

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНИКОВ
КОРПУСКУЛЯРНЫХ И ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ

Методические указания к лабораторной работе № 2

САМАРА 1999

Составитель **Н.Д.Сёмкин**
УДК 621.397.001.24

Исследование характеристик приёмников корпускулярных и заряженных частиц: Метод. указания к лаб. работе №2 /Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. *Н.Д.Сёмкин* Самара, 1999. 16 с.

В методических указаниях к лабораторной работе №2 по дисциплине "Проектирование первичных преобразователей бортовой научной аппаратуры" приводятся краткие теоретические сведения, описание принципиальной схемы и экспериментальной установки, порядок выполнения лабораторной работы с перечнем контрольных вопросов.

Предназначены для студентов радиотехнического факультета. Подготовлены на кафедре радиотехники.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королёва.

Рецензент доцент В.М.Гречишников

Цель работы: ознакомиться с принципом действия, конструктивным исполнением, техническими характеристиками.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Высокоэнергетичные электроны, бомбардируя поверхность твердого тела, могут выбить электроны из поверхности --это явление называется вторичной электронной эмиссией.

Электрический сигнал образуется электронами, эмитированными фотокатодом, находящимся в вакууме, под действием падающего излучения. Эти электроны обычно фокусируются электростатическим полем на первый из последовательно расположенных электродов-динодов, покрытых материалом, для которого вторичная электронная эмиссия значительна. Потенциалы к последовательно расположенным динодам подводятся от резистивного моста; от динода к диноду они возрастают таким образом, что вторичные электроны, вылетевшие из k -го динода, фокусируются на $(k+1)$ -ом диноде, причем каждый из электронов, в свою очередь, выбивает из динода несколько вторичных электронов (рис. 1).

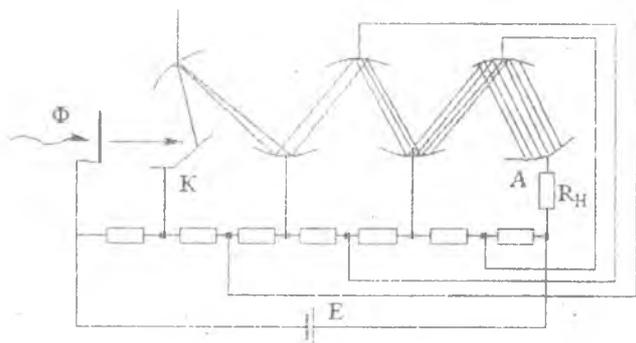


Рис.1. Схема приемника частиц

Если каждый электрон, бомбардируя динод, выбивает в среднем δ вторичных электронов и система содержит n динодов, то коэффициент усиления $M = \delta^n$.

Однако не все электроны достигают первого динода, так что эффективность сбора характеризуется коэффициентом η_c , который меньше единицы. Кроме того, эффективность переноса электронов η_n также меньше

единицы, поэтому $M = \eta_e(\eta_n \delta)^n$, где $n = 5 \div 10$; η_e и η_n – эффективности сбора и переноса, превышает 90%; $M \approx 10^6 \div 10^8$.

Процесс, заканчивающийся вторичной эмиссией, имеет много общего с фотоэмиссией: также происходит освобождение электронов в глубине материала, выход их на поверхность.

Пусть $n(x)$ – число вторичных электронов, освобожденных одним первичным электроном на глубине X материала толщиной d , а $P(x)$ – вероятность выхода освобожденного электрона с глубины X ; тогда коэффициент вторичной эмиссии будет определяться выражением:

$$\delta = \int_0^a n(x)p(x)dx.$$

Теоретический расчет δ может быть проведен с помощью следующих предположений:

а) величина $n(x)$ пропорциональна уменьшению энергии первичного электрона $W_p(x)$ на единице длины:

$$n(x) = -a \frac{dW_p(x)}{dx};$$

б) уменьшение на единицу длины энергии $W_p(x)$ является следующей функцией этой энергии:

$$\frac{dW_p}{dx} = -bW_p^{-\alpha}(x),$$

в) вероятность выхода освобожденного на глубине X электрона подчиняется закону: $p(x) = p_0 \exp(-x/L)$; константы a , b , α , p_0 – зависят от рассматриваемого материала.

Закон изменения δ в функции энергии первичных электронов может быть рассчитан, и он согласуется с экспериментальными наблюдениями.

При энергии первичных электронов (200-400В) имеет место максимум. Величина δ должна быть возрастающей функцией V (разность потенциалов, приложенная к соседним диодам). Для построения измерительной схемы выбирается R_m (сопротивление нагрузки) [1].

Схема питания диодов предназначена для подвода к каждому диоду надлежащего потенциала и состоит из резистивного моста-делителя, к которому приложено высокое напряжение (1,5-2,5 кВ). Каждый диод подсоединяется к определенной точке делителя (рис.2).



Рис.2. Схема питания диодов

Разность потенциалов между диодами зависит от типа фотоумножителя и требуемого усиления; она может изменяться от нескольких десятков до нескольких сотен вольт. Напряжение V_{kd} между катодом и первым диодом должно выдерживаться с большей точностью, так как прежде всего от него зависит эффективность сбора электронов, эмитируемых фотокатодом, а следовательно, и пропорциональность тока падающему потоку. Поэтому напряжение V_{kd} часто стабилизируют диодом, так что оно сохраняется неизменным, когда высокое напряжение изменяют для регулировки усиления. Ток I , проходящий через делитель, должен быть существенно больше среднего анодного тока I_0 , чтобы протекающий через диоды и обусловленный их вторичной электронной эмиссией ток не оказывал заметного влияния на распределение потенциалов диодов и, следовательно, на усиление. Часто устанавливают $I > 100I_0$, обычно между 0,1 и 1 мА. Заземлен, может быть либо анод, либо катод. При пропускании выходного напряжения через емкость можно регистрировать быстропротекающие процессы ($\geq 0,1$ мкс). Величина напряжения питания определяет коэффициент усиления M фотоумножителя:

$$\frac{dM}{M} = n \left(\frac{dV}{V} \right),$$

где n - число диодов. При $n=10$ стабильность коэффициента усиления M находится на уровне 1%.

Выбор анодной нагрузки. Напряжение на нагрузке R_m (рис.3) равно $v_m = R_m I_0$, обычно $R_m I_0 < 10V$.

Нередко применяют также преобразователь ток - напряжение.

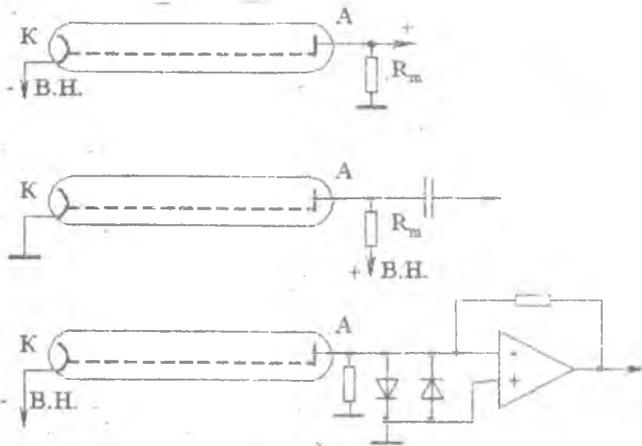


Рис.3. Варианты анодной нагрузки

Анодный темновой ток. Анодный $I_{\alpha 0}$ в отсутствие падающего потока вызывает следующие причины:

- термоэлектронная эмиссия фотокатода;
- токи утечки между электродами.

При охлаждении до -20°C ток $I_{\alpha 0}$ уменьшается в 10-100 раз.

Анодный ток I_{α} получается в результате усиления с помощью системы динодов тока I_k фотокатода:

$$I_{\alpha} = M I_k;$$

зависимость $M = f(V_{\text{нп}})$ показана на рис.4.

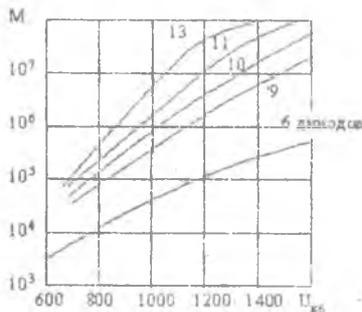


Рис.4. Коэффициент усиления фотоумножителя

Фототок катода зависит от квантового выхода $\eta(\lambda)$ фотоэмиссионного материала и пропускания $T(\lambda)$ окна:

$$I_k = \frac{q\eta(\lambda)T(\lambda)\lambda}{hc} \Phi(\lambda)$$

В области, где ток I_a не превосходит оговоренного в паспорте максимально допустимого значения, коэффициент M не зависит от I_a и фотоумножитель имеет линейную характеристику; его анодная спектральная чувствительность $S_a(\lambda)$ определяется формулой:

$$S_a(\lambda) = \frac{\Delta I_a}{\Delta \Phi(\lambda)} = M(V_{um}) \frac{q\eta(\lambda)T(\lambda)\lambda}{hc}$$

$$S_a(\lambda) = M(V_{um}) S_k(\lambda)$$

где $S_k(\lambda)$ - спектральная чувствительность фотокатода. Обычно $M=10^6-10^8$; $S_k(\lambda_p)$ - от 10 до 100 мА/Вт; $S_a(\lambda_p)$ - от 10^3 до 10^7 А/Вт. Здесь k - длина волны, соответствующая максимуму спектральной чувствительности [2].

Типичные характеристики фотоумножителя: чувствительность фотокатода (при $\lambda_p=400$ км) 85 мА/Вт; коэффициент усиления $M=10^8$; максимальный анодный ток в непрерывном режиме 0,2 мА; площадь фотокатода 16 см². При таких характеристиках поток, соответствующий максимальному анодному току, равен $2,3 \cdot 10^{-11}$ Вт, то есть максимальная освещенность составляет около $1,4 \cdot 10^{-12}$ Вт/см², а поток, соответствующий анодному току порядка 10^{-9} А, равен $1,1 \cdot 10^{-16}$ Вт, то есть освещенность $\sim 0,7 \cdot 10^{-17}$ Вт/см².

При больших анодных токах, возникающих под воздействием мощных импульсных потоков, линейность нарушается из-за образования пространственных зарядов между последними диодами; допустимый для данного отклонения от линейности максимальный ток зависит от свойств материала, которым покрыты диоды, и от их конфигурации (рис.5).

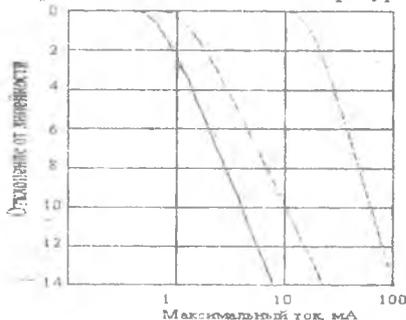


Рис.5. Отклонение от линейности

Временные и частотные характеристики. Быстродействие фотоумножителя определяется разбросом времени пролета электронов от фотокатода к диодам и аноду. Среднее время пролета, от катода к аноду зависит от данного типа диодов, от величины высокого напряжения V_{nm} :

$$t_{tr} = \frac{\text{const}}{\sqrt{V_{nm}}}$$

Обычно t_{tr} составляет от 10 до 100 нс. Разброс $\Delta t_{tr} = 10^{-9} \div 10^{-11}$ с. Время нарастания t_m или спада t_c анодного тока имеет тот же порядок, что и Δt_{tr} . Другое ограничение быстродействия может происходить из-за электрической постоянной времени, связанной с анодной нагрузкой умножителя. Эквивалентная схема представлена на рис.6;

R_d - внутреннее сопротивление ФЭУ ($> 10^{11} \div 10^{12}$ Ом); C_p - ряд паразитных емкостей между анодом и массой. При $R_m \ll R_d$ постоянная времени t равна $R_m C_p$ и граничная частота

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_m C_p}$$

Для $R_m = 50$ Ом и $C_p = 10$ пФ, $t_m' = t_c' = 0,5$ нс, $f_c = 700$ МГц.

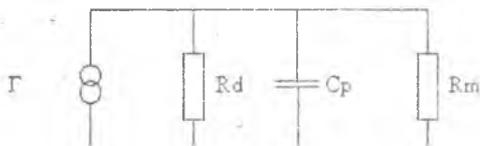


Рис.6. Эквивалентная схема фотоумножителя

Вторично-электронный умножитель (ВЭУ)

Принцип работы ВЭУ аналогичен работе ФЭУ, с той разницей, что вход у ВЭУ открытый. На первый электрод попадает ион или электрон, далее происходит умножение вторичных электронов.

Регистрация ионов с помощью ВЭУ осуществляется в двух режимах: непрерывном и режиме счета.

В первом случае к аноду ВЭУ подключается электрометрический усилитель постоянного тока. С учетом коэффициента усиления ионный ток находится по формуле $I = I_0/K$. При этом регистрируемые токи составляют $10^{-12} \div 10^{-16}$ А. При токах, меньших 10^{-16} А, применяется режим счета ионов. Импульсы, возникающие на выходе ВЭУ при попадании на его катод каждого иона, поступают на усилитель.

Типы ВЭУ. К ним относятся: коробчатые, корытообразные, жалюзийные, тороидальные. Все указанные типы конструкций ВЭУ могут обеспечить коэффициент усиления 10^6+10^7 . Временное разрешение у тороидальных конструкций ВЭУ составляет $10^{-8}+10^{-9}$ с.

На рис.7(а,б) показаны конструкции ВЭУ с непрерывными динодами (а) и канального типа (б).

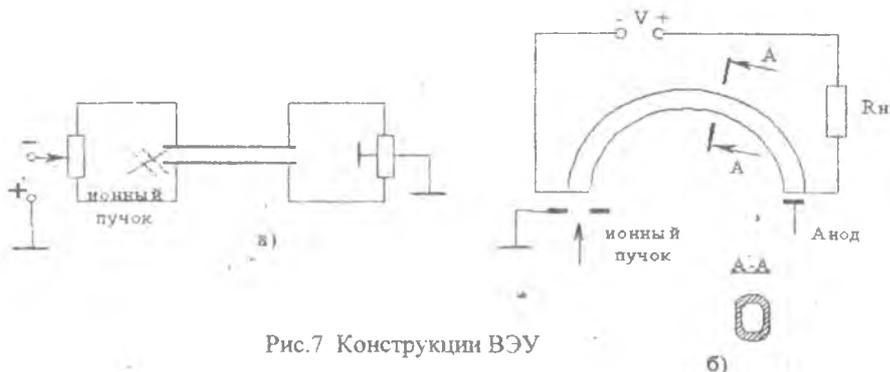


Рис.7 Конструкции ВЭУ

Умножитель представляет собой две стеклянные пластины, расстояние между ними равно 2-3 мм. Поверхность пластин покрыта высокоомной полупроводниковой пленкой. На концы пластин подается питающее напряжение 2-2,5 кВ. В области между пластинами образуется электрическое поле, направленное от анода ко входу ВЭУ. Выбитые ионами электроны ускоряются к аноду и, сталкиваясь на пути с поверхностями пластин, выбивают из них вторичные электроны. Последние умножаются таким же образом. Шумы достигают одного импульса в секунду и менее. Модификацией ВЭУ с непрерывными динодами является каналový электронный умножитель (КЭУ). Он представляет собой изогнутую по окружности (рис.7.б) или спирали трубку из изолятора (стекла), на внутренней поверхности которой имеется полупроводниковый высокоомный слой. При подаче напряжения на концы трубки внутри нее образуется электрическое поле, направленное вдоль оси трубки. Сопротивление КЭУ – 10 Ом, диаметр внутреннего отверстия 1-2 мм. Вместо трубок круглого сечения используются также трубки с сечением в виде эллипса. Основные преимущества КЭУ - высокое усиление, низкий уровень шумов, малая потребляемая мощность, небольшая масса. Например, у ВЭЧ-4 и ВЭУ-6 коэффициент усиления равен 10^7+10^8 . темновой ток - менее 1 импульса в секунду.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис.8. Она предназначена для изучения принципов работы приемников корпускулярных заряженных частиц (электронов, ионов). Выполнение работы проводится в присутствии и при контроле инженера или лаборанта. К работе допускаются лица, ознакомленные с техникой безопасности при эксплуатации электроустановок с напряжениями до 1 кВ.

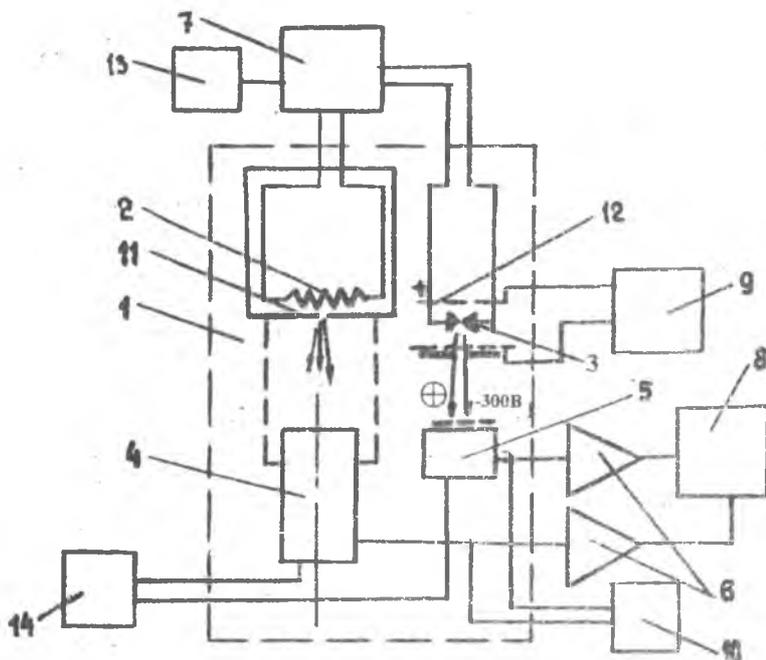


Рис.8. Блок-схема экспериментальной установки для исследования приемников корпускулярных и заряженных частиц (электронов, ионов)

Экспериментальная установка включает: 1 - вакуумную камеру, 2 - нить накала, 3 - контактную пару для создания искры, 4 - фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), 5 - вторично-электронный умножитель (ВЭУ), 6 - эмиттерные повторители, 7 - регулируемый источник питания, 8 - осциллограф, 9 - источник напряжения, 10 - регистрирующее устройство (счетчик - для ВЭУ, микроамперметр - для ФЭУ), 11 - диафрагма, 12 - ускоряющие сетки, 13 - амперметр, 14 - источник питания ФЭУ, ВЭУ.

С помощью лабораторной установки (рис.8) возможно изучение принципа работы ФЭУ и ВЭУ. С этой целью в вакуумной камере 1 помещены нагреватель 2 (вольфрамовая нить с известными спектральными характеристиками и расчетной температурой накала), контактная пара для создания искры 3, фотоэлектронный умножитель 4 и вторично-электронный умножитель 5, выходы которых соединены с эмиттерными повторителями 6, нагреватель (источник света 2) и контактная пара для создания искры 3 соединены с источником питания 7. С помощью источника 7 создается поток света, излучаемый нитью накаливания 2. Выходное напряжение (ток) с ФЭУ 4 и импульсы тока с ВЭУ 5 измеряются с помощью микроамперметра 10 и осциллографа 8. Напряжение с блока 9 подается на две параллельные сетки 12, с помощью которых происходит разделение ионов и электронов, образованных импульсным разрядом в области электродов 3.

Таким образом, с помощью лабораторного стенда можно снять характеристику $U_{\text{ФЭУ}}^{\text{ФЭУ}} = f(S_w)$, где S_w - поток света, создаваемый нитью накала 2. Температура нити накала рассчитывается по измеренным значениям тока накала и сопротивления нагретой нити. Цветовая температура вольфрамовой нити лампы накаливания равна 2850 К, освещенности 1 лк соответствует энергетическая облученность $4,75 \cdot 10^{-2}$ Вт/м², то есть 4,75 мкВт/см². С помощью ВЭУ 5 можно зарегистрировать распределение ионов по скоростям и общий заряд разряда, образованного в промежутке сеток 12.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Принцип работы приемников ионов, электронов, света.
2. Конструктивные особенности приемников заряженных частиц (ФЭУ, ВЭУ).
3. Работа экспериментальной установки.
4. Как рассчитать температуру вольфрамовой нити и найти связь ее с освещенностью (энергетической облученностью).

ЗАДАНИЯ

1. Ознакомиться с принципом действия приемников частиц, их режимами работы, схемами включения.
2. Изучить лабораторную установку.
3. Изучить методику проведения экспериментов.
4. Исследовать экспериментальные зависимости выходного тока (напряжения) ВЭУ от мощности искрового разряда.
5. Освоить методику измерения коэффициентов усиления ФЭУ и ВЭУ.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Исследование характеристик $U_{\text{ФЭУ}}=f(\Phi)$, где Φ - световой поток. Устанавливается ток накала вольфрамовой нити 2 (рис.8) с помощью амперметра 13, величина которого должна соответствовать температуре накала, равной 2850°C .

- Рассчитывается сопротивление нагретой нити по измеренному току и напряжению.

Характеристика $U_{\text{ФЭУ}}=f(\Phi)$ снимается путем измерения постоянного тока с выхода ФЭУ при различных значениях тока накала 2. Уменьшение тока накала 13 необходимо довести до момента, соответствующего минимальному току с выхода ФЭУ. Ток (напряжение) можно измерить с помощью микроамперметра 10 или осциллографа 8. Для примера: если ФЭУ имеет следующие характеристики: чувствительность фотокатода (при $\lambda_v=400\text{nm}$) 85 mA/Vt , коэффициент усиления $M=10^8$, максимальный анодный ток в непрерывном режиме $0,2\text{ mA}$, площадь фотокатода 16 cm^2 , то поток, соответствующий максимальному анодному току, равен $2 \cdot 10^{11}\text{ Vt}$, то есть максимальная освещенность составляет около $1,4 \cdot 10^{12}\text{ Vt/cm}^2$, а поток, соответствующий анодному току порядка 10^{-9} A , равен $1,1 \cdot 10^{16}\text{ Vt}$, то есть освещенность $\sim 0,7 \cdot 10^{17}\text{ Vt/cm}^2$. Яркость вольфрамовой лампы накаливания $6 \cdot 10^6\text{ кд/cm}^2$ или $6 \cdot 10^2\text{ кд/cm}^2$.

2. Исследовать зависимость импульсного напряжения с ВЭУ от мощности искрового разряда.

От источника 7 подается импульс напряжения, при этом в области между контактами происходит импульсный разряд. Ионы, находящиеся в промежутке между двумя сетками, ускоряются напряжением от источника 9.

С помощью ВЭУ ионы выбивают из первого диода электроны, которые после умножения образуют на выходе импульс тока. Интеграл от тока - заряд - является функцией параметров разряда (количество ионов, распределение ионов по скоростям и т.д.).

Примечание: при насыщении ФЭУ и ВЭУ необходимо уменьшить коэффициент усиления путем уменьшения напряжения питания (с 2 кВ до 1,2 кВ).

3. Коэффициент усиления ФЭУ и ВЭУ.

Коэффициент усиления ФЭУ определяется как $\frac{I_a}{\Phi(\lambda)}$, где I_a - ток с выхода ФЭУ; $\Phi(\lambda)$ - поток, создаваемый источником в виде вольфрамовой нити накаливания. Для расчета $\Phi(\lambda)$ необходимо знать температуру нити, диаметр отверстия, через который проходит свет (цветовая температура вольфрамовой нити лампы накаливания равна 2850°C). Уменьшая температуру нити, рассчитывают соответствующее значение $\Phi(\lambda)$ и находят коэффициент усиления ФЭУ. Необходимо получить по крайней мере несколько экспериментальных точек.

С целью определения коэффициента усиления ВЭУ необходимо с помощью источников 7 и 9, а также напряжения на сетке ВЭУ, добиться, чтобы на вход ВЭУ 5 попадали отдельные ионы. Осциллографом 8 регистрируется амплитуда импульса напряжения, образованного взаимодействием иона с ВЭУ. В режиме счета импульсов (два, три и т.д. единичных импульсов) в измеренной амплитуде суммарного импульса содержится n импульсов от p^+ ионов. Амплитуда импульса от иона не зависит от его атомного номера элемента, в который он входит.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Построить зависимость $U_{ФЭУ} = f(\Phi(\lambda))$. Значения находятся по формуле: $\Phi(\lambda) = f(T_w)$.

2. Найти среднее арифметическое результатов путем обработки n измерений:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

3. Найти среднеквадратическое отклонение результатов наблюдений:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{A})^2}{n-1}}$$

где x_i - i -й результат наблюдений;

\bar{A} - среднее арифметическое результатов наблюдений;

n - число результатов наблюдений;

S_x - оценка среднеквадратического отклонения результатов наблюдений.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Результаты измерений, расчеты, графики, осциллограммы, погрешности измерений.
5. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить принципы работы фотоэлектронных и вторично-электронных умножителей (ФЭУ и ВЭУ).
2. Объяснить методику проведения экспериментов.
3. Схема включения ФЭУ и ВЭУ.
4. Области применения ФЭУ и ВЭУ.
5. Условия эксплуатации и источники нестабильности основных параметров ФЭУ и ВЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические измерения неэлектрических величин /Под ред. Новицкого П.В. М.: Энергия, 1975, 576с.
2. Сысоев А.А., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977, 302с.

Составитель Семкин Николай Данилович

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНИКОВ
КОРПУСКУЛЯРНЫХ И ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Методические указания
к лабораторной работе №2

Редактор Н.С.Куприянова
Техн. редактор Г.А.Усачева
Корректор Т.И.Щелокова

Подписано в печать 10.06.99 г. Формат 60×84/16.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл.п.л. 0,93. Усл.кр.-отг. 1,05. Уч.-изд.л. 1,00. Тираж 50 экз.

Заказ 79,

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева,
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного аэрокосмического университета,
443001 г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151.