

УДК 539.124

Использование представлений спиральной электромагнитной модели электрона для объяснения свойств электрона проводимости*

Часть II. Влияние трансляционной анизотропии кристаллической решетки на свойства электрона проводимости. Энергетическая шкала для атомных электронов в кристаллической решетке

*Т. А. Гришина, В. И. Креопалов,
ФГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия*

*В. Ю. Гришина
ИЯИ РАН, Москва, Россия*

*Д. В. Креопалов
МГТУ им. Баумана, Москва, Россия*

Продолжен начатый в работе [1] анализ на основе представлений спиральной электромагнитной модели электрона (СЭМЭ) процесса взаимодействия электронов проводимости (ЭП) с полем кристаллической решетки (КР), состоящей из колеблющихся атомов. Дан анализ влияния трансляционной анизотропии (КР) на характер поведения ЭП.

2.1. Введение

В работе [1] на основе представлений СЭМЭ определены условия превращения атомного электрона (АЭ) в ЭП. Рассмотрены случаи принадлежности атома к цепочке из неподвижных атомов и к цепочке из колеблющихся атомов. Предложено аппроксимировать цепочку атомов в реальной КР, состоящей из колеблющихся атомов, цепочкой неподвижных атомов, смещенных из своих узлов. Обоснована возможность такой аппроксимации.

В предлагаемой статье эти результаты использованы для анализа влияния трансляционной анизотропии КР на характер поведения ЭП. Установлено, что анизотропия пространственного расположения атомов в КР проявляет себя как фактор, под влиянием которого электроны, способные превратиться в ЭП, отделены от электронов, всегда остающихся в связанном состоянии, не одиночной, а расщепленной надвое энергетической границей.

Для идеальной КР и для реальной КР при двух фиксированных температурах выполнено построение энергетической шкалы, на которую нанесены соответствующие пары энергетических границ. Каждая пара границ делит энергетическую шкалу на три диапазона. Электроны, принадлежащие к разным диапазонам, отличаются один от другого степенью их участия в связанном состоянии.

Нижнюю часть шкалы занимает диапазон энергий, при которых электрон находится в устойчивом связанном состоянии (УСС) в составе одного и того же атома. Среднюю часть шкалы занимает диапазон энергий, при которых ЭП способен участвовать в кратковременных актах неустойчивого связанного состояния (НСС) с разными атомами решетки (эти акты названы "релаксациями"). Такой электрон движется в пространстве КР по траекториям с резкими поворотами зигзагами и петлями. Интервал энергетической шкалы, заключенный между верхней и нижней границами, назван диапазоном НСС (или диапазоном "релаксаций").

ЭП, занимающий уровень энергии в самой верхней части шкалы, находящейся выше верхней границы, не испытывает кратковременных переходов в связанное состояние (не подвержен "релаксациям"). Он перемещается в пространстве решетки по плавным траекториям, не имеющим резких поворотов и петлеобразных участков. Участок энергетической шкалы, находящийся над верхней границей, назван диапазоном отсутствия связанного состояния (ОСС).

2.2. Трансляционная анизотропия кристаллической решетки как фактор, приводящий к появлению дополнительной энергетической границы

Трехмерному расположению узлов в КР свойственна пространственно-трансляционная анизотропия. Один и тот же узел КР одновременно

* Часть I данной статьи опубликована в журнале "Прикладная физика" № 2 за 2004 г.

входит в состав нескольких одномерных цепочек с разными трансляционными периодами.

Рассмотрим атом, занимающий в КР узел, который находится на пересечении двух одномерных цепочек с трансляционными периодами a_{\min} и a_{\max} , где a_{\min} и a_{\max} — соответственно, минимальный и максимальный межузловые промежутки в пределах ячейки Вигнера-Зейтца прямого пространства.

Независимо от того, находится ли атом в идеальной или в реальной решетке, для электронов, входящих в состав этого атома, с помощью соотношения (1.11) (см. ч. I) из [1] можно определить не одну, а две энергетические границы: верхнюю и нижнюю.

В [1] показано, что рассмотрение взаимодействия ЭП, описываемого СЭМЭ, с колеблющимися атомами реальной КР можно заменить рассмотрением взаимодействия электрона с неподвижными атомами, смещенными из своих узлов. Поэтому в случае идеальной решетки в (1.11) (см. ч. I) из [1] следует подставлять при определении верхней границы a_{\max} , а при определении нижней границы — a_{\min} , в случае реальной (колеблющейся) КР, соответственно, $a_{\max} + 2\delta a(T)$ и $a_{\min} - 2\delta a(T)$, где $\delta a(T)$ — амплитуда смещения атома из узла решетки, которая определяется соотношением (1.12) (см. ч. I) из [1].

Полученные в результате такой подстановки значения энергии (в эВ), соответствующие верхней и нижней границам для идеальной КР (ИКР), описываются следующими выражениями:

$$E_{ikr}^{up. \lim} = - \frac{2\hbar^2}{m_0 (a_{\max})^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \text{ (эВ)} \quad (2.1, a)$$

и

$$E_{ikr}^{low. \lim} = - \frac{2\hbar^2}{m_0 (a_{\min})^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \text{ (эВ)}. \quad (2.1, b)$$

Энергии (в эВ), соответствующие верхней и нижней границам для реальной КР (РКР) при температурах $T = 0 \text{ K}$ и $T > 0 \text{ K}$, описываются соотношениями

$$E_{rkr}^{up. \lim} (T = 0 \text{ K}) = - \frac{2\hbar^2}{m_0 [a_{\max} + 2|\delta a(0)|]^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}; \quad (2.2, a)$$

$$E_{rkr}^{low. \lim} (T = 0 \text{ K}) = - \frac{2\hbar^2}{m_0 [a_{\min} - 2|\delta a(0)|]^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}; \quad (2.2, b)$$

$$E_{rkr}^{up. \lim} (T > 0 \text{ K}) = - \frac{2\hbar^2}{m_0 [a_{\max} + 2|\delta a(T)|]^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}; \quad (2.3, a)$$

$$E_{rkr}^{low. \lim} (T > 0 \text{ K}) = - \frac{2\hbar^2}{m_0 [a_{\min} - 2|\delta a(T)|]^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}. \quad (2.3, b)$$

2.3. Физический смысл верхней и нижней энергетических границ

Нижняя граница (2.1, б), (2.2, б) или (2.3, б) отделяет электроны, для которых в любом межузловом промежутке выполняется только условие (1.8) (см. ч. I) из [1], от электронов, для которых в данной решетке существуют и межузловые промежутки, где выполняется условие (1.8) (см. ч. I), и межатомные промежутки, где выполняется условие (1.9) (см. ч. I). Это означает, что нижняя граница отделяет электроны, способные в рассматриваемой КР находиться только в связанном состоянии, от электронов, превратившихся в ЭП. Отсюда можно заключить, что именно нижняя граница (2.1, б), (2.2, б) или (2.3, б) является для трехмерной решетки границей зоны проводимости. Это справедливо и для идеальной, и для реальной КР.

Рассмотрим роль верхней границы (2.1, а), (2.2, а) и (2.3, а). Для ЭП, находящегося на энергетическом уровне $E_{occ.1}$, располагающемся выше этой границы

$$|E_{occ.1}| < |E_{cr}^{up. \lim}|, \quad (2.4)$$

в данной решетке существуют только межатомные промежутки, где для него выполняется условие (1.9) из [1]. В любом межузловом промежутке приращения импульса, получаемые электроном с противоположных сторон, примерно одинаковы и компенсируют друг друга. В любой области КР электрон, занимающий уровень (2.4), движется по плавной, почти прямолинейной траектории, примерно так, как двигался бы свободный электрон в свободном пространстве. Характер его перемещения показан на рис. 2.1, а.

Для ЭП, занимающего уровень энергии $E_{occ.2}$ в промежутке между верхней и нижней границами,

$$|E_{cr}^{low. \lim}| > |E_{occ.2}| > |E_{cr}^{up. \lim}| \quad (2.5)$$

в данной решетке существуют и межатомные промежутки, где для него выполняется условие (1.8) (см. ч. I) из [1], и межатомные промежутки, где для него выполняется условие (1.9) (см. ч. I).

Попадая в межатомный промежуток, где выполняется условие (1,8) (см. ч. I), электрон испытывает кратковременный переход в НСС с тем из соседних атомов, от которого получает преобладающие приращения импульса. Электрон начинает огибать этот атом. Траектория (осевая линия) электрона делает в этом месте резкий поворот или замкнутую петлю вокруг атома.

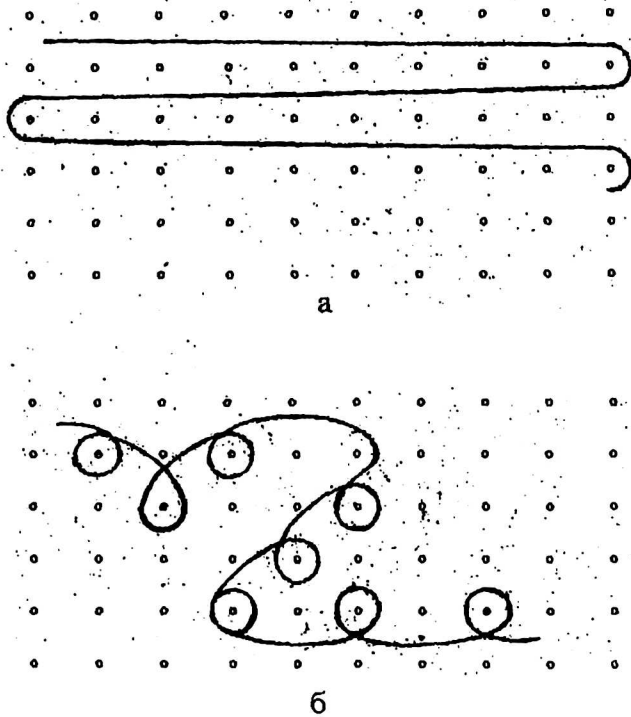


Рис. 2. 1. Характер траектории, по которой "размазанный" заряд электрона проводимости перемещается в пространстве кристаллической решетки проводника. (Он зависит от того, как соотносится длина волны электрона с максимальным реальным межатомным промежутком в кристаллической решетке):
а — траектория "безрелаксационного" электрона проводимости; *б* — траектория электрона, который подвержен "релаксациям" (испытывает кратковременные акты неустойчивого связанного состояния с разными атомами)

Такой характер перемещения сохраняется, пока электрон не окажется в межатомном промежутке, где выполняется условие (1.9) (см. ч. I) из [1], при этом траектория его выравнивается, а перемещение приобретает поступательный характер. Об электроне из диапазона (2.5) можно сказать, что он проявляет свойства и связанного, и свободного электрона. В пространстве КР он перемещается по траектории, которая содержит и плавные участки, и резкие повороты, и петлеобразные участки (см. рис. 2.1, б).

Границы (2.1,а) (2.2,а) и (2.3,а) — каждая в своей решетке — выполняют одну и ту же роль и служат границей между диапазонами энергии, которые оба принадлежат к зоне проводимости, но резко отличаются один от другого характером поведения ЭП. Электрон проводимости, занимающий уровень энергии, находящийся выше этой границы, перемещается в пространстве ре-

шетки по плавным траекториям, не имеющим петель и зигзагообразных участков. ЭП, который занимает уровень энергии, находящийся ниже этой границы, движется в пространстве решетки по траекториям с резкими поворотами, зигзагами и петлеобразными участками.

Для сравнения отметим, что традиционная физика твердого тела [2—3] оперирует представлениями модели волнового пакета. Причиной появления ЭП в ней принято считать перекрытие волновых функций валентных электронов соседних атомов (см. рис. 9.2 в [2] и рис. 3.5 в [3]). На траектории, по которой ЭП перемещается в пространстве решетки, допускается наличие плавных и петлеобразных участков (см. рис. 11.5 в [2]). Однако не предложено четкого количественного критерия, от которого зависит характер траектории ЭП.

В противоположность этому использование представлений СЭМЭ позволяет установить, что характер траектории, по которой ЭП перемещается в пространстве КР проводника, способен быть плавным или петле- и зигзагообразным (т. е. принципиальным образом различаться) в зависимости от уровня энергии, занимаемого электроном.

2.4. Новая трактовка природы релаксаций

Кратковременное НСС может испытать электрон, принадлежащий к диапазону (2.5), оказавшись в межатомном промежутке, где выполняется условие (1.8) (см. ч. I) из [1], при этом оно проявляется как резкое и случайное изменение направления импульса ЭП и очень напоминает релаксацию, которой подвержены ЭП.

Релаксации — акты кратковременного воздействия на импульс ЭП со стороны КР проводника — принято [3] считать причиной электрического сопротивления в проводниках. Каждый такой акт резко и случайным образом меняет направление импульса ЭП. Релаксации разрушают дрейф ЭП, обусловленный приложенным электрическим полем, возвращая ЭП к хаотическому распределению направлений импульсов. Период повторяемости релаксаций [3] варьирует от 10^{-14} с при комнатной температуре до 10^{-9} с — при гелиевых температурах.

Взаимодействие ЭП с атомом решетки, являющееся непосредственной причиной релаксации, принято описывать как взаимодействие электрона с фононом [3]. Взаимодействие трактуется как упругое столкновение и обмен импульсами между двумя частицами — электроном и частицеподобным квантом акустического решеточного возбуждения, обладающим квазиимпульсом.

Сопоставимость периодов повторяемости релаксаций из [3] с приведенными в [1] промежутками времени, характеризующими связанное

состояние, подтверждает допустимость предлагаемой здесь альтернативной интерпретации релаксации как резкого изменения направления импульса ЭП в результате кратковременного перехода этого электрона в НСС с одним из ближайших атомов в КР.

Такая трактовка природы релаксации равнозначна утверждению, что первопричиной ее являются не колебания атомов в решетке, а ее пространственная анизотропия. Релаксации как результат кратковременного перехода электрона в НСС с одним из ближайших атомов в КР возможны не только в реальной КР, состоящей из колеблющихся атомов. Для некоторых электронов такие релаксации были бы неизбежны и в идеальной строго периодической решетке, состоящей из неподвижных атомов, если бы такая решетка могла существовать в действительности.

Чтобы подчеркнуть отличие новой трактовки природы релаксации от традиционной, кратковременный переход электрона в НСС с одним из ближайших атомов в дальнейшем будем обозначать термином "релаксация".

2.5 Степень участия электрона в связанном состоянии и в "релаксациях" как единый критерий классификации атомных электронов в кристаллической решетке

Состояние электрона из диапазона (2.5) описано выше и представлено на рис. 2.1, б. Это состояние охарактеризовано как перемещение по решетке, сопровождаемое чередованием резких хаотических изменений направления импульса из-за кратковременных переходов в НСС с разными атомами решетки. Учитывая данные, приведенные выше, диапазон (2.5) можно назвать диапазоном НСС, а для краткости — диапазоном "релаксаций" (ДР).

Границы (2.2,а), (2.2,б), (2.3,а) и (2.3,б), ограничивающие диапазон (2.5) в реальной решетке при $T = 0$ и при $T > 0$, можно обозначить новым нижним индексом rr

$$E_{rkr}^{up.lim}(T = 0) = E_{rr}^{up.lim}(T = 0); \quad (2.2,а')$$

$$E_{rkr}^{low.lim}(T = 0) = E_{rr}^{low.lim}(T = 0); \quad (2.2,б')$$

$$E_{rkr}^{up.lim}(T > 0) = E_{rr}^{up.lim}(T > 0); \quad (2.3,а')$$

$$E_{rkr}^{low.lim}(T > 0) = E_{rr}^{low.lim}(T > 0). \quad (2.3,б')$$

Границы (2.1,а) и (2.1,б), ограничивающие диапазон (2.5) в идеальной решетке, также можно обозначить новым нижним индексом rr, irr

$$E_{ikr}^{up.lim} = E_{rr.irr}^{up.lim}; \quad (2.1,а')$$

$$E_{ikr}^{low.lim} = E_{rr.irr}^{low.lim}. \quad (2.1,б')$$

Характерные особенности поведения электронов, находящихся выше диапазона (2.5), также можно связать с понятием связанного состояния и "релаксации". Электрон, располагающийся выше диапазона (2.5), находясь в любом межатомном промежутке, неизбежно подвергается совместному и сопоставимому по величине воздействию полей нескольких атомов одновременно. Этот ЭП неспособен даже к кратковременному НСС. В любой области КР он перемещается по плавным траекториям, не имеющим ни резких поворотов, ни петель, ни зигзагов. Для краткости его можно назвать "безрелаксационным" ЭП, а диапазон, к которому он принадлежит, — диапазоном отсутствия связанного состояния (ОСС).

Про электрон, занимающий уровень энергии ниже границы (2.1,б') или (2.2,б'), или (2.3,б') в диапазоне

$$|E_{OCC}| > |E_{rr}^{low.lim}|, \quad (2.6)$$

можно сказать, что он находится в устойчивом связанном состоянии (УСС) в составе одного и того же атома. Он не может покинуть этот атом, поскольку, в каком бы межатомном промежутке он ни оказался, для него всюду выполняется условие (1.8) (см. ч. I) из [1]. Приращения импульса, получаемые им от "своего" атома, неизбежно превосходят приращения, которые он может получить от соседних атомов. Эти приращения импульса регулярно изменяют направление перемещения электрона и удерживают его в окрестностях узла решетки, занятого этим атомом.

С точки зрения представлений СЭМЭ, степень участия электрона в связанном состоянии можно рассматривать как основу классификации всех АЭ в КР.

2.6. Энергетическая шкала для атомных электронов в кристаллической решетке

Электроны, входящие в состав одного и того же атома, отличаются друг от друга энергией связи. В атомной физике дискретный спектр уровней энергии, занимаемых электронами в атоме, принято наносить на энергетическую шкалу.

Если атом находится в составе КР, спектр уровней энергии, представленный на энергетической шкале, необходимо дополнить данными о свойствах и поведении ЭП.

Однако в физике твердого тела для представления этих данных не принято пользоваться энергетической шкалой. В теории энергетических зон в основу определения межзонных энергетических границ положено сопоставление

волнового вектора электрона с параметрами обратной КР [2, 3]. Для обозначения этих энергетических границ также используют обратное пространство. Энергетическую границу представляют в виде поверхности равной энергии в пространстве импульсов (обратном пространстве). В частности, одной из фундаментальных характеристик электронной структуры материала принято считать поверхность Ферми, которая соответствует пограничной энергии, отделяющей незаполненные состояния от заполненных.

Информацию об ЭП, полученную на основе представлений СЭМЭ, удобно представить на энергетической шкале. В частности, для электронов, входящих в состав атома, находящегося на пересечении двух периодических цепочек в трехмерной решетке, спектр занятых уровней на энергетической шкале необходимо дополнить, нанеся на шкалу пару границ. На рис. 2.2 представлена энергетическая шкала с обозначенными на ней четырьмя парами энергетических границ (2.1,а) и (2.1,б), (2.2,а) и (2.2,б), (2.3,а) и (2.3,б). Если на эту шкалу нанести дискретный спектр уровней энергии, занимаемых электронами в конкретном атоме, то можно определить, к какому из диапазонов (2.4), (2.5) или (2.6) будет принадлежать каждый из атомных электронов, когда этот атом окажется в составе конкретной (идеальной или реальной при фиксированной температуре) КР с заданными параметрами a_{\min} и a_{\max} .

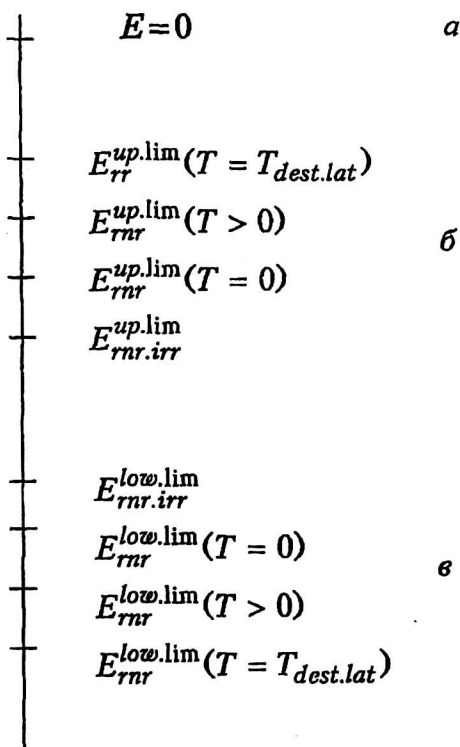


Рис. 2.2. Энергетическая шкала для атомных электронов в кристаллической решетке:

- а — диапазон отсутствия связанного состояния (ОСС) — "безрелаксационные" электроны проводимости;
- б — электроны проводимости, подверженные актам неустойчивого связанного состояния (НСС) — "релаксация";
- в — устойчивое связанное состояние атомных электронов

2.7. Изменение положения энергетических границ как способ представления на энергетической шкале данных о взаимодействии электронов проводимости с тепловыми колебаниями решетки

Энергии электронов, способных участвовать в актах НСС с разными атомами (испытывать "релаксации") в реальной колеблющейся решетке при $T > 0$ К, на энергетической шкале принадлежат к диапазону

$$E_{rr}^{up.lim}(T) > E > E_{rr}^{low.lim} \quad (2.7,а)$$

Ему соответствует диапазон значений длины волны де Бройля

$$\pi[a_{\max} + 2|\delta a|(T)] > \lambda > \pi[a_{\min} - 2|\delta a|(T)]. \quad (2.7,б)$$

При $T = 0$ К этот диапазон энергий и соответствующих значений длины волны минимален и составляет

$$E_{rr}^{up.lim}(T = 0) > E > E_{rr}^{low.lim}(T = 0), \quad (2.8,а)$$

$$\pi[a_{\max} + 2|\delta a|(0)] > \lambda > \pi[a_{\min} - 2|\delta a|(0)]. \quad (2.8,б)$$

Влияние учета колебаний решетки на положение энергетических границ $E_{rr}^{up.lim}$ и $E_{rr}^{low.lim}$ наглядно представлено на рис. 2.2*. Видно, что СЭМЭ позволяет описать воздействие колебаний решетки на поведение ЭП как воздействие фактора, под влиянием которого энергетические границы меняют свое положение на энергетической шкале. С увеличением амплитуды колебаний $\delta a(T)$ граница $E_{rr}^{up.lim}$ смещается вверх, а граница $E_{rr}^{low.lim}$ — вниз по шкале.

Для четырех конкретных КР величины амплитуды колебаний атомов рассчитаны по формулам (1.12) из [1] для $T = 0$ К, $T = \Theta$, где Θ — температура Дебая. Энергетические границы $E_{rr}^{up.lim}$ и $E_{rr}^{low.lim}$ для идеальных (неподвижных, строго периодических) и реальных (колеблющихся) решеток рассчитаны по формулам (2.1,а), (2.1,а'), (2.1,б), (2.1,б'), (2.2,а), (2.2,а'), (2.2,б), (2.2,б'), (2.3,а), (2.3,а'), (2.3,б), (2.3,б'). Вместе с использованными при расчете исходными данными результаты расчета приведены в табл. 2.1.

* Отмечены предельное нижнее положение границы зоны проводимости и предельное верхнее положение границы диапазона "релаксаций" для данной модификации материала.

Таблица 2.1.

Параметры границ $E_{rr}^{up.lim}$ и $E_{rr}^{low.lim}$ на энергетической шкале, рассчитанные для кристаллических решеток свинца, ниобия, индия и цинка

Элемент	Свинец	Ниобий	Индий	Цинк
Тип решетки	Г.Ц.К.	О.Ц.К.	Тетрагональн.	Г.П.У.
Параметр ячейки, нм	0,495	0,33	$a = 0,325, c = 0,495$	$a = 0,266, c = 0,494$
Θ , К	105	275	108	327
M , а.е.м.	207	93	115	65
$ \delta a (\Theta)$, нм	0,0071	0,0065	0,0093	0,0071
$ \delta a (\Theta)$, нм	0,0142	0,013	0,0186	0,0142
$E_{rr}^{up.lim}$, эВ	-0,62	-1,4	-0,62	-0,98
$E_{rr}^{up.lim}(T = 0 \text{ К})$, эВ	-0,59	-1,3	-0,58	-0,92
$E_{rr}^{up.lim}(T = \Theta)$, эВ	-0,56	-1,2	-0,54	-0,86
$E_{rr}^{low.lim}$, эВ	-1,25	-1,87	-1,44	-2,16
$E_{rr}^{low.lim}(T = 0 \text{ К})$, эВ	-1,35	-2,05	-1,63	-2,41
$E_{rr}^{low.lim}(T = \Theta)$, эВ	-1,47	-2,05	-1,85	-2,71

Примечание. Расчет по формулам (2.1,а), (2.1,а'), (2.1,б), (2.1,б') для идеальных решеток и по формулам (1.12) из [1], (2.2,а), (2.2,а'), (2.2,б), (2.2,б'), (2.3,а), (2.3,а'), (2.3,б), (2.3,б') — для реальных (колеблющихся) решеток. Приведены также трансляционные и другие параметры, необходимые в качестве исходных данных для расчета.

Из табл. 2.1 видно, что (2.8,а) — минимальный диапазон НСС ("релаксаций") для рассматриваемых КР варьирует в пределах 0,65—1,5 эВ. Порядок величины смещений энергетических границ по шкале, обусловленных колебаниями решетки, составляет 10^{-2} – 10^{-1} эВ.

Способность энергетических границ $E_{rr}^{up.lim}$ и $E_{rr}^{low.lim}$ к таким смещениям по энергетической шкале приводит к тому, что с возрастанием температуры расширяется диапазон (2.7,а)—(2.7,б), характеризуемый участием электрона в НСС (в "релаксациях"). Расширение это происходит в обе стороны и осуществляется как за счет сокращения диапазона ОСС, характеризуемого "безрелаксационной" проводимостью, так и диапазона УСС.

Максимум диапазона НСС достигает при $T = T_{dest.lat}$ — температуре прекращения существования (из-за плавления или перестройки) данной КР материала. Энергетический уровень $E_{rr}^{low.lim}(T = T_{dest.lat})$ определяет предельное нижнее положение границы зоны проводимости для этой модификации материала. Уровень $E_{rr}^{up.lim}(T = T_{dest.lat})$ определяет предельное верхнее положение границы, отделяющей диапазон ОСС от диапазона НСС.

2.8. Поведение электрона проводимости на границе кристаллической решетки

Достигнув границы кристалла, любой ЭП, какой бы длиной волны он ни характеризовался,

рано или поздно неизбежно окажется в такой точке пространства, где на него оказывает преобладающее влияние поле одного из атомов, расположенных на границе. Под воздействием приращений импульса, сообщаемых полем этого атома, импульс электрона меняет свое направление. Электрон, очутившись на время как бы в связанном состоянии с этим граничным атомом, огибает атом до тех пор, пока не окажется в такой области решетки, где на него уже снова оказывают сравнимое по величине воздействие поля более чем одного атома.

Таким образом, любой ЭП, достигнув границы КР и покидая ее пределы, обязательно огибает один из атомов, расположенных на границе, и неизбежно возвращается вновь в глубину решетки. Это справедливо и для электрона из диапазона ОСС, удовлетворяющего условию (2.4), который, находясь внутри решетки, движется в пространстве решетки по плавной траектории, не содержащей зигзагов и петель. Это же справедливо и для электрона из диапазона НСС, удовлетворяющего условию (2.5), который, находясь внутри решетки, движется по траекториям, содержащим не только плавные участки, но и резкие повороты, и зигзаги, и петлеобразные участки.

2.9. Заключение

1. Проведен анализ влияния трансляционной анизотропии кристаллической решетки на характер поведения электрона проводимости, описываемого спиральной электромагнитной моделью электрона (СЭМЭ). Рассмотрены идеальная

(строго периодическая, состоящая из неподвижных атомов) и реальная (состоящая из колеблющихся атомов) решетки. Рассмотрение взаимодействия электрона проводимости с колеблющимися атомами реальной кристаллической решетки заменено рассмотрением взаимодействия электрона с неподвижными атомами, смещенными из своих узлов.

2. Установлено, что анизотропия пространственного расположения атомов в кристаллической решетке обуславливает такие различия в поведении электронов проводимости, которые можно охарактеризовать не одиночной энергетической границей, отделяющей электроны проводимости от связанных электронов, а парой таких границ.

3. Одна из пар границ отделяет электроны, способные превратиться в электроны проводимости, от электронов, не способных превратиться в электроны проводимости и остающихся всегда в связанном состоянии. Это и есть граница зоны проводимости.

4. Вторая граница служит границей между диапазонами энергии, которые оба принадлежат к зоне проводимости, но резко отличаются один от другого характером поведения электрона проводимости. Последний, занимающий уровень энергии, находящийся выше этой границы, перемещается в пространстве решетки по плавным траекториям, не имеющим петель и зигзагообразных участков. Электрон проводимости, кото-

рый занимает уровень энергии, находящийся ниже этой границы, движется в пространстве решетки по траекториям с резкими поворотами, зигзагами и петлеобразными участками.

5. Выполнено построение энергетической шкалы со схемами расположения этих пар энергетических границ для идеальной и реальной кристаллических решеток.

Диапазоны энергетической шкалы, разделяемые этими границами, отличаются друг от друга степенью участия электрона в связанном состоянии.

6. Показано, что СЭМЭ позволяет описать воздействие колебаний решетки на поведение электронов проводимости как воздействие фактора, под влиянием которого энергетические границы меняют свое положение на энергетической шкале.

Л и т е р а т у р а

1. Гришина Т. А., Креопалов В. И., Гришина В. Ю., Креопалов Д. В. Использование представлений спиральной электромагнитной модели электрона для объяснения свойств электрона проводимости. Часть I. Обоснование возможности возникновения электронов проводимости на основе представлений спиральной электромагнитной модели электрона//Прикладная физика, 2004, № 2. С. 5—10.

2. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. — М.: Мир, 1969.

3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. — М.: Наука, 1978.

Use of an electron spiral electromagnetic model for the explanation conductivity properties

Part II. Influence lattice translation anisotropy on the conduction band electron properties. Energetic scale for atomic electrons in lattice

T. A. Grishina, V. I. Kreopalov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

V. Yu. Grishina

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

D. V. Kreopalov

Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Development of spiral electromagnetic model of an electron applicable to conduction (band) electron was begun in the part I and prolonged here. Influence lattice translation anisotropy on properties of conduction (band) electron was investigated.