

лоиде (как в магнетроне). При достаточно большой величине магн. индукции, большей критической, электроны перестают доходить до анода, между катодом и анодом создаётся облако пространств. заряда, вращающееся вокруг катода. Продольная составляющая электр. поля,

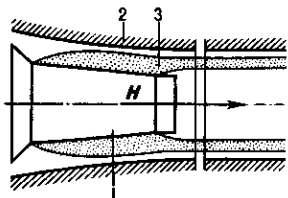


Рис. 2. Магнетронная электронная пушка: 1 — катод; 2 — анод; 3 — электронный пучок.

возникающая вследствие наклона к оси образующих катодного и анодного электродов, смещает электроны вдоль оси — формируется трубчатый электронный пучок. С помощью магнетронных пушек удаётся сформировать трубчатые электронные пучки с лервансом в несколько десятков мкА/В<sup>3/2</sup>.

Разновидностью систем формирования электронных пучков являются Э. п. с модуляцией тока пучка. Управление током пучка в этих пушках производится спец. управляющим электродом, к-рый может быть выполнен в виде штыря, проходящего через отверстие в середине катода, сетки, помещённой между катодом и анодом, и толстой диафрагмы, расположенной вблизи анода. Изменение потенциала управляющего электрода позволяет в широких пределах — от нуля (запирания пушки) до максимального для данной системы значения — изменять ток пучка.

Лит.: Алямовский И. В., Электронные пучки и электронные пушки, М., 1966; Молоковский С. И., Сушков А. Д., Интенсивные электронные и ионные пучки, 2 изд., Л., 1991.

А. А. Жигарев.

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ** — совокупность методов анализа свойств вещества по энергетич. спектрам, угл. распределениям, спиновой поляризации и др. характеристикам электронов, эмитируемых веществом под влиянием к.-л. внеш. воздействий (электронных, ионных и др. зондов). Методы Э. с. позволяют изучать элементный состав образца, структуру, электронное строение, тепловые колебания атомов и молекул веществ в твёрдой, жидкой и газовой фазе, а также получать др. информацию на микроскопич. уровне. Для твёрдого тела и жидкости информация может относиться как к поверхности и приповерхностной области, так и к объёму. В зависимости от природы зонда различают: фотоэлектронную спектроскопию, в к-рой для выбивания из вещества электронов используют: излучение от красного до рентг. диапазона; ионно-электронную спектроскопию, в к-рой изучаемый объект бомбардируют ионами разл. энергии; вторично-электронную спектроскопию (ВЭС), основанную на изучении рассеяния в веществе потоков ускоренных электронов, и т. д. [1].

Помимо фотоэлектронной спектроскопии, наиб. результативны методы ВЭС. В них информацию получают, регистрируя и анализируя изменения, претерпеваемые первичными электронами вследствие определённых элементарных актов взаимодействия их с изучаемым объектом (спектроскопия отражённых электронов); носителями информации являются также вторичные электроны, возникающие в результате генерации их воздействующим агентом или при релаксации создаваемого им возбуждения в веществе (спектроскопия истинно-вторичных электронов). Имеются также методики, в к-рых обе группы электронов исследуются совместно. Т. к. отражение электронов может быть упругим, квазиупругим и неупругим, различают неск. методов регистрации отражённых частиц.

В спектроскопии упруго рассеянных электронов (УРЭ) изучают угл. распределения частиц. В этих распределениях содержится в осн. информация о структуре исследуемых объектов, т. к. распределения формируются в результате

когерентного сложения волн, упруго рассеиваемых атомами вещества, и результат сложения — дифракция электронов — чувствителен к пространств. распределению атомов. Для объекта с кристаллич. структурой распределения УРЭ представляет собой совокупность резких максимумов, для газа или пара на более или менее равномерном фоне появляются относительно плавные максимумы и минимумы, связанные с особенностями дифференц. сечений упругого рассеяния электронов на отд. атомах; эти максимумы являются источником сведений об особенностях рассеивающих частиц. Для аморфных тел и жидкостей появление сглаженных максимумов или минимумов может быть связано и с ближним порядком расположения в них атомов, к-рый при определ. условиях также можно исследовать (см. *Электроннография*). Детальный анализ структуры линий УРЭ в области энергии 10—20 кэВ может применяться для количественного элементного анализа приповерхностной области образца [2].

Квазиупруго отражённые электроны исследует спектроскопия потерь энергии электронов высокого разрешения. Информацию об объекте в этом случае получают, исследуя структуру энергетич. спектра вблизи пика УРЭ в диапазоне потерь энергии от единиц до сотен мэВ, где регистрируемые потери обусловлены возбуждением фононов, колебат. и вращат. мод атомов, молекул вещества и адсорбированных атомных частиц, плазменных колебаний свободных носителей в полупроводниках и др. Данным методом возможно исследовать дисперсию поверхностных фононов, адсорбционно-десорбционные процессы и реакции на поверхности, механич. напряжения, возникающие в приповерхностном слое твёрдого тела при нанесении разл. покрытий, межфазовые границы в полупроводниковых структурах, включая сверхрешётки, и др. [3, 4].

Анализ энергетич. спектров неупруго рассеянных электронов составляет основу спектроскопии характеристических потерь энергии электронов, исследующей коллективные (плазменные) и одночастичные возбуждения валентных электронов с энергией до  $\epsilon \sim 50$  эВ, и ионизационной спектроскопии, изучающей возбуждение и ионизацию электронов внутр. оболочек атомов (электронов остова) в диапазоне потерь энергии  $\epsilon \sim 50$ —5000 эВ. В зависимости от используемой энергии первичных электронов в Э. с. (и в дифракции электронов) различают два случая. Если энергия лежит в интервале от десятков до  $\sim 100$  кэВ, то регистрируются либо электроны, прошедшие сквозь тонкий слой вещества, когда получаемая информация характеризует его объёмные свойства, либо электроны, отражённые от поверхности под скользящими углами. Обычно при этом аппаратуру совмещают в одном приборе с электронным микроскопом [5]. В области низких и ср. значений энергии (не превосходящих неск. кэВ) используется геометрия эксперимента на отражение. В этом случае получают информацию о структуре и свойствах приповерхностного слоя, толщина к-рого примерно равна длине свободного пробега электрона  $\lambda$ . При энергии электронов  $\sim 50$ —100 эВ, когда  $\lambda$  составляет неск. моноатомных слоёв, достигается наиб. чувствительность метода к свойствам поверхности. При большей и меньшей энергии глубина зондирования возрастает.

Определение элементного состава методом ионизационной спектроскопии основано на измерении энергий связи электронов остова [6]. Одно из новых направлений ионизационной спектроскопии — анализ протяжённой тонкой структуры спектра, проявляющейся в виде осцилляций за порогом ионизации и охватывающей область энергий до сотен эВ. Природа этих осцилляций подобна природе осцилляций EXAFS (см. *Рентгеновские спектры*) и связана с интерференцией волны де Бройля выбитого из атома электрона и волн, рассеянных атомами ближайших координац. сфер данного атома в направлении «назад». Фурье-анализ образующейся тонкой структуры энергетич. спектра электронов позволяет с высокой точностью определять радиусы координац. сфер [7]. Тонкая структура в спектре, прилегающая к порогу ионизации остовных уровней, служит ис-