

УДК 539.124

## 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**

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

*В цикле из трех статей\* продолжена разработка спиральной электромагнитной модели электрона, начатая в работах [1–3]. Ее представления использованы для анализа свойств электрона проводимости (ЭП). Рассмотрено воздействие таких факторов, как трансляционная анизотропия трехмерной структуры, тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки (КР) и температура. Предложена новая трактовка некоторых свойств ЭП, среди которых подверженность релаксациям и участие в теплопроводности. Показано, что новая модель позволяет представить эти свойства как проявление волновой природы электрона.*

### 1.1. Введение

В физике твердого тела [1] процессы взаимодействия ЭП с периодическим полем КР и тепловыми колебаниями атомов в решетке исследуют порознь и на основе разных представлений о природе электрона. Взаимодействие ЭП с периодическим полем кристаллической решетки описывает теория энергетических зон с учетом волновых свойств электрона. В основе описания — сопоставление волнового вектора с характеристиками обратной решетки.

Взаимодействие ЭП с тепловыми колебаниями атомов описывают на основе корпускулярных представлений о природе электрона. Взаимодействие трактуют как акт упругого соударения и обмена приращениями импульса между двумя частицами: электроном и частицепоподобным квантом акустического возбуждения решетки, который называют фононом и которому приписывают наличие квазиимпульса.

Цель данной работы — разработать метод, который позволил бы объединить исследование этих двух процессов. Ни корпускулярная модель электрона, ни модель, оперирующая вероятностной трактовкой волновых свойств электрона,

для этой цели не подходят. В этих моделях однозначно определен только импульс электрона.

Между тем, анализировать как единый неразделимый процесс взаимодействие электронов проводимости с полем кристаллической решетки, состоящей из колеблющихся атомов, можно только в представлениях прямого пространства. Для осуществления такого анализа недостаточно знать только импульс электрона, необходимо располагать информацией и о характере локализации заряда.

В работах [2–4] выдвинута и обоснована гипотетическая модель электрона, удовлетворяющая этим требованиям. Она названа спиральной электромагнитной моделью электрона (СЭМЭ). В работе [2] сформулированы принципиально новые представления о происхождении элементарного заряда, а также волновых и инерциальных свойств свободного электрона (и протона). В [3] рассмотрен способ описания взаимодействия частиц, аппроксимируемых новой моделью, и обоснована новая трактовка связанного состояния электрона и протона в атоме водорода.

В предлагаемом цикле на основе представлений СЭМЭ анализируется взаимодействие электронов проводимости с полем кристаллической решетки, состоящей из колеблющихся атомов. Рассмотрена роль таких факторов, как трансляционная анизотропия трехмерной структуры, тепловые колебания атомов в узлах кристалли-

\* Две последующие статьи этого цикла будут опубликованы в других номерах этого журнала.

ческой решетки и температура. Предложена новая трактовка некоторых свойств ЭП. Среди этих свойств подверженность релаксациям и участие в теплопроводности. Показано, что новая модель объясняет эти свойства и позволяет представить их как проявление волновой природы электрона без привлечения понятия о фононах.

В данной статье представлен начальный этап этой разработки. Энергия и импульс частицы, а также скорость, масса и релятивистские поправки к ним представлены в виде функций двух частот. Дан анализ взаимодействия электрона, описываемого СЭМЭ, с периодической цепочкой атомов. В основе анализа — сопоставление длины волны электрона с реальным межатомным расстоянием в цепочке. Определены условия превращения атомного электрона в электрон проводимости. Приведены случаи принадлежности атома к цепочке из неподвижных атомов и к цепочке из колеблющихся атомов. Обоснована возможность аппроксимации цепочки, состоящей из колеблющихся атомов, цепочкой из неподвижных атомов с нарушенной трансляционной симметрией.

## 1.2. Представления спиральной электромагнитной модели о свойствах электрона

СЭМЭ [1, 2] предлагает рассматривать электрон как одну из форм существования электромагнитного возбуждения, а именно, как квант электромагнитного колебания из  $\gamma$ -диапазона, находящийся в состоянии циркулирующей поляризации и характеризуемый двумя частотами  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Частота  $\nu_1 = \nu_\gamma^e$  описывает повторяемость возбуждения электрической и магнитной компонент. Ее можно назвать собственной частотой электромагнитного колебания. Вторая частота  $\nu_2 = \nu_{circ}$  описывает повторяемость пространственной ориентации электрической и магнитной компонент, и ее называют частотой циркулирования.

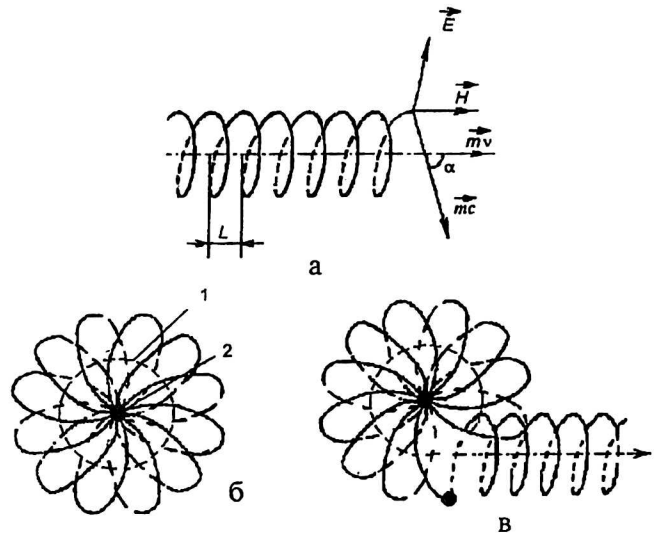
Как и линейно поляризованный квант, электромагнитное возбуждение, характеризуемое циркулирующей поляризацией, перемещается в пространстве с предельной скоростью, равной скорости света  $c$ . Как и у линейно поляризованного кванта, мгновенное направление его импульса в любой момент является нормальным к мгновенным направлениям электрической и магнитной компонент. Синхронно с изменениями направлений электрической и магнитной компонент квант, характеризуемый циркулирующей поляризацией, непрерывно меняет мгновенное направление своего импульса, прецессирует, а потому перемещается не вдоль прямой, а вдоль спирали (винтовой линии, "на-

мотанной" на цилиндр), которая показана на рисунке, а и описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} x &= \frac{c}{2\pi\nu_2} \cos \nu_2 t; & y &= \frac{c}{2\pi\nu_2} \sin \nu_2 t; \\ z &= \frac{c\nu_2 t}{\nu_{sum}}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $c$  — скорость света;  
 $t$  — время.

$$\nu_{sum} = \sqrt{\nu_1^2 + \nu_2^2}. \quad (1.2)$$



**Спиральная электромагнитная модель электрона:**  
а — свободный электрон; осевая линия спирали — прямая линия; отмечены направления скоростей перемещения и компонент электромагнитного поля;  $\alpha$  — угол прецессии  $\gamma$ -кванта; б — электрон, находящийся в связанном состоянии в составе атома: 1 — осевая линия спиральной траектории "заряда" электрона, превратившаяся в окружность; 2 — область ядра, в пределах которой электрон получает приращение импульса, удерживающие его в связанном состоянии; в — превращение связанного электрона в электрон проводимости.  
Виток спирали проходит через область ядра соседнего атома, где электрон получает компенсирующее приращение импульса

Движение по спирали, сопутствующее циркулированию, осуществляется таким образом, что импульс направлен по касательной, магнитная компонента — по главной нормали, а электрическая компонента — по бинормали к винтовой линии. Магнитная компонента имеет преобладающую составляющую, направленную вдоль оси спирали. Эта составляющая создает дипольный магнитный момент электрона. Электрическая компонента имеет преобладающую составляющую, направленную по радиусу витка спирали. Циркулируя, она создает радиальное распределение электрического поля, примерно эквивалентное полю, которое мог бы возбудить точечный электрический монополю, движущийся по оси спирали. Заряд этого эквивалентного электрического монополя (элементарный заряд)

предложено интерпретировать (исходя из совпадения размерностей) как эквивалент потока электрической индукции, создаваемого электрической компонентой электромагнитного возбуждения.

Результат перемещения, сопровождаемого прецессией и совершаемого по спирали, воспринимается как распространение "размазанного заряда" в направлении оси спирали, которое осуществляется не с предельной, а с меньшей скоростью — скоростью электрона  $v$ . Ось спирали в данном случае рассматривается как траектория, по которой перемещается "размазанный заряд" электрона.

Протяженность витка спирали принята равной длине волны электрона  $\lambda_e$

$$L_{curl} = \lambda_e = \frac{h}{|m\vec{v}|} = \frac{c}{v_2}, \quad (1.3)$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $m$  и  $v$  — масса и скорость электрона, соответственно.

Величина  $L_{curl}$  зависит только от частоты циркулирования  $v_2$ .

Шаг спирали описывается выражением

$$L_{step} = \frac{h}{mc} = \frac{c}{v_{sum}}. \quad (1.4)$$

Сравнивая (1.3) и (1.4), можно заключить, что согласно СЭМЭ в основе электрона лежит движение по винтовой линии (спирали), у которой длина витка может меняться в чрезвычайно широких пределах, а шаг остается почти неизменным. Шаг спирали убывает с увеличением энергии электрона, но убывание это становится заметным только в области релятивистских скоростей. Для нерелятивистских электронов шаг спирали равен своему верхнему предельному значению

$$L_{step, max} = \frac{h}{m_0 c} = \frac{c}{v_1} = 2,44 \cdot 10^{-10} \text{ см}, \quad (1.4')$$

где  $m_0$  — масса покоя электрона.

Верхнее предельное значение шага спирали (1.4') равно длине волны электромагнитного колебания, составляющего основу электрона.

В общем случае шаг спирали (1.4) зависит и от собственной частоты  $v_1$ , и от частоты циркулирования  $v_2$ , все остальные параметры частицы также удалось представить в виде функций этих частот, характеризующих состояние кванта [3].

В частности, масса, скорость и релятивистские поправки к ним описываются соотношениями

$$m_0 = \frac{hv_1}{c^2}, \quad m = \frac{hv_{sum}}{c^2}, \quad \beta = \frac{v}{c} = \frac{v_2}{v_{sum}}. \quad (1.5)$$

Полная энергия свободного электрона описывается выражением

$$E_{e, free} = mc^2 = hv_{sum}. \quad (1.6)$$

Для связанного электрона, входящего в состав атома, полная энергия описывается выражением

$$E_{e, con} = mc^2 = hv_{sum, con}. \quad (1.7)$$

где 
$$v_{sum, con} = \sqrt{v_1^2 - v_2^2}. \quad (1.3')$$

Для нерелятивистских электронов, для которых выполняется соотношение  $v_2 \ll v_1$ , выражения для полной энергии электрона (1.6) и (1.7) (с учетом (1.5)) преобразуются к виду

$$E_{e, free} = mc^2 = hv_1 + \frac{h^2}{2m_0\lambda_e^2} = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2}; \quad (1.6')$$

$$E_{e, con} = m_0c^2 - \frac{h^2}{2m_0\lambda_e^2}. \quad (1.7')$$

Одна из отличительных особенностей описываемой модели заряженной частицы заключается в характере "размазанности заряда". Область, по которой "размазан заряд" электрона, имеет резкие границы. "Размазан заряд" не по всей этой области, а лишь по ее периметру. Другая существенная особенность — дискретность возбуждаемого поля (и во времени, и по направлению). Именно эти факторы определяют своеобразие процесса взаимодействия таких заряженных частиц.

Для описания взаимодействия частиц, обладающих перечисленным выше набором характеристик, в работе [2] предложена модель, названная моделью элементарных попарных взаимодействий. В ней процесс взаимодействия представлен как последовательность дискретных, независимых друг от друга актов попарного взаимодействия между потоками электрической индукции (эквивалентами элементарного заряда), возбуждаемыми периодическим электромагнитным полем частиц. Условились, что элементарное попарное взаимодействие осуществимо только в том случае, когда взаимодействующие потоки электрической индукции возникли синхронно и направлены вдоль одной и той же прямой. Во время такого дискретного акта взаимодействия между частицами происходит обмен приращениями импульса. Величины приращений импульса рассчитываются на основе закона Кулона.

### 1.3. Обоснование возможности связанного состояния и возникновения электронов проводимости на основе представлений спиральной электромагнитной модели электрона

В [2] предложены новые представления о природе связанного состояния электрона и протона в атоме водорода. Они проиллюстрированы на рисунке, б. Связанное состояние представлено как регулярное обращение электрона вокруг протона, однако обращение это выглядит как движение точечного "заряда" электрона по винтовой линии, "намотанной" на тор, т. е. по спиральной траектории, осевая линия которой превратилась в окружность. Винтовую линию, "намотанную" на тор, удобнее описывать системой уравнений, записанных в цилиндрических координатах

$$\begin{aligned} z &= \frac{c}{2\pi v_2} \cos v_2 t; & r &= \frac{c}{2\pi v_2} (1 + \sin v_2 t); \\ \varphi &= \frac{2\pi v_2^2 t}{v_{sum.con}}. \end{aligned} \quad (1.1')$$

Осевую линию, превратившуюся в окружность, можно рассматривать как орбиту, по которой перемещается "размазанный заряд" электрона, находящегося в связанном состоянии.

В отличие от модели атома водорода, предложенной Бором [4], обращение электрона вокруг протона по стационарной круговой орбите в работе [2] не постулируется, а представлено как результат регулярных приращений импульса, которые электрон получает в ходе дискретных кратковременных взаимодействий между потоками электрической индукции, возбуждаемыми электромагнитными полями электрона и протона. В [2] также рассчитаны относительные приращения импульса, способные удержать электрон на стационарной круговой орбите вокруг протона. Относительное приращение импульса, сообщаемое электрону за один дискретный акт взаимодействия, составляет около 5 %, направление импульса при этом меняется на угол в 3°, длительность акта взаимодействия — порядка  $10^{-21}$  с, период повторяемости актов взаимодействия — порядка  $10^{-18}$  с, за  $10^{-16}$  с атомный электрон успевает изменить направление своего импульса на  $360^\circ$ . За этот период полного обращения электрона вокруг протона "заряд" электрона проходит 133 витка спирали.

На рисунке, б в центре осевой линии, превратившейся в окружность, малым кружком отмечена область нахождения ядра. Условимся считать, что приращения импульса, получаемые электронам, способны удержать его на стационарной орбите только в том случае, если витки его спиральной траектории проходят внутри этой области, отмеченной малым кружком.

Связанное состояние представлено (см. рисунок, б) как регулярная последовательность дискретных актов взаимодействия между "зарядами" электрона и протонов ядра. Акты взаимодействия происходят каждый раз при сближении электрона и протона, а именно, когда "заряд" электрона проходит по внутреннему участку витка своей спиральной траектории, в непосредственной близости от ядра. Эту трактовку взаимодействия электрона с ядром атома можно использовать при обосновании возможности возникновения связанного состояния, а также при возможности превращения связанного электрона в электрон проводимости. На рисунке, в представлена конфигурация, при которой такое превращение становится возможным. Электрон, находящийся в связанном состоянии, получает от ядра соседнего атома приращение импульса, которое способно полностью компенсировать приращения импульса, получаемые электроном от ядра "своего" атома. Такая компенсация имеет место, когда наружная часть витка спиральной траектории "заряда" электрона проходит через область ядра соседнего атома, отмеченную на рисунке, в вторым малым кружком.

### 1.4. Условие превращения атомного электрона в электрон проводимости

Степень компенсирующего воздействия приращений импульса, получаемых атомным электроном от соседнего атома, зависит от того, как соотносятся между собой расстояние  $a_{broad}$  между соседними атомами в кристаллической решетке и диаметр витка спиральной траектории "точечного заряда" электрона  $\lambda_e/\pi$ .

Для всех электронов, для которых расстояние  $a_{broad}$  удовлетворяет условию

$$a_{broad} > \frac{\lambda_e}{\pi}, \quad (1.8)$$

компенсирующие приращения импульса, получаемые от соседних атомов, не достаточны для того, чтобы "оторвать" электрон от атома, с которым он связан. Приращения импульса, получаемые этим электроном от "своего" атома, являются превосходящими. Такой электрон не может покинуть "свой" атом и остается в связанном состоянии.

Полная компенсация регулярных приращений импульса, удерживающих электрон на замкнутой орбите в составе "своего" атома, возможна в том случае, если расстояние между соседними атомами  $a_{broad}$  оказывается равным диаметру витка спиральной траектории "точечного заряда" электрона или меньше этого диаметра

$$a_{broad} \leq \frac{\lambda_e}{\pi}. \quad (1.9)$$

Под влиянием компенсирующих приращений импульса осевая линия спиральной траектории "точечного заряда" электрона перестает быть окружностью, осевая линия распрямляется. Электрон покидает окрестности "своего" атома и движется в межатомном промежутке поступательно, как мог бы двигаться свободный электрон в свободном пространстве. Распрямленную осевую линию можно рассматривать как траекторию, по которой перемещается "размазанный заряд" этого атомного электрона, превратившегося в электрон проводимости. Условимся в дальнейшем называть ее "траекторией электрона проводимости".

В процессе перемещения электрона проводимости по решетке при каждом сближении витка спиральной траектории с ядром одного из атомов решетки электрон получает от него приращение импульса. Каждое такое приращение меняет направление перемещения электрона на угол около 3°. Пока электрон проходит по межатомным промежуткам, где выполняется условие (1.9), приращения импульса, получаемые электроном с противоположных сторон, сопоставимы по величине и компенсируют друг друга. Перемещение электрона по решетке практически остается поступательным.

Рассмотрение поведения атомного электрона, выполненное с использованием представлений СЭМЭ, приводит к заключению, что условие

$$a_{broad} = \frac{\lambda_e}{\pi} \quad (1.10)$$

можно считать условием взаимных переходов связанного электрона в состояние электрона проводимости, а электрона проводимости — в связанное состояние.

### 1.5. Энергия, соответствующая границе зоны проводимости

Отметим, что условие (1.10) эквивалентно определению межзонной энергетической границы, принятому в теории энергетических зон [5]. Отличие от теории энергетических зон состоит в том, что в (1.10) используются представления прямого пространства кристаллической решетки.

Таким образом, с точки зрения представленной спиральной электромагнитной модели электрона, энергетическая граница, определяемая условием (1.10), отделяет атомные электроны, которые в одномерной цепочке атомов с трансляционным параметром  $a_{broad}$  способны превратиться в электроны проводимости, от электронов, остающихся в связанном состоянии (является границей зоны проводимости для этой цепочки атомов). Величину энергии, соответствующую границе (1.10), можно определить с помощью (1.7):

$$E_{z.p}^{lim} = -\frac{2\hbar^2}{m_0(a_{broad})^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \text{ (эВ)}, \quad (1.11)$$

где  $\hbar = h/2\pi$  — постоянная Планка.

По отношению к электронам, входящим в состав атомов, образующих одномерную цепочку с периодом  $a_{broad}$ , граница (1.11) отделяет атомные электроны, не способные превратиться в электроны проводимости и остающиеся в связанном состоянии, от электронов, способных превратиться в электроны проводимости.

### 1.6. Представления спиральной электромагнитной модели о взаимодействии электрона с колеблющимися атомами реальной кристаллической решетки

В реальной кристаллической решетке атомы находятся в состоянии непрерывных тепловых колебаний и с частотой порядка  $10^{13}$  Гц [6] совершают регулярные смещения из положений равновесия, находящихся в узлах решетки.

При комнатных температурах амплитуды этих смещений составляют от 5 до 10 % межатомного расстояния [6]. Даже при 0 К атомы решетки находятся в состоянии непрекращающихся колебаний конечной амплитуды. Энергия этих нулевых колебаний по оценкам [7], составляет четверть от энергии тепловых колебаний, имеющих место при температуре Дебая.

Среднеквадратичная амплитуда смещения атома из узла решетки определяется следующим соотношением [7]:

$$|\delta a|^2(T) = \begin{cases} \frac{9\hbar^2 T}{Mk\Theta^2} & \text{при } T > \Theta \\ \frac{9\hbar^2}{Mk\Theta} & \text{при } T = \Theta \\ \frac{9\hbar^2}{4Mk\Theta} & \text{при } T = 0 \text{ К,} \end{cases} \quad (1.12)$$

где  $M$  — масса колеблющегося атома;  
 $k$  — постоянная Больцмана;  
 $T$  — температура;  
 $\Theta$  — температура Дебая.

В трехмерной решетке, состоящей из колеблющихся атомов, ряды атомов перестают быть прямолинейными и периодическими. В любом из рядов трансляционный параметр  $a$  больше не является одинаковым для всего ряда и неизменным во времени. На разных участках ряда он может одновременно иметь любое значение из целого диапазона  $a \pm 2\delta a(T)$ , где  $\delta a(T)$  — максимально возможное при данной температуре  $T$  смещение атома из узла решетки. Его величину можно определить извлечением корня квадратного из среднеквадратичной амплитуды (1.12).

Период колебания атома в узле решетки на несколько порядков превосходит приведенные выше временные промежутки дискретных актов взаимодействия, обеспечивающих связанное состояние электрона. Кроме того, с помощью соотношения (1.3) легко убедиться, что за промежутки времени, равный периоду тепловых колебаний атомов в решетке, электрон, имеющий длину волны, сравнимую с межузловыми расстояниями, успевает переместиться на расстояние, измеряемое сотнями нанометров. Следовательно, на протяжении промежутка времени, необходимого для прохождения электрона вблизи данного колеблющегося атома, этот атом практически остается неподвижным.

Это позволяет сделать вывод о том, что электрон проводимости, движущийся в пространстве решетки, должен воспринимать картину пространственного распределения трансляционных параметров в решетке, меняющуюся с частотой  $10^{13} \text{ с}^{-1}$ , как стационарную картину. Поле, которое воздействует на электрон проводимости при его движении в пространстве колеблющейся решетки, можно рассматривать как квазистационарное, а саму решетку — как неподвижную трехмерную решетку с нарушенной трансляционной симметрией. Перемещаясь в пространстве этой решетки, электрон проводимости попеременно встречает сгущения и разрежения атомов.

Возможность (или невозможность) для электрона испытать резкое изменение импульса, обусловленное взаимодействием с колеблющейся

решеткой, спиральная электромагнитная модель позволяет обосновывать путем сопоставления длины волны электрона с величиной реального межатомного промежутка. Для этого в соотношения (1.8), (1.9) и (1.10) нужно подставить локальное мгновенное значение  $a_{loc.inst}$  трансляционного параметра в той области решетки, где электрон в это мгновение находится.

Таким образом, с использованием представлений спиральной электромагнитной модели электрона определены условия превращения атомного электрона в электрон проводимости. Рассмотрены случаи принадлежности атома к цепочке из неподвижных атомов и к цепочке из колеблющихся атомов. Обоснована возможность аппроксимации кристаллической решетки, состоящей из колеблющихся атомов, решеткой из неподвижных атомов с нарушенной трансляционной симметрией.

#### Л и т е р а т у р а

1. Гришина Т. А.// Прикладная физика. 1997. № 2—3. С. 151.
2. Гришина Т. А.// Там же. 1998. № 2. С. 92.
3. Гришина Т. А.// Известия РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 9. С. 1335.
4. Шпольский Э. В. Атомная физика. Т. II. — М.: Наука, 1984.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. — М.: Наука, 1978.
6. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. — М.: Мир, 1969.
7. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. — М.: Мир, 1974.

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

### Part I. Treatment of arising the conduction band electrons developed with using spiral electromagnetic model

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

*Hypothetic model for an electron (and a proton) was supposed and developed in [1—3]. It was called spiral electromagnetic model for an electron (SEME). New step of the theory is present here. The electron described by SEME interacts with periodical chain of atoms. The interaction was analyzed. The main principle of the analysis is the comparison of the electron wave length and the chain interatomic distance. The condition of the process of atomic electron transformation into conduction band electron was defined. The cases of oscillating atoms and the atoms with static positions were considered.*