

энергия Ферми?

2. Сформулируйте принцип Паули.

3. Объясните температурную зависимость сопротивления металлов с точки зрения квантовой теории.

4. Каковы особенности энергетического спектра электронов у металлов, полупроводников и диэлектриков?

5. Как осуществляется распределение электронов по энергетическим уровням валентной зоны при $T = 0$ К в металлах и в полупроводниках?

6. Каков механизм проводимости собственных полупроводников?

7. Как изменяются сопротивление металлов, средняя длина свободного пробега и сечение рассеяния электронов на тепловых колебаниях ионов решетки с ростом температуры?

8. Объясните температурную зависимость сопротивления собственных полупроводников.

610. ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

610.1. Цель работы

Измерить фон вторичного космического излучения, ознакомиться с методами регистрации ионизирующего излучения.

610.2. Разделы теории

Методы регистрации частиц высоких энергий; космические лучи. [1. Гл.11, §75, §76]; [3. §251]; [4]

610.3. Приборы и принадлежности

Счётчик Гейгера – Мюллера, формирователь импульсов, усилитель, пересчетное устройство, блок питания.

610.4. Методы регистрации космических лучей

На верхние слои атмосферы Земли из мирового пространства непрерывно и изотропно (равномерно со всех направлений) падает поток так называемых космических лучей. Эти лучи состоят из частиц высоких энергий, главным образом протонов. В космических лучах различают две компоненты: сравнительно малых энергий (до 10^{10} эВ) – солнечного происхождения и высокоэнергетичную, (вплоть до 10^{21} эВ), которую называют галактической компонентой. Энергия частиц космических лучей поразительно велика: энергии 10^{21} эВ достаточно для подъема груза массой в 10 кг на высоту около 1 метра. На лучших современных ускорителях, имеющих многокилометровые кольцевые каналы, достигнуты энергии протонов не более 10^{14} эВ. Проблема происхождения космических лучей считается одним из важнейших разделов современной астрофизики.

Попадая в верхние слои атмосферы Земли, частицы космических лучей взаимодействуют с ядрами атомов воздуха (главным образом, с азотом и кислородом). При этом, как правило, происходит множественное рождение вторичных частиц, в основном π -мезонов, масса которых в несколько сотен раз превышает массу покоя электрона. Энергия протона космических лучей столь велика, что прежде чем он достигнет уровня Земли, произойдет несколько столкновений, сопровождающихся множественными процессами рождения новых частиц. Энергии вторичных частиц также хватает для возникновения ядерных реакций. Поэтому на уровне Земли всегда существует ионизирующее излучение, состоящее из вторичных продуктов ядерных взаимодействий первичного космического излучения с атмосферой.

Наиболее распространенный детектор ионизирующего излучения – счетчик Гейгера – Мюллера. Он был изобретен еще

в 1908 г. Гейгером совместно с Резерфордом, а впоследствии усовершенствован Гейгером и Мюллером.

Счётчик Гейгера – Мюллера есть ионизационное устройство, основанное на своего рода «внутреннем усилении» первичных слабых ионизационных процессов. Схема счётчика изображена на рис. 610.1. Он представляет собой цилиндрический конденсатор, в котором центральным электродом, обычно служащим анодом, является тонкая нить радиусом в сотые доли миллиметра, а катодом — металлический цилиндр радиусом примерно в 1 см. Счётчик помещается в откачанной оболочке, которая может наполняться теми или иными газами, обычно при пониженном давлении. Если радиус нити обозначить через a , а радиус цилиндра через b и если разность потенциалов между нитью и цилиндром равна V , то градиент потенциала, т. е. напряжённость поля E , на расстоянии r от оси счётчика ($a < r < b$) будет

$$E = \frac{V}{r \ln(b/a)}. \quad (610.1)$$



Рис. 610.1

Пусть, например, $V = 1000$ В, $a = 4 \cdot 10^{-3}$ см, $b = 1$ см. Тогда напряжённость поля около цилиндра ($r = 1$ см) будет 181 Всм $^{-1}$, а около нити ($r = 4 \cdot 10^{-3}$ см) $E = 4,52 \cdot 10^4$ Всм $^{-1}$. Из этого простого подсчёта видно, что если нить достаточно тонка, то при сравнительно небольшой разности потенциалов между нею и цилиндром напряжённость поля у нити может достигать столь больших значений, что становится возможным появление

вблизи нити новых электронов и ионов вследствие ударной ионизации.

Характер работы счётчика существенно зависит от разности потенциалов V между нитью и цилиндром: в зависимости от величины V счётчик работает либо как ионизационная камера, либо как так называемый «пропорциональный счётчик», либо собственно как счётчик Гейгера – Мюллера.

Представим себе, что под действием того или иного ионизирующего агента (заряженные быстрые частицы или коротковолновое излучение) внутри счётчика возникло определённое число пар ионов. Если увеличивать постепенно напряжение, то ионизационный ток сначала будет линейно возрастать, но при дальнейшем увеличении напряжения возрастание тока сначала замедляется, а затем ток становится независимым от напряжения (ток насыщения, рис. 610.2, область $0 - V_p$). Сила этого тока насыщения является мерой числа возникших пар ионов.

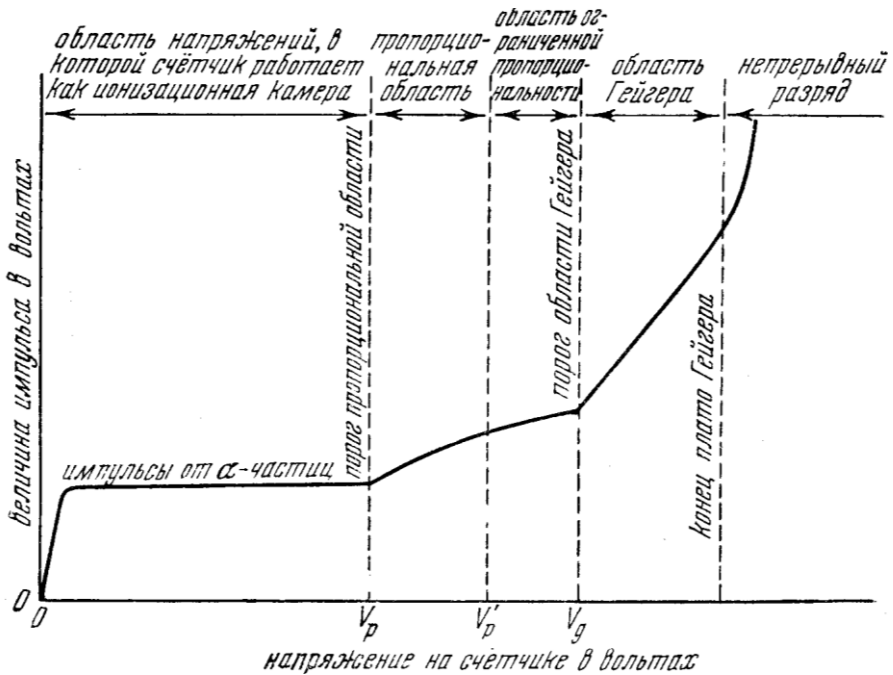


Рис. 610.2

При напряжении, большем V_p , начинается ударная ионизация, в результате которой число ионов увеличивается. Если каждый электрон на пути к нити создаёт за счёт ионизации соударения A новых электронов, то A называется коэффициентом газового усиления; он может достигать величины 10^7 . В определённой области напряжений от V_p до V'_p коэффициент газового усиления A не зависит от числа первично возникающих ионов. Поэтому, если первичная ионизация даёт n пар ионов, то в результате газового усиления ток будет пропорционален n и, следовательно, будет пропорционален числу первичных пар ионов. Счётчик, работающий в таком режиме, называется *пропорциональным*. Он позволяет, например, различать импульсы от α - и β -частиц. При дальнейшем увеличении напряжения обнаруживается

зависимость величины A от мощности ионизации: чем большее число пар ионов создаёт первичная частица, тем меньше A . Наконец, начиная с некоторого критического напряжения V_g , импульсы от частиц с различной ионизирующей способностью становятся одинаковыми. Прибор, работающий в таком режиме, действует уже, собственно, как счётчик Гейгера – Мюллера. Коэффициент усиления при этом сильно возрастает, но возможность различения первичных ионизирующих частиц теряется.

Механизм работы в режиме счётчика Гейгера – Мюллера довольно сложен. В основных чертах он состоит в том, что электроны, обладающие очень большой подвижностью, в промежутки времени порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ с оказываются вблизи нити, где благодаря высокому градиенту потенциала они получают столь большое ускорение, что путём ударной ионизации вызывают новые электроны и ионы с последующим развитием лавины. Важную роль при этом играет также фотоэлектрическое освобождение электронов со стенок счётчика под влиянием ультрафиолетового излучения возбуждённых атомов газа, возникающих вследствие ударов быстрых электронов или при рекомбинации положительных ионов и электронов.

Положительные ионы за промежуток времени $10^{-7} - 10^{-8}$ с, в течение которого развивается лавина, практически остаются на месте. Они создают вблизи нити облако положительного пространственного заряда, которое в конце концов настолько понижает градиент потенциала у нити, что дальнейшее развитие лавины становится невозможным. Медленно двигаясь по направлению к цилиндру (катоде), положительные ионы в конечном счёте нейтрализуются на его стенках, и разряд прекращается.

Для хорошей работы счётчика важна быстрота гашения разряда. В так называемых несамогасящихся счётчиках гашение осуществляется благодаря включению в цепь последовательно с нитью высокоомного сопротивления R (см. рис. 610.1) порядка

$10^8 - 10^9$ Ом. Падение потенциала на этом сопротивлении уменьшает разность потенциалов между нитью и цилиндром и препятствует дальнейшему развитию разряда. При наличии этого гасящего сопротивления потенциал пространственного заряда падает по экспоненциальному закону $e^{-t/RC}$, т. е. через RC секунд уменьшается в e раз; (C – распределённая ёмкость всей схемы). При $R \sim 10^8$ Ом и $C \sim 10^{-11}$ Ф, $RC \sim 10^{-3}$ с. Это и есть характерная постоянная времени счётчика. От её величины зависит временная "разрешающая" способность счётчика, т. е. его способность отдельно отмечать быстро следующие друг за другом частицы. В самом деле, до тех пор пока разность потенциалов между нитью и цилиндром не восстановится до своего первоначального значения, новая частица, попавшая в счётчик, не вызовет развития лавины и образования разряда ("мёртвое время").

Применение гасящих сопротивлений, однако, ухудшает работу счётчика в других отношениях. Поэтому в настоящее время для целей гашения пользуются специальными "гасящими" электронными схемами. Применяются также "самогасящиеся" счётчики, которые наполнены газом, состоящим из сложных молекул (например, смесью аргона и паров спирта). Пары спирта и выполняют функцию гашения разряда. Это объясняется тем, что молекулы спирта поглощают ультрафиолетовое излучение, испускаемое возбуждёнными атомами аргона, и благодаря способности многоатомных молекул перераспределять энергию возбуждения по большому числу степеней свободы с большой вероятностью превращают энергию электронного возбуждения в энергию колебаний ядер. Вследствие этого сильно уменьшается число электронов, освобождаемых фотоэлектрическим путём, и разряд быстро гасится.

В качестве измерительного прибора на выходе счётчика раньше применялись малоинерционные струнные электрометры. В настоящее время пользуются обычно радиотехническими усилительными устройствами, достигшими высокой степени совершенства. На выходе усилителя обычно ставится не

измерительный прибор, а счётчик, автоматически регистрирующий число импульсов. Для регистрации очень быстро следующих друг за другом частиц применяются так называемые пересчётные схемы, понижающие скорость счёта в заданное число раз (рис. 610.3).

Вторичное излучение можно также охарактеризовать плотностью потока ионизирующих частиц

$$\vec{W} = \frac{d\Phi}{dS} \cdot \vec{n} = \omega \vec{v}, \quad (610.2)$$

где $d\Phi$ – элементарный поток ионизирующих частиц, проходящих через элементарную площадку dS , ω – число ионизирующих частиц в единице объема вещества (концентрация); \vec{v} – средняя скорость проходящих частиц; \vec{n} – единичный вектор в направлении средней скорости. Если площадка S – плоская и все частицы пролетают ее по нормали, то соотношение (610.2) можно представить в другом виде:

$$W = \frac{N}{S \cdot t}, \quad (610.3)$$

где N – число частиц, пересекающих площадку S за время t .

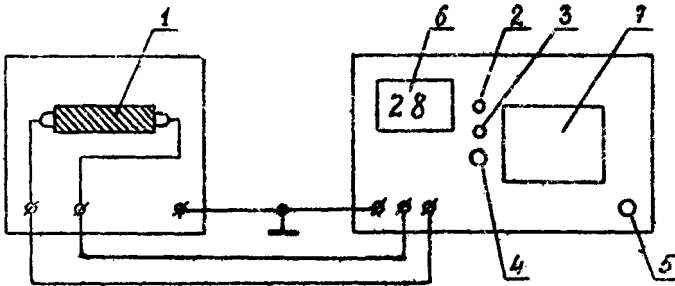
610.5. Описание установки и методика измерений

Исследование вторичного космического излучения проводится на установке, состоящей из счётчика Гейгера – Мюллера, формирователя импульсов, усилителя и счетчика импульсов (рис. 610.3).

При включении тумблера 5 прибор прогревается в течение 10 мин. Затем кнопкой 4 счетчик переводится в режим счета. При этом включается лампочка 2. Счет хронометрируется внутренним таймером и время счета одинаково и составляет

$t = (60,0 \pm 0,1)$ с. По прохождении этого времени включается лампочка 3, счетчик блокируется, при этом показания цифрового

индикатора 6 изменяются. Прохождение каждой частицы фиксируется акустическим индикатором 7.



1 – детектор Гейгера – Мюллера, 2 – лампочка включения пересчетного устройства, 3. – лампочка выключения пересчетного устройства, 4 – кнопка «Запуск» пересчетного устройства, 5 – выключатель «Сеть», 6 – цифровой индикатор, 7 – акустический индикатор

Рис. 610.3

610.6. Порядок выполнения работы

1. После прогрева прибора провести 50 измерений по 1 мин каждое. Результаты занести в таблицу.

2. На калькуляторе рассчитать $N_{10}, N_{20}, N_{30}, N_{40}, N_{50}$ – среднее арифметическое числа импульсов за $t = (60,0 \pm 0,1)$ с для 10-и, 20-и, 30-и, 40 и 50-и измерений соответственно. Рассчитать ΔN_0 для соответствующих наборов измерений. При расчёте ΔN_0 пользоваться формулой Стьюдента: $\Delta N_0 = S_n \cdot t_\alpha$ (где t_α – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0,95 зависит от числа измерений $t_\alpha(10) = 2,3; t_\alpha(20) = 2,1; t_\alpha(30) = t_\alpha(40) = t_\alpha(50) = 2,0$), а

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n(n-1)}},$$

где ε_i – случайное отклонение (см. [4]). Полученные результаты занести в таблицу.

Таблица

N (п/п)	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
\bar{N}					
ΔN_0					
N					

3. Окончательный результат представить в виде $N = (\bar{N} \pm \Delta N_0)_{\text{мин}}^{-1}$ и занести в таблицу в соответствующие колонки.

4. Из соотношения (610.3) по результату для $\bar{N} \pm \Delta N_0$, взятому для 50-и измерений, рассчитать среднее значение плотности потока через горизонтальную плоскость счётчика вторичного космического излучения. При этом учесть, что площадь поперечного сечения счётчика имеет значение $S = (740 \pm 10) \text{ мм}^2$.

5. Рассчитать косвенную погрешность измерения плотности потока ΔW_0 . Результат представить в виде $W = (\bar{W} \pm \Delta W_0)_{\text{мин}}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой вторичное космическое излучение?
2. Какие компоненты космических лучей различают?
3. Как перевести энергию 1 эВ в джоули?
4. Какие частицы появляются при множественном рождении вторичных частиц?
5. Как устроен счётчик Гейгера – Мюллера?
6. Как распределено электрическое поле в счетчике Гейгера – Мюллера?
7. От чего зависит характер работы счётчика Гейгера – Мюллера?
8. Когда счётчик работает как ионизационная камера?
9. Когда счётчик работает как пропорциональный?
10. Когда счётчик работает в режиме Гейгера?
11. Что такое коэффициент газового усиления A ?
12. Что называют ударной ионизацией?
13. Что такое временная «разрешающая» способность счётчика?
14. Какие меры принимают для того, чтобы разряд быстро гасился?
15. Что такое гасящее сопротивление и какую роль оно играет?
16. Что такое плотность потока ионизирующих частиц?
17. Объясните причины уменьшения абсолютной погрешности измерений при увеличении числа измерений.

611. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

611.1. Цель работы