

играет роль не только заряд, но также и спин рассеиваемого электрона.

Рассмотрим дефект с локальным магнитным моментом, например, d -электрон атома переходного металла, находящегося в немагнитной решетке. Тогда, наряду с кулоновским взаимодействием рассеиваемого электрона с локализованным d -электроном, может играть роль обменное взаимодействие между обеими частицами. Мы увидим, что это взаимодействие вносит вклад в удельное электро-сопротивление, который убывает с ростом температуры. Вместе с постоянным остаточным сопротивлением и (возрастающим как T^2) сопротивлением, обусловленным электрон-фононным взаимодействием, это приводит в металлах к минимуму сопротивления при низких температурах (*эффект Бондо*).

В дальнейшем мы хотим определить, какие зависящие от температуры вклады в обратное время релаксации возникают в результате обменного взаимодействия между свободными и локализованными электронами. Мы описываем свободный электрон блоховской функцией $\psi(\mathbf{k}, \mathbf{r})$, локализованный электрон — атомной функцией рассеивающего центра, находящегося в узле решетки $\mathbf{R}_n$: $\Phi(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n)$. Учитываем межэлектронное взаимодействие, как в ч. I, § 3, и пользуемся представлением чисел заполнения. Описывающий взаимодействие член в операторе Гамильтона имеет тогда вид

$$H' = \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'\sigma\sigma'n} (\langle \mathbf{k}'n | V | \mathbf{k}n \rangle c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger} c_{\mathbf{k}\sigma} c_{n\sigma'}^{\dagger} c_{n\sigma} - \langle \mathbf{k}'n | V | n\mathbf{k} \rangle c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger} c_{\mathbf{k}\sigma} c_{n\sigma'}^{\dagger} c_{n\sigma}). \quad (2.109)$$

Здесь $c_{\mathbf{k}}^{\dagger}$, $c_{\mathbf{k}}$ и $c_n^{\dagger}$, c_n — операторы рождения и уничтожения для свободного и локализованного электронов соответственно. Индекс σ дает направление спина. Матричные элементы таковы:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{k}'n | V | \mathbf{k}n \rangle &= \\ &= \int \psi^*(\mathbf{k}', \mathbf{r}_1) \Phi^*(\mathbf{r}_2 - \mathbf{R}_n) V \psi(\mathbf{k}, \mathbf{r}_1) \Phi(\mathbf{r}_2 - \mathbf{R}_n) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \end{aligned} \quad (2.110)$$

$$\begin{aligned} \text{и} \\ \langle \mathbf{k}'n | V | n\mathbf{k} \rangle &= \\ &= \int \psi^*(\mathbf{k}', \mathbf{r}_1) \Phi^*(\mathbf{r}_2 - \mathbf{R}_n) V \Phi(\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}_n) \psi(\mathbf{k}, \mathbf{r}_2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2. \end{aligned} \quad (2.111)$$

Первый член в (2.109) означает взаимодействие обоих электронов с сохранением спина, второй — взаимодействие с обменом спинами (включая случай $\sigma = \sigma'$). Проводя суммирование по спину, получаем

$$\begin{aligned} H' &= \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'n} (c_{\mathbf{k}\uparrow}^{\dagger} c_{\mathbf{k}\uparrow} + c_{\mathbf{k}\downarrow}^{\dagger} c_{\mathbf{k}\downarrow}) (c_{n\uparrow}^{\dagger} c_{n\uparrow} + c_{n\downarrow}^{\dagger} c_{n\downarrow}) \times \\ &\times \left(\langle \mathbf{k}'n | V | \mathbf{k}n \rangle - \frac{1}{2} \langle \mathbf{k}'n | V | n\mathbf{k} \rangle \right) - \end{aligned}$$