

вать ядра многих координац. сфер вблизи дефекта, что позволяет однозначно определить его природу и свойства. Двойные резонансы, связанные с получением источников эл.-магн. излучения, легли в основу работы квантовых генераторов, что привело к созданию и развитию нового направления — квантовой электроники.

**Заключение.** ЭПР нашёл широкое применение в разл. областях физики, химии, геологии, биологии, медицине. Интенсивно используется для изучения поверхности твёрдых тел, фазовых переходов, неупорядоченных систем. В физике полупроводников с помощью ЭПР исследуются мелкие и глубокие точечные примесные центры, свободные носители заряда, носитель-примесные пары и комплексы, радиац. дефекты, дислокации, структурные дефекты, дефекты аморфизации, межслойные образования (типа границ Si—SiO<sub>2</sub>), изучаются носитель-примесное взаимодействие, процессы рекомбинации, фотопроводимость и др. явления.

*Лит.:* Альтшулер С. А., Козырев Б. М., Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп, 2 изд., М., 1972; Пул Ч., Техника ЭПР-спектроскопии, пер. с англ., М., 1970; Абрагам А., Блани Б., Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов, пер. с англ., т. 1—2, М., 1972—73; Мейльман М. Л., Самойлович М. И., Введение в спектроскопию ЭПР активированных монокристаллов, М., 1977; Электрические эффекты в радиоспектроскопии, под ред. М. Ф. Дейгена, М., 1981; Ройцин А. Б., Маевский В. Н., Радиоспектроскопия поверхности твердых тел, К., 1992; Радиоспектроскопия твердого тела, под ред. А. Б. Ройцина, К., 1992. А. Б. Ройцин.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС акустический** — см. *Акустический парамагнитный резонанс*.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЕКТОР** (автоэлектронный микроскоп, полевой электронный микроскоп) — безлинзовый электронно-оптический прибор для получения увеличенного в  $10^5$ — $10^6$  раз изображения поверхности твёрдого тела. Изобретён в 1936 Э. Мюллером (E. W. Müller). Осн. части Э. п.: катод в виде проволоки (острия) с точечным эмиттером на конце, радиус кривизны к-рого  $r \sim 10^{-7}$ — $10^{-8}$  м; стеклянная сферич. или конусообразная колба, дно к-рой покрыто слоем люминофора; анод в виде проводящего слоя на стенках колбы или проволочного кольца, окружающего катод. Из колбы откачивается воздух (остаточное давление  $10^{-9}$ — $10^{-11}$  мм рт. ст.). (В др. варианте катод и анод могут быть собраны в вакуумной камере.) Когда на анод подают положит. напряжение в неск. тыс. В относительно расположенного в центре колбы катода, напряжённость эл. поля  $F$  у поверхности кончика острия достигает  $10^7$ — $10^8$  В/см. Это обеспечивает интенсивную автоэлектронную эмиссию. При этом электроны эмигрируют преим. с мест локального увеличения  $F$ : над небольшими неровностями и выступами поверхности эмиттера и с участков с пониженной работой выхода  $\phi$ .

Эмитированные электроны, ускоряясь в радиальных (относительно острия) направлениях, бомбардируют экран, вызывая свечение люминофора, и создают на экране увеличенное контрастное изображение поверхности катода, как правило, отражающее её кристаллич. структуру (рис. 2, а к ст. *Ионный проектор*). Контраст автоэлектронного изображения определяется плотностью автоэмиссионного тока, к-рый зависит от локальной работы выхода  $\phi$ , отражающей кристаллографии. строение поверхности эмиттера, и от величины поля  $F$  у поверхности эмиттера. Увеличение в Э. п. равно отношению  $R/\beta r$ , где  $R$  — расстояние катод — экран;  $\beta \approx 1,5$  — константа, зависящая от геометрии трубки. Разрешающая способность Э. п. ограничивают наличие тангенциальных составляющих скоростей автоэлектронов у кончика острия и (в меньшей степени) явление дифракции электронов. Предел разрешения Э. п. составляет  $(2—3) \cdot 10^{-7}$  см.

Э. п. применяются для изучения автоэлектронной эмиссии металлов и полупроводников, для определения работы выхода с разных граней монокристалла и др., для наблюдения фазовых превращений, изучения адсорбции и поверхностной диффузии атомов разл. веществ на проводящей поверхности, для исследования эффектов в сильных

полях и т. д. Э. п., при крайней простоте, обеспечивает высокую разрешающую способность. В случаях, когда её необходимо повысить до атомной, его легко перевести в режим *ионного проектора*.

*Лит. см. при ст. Автоэлектронная эмиссия. В. Н. Шредник.*  
**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК** — поток электронов, движущихся по близким траекториям в одном направлении, имеющий размеры, значительно большие в направлении движения, чем в поперечной плоскости. Поскольку Э. п. является совокупностью одноимённых заряж. частиц, внутри него имеется *пространственный заряд* электронов, создающий собств. эл. поле. С др. стороны, движущиеся по близким траекториям электроны можно рассматривать как линейные токи, создающие собств. магн. поле. Эл. поле пространств. заряда создаёт силу, стремящуюся расширить пучок («кулоновское расталкивание»), магн. поле линейных токов создаёт силу Лоренца, стремящуюся сжать пучок. Расчёт показывает, что действие пространств. заряда начинает заметно сказываться (при энергиях электронов в неск. кэВ) при токах в неск. десятых мА, тогда как «стягивающее» действие собств. магн. поля заметно проявляется только при скоростях электронов, близких к скорости света — энергии электронов порядка МэВ. Поэтому при рассмотрении Э. п., используемых в разл. электронных приборах, техн. установках, в первую очередь необходимо принимать во внимание действие собств. пространств. заряда, а действие собств. магн. поля учитывать только для релятивистских пучков.

**Интенсивность Э. п.** Осн. критерием условного разделения Э. п. на неинтенсивные и интенсивные является необходимость учёта действия поля собств. пространств. заряда электронов пучка. Очевидно, чем больше ток пучка, тем больше плотность пространств. заряда, сильнее расталкивание. С др. стороны, чем больше скорость электронов, тем меньше скажется на характере движения электронов собств. эл. поле пучка — чем выше энергия электронов, тем «жёстче» пучок. Количественно действие поля пространств. заряда характеризуется коэф. пространств. заряда — первеансом, определяемым как

$$P = I/U^{3/2} [A/V^{3/2}],$$

где  $I$  — ток пучка;  $U$  — ускоряющее напряжение, определяющее энергию электронов пучка.

Заметное влияние пространств. заряда на движение электронов в пучке начинает проявляться при  $P \geq P^* = 10^{-8} A/V^{3/2} = 10^{-2}$  мкА/ $V^{3/2}$ . Поэтому к интенсивным пучкам принято относить Э. п. с  $P > P^*$ .

Неинтенсивные пучки (с  $P < P^*$ ) малого сечения, часто называемые электронными лучами, рассчитываемые по законам геом. электронной оптики без учёта действия поля собств. пространств. заряда, формируются с помощью электронных прожекторов и используются в основном в разл. *электронно-лучевых приборах*.

В интенсивных пучках действие собств. пространств. заряда существенно влияет на характеристики Э. п. Во-первых, интенсивный Э. п. в пространстве, свободном от внеш. эл. и магн. полей, за счёт кулоновского расталкивания неограниченно расширяется; во-вторых, за счёт отрицат. эл. поля электронов пучка происходит падение потенциала в пучке. Если с помощью внеш. эл. или магн. полей ограничить расширение интенсивного пучка, то при достаточно большом токе потенциал внутри пучка может понизиться до нуля, пучок «оборвётся». Поэтому для интенсивных пучков существует понятие предельного (максимального) первеанса. Практически при ограничении расширения пучка внеш. полями удаётся сформировать протяжённые устойчивые интенсивные пучки с  $P \leq 5 \cdot 10$  мкА/ $V^{3/2}$ .

Полное матем. описание интенсивных Э. п. затруднительно, поскольку реальный электронный поток состоит из множества движущихся электронов, учесть взаимодействие между к-рыми практически невозможно. При введении нек-рых упрощающих предположений, в частности, заменяя сумму сил, действующих на выбранный электрон со стороны соседних электронов, силой действия на этот