Следовательно, масса электрона равна

$$m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-28}\ г = \frac{1}{1837} \text{ массы атома водорода.} \qquad (37.15)$$

Тщательные измерения e/m для электронов и ионов позволили открыть много новых свойств микроскопических частиц. Было обнаружено уменьшение e/m, вызванное возрастанием массы электрона со скоростью, и установлена зависимость массы от скорости:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (37.16)$$

Здесь m_0 — масса покоящегося электрона (при $v = 0$), а m — его масса при движении со скоростью v. Объяснение зависимости m от v было дано Эйнштейном в 1905 г.

В принципе теми же методами определяются массы атомов и молекул. Соответствующие приборы для определения масс атомов и молекул (точнее, их ионов) носят название масс-спектрографов. Необходимые ионы получаются с помощью газового разряда Далее они ускоряются, и из пучка их с помощью электромагнитного «монохроматора» выделяются ионы одной скорости. Затем ионы отклоняются электрическими и магнитными полями. По величине отклонения определяется удельный заряд e/M, а отсюда и масса ионов M.

Первые же измерения масс атомов обнаружили существование изотопов. Пучок ионов одного химического элемента в масс-спектрографе после отклонения в магнитном поле расщепился и дал на фотопластинке несколько линий, соответствующих массам различных изотопов данного элемента, — своеобразный спектр масс. В наши дни точность определения масс атомов с помощью масс-спектрографов (правда, не в граммах, а по отношению к массе эталонного атома) достигает 6—8 значащих цифр.

Масс-спектроскопические методы позволяют проводить количественный анализ нефти, состоящей из молекул различных углеводородов, трудно различимых обычными химическими способами. При большой мощности ионного пучка этот метод позволил разделять изотопы в заметных количествах.

§ 38. Электронно-лучевые приборы. Электронный микроскоп

В настоящее время электронные приборы получили широкое распространение. Это вызвано несколькими причинами — легкостью управления электронным пучком («лучом»), практической безынерционностью пучка (заметим, что согласно (37.7) и (37.14) электрон,

будучи ускорен полем напряжением в $U=1$ *в*, приобретает скорость 594 *км/сек* и эта скорость растет для небольших напряжений, как $\sqrt{U}$) и т. д. Среди электронных приборов, получивших самое широкое применение, кроме рассмотренных в § 23 электронных ламп, следует прежде всего назвать электронно-лучевую трубку, применяемую в телевизорах, радиолокаторах, электронных осциллографах и множестве других устройств

Электронно-лучевая трубка состоит из электронного прожектора (более совершенной конструкции, чем описанная в предыдущем параграфе), системы отклонения электронного луча и экрана, светящегося при падении на него электронов.

Конструкция электронного прожектора показана на рис 3 45 Источником электронов является подогревный катод K—цилиндрик с донышком, покрытым тонким слоем вещества, обладающего малой работой выхода Его температуру можно регулировать, меняя ток в нити иакала катода H. За катодом располагается модулирующий электрод M(цилиндр Венельта). Потенциал, подаваемый на M, отрицателен по отношению к катоду Число

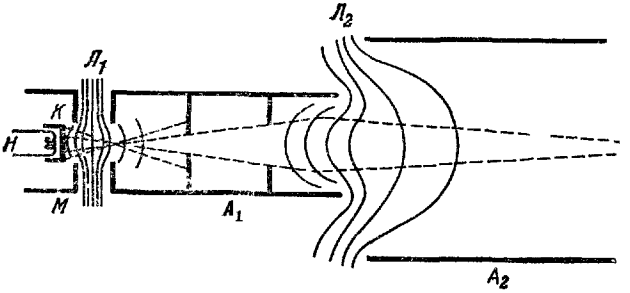


Рис 3.45.

электронов, проходящих через отверстие модулирующего электрода, сильно зависит от его потеициала Варьируя последиий, можно менять ток электронного пучка и в конечном итоге—яркость пятнышка на экране трубки. Этим пользуются в кинескопах телевизоров, подавая видеосигнал на модулирующий электрод

Далее следуют два анода A_1 и A_2 с положительными по отношеиию к катоду потеициалами Ускоряющие электроны электрические поля, возникающие между M и A_1, а также между A_1 и A_2, показаны на рис 3 45 эквипотеициальными поверхиостями Конфигурация электродов, а следовательно, форма эквипотенциальных поверхностей поля выбирается так, чтобы электроиы не только ускорялись, но и фокусировались в точку иа экраие трубки

С помощью специально рассчитаиных электрических и магиитных полей электроиные пучки можно фокусировать так же, как лучи света фокусируются с помощью лииз Поля, обладающие свойством фокусировать электронные пучки (например, между M и A_1 или между A_1 и A_2), называются электронными лиизами, электростатическими или магнитиыми в зависимости от используемого для фокусировки поля Две электростатические

линзы $Л_1$ и $Л_2$ в электронной пушке позволяют фокусировать достаточно мощный пучок электронов в пятнышко диаметром порядка десятых долей миллиметра

Следующим элементом электронно-лучевой трубки является система, управляющая отклонением электронного пучка Для этой цели применяются магнитные или электрические поля. В последнем случае на пути пучка располагаются два конденсатора, плоскости которых повернуты друг к другу под углом 90° (рис. 3 46). Меняя напряженность поля в конденсаторе C_1 с вертикальными пластинами, можно отклонять электронный пучок в горизонтальной плоскости; конденсатор C_2 позволяет осуществлять отклонение в вертикальной плоскости.

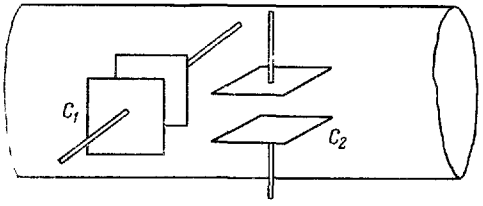


Рис. 3.46.

Скорость электронов в электронно лучевой трубке составляет 10000—20000 *км/сек*. Проходимый ими путь от управляющего конденсатора до экрана не превышает 20—30 *см*, а от катода до экрана — не более 50 *см*. Поэтому прибор является почти безынерционным, позволяя исследовать явления, протекающие за миллионные доли секунды. Особенно удобным для такого рода исследований является прибор, получивший название электронного осциллографа.

Основной частью электронного осциллографа является электронно-лучевая трубка, на экран которой иногда для удобства наносят координатную сетку. В приборе имеется генератор электрических колебаний, позволяющих подавать на вертикальные отклоняющие пластины конденсатора переменное напряжение различной частоты.

С помощью этого приспособления можно исследовать электрические колебания в широком диапазоне частот, подавая изучаемую периодическую э. д. с. на пластины горизонтального конденсатора и подбирая частоту генератора осциллографа так, чтобы на экране получались фигуры Лиссажу (см. т. I, гл. IV).

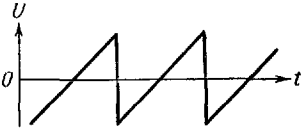


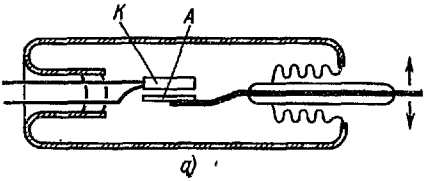
Рис. 3.47.

С помощью специальной схемы, на описании которой мы не останавливаемся, на C_1 можно подавать напряжение пилообразной формы (рис. 3.47). Под действием этого напряжения электронный луч будет перемещаться на экране по горизонтальной прямой слева направо с постоянной линейной скоростью и, пробежав весь экран, практически мгновенно возвращаться обратно и повторять опять весь путь. Такое движение электронного луча называется развертт-

к о й. Подавая на C_2 изучаемое переменное напряжение и подбирая частоту развертки C_1 так, чтобы эти частоты совпадали, можно получить на экране осциллографа неподвижный график изучаемого процесса.

Переводить на «электрический язык» и изучать с помощью катодного осциллографа можно самые различные процессы Приведем несколько примеров.

Можно исследовать деформацию деталей быстроходных машин в процессе их работы, не нарушая при этом работы машин. Для этого на исследуемую деталь наклеивают тонкую целлулоидную ленточку, на которой нанесена полоска графита или приклеен тонкий проводник (тензометр, см §§ 15 и 17) К тензометру через большое сопротивление R подключается источник постоянного напряжения U, так что в цепи идет ток I постоянной величины $I=U/R$ При деформации детали датчик растягивается или сжимается, его сопротивление меняется (в случае металлического проводника—



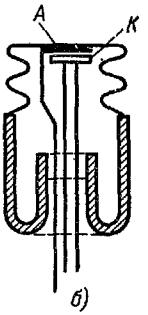


Рис. 3.48.

пропорционально деформации), и вместе с тем меняется разность потенциалов ΔU на его концах ($I=\Delta U/\Delta R=\text{const}$, при изменении ΔR меняется ΔU) Переменная по величине э д с. ΔU, снимаемая с концов тензометра, усиливается и подается на конденсатор C_2 осциллографа На экране получается график деформации детали за период. С помощью специального изменения напряжения развертки, подаваемого на C_1, можно растянуть и просмотреть в деталях любой участок изучаемой кривой

Весьма удобными—чувствительными и универсальными—датчиками для решения самых различных задач являются диоды с подвижными электродами. Две простейшие лампы такого типа показаны на рис 3 48, *а* и *б* В обеих лампах анод крепится с помощью герметической гибкой металлической гофрированной трубки—сильфона. При колебаниях анода ламп (рис 3 48, *а*) резко меняется анодный ток или анодное напряжение (в зависимости от схемы установки, которую мы опускаем) С помощью такой лампы легко осуществить микрометр любой чувствительности, исследовать колебания с помощью катодного осциллографа и т д Особым преимуществом ламп с подвижными электродами как датчиков является то обстоятельство, что они непосредственно дают напряжение, достаточное для работы осциллографа, так что необходимость усиления сигналов датчика отпадает Это позволяет с помощью многолучевого осциллографа, т е осциллографа с несколькими одновременно развертываемыми и независимо управляемыми электронными лучами, изучать колебания сразу нескольких узлов машины, что очень важно, когда взаимосвязь таких колебаний представляет интерес (см резонанс и вынужденные колебания, т I, гл. XIII).

Лампа, изображенная на рис. 3.48, *б*, может служить манометром (в частности, барометром), электрические показания которого можно регистрировать на любом расстоянии от датчика. В зависимости от характера измерений созданы лампы с подвижными электродами самой различной конструкции.

О применении электронно-лучевой трубки в радиолокации и телевидении будет сказано в главе XI. Здесь же мы остановимся на электронном микроскопе.

Важнейшей характеристикой микроскопа является не его увеличение, которое может быть сделано сколь угодно большим, а его разрешающая способность, характеризующая возможность различения предельно мелких деталей изучаемого объекта. Если изображения двух точек, находящихся на расстоянии δ друг от друга, неразличимы, т. е. сливаются в одно, то никакое увеличение не позволит увидеть их раздельно.

Уже отмечалось (т. I, гл. XIV), что волна рассеивается на преграде, если преграда соизмерима с длиной волны, или задерживается ею, если размеры преграды много больше длины волны. Преграды, малые по сравнению с длиной волны, почти не задерживают и не рассеивают волн.

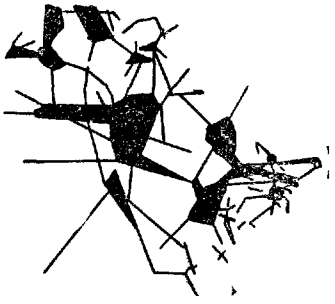


Рис. 3.49.

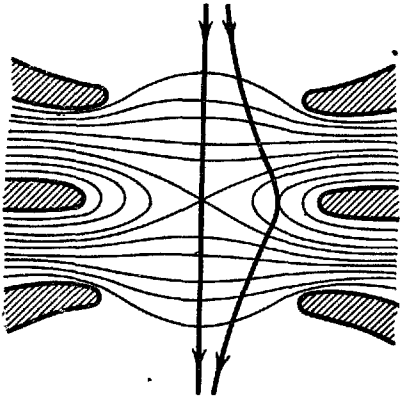


Рис. 3.50.

Наименьшая длина волны излучения, видимого глазом, составляет 0,38 *мк*. Частицы вещества с линейными размерами 0,1 *мк* с помощью оптического микроскопа уже нельзя наблюдать.

Выше мы упоминали о волновых свойствах электрона. При ускорении электрическим полем с разностью потенциалов в десятки тысяч вольт электронный пучок может рассматриваться как волна с длиной порядка 10^{-10} *см*. В то же время с помощью электрических и магнитных линз электронными пучками можно управлять так, как обычными световыми лучами управляют с помощью стеклянных линз. Это позволило создать электронный микроскоп.

Мы опишем коротко применяемый редко, но более простой электронный микроскоп с электростатическими электронными линзами.

Заметим предварительно, что удовлетворительные результаты получаются при работе не с отраженным, а с проходящим сквозь объект электронным лучом Поскольку же электроны, обладая зарядом, сильно взаимодействуют с веществом, то для электронных лучей прозрачными могут быть

лишь очень тонкие объекты, толщина которых не превышает десятых долей микрона При изучении бактерий, вирусов и т д. их наносят на поверхность тончайшей коллодиевой пленки, получаемой при испарении капельки жидкого коллодия, растекшейся по поверхности воды.

Электронный прожектор в электронных микроскопах дает монохроматический пучок электронов, проходящих сквозь объект, т. е «на просвет». Вследствие этого от слишком плотных или имеющих слишком большую толщину предметов может быть получено лишь теневое изображение (рис. 3.49).

Обычный диапазон ускоряющих напряжений, применяемых в электронных микроскопах разных конструкций, лежит в области от 50 000 до 200 000 вольт.

Электростатическая электронная линза (рис 3 50) состоит обычно из трех круглых диафрагм с центральными круглыми отверстиями. Крайние диафрагмы имеют одинаковый потенциал (соединены друг с другом), средняя

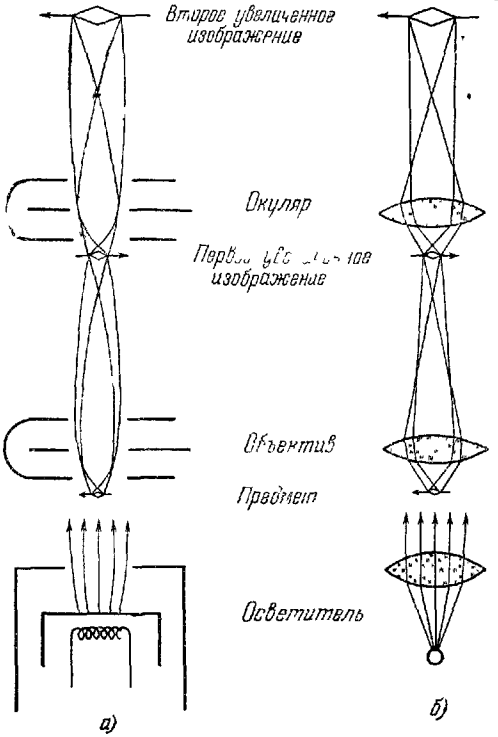


Рис. 3.51.

имеет больший либо меньший потенциал. Структура электрического поля линзы показана его эквипотенциальными поверхностями. Выпуклости этих поверхностей в области отверстий диафрагм и образуют линзу. На рисунке показаны траектории электронов, идущих от двух точек предмета; траектории сходятся после прохождения линзы, и электроны создают изображение этих точек предмета.

«Ход лучей» в электронном микроскопе показан на рисунке 3 51, *а*. Для сравнения на рис. 3.51, *б* показан ход лучей в оптическом микроскопе.