

# УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛУ-4

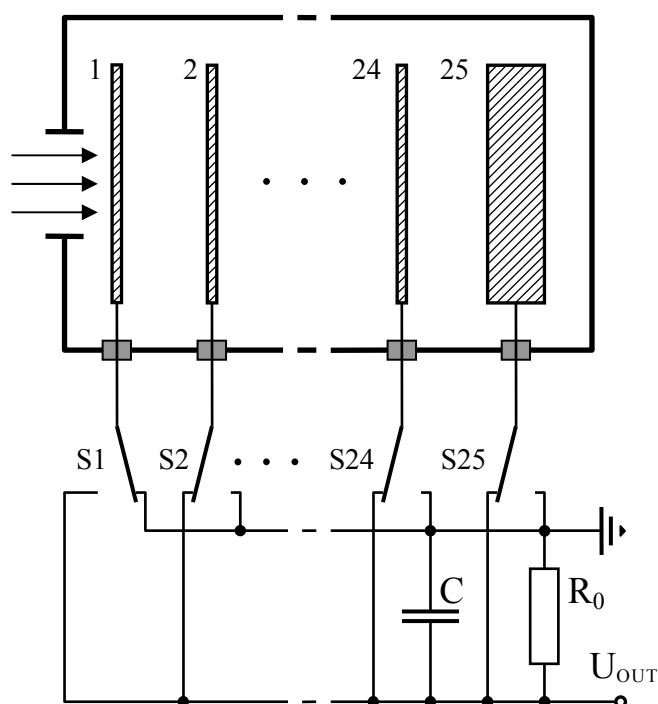
Коршунов Ф.П., Лазарь А.П.

ГНУ "Институт физики твердого тела и полупроводников" НАН Беларуси  
ул. П. Бровки, 17, Минск, 220072 Беларусь

E-mail: [korshun@iftp.bas-net.by](mailto:korshun@iftp.bas-net.by), [lazar@iftp.bas-net.by](mailto:lazar@iftp.bas-net.by)

**Введение.** Радиационная технология используется в производстве многих типов полупроводниковых приборов. Ее применение базируется на возможности контролируемого введения в полупроводники и структуры с *pn*-переходами радиационных дефектов, вызывающих заданные изменения электрических свойств приборов. Для этой цели используются различные виды проникающих излучений: электроны,  $\gamma$ -кванты, нейтроны, протоны,  $\alpha$ -частицы [1,2].

В данной статье описывается устройство для измерения энергии электронов пучка сильноточного ускорителя ЭЛУ-4. Ускоритель, предназначенный для применения в радиационно-технологических процессах с использованием ускоренных электронов и тормозного излучения, имеет следующие основные параметры: номинальная энергия частиц 4 МэВ, ток в импульсе до 1 А, длительность импульса тока 5 мкс, частота следования импульсов 200 Гц.



**Рис. 1.** Принципиальная схема устройства для измерения кинетической энергии электронов по пробегу и поглощению в меди: 1–24 — набор медных пластин, 25 — коллектор из меди, S1–S25 — блок реле

**Описание устройства и методики измерений.** Принципиальная схема устройства показана на рис. 1. Оно представляет собой набор из 24 медных пластин диаметром 80 мм и толщиной  $0.117 \text{ г/см}^2$  каждая. Пластины расположены на расстоянии 1 мм друг от друга. За ними расположен медный коллектор толщиной  $2.7 \text{ г/см}^2$ . Суммарная толщина поглотителя, равная  $5.5 \text{ г/см}^2$ , рассчитана на полное торможение электронов с энергией 8 МэВ.

Поглощающие пластины и коллектор изолированы друг от друга и от земли с помощью фторопластовых прокладок. Через вакуумплотный разъем они гальванически связаны с реле, которые коммутируют их на накопительный конденсатор  $C$  или на землю. Схема управления реле, цифровой вольтметр, измеряющий напряжение на нагрузочном сопротивлении  $R_0$ , работают под управлением персонального компьютера, который одновременно осуществляет накопление и обработку

получаемых результатов. Весь блок смонтирован в цилиндрическом переходнике и установлен на боковом отводе тракта транспортировки пучка ускоренных электронов.

Напряжение  $U_{OUT}$  на сопротивлении  $R_0$  пропорционально заряду электронов  $Q$ , поглощенных в пластинах за один импульс:  $U_{OUT}=QvR_0$ . Здесь  $v=200$  Гц — частота следования импульсов тока. Постоянная составляющая заряда на накопительном конденсаторе  $C$  равна  $Q\tau_1v$ , где  $\tau_1=R_0C$  — постоянная  $RC$ -цепочки. Номинальные значения резистора и конденсатора ( $R_0=1-10$  МоМ,  $C=0.1-1$  мкФ) выбираются из условия  $U_{OUT}\sim 1$  В,  $\tau_1v\gg 1$  и определяются величиной тока пучка.

За один импульс на конденсатор стекает заряд  $Q$ , поэтому напряжение  $U_{OUT}$  содержит переменную составляющую в виде сильно вытянутой "пилы" с амплитудой  $1/\tau_1v$  относительно постоянного уровня. На самом деле погрешность измерения заряда еще меньше, так как период интегрирования входного сигнала вольтметром, равный 40–60 мс, намного дольше периода следования импульсов  $1/v=5$  мс.

Методика проведения измерений заключается в следующем. Пучок ускоренных электронов отклоняется на угол  $20^\circ$ , проходит тракт коллимации и сепарации по энергии и через вакуумный затвор подается на пластины. Диаметр пучка на первой пластине — 1 мм. Цикл измерений начинается с отсчета  $I_0$ , соответствующего полному току пучка. В этом случае все пластины замкнуты на накопительный конденсатор. Затем на землю последовательно коммутируется первая пластина, за ней вторая, третья и т.д. Таким образом, отсчету  $I_n$  соответствует конфигурация реле, где  $n$  первых пластин замкнуты на землю, а остальные пластины — на нагрузку; они вместе с коллектором выступают в качестве цилиндра Фарадея, регистрируя, таким образом, электроны, прошедшие без поглощения слой толщиной  $n\Delta$ , где  $\Delta=0.117$  г/см<sup>2</sup>.

Характерная зависимость числа прошедших частиц от толщины слоя поглотителя представляет собой медленно спадающую кривую, которая постепенно переходит в участок быстрого спада и заканчивается пологим "хвостом" (областью страгглинга). За полный пробег принимается величина  $R_\Sigma$ , получающаяся при пересечении касательной к резко спадающей части кривой с осью абсцисс (экстраполированный пробег).

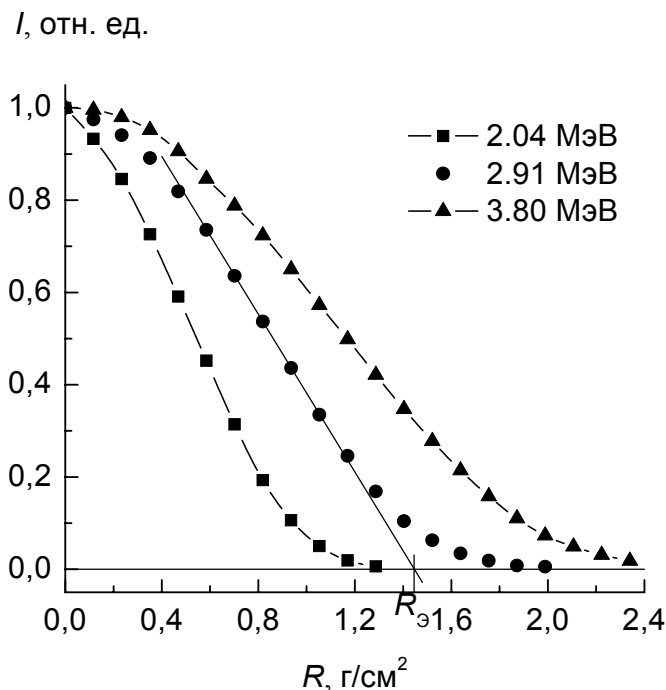


Рис. 2. Экспериментальные кривые прохождения моноэнергетических электронов разных энергий в меди.

### Результаты и обсуждение.

На рис. 2 представлены кривые прохождения моноэнергетических электронов разных энергий в меди, полученные с помощью описываемой методики. Все кривые нормированы на полный ток пучка  $I_0$ . Значения величин  $R_\Sigma$  находятся численно путем аппроксимации участков быстрого спада кривых кубическими полиномами вида  $a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3$ . Линейная составляющая найденных полиномов,  $a_0+a_1x$ , задает прямую, касательную к кривой на уровне 0.5, и точку ее пересечения с осью абсцисс. Так для кривых, представленных на рис. 2, были

получены значения  $R_{\text{Э}}=0.960, 1.447$  и  $1.926$  г/см<sup>2</sup>. Существенно, что фоновый ток, влияющий на точность определения  $R_{\text{Э}}$ , практически нулевой.

За отправную точку при калибровке устройства взяты данные по пробегу электронов с полной энергией  $W=4.30$  МэВ в меди, приведенные в [3]:  $R_{\text{Э}}=1.92$  г/см<sup>2</sup>. Далее учитывается то обстоятельство, что величина напряженности поперечного магнитного поля, в котором по заданному радиусу движется заряженная частица, прямо пропорционально зависит от ее импульса; поэтому между кинетической энергией электронов и током обмоток поворотного магнита  $I_M$ , отклоняющего пучок на пластины, существует параметрическая связь. С учетом релятивистских поправок она дается выражением:

$$E_{\text{кин}} = \left[ (\alpha I_M)^2 + E_0^2 \right]^{1/2} - E_0,$$

где  $E_0=0.511$  МэВ — энергия покоя электрона,  $\alpha$  — эмпирический коэффициент. В соответствии с данной формулой кривым, представленным на рис. 2, сопоставлены значения энергии 2.04, 2.91 и 3.80 МэВ.

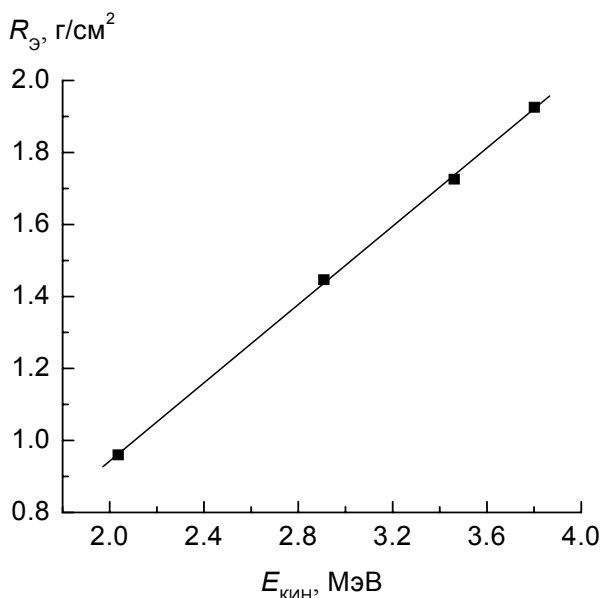


Рис. 3. Экстраполированные пробеги электронов в зависимости от кинетической энергии.

Было проведено сравнение этих значений с результатами, полученными в экспериментах по дифракции электронов [4]. Сравнение показало, что с точностью до ошибок измерения обоих методов ~1% значения энергий совпадают.

В общем случае экспериментальная зависимость экстраполированного пробега электронов в веществе от их энергии имеет нелинейный характер. Однако для небольших диапазонов изменения величин можно получить простые эмпирические формулы, связывающие пробег с энергией частиц. На рис. 3 приведены измеренные экстраполированные пробеги электронов в зависимости от их кинетической энергии. Видно, что в диапазоне энергий от 2 до 4 МэВ полученные результаты можно с хорошей точностью аппроксимировать линейной зависимостью

$$R_{\text{Э}} = 0.543E_{\text{кин}} - 0.144.$$

Здесь энергия электронов дана в мегаэлектронвольтах, а экстраполированный пробег — в граммах на квадратный сантиметр. Полученная формула позволяет легко решить и обратную задачу: по экстраполированным пробегам определить энергию электронов.

### Список литературы

1. Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский, И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович. Актуальные проблемы физики твердого тела. Беларуская наука, Мн. (2003). С. 245.
2. Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский, А.И. Дударчик. Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук. №2, 80 (2000)
3. F.L. Hereford, C.P. Swann. Phys. Rev. **78**, 6, 727 (1950).
4. Ф.П. Коршунов, А.П. Лазарь. Известия РАН. Сер. физ. 59, 10, 152 (1995).