d = 10^4$. Под высоким напряжением находится вся система питания дуоплазматрона: трансформатор накала катода, модулятор разряда, выпрямитель магнитной катушки, модулятор электромагнитного клапана напуска газа в источник. Для энергоснабжения их используются отдельные разделительные трансформаторы, что позволяет осуществлять регулировку параметров цепей в источнике ионов независимо друг от друга, по первичной цепи.

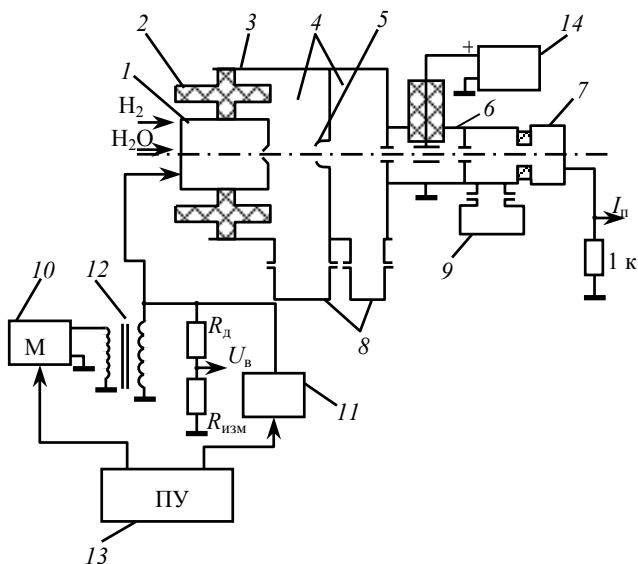


Рис. 2.4. Схема инжектора ионов водорода: 1 – ионный источник "дуоплазматрон"; 2 – высоковольтный изолятор; 3 – заземленный вакуумный корпус установки; 4 – отсеки дифференциальной откачки; 5 – вытягивающий электрод; 6 – трехэлектродная электростатическая одиночная линза; 7 – цилиндр Фарадея; 8 – вакуумные насосы ТИС-6; 9 – насос НОРД-250; 10 – модулятор высокого напряжения; 11 – блок разделительных трансформаторов; 12 – импульсный трансформатор; 13 – пульт управления; 14 – питание электростатической линзы (ВС-22)

Система откачки инжектора состоит из двух форвакуумных насосов: механического и криогенного цеолитового; трех титановых ионно-сорбционных насосов 8, установленных в системе дифференциальной откачки 4 напускаемого в источник ионов газа, а также магниторазрядного насоса НОРД-250 9, установленного в области токоприемника пучка. Метод дифференциальной откачки заключается в том, что на пути направленного потока газа располагаются ряд отдельных отсеков (объемов), соединенных между собой диафрагмами с отверстиями для прохождения пучка, причем каждый отсек откачивается отдельным насосом или насосами. В ионном инжекторе используется двухступенчатая система дифференциальной откачки, которая обеспечивает перепад давления от $3 \div 5$ Па в разрядной камере дуоплазматрона до $3 \cdot 10^{-3}$ Па в последнем отсеке системы. Контроль вакуума в установке осуществляется с помощью терморных и ионизационных датчиков давления типа ПМТ-4М и ПМИ-2.

Для фокусировки пучков ионов низкой энергии в основном используются электростатические осесимметричные линзы, обладающие малым энергопотреблением. В инжекторе установлена так называемая одиночная электростатическая линза 6. Она состоит из трех электродов цилиндрической формы, установленных соосно и последовательно на оси пучка, причем крайние электроды заземлены, а средний электрод подключен к плюсу высоковольтного источника 14. Рассмотрим принцип действия такой линзы (рис. 2.5). Электрическое поле в первом зазоре линзы замедляет продольное движение иона, т.е. уменьшает его продольную скорость $\vec{V}_2 < \vec{V}_1$. При этом в левой половине зазора от заземленного электрода до плоскости симметрии aa' на ион действует дефокусирующее электрическое поле, а после прохождения им плоскости aa' – фокусирующее. Таким образом, из-за того, что $\vec{V}_2 < \vec{V}_1$, ион находится в фокусирующем поле более длительное время, чем в дефокусирующем, т.е. превалирует эффект фокусировки. Аналогичный процесс происходит и во втором зазоре линзы, где фокусировка осуществляется слева от плоскости симметрии зазора bb' , а дефокусировка – справа.

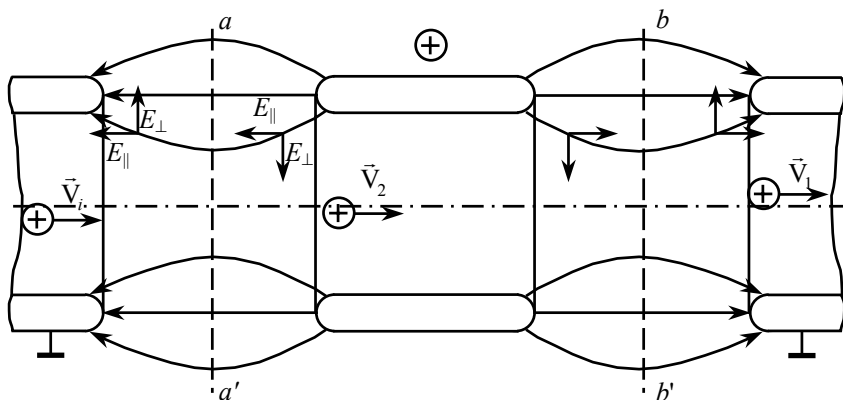


Рис. 2.5. Движение ионов в электростатической линзе

Для измерения тока ионного пучка на выходе инжектора установлен токоприемник – цилиндр Фарадея, представляющий собой вакуумный корпус, внутри которого на изоляторах установлен конусообразный коллектор, соединенный с "землей" гальванически через калиброванное измерительное сопротивление (1 кОм). Перед коллектором также на изоляторах установлено так называемое "охранное" кольцо, на которое подается отрицательный по отношению к коллектору потенциал в несколько сотен вольт. Это сделано для подавления вторичной электронной эмиссии из материала коллектора при попадании на последний ускоренного протона. В диапазоне энергий протона $\Delta E \sim 10 \div 100$ кэВ коэффициент вторичной эмиссии электронов может достигать величины $n \sim 3$, т.е. каждый протон, пришедший на коллектор, выбивает из него три электрона.

Формирование пучка ионов и их ускорение осуществляется в зазоре между источником и вытягивающим заземленным электродом 5. Если в электронных пучках источником электронов является фиксированная поверхность термоэмиттера, то в данном случае источником ионов служит граница плазмы, проникающая из источника наружу. При этом положение и форма эмиттирующей ионы поверхности плазмы зависит от конфигурации прилегающих

к плазме электродов и формы вытягивающего электрода, от напряженности электрического поля, от режима работы источника. Кроме того, граница плазмы – интенсивный источник нейтрального газа.

Пульт управления инжектором 13 позволяет дистанционно регулировать и контролировать все параметры источника ионов, менять энергию ионов и потенциал электростатической линзы.

Электропитание инжектора осуществляется от промышленной сети напряжением 220 В, частотой 50 Гц от силовых щитов, установленных в боксе 012 и в пультовой комнате 112.

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для визуального наблюдения импульсных сигналов тока и напряжения в лабораторной работе используются два электронно-лучевых осциллографа С1-55 и С1-68. Погрешность измерения временных и амплитудных параметров сигналов составляет величину $\leq 10\%$.

При измерении напряжения на головке ионного источника и токов ионного пучка первичными преобразователями являются малоиндуктивный омический делитель $k_d \approx 10^4$ и безиндуктивное сопротивление $R = 1$ кОм. Линией передачи сигналов являются коаксиальные кабели РК-50.

Измерение параметров электрических цепей ионного источника осуществляется стрелочными приборами по первичным цепям блока разделительных трансформаторов с использованием градуированных графиков. Определение потенциала на среднем электроде одиночной линзы производится с помощью калиброванного делителя, встроенного в стабилизированный источник постоянного напряжения ВС-22.

5. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Ознакомиться с пп. 1–4 данной работы, рекомендуемой литературой.
2. Ознакомиться с методами измерения параметров установки.
3. Подготовить таблицы измерений для заполнения.

4. Продумать ответы на контрольные вопросы.

6. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с инструкциями по технике безопасности при работе на ионном инжекторе и расписаться в журнале по технике безопасности.

2. Записать в оперативный журнал ионного инжектора номер и состав бригады, время начала работы, сменное задание и зафиксировать прием смены.

3. В сопровождении оперативного персонала и преподавателя ознакомиться с ионным инжектором и его пультом управления.

4. Включить силовое питание инжектора и пульт управления.

5. По термоманометру вакуумметра ВИТ-2П, установленному в пульте управления инжектора, определить остаточное давление в вакуумном корпусе инжектора. Если показания прибора окажутся меньше 60 дел. (2,66 Па), необходимо откачать инжектор криогенным цеолитовым насосом до $p \sim 2$ Па. При показаниях вакуумметра более 60 дел. (т.е. $p < 2,66$ Па) включить водоохлаждение инжектора и включить блок питания БП-100 насоса НОРД-250. Убедиться, что насос вышел на рабочий режим.

6. Закрыть дверь бокса 012 на ключ. Ключ передать преподавателю.

7. Включить ионизационную часть вакуумметра.

8. Запустить титановый ионно-сорбционный насос ТИС-6.

9. Убедиться в том, что ручки всех регуляторов напряжения на пульте управления установлены в крайнее положение против хода часовой стрелки.

10. Включить на прогрев выпрямитель ВС-22.

11. Включить тумблеры "Вкл" блоков "Магнит", "Накал", "Разряд", "Клапан", "Высокое", "Запуск".

12. Установить импульсное напряжение на источнике ионов от 20 до 50 кВ.

13. На осциллографе С1-55 измерить длительность и амплитуду импульса высокого напряжения. Зарисовать его форму.

14. Установить по приборам пульта управления:

Ток магнита, А.....	10
Ток накала, А.....	15 ÷ 17
Напряжение разряда, В.....	200

15. Плавно увеличивая напряжение на блоке "Клапан" и наблюдая показания вакуумметра, открыть подачу водорода в ионный источник.

16. Плавно увеличивая ток накала (не более 30 А), зажечь разряд в источнике и получить импульс ионного тока.

17. Включить напряжение выхода блока питания ВС-22 и, регулируя потенциал на одиночной линзе, снять зависимость тока ионов от потенциала линзы для трех значений энергии пучка:
 $I_+ = f(U_{\text{линз}})$.

18. Выключить напряжение выхода блока питания ВС-22.

19. Снять вольт-амперную характеристику ионного источника:
 $I_+ = f(U_{\text{выс}})$.

20. Снять зависимость ионного тока от напряжения разряда:
 $I_+ = f(U_{\text{разр}})$.

21. Вывести все используемые регуляторы блоков пульта на нуль.

22. Выключить все блоки пульта.

23. Выключить осциллографы и вакуумметр.

24. Открыть бокс 012 и отключить силовое питание.

25. Отключить систему водоохлаждения.

26. Зафиксировать в оперативном журнале параметры работы ионного инжектора и время окончания работы.

7. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) схему инжектора с обозначением отдельных блоков;
- 2) таблицу основных параметров инжектора;
- 3) таблицу измерений;
- 4) графики, построенные по результатам измерений;
- 5) значения оптимального потенциала одиночной линзы для каждой энергии пучка, определенные по графикам;
- 6) зарисованные осциллограммы импульсов тока пучка и ускоряющего напряжения.

Все графики должны быть изображены на листах миллиметровой бумаги.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные характеристики ионных пучков и ионных инжекторов знаете?

2. Каковы требования, предъявляемые к плазменным источникам ионов?

3. Объясните механизмы контрагирования плазмы в дуоплазматроне.

4. Каким способом, по вашему мнению, можно увеличить ток, извлекаемый из дуоплазматрона?

5. Объясните механизм фокусировки пучка в одиночной линзе.

6. Правда ли, что одиночная линза всегда является фокусирующей?

7. На каких физических принципах основана работа цилиндра Фарадея?

8. Каким образом можно избежать влияния вторичной электронной эмиссии на результаты измерения тока ионного пучка цилиндром Фарадея?

9. Назовите основные блокировки, обеспечивающие безопасное обслуживание инжектора.

10. Какие функции выполняет система синхронизации?

11. Ионный источник находится под потенциалом + 100 кВ по отношению к "земле". Каким образом можно обеспечить питание и независимую регулировку электрических цепей дуоплазматрона?

12. Какие средства фокусировки ионного пучка знаете?

13. Чем ограничено применение электростатических линз для фокусировки ионных пучков?

14. Назовите области применения плазменных источников ионов.

15. Есть ли различия между инжектором ионов и имплантером ионов?

16. Какие типы катодов знаете?

ЛИТЕРАТУРА

2.1. Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. – М.: Атомиздат, 1972.

2.2. Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки. – М.: Мир, 1992.

РАДИАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ЛИНЕЙНОМ ЭЛЕКТРОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Цель: исследование радиационной деградации биполярной транзисторной структуры под воздействием электронного излучения (изучение зависимости коэффициента усиления β и обратного тока коллектора $I_{К0}$ от интегральной плотности потока (флюенса) электронов Φ , по найденным зависимостям определение вклада объемных и поверхностных составляющих радиационных повреждений в деградации параметров исследуемой структуры).

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Радиационное изменение параметров большинства электронных схем в основном определяется изменением характеристик биполярного транзистора под воздействием излучения.

Действие различных видов радиационного излучения на кристаллическую структуру полупроводника можно свести к двум основным физическим эффектам: эффекту ионизации и эффекту смещения. Эффект ионизации приводит к возникновению дополнительных носителей и фототоков. Он обычно кратковременный и обратимый. Эффект смещения вызывает долговременные обратимые и необратимые нарушения кристаллической решетки полупроводника.

При взаимодействии излучения с атомами кристалла последним передается кинетическая энергия. Это приводит к смещению некоторых атомов из узла решетки в междоузлие. Совокупность атома в междоузлии и пустого узла (вакансии) называется *точечным дефектом Френкеля* и является одним из простейших и самых распространенных радиационных дефектов. Увеличение доли энер-

гии, передаваемой излучением атомам кристалла и всему кристаллу в целом, ведет к образованию более сложных дефектов: многовакансионных комплексов, разупорядоченных областей, температурной перестройки кристалла, активации и т.д. Структурные дефекты, возникающие при эффекте смещения, и их стабильные комплексы с примесными и легирующими атомами полупроводника в подавляющем большинстве являются электроактивными центрами, энергетические уровни которых находятся в запрещенной зоне полупроводника. Возникновение новых энергетических уровней изменяет концентрацию, подвижность и время жизни свободных носителей заряда в полупроводнике, а это ведет к изменению электрических характеристик полупроводникового прибора.

При облучении биполярных транзисторов главным образом изменяются коэффициенты передачи токов транзистора α (тока эмиттера), β (тока базы) и обратный ток коллектора I_{K0} . Эти изменения и определяют радиационную стойкость транзисторов.

Деградация параметров транзисторов при облучении происходит не только вследствие структурных повреждений кристаллической решетки, но и в результате изменений поверхностных свойств кристаллов. В основе поверхностных эффектов лежат ионизационные явления в оксидном слое кристалла и в среде, окружающей кристалл. При облучении ионы и электроны, образующиеся внутри капсулы прибора, под действием электрических полей переходов собираются на противоположно заряженных поверхностях. Например, в *n-p-n* транзисторах происходит миграция электронов к коллектору, а положительно заряженных ионов – к базе. Осаждаясь на поверхности базы, ионы образуют инверсный слой (рис. 3.1), примыкающий к коллектору и увеличивающий эффективную площадь коллекторного *p-n* перехода. Эти процессы лежат в основе наблюдающегося быстрого роста обратного коллекторного тока I_{K0} при облучении. Характерно, что для радиационного изменения коэффициента передачи тока базы β , обусловленного поверхностными эффектами, наблюдается насыщение (при облучении электронами с энергией 6 МэВ при интегральной плотности потока около $\Phi = 5 \cdot (10^{13} - 10^{14})$ 1/см²). Изменение $1/\beta$, связанное со структурными дефектами в объеме кристалла, в логарифмическом масштабе линейно зависит от

интегрального потока (рис. 3.2). Это обусловлено, в основном, тем, что электроактивные центры, образующиеся в объеме полупроводника, увеличивают скорость рекомбинации неосновных носителей в области базы, приводя к уменьшению их времени жизни τ . Последнее связано с воздействующим потоком частиц Φ соотношением:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau}\Phi, \quad (3.1)$$

где τ_0 , τ – время жизни носителей до и после облучения; K_{τ} – коэффициент радиационных повреждений, зависящий от типа полупроводника, вида и энергии излучения.

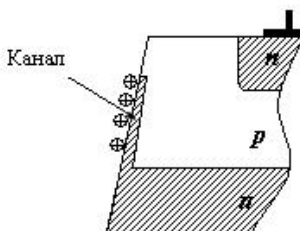


Рис. 3.1. Образование инверсионного слоя в транзисторе

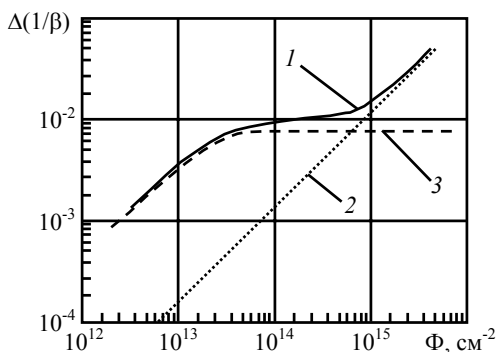


Рис. 3.2. Вид зависимости приращения величины $\Delta(1/\beta)$ от интегральной плотности потока (флюенса) Φ : 1 – суммарная зависимость; 2 – зависимость от объемной составляющей; 3 – зависимость от поверхностной составляющей радиационных повреждений

2. МЕТОДИКА РАДИАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе эксперимента исследуемую транзисторную структуру, размещенную на заданном расстоянии от выходного окна ускорителя, облучают в течение ряда сеансов ускоренными электронами с известной энергией W и плотностью потока Φ_0 . Длительность, режимы облучения и режимы работы ускорителя определяют заранее.

Для набора статистики облучению в одинаковых условиях подвергаются одновременно 4–5 предварительно промаркированных образцов исследуемой структуры, которые помещены в специальную кассету. При этом выбором расстояния от кассеты до выходного окна ускорителя обеспечивается требуемый уровень неравномерности поля облучения, в нашем случае примерно 10 %. При облучении образцов плотность потока, энергия электронов и неравномерность поля облучения непрерывно контролируются по пультовым приборам ускорителя и поддерживаются на заданном уровне.

Перед началом и по окончании каждого сеанса облучения измеряют коэффициент усиления β и обратный ток коллектора I_{K0} у каждого исследуемого образца структуры. Результаты измерений заносят в табл. 3.1. Для измерения величин β и I_{K0} используется прибор "Измеритель h -параметров маломощных транзисторов Л2-22". Режимы измерений, цоколевка структуры и ее электрические характеристики приведены в паспортных данных изучаемой структуры. Следует отметить, что поскольку в процессе облучения происходит радиационный разогрев исследуемых образцов, то для исключения влияния температуры и температурного отжига на результаты эксперимента необходимо измерять параметры образцов после их остывания до комнатной температуры.

Таблица 3.1

Результаты измерений параметров образцов

Флюенс и время экспозиции	$\Phi = 0, t = 0$		$\Phi = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}, \tau = 5 \text{ с}$		$\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}, \tau = 1 \text{ мин } 35 \text{ с}$		$\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}, \tau = 8 \text{ мин } 20 \text{ с}$	
	β_0	I_{K0}^0	β	I_{K0}	β	I_{K0}	β	I_{K0}
Прибор № 1								
...								
Прибор № 5								

Энергия ускоренных электронов выбирается либо из условий применения транзисторной структуры, либо из условия равномерного образования радиационных дефектов в объеме кристалла. В данной работе энергия должна быть больше 3 МэВ.

Требуемая плотность потока электронов Φ_0 , число и длительность сеансов облучения выбираются из следующих условий:

1) дозовые зависимости $\beta(\Phi)$ и $I_{K0}(\Phi)$ должны сниматься в диапазоне флюенсов электронов Φ от 0 до 10^{15} см⁻²;

2) в процессе одного сеанса облучения температура образцов не должна превышать 40 – 50 °С;

3) суммарное время облучения не должно превышать 30 – 45 мин.

В данной работе Φ_0 следует выбрать равным 10^{12} , а флюенс Φ увеличивать следующими шагами: $3 \cdot 10^{12}$, 10^{13} , $3 \cdot 10^{13}$, 10^{14} , $3 \cdot 10^{14}$, 10^{15} см⁻². При этом длительность сеансов облучения определяется частными приростами флюенса, а полная экспозиция равна сумме длительностей сеансов облучения. Длительность сеансов облучения измеряется секундомером на пульте ускорителя. Ток ускорителя выбирается такой величины, чтобы в плоскости поля облучения, где размещаются образцы структуры, была обеспечена требуемая плотность потока электронов. В качестве датчика плотности потока используется цилиндр Фарадея, во входное окно которого и помещается кассета с образцами. Плотность потока электронов, измеряемая с помощью такого датчика, равна отношению регистрируемого прибором среднего тока частиц к площади входного окна цилиндра Фарадея. Для нахождения площади входного окна измеряют штангенциркулем его диаметр.

3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Ознакомиться с основами теории радиационной деградации полупроводниковых приборов. Уяснить взаимосвязь между величинами β , I_{K0} и Φ .

2. Ознакомиться с приведенным в практикуме описанием ускорителя РЭЛУС-1, на котором проводится эксперимент.

3. Разработать структурную схему эксперимента.

4. Вывести расчетные формулы для определения режимов и длительности сеансов облучения.

5. Подготовить таблицу для заполнения результатов измерений.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Снять зависимости $\beta(\Phi)$ и $I_{\text{ко}}(\Phi)$ для 4 – 5 образцов биполярной транзисторной структуры.

2. Определить вклад объемных и поверхностных составляющих радиационных повреждений в деградацию параметров структуры.

Внимание! Входить и работать в ускорительном зале можно только лишь с разрешения, в сопровождении и под надзором членов оперативного персонала ускорителя!

Перед началом эксперимента оперативный персонал производит включение ускорителя в дежурный режим работы. Далее включение и выключение ускорителя, а также настройку режима работы производят студенты совместно с оперативным персоналом.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с инструкциями по технике безопасности при работе на ускорителе и расписаться в журнале по технике безопасности.

2. Ознакомиться с экспериментальной установкой и записать параметры ускорителя и измерительных приборов в отчет. При этом оперативный персонал указывает студентам место расположения цилиндра Фарадея, показывает кассету для образцов и способ установки кассеты во входном окне цилиндра Фарадея.

3. В соответствии с указаниями преподавателя определить количество, длительность и режимы сеансов облучения образцов. Эти данные занести в таблицу.

4. Измерить штангенциркулем диаметр входного окна цилиндра Фарадея и рассчитать требуемое для эксперимента значение тока электронов, падающих на исследуемые образцы.

5. Определить совместно с оперативным персоналом режим работы ускорителя, соответствующий расчетным режимам облучения.

6. Изучить паспортные данные исследуемой транзисторной структуры. Ознакомиться с образцами структуры, которые будут исследоваться в эксперименте, и промаркировать их корпуса (образцы и их паспортные данные выдаются преподавателем).

7. Изучить по описанию и научиться пользоваться на практике прибором Л2-22 (описание прибора выдается преподавателем).

8. Измерить у исследуемых образцов значения величин β и I_{K0} перед облучением. Результаты измерения занести в таблицу.

9. Поместить образцы в кассету и установить ее во входное окно цилиндра Фарадея. Здесь и далее нельзя сдвигать цилиндр Фарадея с места, выбранного для проведения эксперимента.

10. После закрытия защитной двери ускорительного зала провести первый сеанс облучения.

11. По окончании первого сеанса облучения ток пучка выключить и ускоритель перевести в дежурный режим. Исследуемые образцы доставить из зала в пультовую. Произвести измерение величин β и I_{K0} у каждого образца после их остывания до комнатной температуры. Результаты измерений занести в таблицу.

12. Затем образцы снова установить во входное окно цилиндра Фарадея и производить следующий сеанс облучения и т.д.

13. По данным, полученным в эксперименте, построить:

а) графики зависимостей β/β_0 и I_{K0}/I_{K0}^0 от Φ для каждого образца с учетом погрешностей измерения (по оси абсцисс используется логарифмический масштаб, а по оси ординат – линейный); каждое семейство построить на отдельном рисунке, там же нанести зависимости для β и I_{K0} , усредненные по образцам;

б) усредненную зависимость $(1/\beta - 1/\beta_0)$ от Φ в логарифмическом масштабе по обеим осям (по этой зависимости после соответствующей обработки (см. рис. 3.2) определяется вклад объемной и поверхностной составляющих радиационных повреждений в деградацию приборов).

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы и рабочее задание;
- 2) расчетные формулы и структурную схему эксперимента;

- 3) параметры ускорителя, на котором проводился эксперимент, параметры использованных измерительных приборов;
- 4) паспортные данные исследуемой транзисторной структуры;
- 5) расчеты режимов облучения и погрешностей измерений;
- 6) таблицу с экспериментальными данными;
- 7) графики исследуемых зависимостей;
- 8) выводы и заключение.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды радиационных дефектов наблюдаются в полупроводниковых приборах (ППП) и как они влияют на электрические свойства приборов?
2. Какие параметры транзистора наименее радиационно стойкие?
3. Какова специфика образования поверхностных дефектов в ППП?
4. Что такое электроактивные центры и почему их образование ведет к уменьшению времени жизни неосновных носителей?
5. Как определяется плотность потока электронов при облучении?
6. Нарисуйте структурную схему радиационного эксперимента. Что изменится при увеличении расстояния от выходного окна ускорителя до облучаемого объекта?
7. Как определяется время экспозиции и флюенс электронов?
8. Каков физический смысл радиационного изменения β и I_{K0} ?
9. Каковы критерии радиационной стойкости приборов?
10. Почему данные для разных экземпляров прибора имеют разброс?
11. Какие эффекты могут исказить результаты эксперимента?

ЛИТЕРАТУРА

- 3.1. Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. – М.: Атомиздат, 1969.
- 3.2. Справочник по диафрагмированным волноводам / О.А. Вальднер, Н.П. Собенин, Б.В. Зверев, И.С. Щедрин. – М.: Атомиздат, 1977.

3.3. Бычков С.И., Буренин Н.И., Сафаров Р.Г. Стабилизация частоты генераторов СВЧ. – М.: Советское радио, 1962.

3.4. Вальднер О.А., Шальнов А.В., Диденко А.Н. Ускоряющие волноводы. – М.: Атомиздат, 1973.

3.5. Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. – М.: Атомиздат, 1972.

3.6. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

3.7. Патрикеев Л.Н., Подлепецкий Б.И., Попов В.Д. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: МИФИ, 1975.

3.8. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – М.: Энергия, 1973.

3.9. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / под ред. Е.А. Ладыгина. – М.: Советское радио, 1980.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Цель: исследование характеристик и параметров линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) модели У-31/33 (снятие зависимости энергии ускоренных электронов от частоты питающего генератора, исследование зависимости электронного КПД ускоряющего волновода от частоты, исследование среднего темпа ускорения электронов в зависимости от частоты).

1. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ В ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

Особенности ускорения электронов по сравнению с тяжелыми частицами объясняются их малой энергией покоя. Это приводит к тому, что электроны на коротком начальном участке линейного ускорителя быстро набирают скорость, величина которой приближается к скорости света в свободном пространстве. Процесс ускорения в линейном ускорителе с диафрагмированным волноводом происходит следующим образом. Электроны, предварительно ускоренные в инжекторе, вводятся в начальную часть диафрагмированного волновода. При этом скорость инжектированных частиц меньше скорости света. При взаимодействии с ускоряющей волной внутри диафрагмированного волновода они не только ускоряются, но и группируются в отдельные сгустки. Такие сгустки электронов образуются на каждом периоде волны электромагнитного поля и движутся вместе с ускоряющей волной вдоль волновода. Группировка в основном заканчивается при достижении частицами скорости, достаточно близкой к скорости света. Таким образом, для начальной части ускорителя характерны возрастание скорости электронов и группировка электронов в сгустки. По смыслу происходящих процессов начальную часть ускоряющего волновода назовем волноводным группирователем.

Затем сгруппированные электроны поступают во вторую часть диафрагмированного волновода, где они ускоряются до требуемой энергии. Электронные сгустки в этой части ускорителя движутся почти в постоянных фазах электромагнитной волны. Эффектом, связанным с расталкивающим действием пространственного заряда, можно пренебречь. В отличие от первой вторую часть волновода назовем ускоряющей секцией [4.1]. На частицу, движущуюся точно вдоль продольной оси z в поле бегущей электромагнитной волны, действует только продольная компонента напряженности электрического поля волны E_z . Это обусловлено аксиальной симметрией диафрагмированного волновода. Продольное движение электронов в ускоряющем волноводе можно описать системой уравнений движения в безразмерной форме:

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{d\xi} &= A \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{d\xi} &= 2\pi \left(\frac{1}{\beta_B} - \frac{1}{\beta} \right), \end{aligned} \quad (4.1)$$

где $\gamma = W/W_0$ – приведенная энергия электрона (отношение полной энергии к энергии покоя электрона); $\beta = v/c$ – приведенная скорость электронов, $\beta = \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\lambda}$; β_B – приведенная фазовая скорость ускоряющей электромагнитной волны, $\xi = z/\lambda$ – безразмерная продольная координата вдоль ускоряющего волновода; $A = eE_m\lambda/m_0c^2$ – приведенная амплитуда ускоряющей волны, E_m – амплитуда напряженности электрического поля волны; φ – фаза частицы в поле волны, $\varphi = kz - \omega t$, k – продольное волновое число, ω – частота ускоряющего поля. Если частицы движутся не строго по оси волновода, то на них действуют также радиальная и азимутальная компоненты электромагнитного поля. Величина действующей силы зависит от расстояния до оси волновода. Кроме того, частицы могут иметь отличные от нуля значения радиальной и азимутальной скоростей при инжекции, поэтому на начальном участке ускорителя кроме переменного электромагнитного поля

необходимо создать постоянное продольное магнитное поле для фокусировки электронов.

Рассматривая картину электромагнитного поля, создаваемого малым сгустком, равномерно движущимся вдоль оси ускоряющей системы, можно обнаружить, что она существенно отличается от картины поля заряда, летящего в свободном пространстве. Разница обусловлена тем, что некоторые спектральные компоненты поля могут распространяться в ускоряющей системе свободно (без источников) со скоростью, меньшей или равной скорости частиц. Это является условием черенковского излучения соответствующих волн равномерно движущимся зарядом: поле отсутствует в области перед сгустком и тянется за ним в виде волнового шлейфа, длина которого определяется групповой скоростью и параметрами затухания в волноводе. Те гармоники, которые не могут излучаться, представляют собой потенциальную (кулоновскую) часть поля, искаженную проводящими поверхностями. Как упоминалось выше, в предположении, что сгустки являются точечными, кулоновским взаимодействием в дальнейшем будем пренебрегать. Поля излучения отдельных сгустков складываются когерентно и, следовательно, в первой полосе пропускания при достаточно длинной цепочке могут достигать больших значений даже при относительно малом токе. Суммарное поле излучения когерентно с ускоряющим полем, т.е. в конечном итоге меняет амплитуду и фазу полного поля, действующего на данный сгусток [4.2]. Поле на данной частоте ω в силу линейности уравнений Максвелла может возбуждаться только компонентой тока с той же частотой. Поэтому рассмотрим продольный ток вида

$$J(z, t) = J_0(z, t) \exp\left(i \int k dz - i \omega t\right), \quad (4.2)$$

где сохранена возможность медленного изменения комплексной амплитуды $J_0(z, t)$ во времени и в пространстве и учтено, что ток почти синхронен с ускоряющим полем, т.е. распространяется в виде волны с фазовой скоростью ω/k и медленно меняющимися амплитудой и фазой. Выражение для комплексной амплитуды продольного поля волны на оси $E(z, t)$, также медленно меняющейся в пространстве и во времени,

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -V_{\text{гр}} \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{E}{\tau} + CJ_0(z, t). \quad (4.3)$$

Первое слагаемое связано с приходом в данную точку сигнала из соседней точки, распространяющегося с групповой скоростью $V_{\text{гр}}$. Второе слагаемое представляет собой затухание за счет омических потерь с некоторой постоянной времени τ . Третье слагаемое есть поле излучения, возбужденное в точке z элементом заряда $J_0 dt$, прошедшим эту точку за время dt . Излучение пропорционально току, а не его производным, что означает учет только черенковского излучения и пренебрежение полями, возникающими при ускорении частиц. Уравнение (4.3) должно быть дополнено граничным условием, в качестве которого обычно принимают задание напряженности поля в точке подключения генератора $E(0, t) - E_{r0}(t)$. Использование этой величины в качестве внешнего параметра неявно предполагает, как видно ниже, что мощность, отдаваемая генератором в секцию, не зависит от тока нагрузки. Для определения τ и C , входящих в уравнение (4.3), умножим его на $E/(\alpha V_{\text{гр}} R_{\text{ш}})$, где α и $R_{\text{ш}}$ – постоянная затухания и шунтовое сопротивление для ускоряющей волны соответственно. Складывая полученное выражение с комплексно-сопряженным выражением и пользуясь тем, что $|E|^2 = E_0^2$, $P = E_0^2 / (2\alpha R_{\text{ш}})$, $W = P/V_{\text{гр}}$, где W и P – энергия электромагнитного поля, запасенная на единице длины, и поток мощности в сечении z соответственно, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} = & -V_{\text{гр}} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{2W}{\tau} + \\ & + (\alpha R_{\text{ш}} V_{\text{гр}})^{-1} [\text{Re} C \cdot \text{Re}(E J_0) - \text{Im} C \cdot \text{Im}(E J_0)]. \end{aligned} \quad (4.4)$$

По своему физическому смыслу соотношение (4.4) представляет собой баланс мощности в системе: уменьшение во времени запасенной энергии складывается из разности уходящей и подходящей СВЧ-мощностей, омических потерь и работы поля над пучком. Постоянная времени $\tau = 2Q/\omega = (\alpha V_{\text{гр}})^{-1}$, где Q – доброт-

ность, а действительное значение коэффициента связи $\beta = -\alpha R_{\text{ш}} V_{\text{гр}}/2$ [4.2].

Траектория движения электронов при ускорении представляет собой спираль с неравномерным шагом и непостоянным диаметром.

В соответствии с теоремой Ирншоу у электрического потенциала нет абсолютного минимума в свободном пространстве. Имеются лишь седловые точки, в которых в одних направлениях есть минимум потенциала, а в других – максимум. Поэтому если в одном направлении имеет место устойчивость, то в перпендикулярном к нему – неустойчивость. Устойчивость продольного и неустойчивость радиального движения частиц зависят от скорости электромагнитной волны. Неустойчивость уменьшается с увеличением скорости и исчезает с приближением скорости волны к скорости света. Для преодоления радиальной неустойчивости в линейных ускорителях электронов применяют постоянное продольное магнитное поле B_z . В диафрагмированных волноводах бегущая электромагнитная волна, ускоряющая частицы, является аналогом волны E_{01} в обычных круглых волноводах [4.2]. Выражения для продольной, радиальной и азимутальной составляющих электромагнитного поля волны имеют вид

$$\begin{aligned} E_z &= E_m I_0(k_r r) \cos \varphi, \\ E_r &= E_m \frac{k_z}{k_c} I_1(k_r r) \sin \varphi, \\ B_\theta &= \frac{\mu_0}{Z_0} E_m \frac{k}{k_c} I_1(k_r r) \sin \varphi, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $k = \omega/c$ – волновое число; $k_z = k/\beta_v$ – продольная компонента волнового числа; $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ – радиальная компонента волнового числа; Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства; I_0 , I_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно. При малых отклонениях от оси z можно воспользоваться разложением первой функции Бесселя в ряд и ограничиться первым членом разложения: $I_1(x) = (x/2) + \dots$ С

учетом этого обстоятельства выражения для компонент электромагнитного поля волны примут вид

$$\begin{aligned} E_r &= E_m \frac{k_z r}{2} \sin \varphi, \\ B_\theta &= \frac{\mu_0}{Z_0} E_m \frac{kr}{2c} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Электроны, инжектируемые в диафрагмированный волновод, обладают начальными радиальными скоростями. Если диафрагмированный волновод поместить в продольное магнитное поле B_z , то возникает сила Лоренца $e[\dot{r}B_z]$, приводящая к появлению азимутальной компоненты скорости v_θ . Если радиальная скорость электронов направлена от оси пучка, то угловая скорость $\dot{\theta}$ при положительном B_z отрицательна. Для устойчивого движения частицы в радиальном направлении потребуем, чтобы радиус траектории, по которой движется частица, оставался постоянным. Тогда уравнение движения имеет вид

$$mr\dot{\theta}^2 + eE_r - ez\dot{B}_\theta + er\dot{\theta}B_z = 0. \quad (4.7)$$

Подставляя в уравнение (4.7) выражения для компонент поля и учитывая, что $\beta = \dot{z}/c$, имеем

$$mr\dot{\theta}^2 + eE_m \frac{kr}{2\beta_B} (1 - \beta\beta_B) \sin \varphi + er\dot{\theta}B_z = 0. \quad (4.8)$$

Из уравнения (4.8) видно, что второе слагаемое, характеризующее действие высокочастотных полей в радиальном направлении, стремится к нулю по мере увеличения скорости волны и скорости электрона. Разделив почленно последнее выражение на mr , получим квадратное уравнение относительно угловой скорости $\dot{\theta}$:

$$\dot{\theta}^2 + \frac{e}{m} B_z \dot{\theta} + \frac{ek}{2\beta_B m} E_m (1 - \beta\beta_B) \sin\varphi = 0, \quad (4.9)$$

и, разрешая его относительно $\dot{\theta}$, имеем

$$\dot{\theta}_{1,2} = \frac{e}{2m} B_z \pm \sqrt{\left(\frac{e}{2m} B_z\right)^2 - \frac{ekE_m}{2m\beta_B} (1 - \beta\beta_B) \sin\varphi}, \quad (4.10)$$

если $\dot{\theta}$ – действительная величина, т.е. подкоренное выражение – положительное, то проекция траектории движения частиц на плоскость, перпендикулярную оси z , представляет собой окружности с постоянным радиусом, что соответствует устойчивому поперечному движению. Отсюда определяется величина продольной компоненты магнитной индукции, необходимой для фокусировки:

$$B_z \geq \sqrt{\frac{2mk}{e\beta_B} E_m (1 - \beta\beta_B) \sin\varphi}. \quad (4.11)$$

Если магнитная индукция фокусирующего поля удовлетворяет неравенству (4.11), то ускоряемые частицы движутся внутри волновода по устойчивой спиральной траектории. Шаг спирали увеличивается с ростом продольного импульса частиц и в конце ускорения касательная к спирали почти параллельна оси ускорителя. В связи с этим угол расходимости пучка оказывается малым. В секции с $\beta_B = 1$ дефокусирующие силы бегущей электромагнитной волны практически отсутствуют. В самом деле, если поперечная сила отсутствует, величина радиального импульса электрона p_r остается неизменной. Величина же составляющей импульса по оси z возрастает. Поэтому угол наклона траектории электрона к оси z уменьшается (рис. 4.1), вследствие чего смягчаются требования к начальной расходимости пучка.

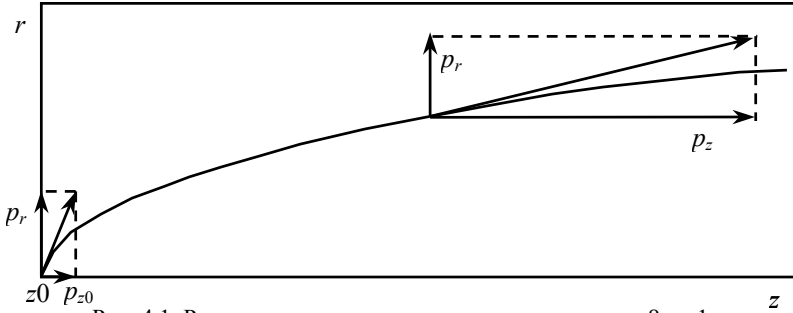


Рис. 4.1. Радиальная траектория электрона в секции с $\beta_B = 1$

В любой точке имеет место соотношение

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{dr}{dz} = \frac{p_r}{p_z}, \quad (4.12)$$

для малых углов можно полагать

$$\delta \approx \frac{dr}{dz} = \frac{p_r}{p_z}. \quad (4.13)$$

Если электрон расположен на вершине волны ($\varphi = 0$), а скорость его такова, что $\beta \approx 1$, то на всей длине будем иметь следующее выражение для продольного импульса:

$$p_z = p_{z0} + \frac{eE_m z}{c} = \frac{W_{\text{нач}} + eE_m z}{c}, \quad (4.14)$$

где $W_{\text{нач}}$ – энергия инжекции. В выражении (4.14) амплитуда поля ускоряющей волны по длине ускорителя считается неизменной. Учитывая выражения (4.13) и (4.14), имеем

$$\frac{dr}{dz} = \frac{p_r}{p_{z0} \left(1 + \frac{eE_m z}{W_{\text{нач}}} \right)}. \quad (4.15)$$

2. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Рабочими характеристиками линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) называют зависимости выходных параметров пучка ускоренных электронов – энергии, энергетической неоднородности, фазовой протяженности сгустка и т.д. – от входных параметров: энергии инжекции, тока пучка, частоты и мощности высоко-частотного питания.

Для однозначного исследования рабочих характеристик следует точно определить выходные параметры. Самым строгим и естественным способом описания пучка электронов на выходе ЛУЭ является описание при помощи распределения частиц в пучке по обобщенным координатам и скоростям в произвольный момент времени. Знание подобного распределения позволяет вычислить полный набор параметров пучка.

Для большинства практических применений пучков ускоренных частиц и для проектирования ускорителей достаточно знать одномерные распределения частиц по энергиям и фазам, которые можно рассматривать как проекцию шестимерного распределения на плоскости, соответственно, энергии и фаз. Однако и такое описание пучка не слишком удобно. Точно так же, как это делают в математической статистике, желательно ввести числовые характеристики, которые полностью или с некоторой точностью определяют энергетические и фазовые распределения частиц на выходе ускорителя.

Определим энергию как среднюю по тепловому действию пучка частиц (например, при калориметрическом измерении):

$$\bar{W} = \int_0^{\infty} S_W(W) W dW, \quad (4.16)$$

где $S_W = \frac{1}{i_0} \frac{di}{dW}$ – нормированное энергетическое распределение частиц; i_0 – полный ток пучка; W – энергия частицы.

Заметим, что определение (4.16) совпадает с определением математического ожидания функции случайной переменной.

Ширина энергетического распределения ΔW , являющаяся мерой энергетической неоднородности пучка, может быть определена заданием соответствующей доли α полного пучкового тока, которая создается частицами с энергиями, лежащими между значениями W_1 и $W_1 + \Delta W$:

$$\alpha = \int_{W_1}^{W_1 + \Delta W} S_W(W) dW, \quad (4.17)$$

где ΔW – ширина энергетического распределения; α – заданная доля частиц; W_1 – значение энергии, выбираемое из условия $\Delta W(\alpha, W_1) = \min$ при фиксированном α .

Легко видеть, что подобное определение не является универсальным, так как связано с заданием величины α , кроме того, возникают достаточно большие математические трудности, связанные с вычислением величины W_1 и разрешением уравнения (4.17) относительно величины ΔW при анализе спектров произвольной формы.

В качестве меры энергетической неоднородности можно воспользоваться величиной среднеквадратического отклонения энергии:

$$\delta_W^2 = \int_0^{\infty} (W - \bar{W})^2 S_W dW = \langle W^2 \rangle - W_0^2, \quad (4.18)$$

где $\langle W^2 \rangle = \int_0^{\infty} W^2 S_W dW$ – средний квадрат энергии частиц в пучке. В

математической статистике величина δ_W называется стандартным отклонением, а квадрат этой величины – дисперсией функции случайной величины. Такое определение энергетической неоднородности, хотя и менее наглядно, чем предыдущие, но является более универсальным и простым.

Таким образом, введенные параметры – средняя энергия и стандартные отклонения энергии от средней – являются, соответственно, мерой расположения на оси энергий.

Заметим, что величины \bar{W} и δ_W не полностью характеризуют энергетическое распределение частиц произвольной формы. Для более полного описания конкретных распределений всегда можно ввести дополнительные величины – асимметрию, эксцесс и т.д., как это делается в математической статистике. Аналогичным образом может быть введен параметр, характеризующий фазовую протяженность сгустка δ_φ . Однако в данной работе этот параметр исследоваться не будет, поэтому ограничимся только упоминанием о нем.

Рабочие характеристики аналитически рассчитать чрезвычайно трудно. Обычно расчет проводится численно, вследствие чего аналитические зависимости, пригодные для анализа, отсутствуют.

С другой стороны, их практическая важность вытекает из того, что они позволяют анализировать работу ускорителей: находить оптимальные варианты систем установки на этапе проектирования, оптимальные режимы при эксплуатации и, наконец, являются основной для разработки средств регулирования и стабилизации параметров пучка ускоренных частиц.

Различают следующие рабочие характеристики: инжекционные токовые, мощностные, частотные. Каждая из этих характеристик может быть еще энергетической, спектральной или фазовой, соответственно выходному параметру, определяемому в ней.

Любая из этих характеристик может быть математически представлена в зависимости от входных параметров в виде

$$X = F(P, f, W_{\text{нач}}, I), \quad (4.19)$$

где X – выходной параметр (\bar{W} , δ_W или δ_φ); P и f – мощность и частота генератора или усилителя соответственно; I – ток пучка.

Для малых изменений входных параметров x уравнение (4.19) может быть представлено в виде разложения в ряд (в безразмерной форме):

$$\frac{1}{X_0} x = 1 + \frac{P_0}{X_0} \frac{\partial x}{\partial P} \frac{\partial p}{P_0} + \frac{f_0}{X_0} \frac{\partial x}{\partial f} \frac{\partial p}{f_0} + \frac{W_{\text{нач}0}}{X_0} \frac{\partial x}{\partial W_{\text{нач}}} \frac{\partial W_{\text{нач}}}{W_{\text{нач}0}} + \frac{I_0}{X_0} \frac{\partial x}{\partial I} \frac{\partial I}{I_0}, \quad (4.20)$$

где индексом нуль помечены номинальные величины.

Все величины, входящие в уравнение (4.19), могут быть получены экспериментальным путем. Знание рабочей характеристики в форме (4.20) является наиболее полезным для целей регулирования параметров ЛУЭ в процессе эксплуатации.

Способ измерения энергии ускоренных электронов, используемый в работе, основан на наличии зависимости пробега электронов в среде от его начальной энергии.

"Средний" пробег электрона в среде в зависимости от начальной энергии может быть вычислен в приближении непрерывного замедления по формуле:

$$R(W_0) = \int_0^{W_0} \frac{dW}{(-dW/dx)}, \quad (4.21)$$

где $R(W_0)$ – "средний" пробег электрона в среде, г/см²; $(-dW/dx)$ – полные "средние" потери электрона в среде на единицу пробега, МэВ·см²/г; W_0 – начальная энергия электрона при входе в среду.

Поясним термин "средние". Очевидно, что взаимодействие электронов с атомами среды носит вероятностный характер, поэтому величина $(-dW/dx)$ носит тоже вероятностный характер и может быть описана некоторой функцией распределения, близкой к гауссовой. Отсюда возникновение терминов "средние" потери энергии, "средний" пробег. Кроме того, при расчете величин реальных пробегов надо принимать во внимание многократное кулоновское рассеяние, искривляющее траекторию электрона. Поскольку сечение упругого рассеяния обратно пропорционально W^2 , роль этого процесса быстро возрастает по мере замедления электронов. После некоторого числа актов рассеяния угловое распределение электронов становится настолько изотропным, что уже не существует какого-либо преимущественного направления, и перемещения электронов можно рассматривать как диффузию.

Из сказанного ясно, что процесс вычисления величины $(-dW/dx)$ в зависимости от энергии электрона чрезвычайно сложен и, как следствие, носит приближенный характер. Соответственно приближенный характер носит зависимость величины "среднего" пробега от энергии электронов при выходе в среду, полученная из формулы

(4.21) на основе расчета зависимости $(-dW/dx)$ от энергии электрона.

На практике в качестве калибровочного графика зависимости обычно используют зависимость, полученную экспериментальным путем. Установив тем или иным способом зависимость $R(W_0)$ – она прилагается во время работы – перейдем к описанию собственно измерителя энергии, который называют или *пластинчатым цилиндром Фарадея*, или *пластинчатым датчиком энергии*.

Конструктивно измеритель, установленный на ускорителе У-31/33, представляет собой набор дисков из алюминия толщиной 0,045 см, каждый из которых может быть включен в цепь измерителя тока или заземлен. Схема соединения пластин представлена на рис. 4.2. Вся конструкция помещена в металлический кожух.

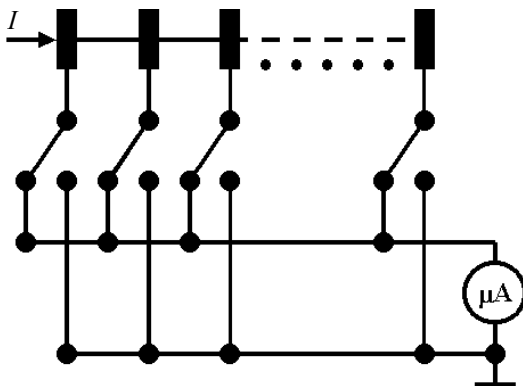


Рис. 4.2. Схема соединения пластин измерителя энергии

Получив прямую полного поглощения, т.е. зависимость доли прошедшего тока ускоренных электронов от номера диска или, что то же самое, от толщины слоя алюминия, определим величину пробега электрона, как это показано на рис. 4.3. Затем, зная величину пробега, по калибровочной зависимости (рис. 4.4, табл. 4.1) находится величина средней энергии электронов в пучке.

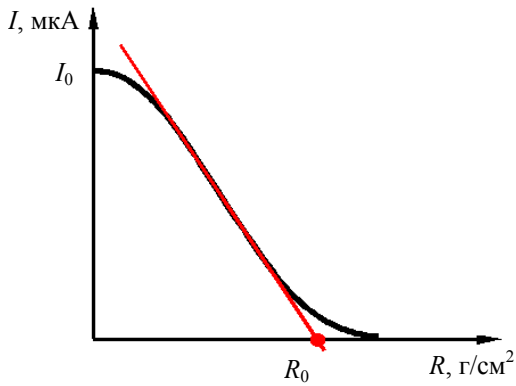


Рис. 4.3. Определение пробега электронов по кривой полного поглощения, где I_0 – полный ток пучка

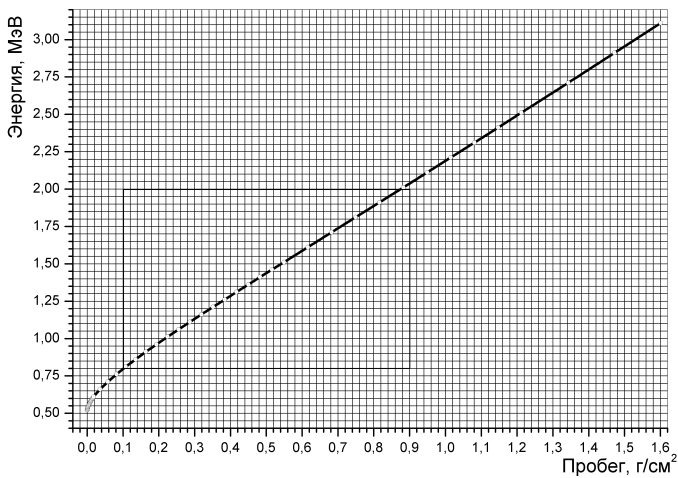


Рис. 4.4. Зависимость пробега электронов в алюминии от энергии (в диапазоне 0,5 ÷ 3,0 МэВ)

Таблица 4.1

**Градуировочный график для определения энергии электронов
(материал пластин – алюминий, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$)**

Энергия электронов, МэВ	Пробег, г/см^2	Энергия электронов, МэВ	Пробег, г/см^2
0,521	$3,519 \cdot 10^{-4}$	0,961	$1,938 \cdot 10^{-1}$
0,526	$7,074 \cdot 10^{-4}$	1,011	$2,243 \cdot 10^{-1}$
0,531	$1,165 \cdot 10^{-3}$	1,061	$2,554 \cdot 10^{-1}$
0,536	$1,716 \cdot 10^{-3}$	1,111	$2,871 \cdot 10^{-1}$
0,541	$2,356 \cdot 10^{-3}$	1,161	$3,191 \cdot 10^{-1}$
0,546	$3,080 \cdot 10^{-3}$	1,211	$3,514 \cdot 10^{-1}$
0,551	$3,883 \cdot 10^{-3}$	1,261	$3,840 \cdot 10^{-1}$
0,556	$4,762 \cdot 10^{-3}$	1,311	$4,168 \cdot 10^{-1}$
0,561	$5,714 \cdot 10^{-3}$	1,361	$4,498 \cdot 10^{-1}$
0,566	$6,735 \cdot 10^{-3}$	1,411	$4,828 \cdot 10^{-1}$
0,571	$7,822 \cdot 10^{-3}$	1,461	$5,160 \cdot 10^{-1}$
0,576	$8,974 \cdot 10^{-3}$	1,511	$5,493 \cdot 10^{-1}$
0,581	$1,019 \cdot 10^{-2}$	1,611	$6,159 \cdot 10^{-1}$
0,586	$1,146 \cdot 10^{-2}$	1,711	$6,826 \cdot 10^{-1}$
0,591	$1,279 \cdot 10^{-2}$	1,811	$7,493 \cdot 10^{-1}$
0,596	$1,417 \cdot 10^{-2}$	1,911	$8,160 \cdot 10^{-1}$
0,601	$1,561 \cdot 10^{-2}$	2,011	$8,825 \cdot 10^{-1}$
0,606	$1,710 \cdot 10^{-2}$	2,111	$9,489 \cdot 10^{-1}$
0,611	$1,864 \cdot 10^{-2}$	2,211	1,015
0,661	$3,641 \cdot 10^{-2}$	2,311	1,081
0,711	$5,772 \cdot 10^{-2}$	2,411	1,147
0,761	$8,165 \cdot 10^{-2}$	2,511	1,212
0,811	$1,077 \cdot 10^{-1}$	2,711	1,343
0,861	$1,353 \cdot 10^{-1}$	2,911	1,472
0,911	$1,640 \cdot 10^{-1}$	3,111	1,601

Доказать утверждения, что найденная вышеописанным способом энергия есть средняя энергия пучка электронов, предлагается самостоятельно.

3. ОПИСАНИЕ ИЗУЧАЕМОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Линейный ускоритель – сложная техническая установка, содержащая ускоряющую, высокочастотную, вакуумную, фокусирующую системы, а также системы охлаждения, управления и др. Одной из основных систем ускорителя является его высокочастотная система, содержащая генератор высокочастотных колебаний большой мощности. Выбор источника питания линейного ускорителя, а следовательно, и длины волны колебаний генератора определяется как требованиями к энергии и мощности электронного пучка на выходе ускорителя, так и конструктивными и экономическими соображениями.

Если принять во внимание эффективность ускоряющей структуры, выраженную через шунтовое сопротивление, то целесообразно выбирать наиболее коротковолновые источники высокочастотной мощности, так как $R_{ш} \sim 1/\lambda$ для геометрически подобных структур. Такой же вывод можно сделать, учитывая габариты и вес установки, потому что радиальные размеры (например, диафрагмированного волновода) уменьшаются прямо пропорционально длине волны λ , поперечное сечение $\sim \lambda^2$, масса ускорителя также в первом приближении $\sim \lambda^3$. Кроме того, при фиксированном темпе ускорения требуемая мощность источника питания изменяется прямо пропорционально λ^2 . Следовательно, при одной и той же длине ускоряющего волновода на заданную энергию можно применить более коротковолновый генератор с меньшей мощностью, хотя при этом приходится мириться с необходимостью выдерживать довольно жесткие допуски на изготовление ускоряющего волновода и увеличением потерь мощности в его стенках.

Величина предельного тока ускоренных частиц также зависит от частоты питающего генератора, причем с ростом частоты за счет уменьшения поперечных размеров сгустка она изменяется приблизительно как $1/f^2$. Увеличение коэффициента затухания и уменьшение предельного тока при переходе в более коротко-

уменьшение предельного тока при переходе в более коротковолновую область длин волн приводят к снижению КПД ускорителя.

Можно отметить также, что, например, в 3-см диапазоне длин волн применение фокусирующей системы на основе постоянных магнитов (МПФС) более рационально, чем в 10-см диапазоне, так как вместе с существенным уменьшением габаритов, массы и стоимости этой системы можно получить большие величины напряженности магнитного поля на оси волновода.

Конструктивные, технологические и экономические соображения также играют важную роль в выборе источника ионизирующего излучения, каким является линейный электронный ускоритель. Так, требования малых габаритов, массы, стоимости установки и, соответственно, размеров и стоимости помещения под эту установку, включая высокочастотное и высоковольтное оборудование, минимальный вакуумный объем и время достижения рабочего вакуума, использование модульно-блочной конструкции, возможность применения местной защиты от излучения, отдадут предпочтение более коротковолновому диапазону длин волн.

Из всего сказанного следует, что выбор того или иного диапазона длин волн генератора зависит от многих факторов и, в первую очередь, от того, какой из них (или их совокупность) является определяющим [4.5].

Разработанная в Малой ускорительной лаборатории МИФИ экспериментальная установка модели У-31/33 представляет собой линейный ускоритель электронов 3-см диапазона длин волн, служащий источником быстрых электронов или (при торможении электронов на мишени) источником гамма-излучения.

Установка предназначена для:

проведения учебно-исследовательских работ, подготовки и обучения студентов принципам и навыкам работы с современной электрофизической аппаратурой;

исследования ряда физических процессов, лежащих в основе действия ускорителя, с целью совершенствования его отдельных систем и создания на их основе более современных образцов установки.

Одновременно в КДВ непрерывно в течение импульса магнетрона инжектируются электроны с энергией 36 кэВ. Импульсы магнетрона и инжектора синхронизируются внешними запускающими генераторами. При взаимодействии электронов с волной происходит группировка электронов в сгустки, которые ускоряются под действием продольной компоненты электрического поля и выводятся из ускоряющего волновода через тонкую алюминиевую фольгу.

Передача СВЧ-мощности от магнетрона к КДВ осуществляется с помощью СВЧ-тракта, состоящего из отрезков прямоугольного волновода, в котором возбуждается волна H_{10} . Для предотвращения пробоев СВЧ-тракт заполнен сухим азотом под давлением. Преобразование волны H_{10} в прямоугольном волноводе в волну типа E_{01} в КДВ осуществляется в трансформаторе типа волны (ТТВ), который установлен на входе КДВ.

Для создания режима бегущей волны в КДВ восемь последних ячеек имеют альсиферовое покрытие, в котором полностью поглощается мощность, оставшаяся после ускорения.

В процессе ускорения пучок электронов удерживается на оси КДВ продольным магнитным полем соленоида, состоящего из шести катушек, намотанных из алюминиевой фольги.

Для уменьшения столкновений частиц с молекулами остаточного газа и устранения высокочастотных пробоев в ускоряющей секции поддерживается вакуум не хуже $133 \cdot 10^{-5}$ Па магнито-разрядным диодным насосом НМД-0,1. Требующие охлаждения элементы и узлы ускорителя принудительно охлаждаются водой или воздухом.

Управление ускорителем осуществляется дистанционно с пульта оператора, установленного в специальном помещении, оборудованном биологической защитой от излучений.

4. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности в лаборатории.
2. Записать параметры экспериментальной установки.
3. Зарисовать и объяснить схемы эксперимента.

4. Снять частотные зависимости ускорителя $\bar{W} = \bar{W}(f)$. По измеренной величине пробега R с помощью калибровочного графика сразу определить энергию и нанести ее на график частота-энергия. Толщина мишени варьируется с пульта управления (выносной пульт) коммутацией пластин датчика энергии.

5. Измерить полный ток пучка ускорителя.

6. Зафиксировать энергию инжекции.

7. Построить зависимость электронного КПД η волновода от частоты.

8. Вычислить средний темп ускорения электронов при резонансном значении частоты.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1) данные о номинальных параметрах установки У-31/33;

2) схему измерения энергии;

3) график кривых поглощения;

4) графики зависимостей $\bar{W} = \bar{W}(f)$ и $\eta = \eta(f)$.

Весь отчет должен быть аккуратно выполнен на листах строго одного формата. Все графики должны быть начерчены карандашом на миллиметровой бумаге. На каждом графике должен быть указан режим испытаний.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определите энергетические параметры пучка ускоренных электронов.

2. Определите величину фазовой протяженности сгустка.

3. В чем трудность аналитического расчета рабочих характеристик?

4. Определите по рабочей характеристике нестабильность средней энергии, если задан уровень и распределение нестабильности частоты.

5. Определите электронный КПД ускоряющего волновода.

6. Определите величину среднего тока ускорения.

7. Почему для передачи мощности от генератора к ускорителю используется прямоугольный волновод?
8. Зачем СВЧ-тракт заполнен азотом под давлением?
9. Какие функции выполняет ТТВ?
10. Для чего в данной конструкции волновода используется алсиферовое покрытие в последних ячейках?
11. Почему для откачки волновода используется магнито-разрядный насос, а не масляный?
12. В чем причина ухудшения вакуума при повышении уровней тока накала катода инжектора, напряжения инжектора, высокочастотной мощности?
13. Поясните метод измерения энергии по кривым полного поглощения.
14. Поясните, что физически означает максимальное значение производной на кривой полного поглощения.
15. Перечислите физические явления, приводящие к погрешности измерения энергии по кривым полного поглощения.
16. Объясните резонансный характер зависимостей средней энергии от частоты.
17. Какое влияние оказывает на динамику электронов объемный заряд пучка ускоряемых электронов?
18. Какую роль играет теорема Ирншоу в ЛУЭ?
19. Объясните, на что расходуется СВЧ-мощность.

ЛИТЕРАТУРА

- 4.1. Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. – М.: Атомиздат, 1969.
- 4.2. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 4.3. Комар А.П. Измерение энергии пучков тормозного излучения от ускорителей электронов. – М.: Наука, 1972.
- 4.4. Диафрагмированные волноводы: справочник / О.А. Вальднер, Н.П. Собенин, Б.В. Зверев, И.С. Щедрин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
- 4.5. Алешин Е.Р., Пучков В.Н. Лабораторный практикум "Физика линейных ускорителей электронов трехсантиметрового диапазона". – М.: МИФИ, 1983.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
В.К. Баев, А.П. Игнатъев, В.А. Сениуков, В.В. Яненко Работа 1. Система повышения мощности СВЧ-волны с накоплением энергии для питания линейного ускорителя электронов.....	4
А.В. Нестерович, А.Н. Пучков Работа 2. Плазменный источник ионов типа "дуоплазматрон" в составе инжектора ионов.....	15
В.М. Лубков Работа 3. Радиационный эксперимент на линейном электронном ускорителе.....	33
В.А. Дворников, И.А. Кузьмин Работа 4. Исследование рабочих характеристик линейного ускорителя электронов.....	42

**Баев Валерий Константинович
Дворников Владимир Алексеевич
Игнатьев Алексей Павлович
Кузьмин Игорь Алексеевич
Лубков Вячеслав Михайлович
Нестерович Александр Владимирович
Пучков Александр Николаевич
Сенюков Виктор Алексеевич
Яненко Виктор Васильевич**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ УСКОРИТЕЛЕЙ**

Под ред. Б.Ю. Богдановича

Редактор М.В. Макарова

Подписано в печать 30.10.2007. Формат 60×84 1/16
П.л. 4,0. Уч. изд. л. 4,0. Тираж 150 экз.
Изд. № 3/4. Заказ №

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет).
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Типография издательства "Тривант".
г. Троицк Московской обл.