

плоскости слоёв движения электронов часто близко к изотропному и в электронной зонной картине отвечает движению по широкой зоне проводимости, а в направлении, перпендикулярном слоям, ширина зоны оказывается намного меньше. Для описания такого движения электронов обычно используется модель *эффективной массы* внутри слоёв и приближение сильной связи для движения электронов между слоями (см. *Зонная теория, Блоховские электроны*). Энергия электрона  $\mathcal{E}$  в зависимости от квазиимпульса  $\mathbf{p}$  имеет тогда вид  $\mathcal{E}(\mathbf{p}_{\parallel}, \mathbf{p}_{\perp}) = p_{\parallel}^2/2m_{\parallel}^* + \delta \cos(p_{\perp}d)/\hbar$ , где  $\mathbf{p}_{\parallel}$  — импульс вдоль слоёв,  $\mathbf{p}_{\perp}$  — импульс поперёк слоёв,  $d$  — расстояние между слоями,  $m_{\parallel}^*$  — эфф. масса в плоскости слоя,  $\delta$  — полупериод зоны проводимости для движения между слоями.

Сильная анизотропия такого типа реализуется, напр., в слоистых кристаллах дихалькогенидов переходных металлов типа  $\text{TaS}_2$  (металлич. проводимость) или  $\text{MoS}_2$  (полупроводник), а также в их *интеркалированных соединениях* I или интеркалированных соединениях графита. В дихалькогенидах переходных металлов слой металла с двух сторон окружён слоями халькогенов и связь этих трёх слоёв в сэндвиче является сильной (ковалентной). Сэндвичи упакованы в кристалле также слоями, причём взаимодействие сэндвичей близко к ван-дер-ваальсовскому. В интеркалированных соединениях металлич. слой раздвинуты ещё больше непроводящими слоями молекул или групп атомов, введённых в пространство между сэндвичами. К К. с. относятся также органич. проводники, где плоские органич. молекулы упакованы в цепочки, к-рые, располагаясь параллельно друг другу, образуют проводящие слои, разделённые непроводящими слоями др. молекул, напр. в BEDT— $\text{TTF}_2\text{I}_3$  проводящие слои плоских молекул BEDT—TTF разделены слоями из атомов I [2].

Анизотропия проводимости  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$  достигает 50 в слоистых соединениях типа  $\text{TaS}_2$  и  $10^5$  в интеркалированном соединении  $\text{TaS}_2$  с пиридином.

По мере уменьшения  $\delta$  движение электронов приближается к двумерному, а ниже некоего порогового значения  $\mathcal{E}_0$  для  $\delta$  система начинает вести себя как двумерная. Пороговое значение  $\mathcal{E}_0$  совпадает с характерной энергией эффекта. Напр., если рассматривается *Ванье — Мотта экситон* в слоистом полупроводнике, то  $\mathcal{E}_0$  — энергия связи экситона. При  $\delta \gg \mathcal{E}_0$  мы имеем дело с трёхмерным анизотропным экситоном. Его уровни энергии определяются ридберговской серией, а волновая ф-ция анизотропна в меру анизотропии  $m_{\parallel}^*$  и  $m_{\perp}^* = \hbar^2/2dt$ . При  $\delta \ll \mathcal{E}_0$  экситон локализован в слое и его спектр определяется решением кулоновской задачи для двумерного движения электрона и дырки. В случае *сверхпроводимости* энергия  $\mathcal{E}_0$  по порядку величины есть темп-ра сверхпроводящего перехода  $T_{кр}$ , и при  $\delta \gg T_{кр}$  мы имеем дело с обычными анизотропными сверхпроводниками, а при  $\delta \ll T_{кр}$  реализуется джозефсоновское взаимодействие слоёв со всеми свойствами, характерными для джозефсоновских переходов во внеш. полях [1]. Системы с  $\delta \ll \mathcal{E}_0$  наз. квазидвумерными (в узком смысле) по отношению к рассматриваемому эффекту. Т. о., система может быть обычной анизотропной для одного явления и квазидвумерной для др. эффекта [2].

Лит.: 1) Булаевский Л. Н., Сверхпроводимость и электронные свойства слоистых соединений, «УФН», 1975, т. 116, с. 449; 2) Я г у б с к и й Э. Ф. и др., Сверхпроводящие свойства ромбической фазы триида бис-(этилендиоло) тетраиофульвалена, «Письма в ЖЭТФ», 1984, т. 39, с. 275.

Л. Н. Булаевский.

**КВАЗИИМПУЛЬС** — векторная характеристика  $\mathbf{p}$  состояния квазичастицы в кристалле. К. играет для частиц в периодич. среде (напр., в кристаллич. решётке) ту же роль, что и импульс частицы в пространственно однородных системах. В однородной среде преобразование волновой ф-ции  $\psi(\mathbf{r})$  частицы при произвольном сме-

щении  $\mathbf{u}$  имеет вид  $\psi(\mathbf{r} + \mathbf{u}) = \exp(i\mathbf{p}^* \cdot \mathbf{u}/\hbar) \psi(\mathbf{r})$ , где  $\mathbf{p}^*$  — импульс частицы. Для пространственно периодич. систем  $\psi(\mathbf{r})$  обладают аналогичным свойством только для смещений, равных векторам трансляции (периодам)  $\mathbf{a}_i$  системы:

$$\psi(\mathbf{r} + \mathbf{a}_i) = \exp(i\mathbf{p} \cdot \mathbf{a}_i/\hbar) \psi(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{p} = \mathbf{K}$ . При этом волновая ф-ция частицы имеет вид:

$$\psi_{n, \mathbf{p}}(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}) W_{n, \mathbf{p}}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где  $W_{n, \mathbf{p}}(\mathbf{r} + \mathbf{a}_i) = W_{n, \mathbf{p}}(\mathbf{r})$ . Согласно *Блоха теореме*, собств. волновые ф-ции стационарных состояний квазичастиц, находящихся в поле с периодич. потенциалом, имеют вид (2), причём значение  $\mathbf{p}$  вместе с индексом  $n$  (номер энергетич. зоны) образуют полный набор квантовых чисел, определяющих данное состояние (см. *Блоховские электроны, Зонная теория*).

В отличие от импульса величина К. задаётся неоднозначно — состояния, в к-рых  $\mathbf{p}/\hbar$  отличаются на один из векторов *обратной решётки*  $\mathbf{b}_k$ , тождественны. Соответственно для всех физических различных состояний  $\mathbf{p}$  можно задавать внутри одной элементарной ячейки обратной решётки (в качестве к-рой обычно выбирают *Бриллюэна зону*). С неоднозначностью связано и отсутствие точного закона сохранения К.: при взаимодействии квазичастиц их суммарный К. сохраняется лишь с точностью до  $\hbar \mathbf{b}_k$ . Это проявляется в *перевоса процессах*.

Значения К. определяют энергию квазичастиц  $\mathcal{E}_n(\mathbf{p})$  внутри каждой из энергетич. зон. Изменение К. под действием внешнего  $V(\mathbf{r})$  задаётся ур-нием, аналогичным закону Ньютона:  $d\mathbf{p}/dt = -\nabla V(\mathbf{r})$ . Возможность введения К. существенно упрощает анализ свойств кристаллов: вид, взаимное расположение, связность, наличие особенностей и т. д. для *ферми-поверхностей* и энергетич. зон, определяемых в пространстве К., позволяют сделать качественные выводы о свойствах твёрдых тел, напр. о их проводимости.

Лит. см. при статьях *Зонная теория, Квазичастица*.  
А. Э. Мейерович.

**КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ** квантовой механики (Венцеля — Крамерса — Бриллюэна метод, ВКБ метод) — приближённый метод нахождения волновой ф-ции и уровней энергии квантовой системы при условии, что длина волны де Бройля  $\lambda$  частиц системы много меньше характерных размеров  $R$  изменения потенциала. В условиях К. п. квантовое *неопределённости соотношение* позволяет построить *волновой пакет*, в к-ром неопределённости координаты и импульса гораздо меньше самих этих величин. Такой пакет будет двигаться, подчиняясь законам классич. механики с точностью до малых величин порядка  $\lambda/R$ . В простейшем случае точечной частицы массы  $m$  с заданной энергией  $\mathcal{E}$ , движущейся по законам классич. механики во внеш. поле с потенциалом  $U(\mathbf{r})$ , модуль импульса  $p(\mathbf{r})$  в данной точке пространства  $\mathbf{r}$  равен  $p(\mathbf{r}) = [2m(\mathcal{E} - U(\mathbf{r}))]^{1/2}$ . Длина волны связана с импульсом соотношением де Бройля  $\lambda(\mathbf{r}) = \hbar/p(\mathbf{r})$ . Критерий применимости К. п. таков:

$$|\nabla \lambda(\mathbf{r})| = \frac{\hbar}{p^2} |\nabla p(\mathbf{r})| \ll 1. \quad (1)$$

Движение квантовой частицы в тех же условиях определяется *Шрёдингера уравнением*:

$$\hbar^2 \Delta \psi + p^2(\mathbf{r}) \psi = 0, \quad (2)$$

где  $\psi$  — волновая ф-ция частицы. В одномерном случае (потенциал и волновая ф-ция зависят лишь от одной координаты  $x$ ) приближённые решения ур-ния (2) в классически доступной области  $\mathcal{E} > U(x)$  имеют вид

$$\psi(x) = \frac{C}{V p(x)} \exp\left[\pm \frac{i}{\hbar} \int p dx\right], \quad (3)$$

где  $C$  — постоянная. Решения (3) представляют собой простейшее обобщение плоской волны  $\exp(ipx/\hbar)$  на