РАЗДЕЛ III. ФИЗИКА

Волкова М.Г., Боровицкий А.А., Дудров А.М., Пегашов А.Д.
К вопросу расщепления энергетических уровней атомов в зоны при образовании кристаллов

ФГКВООУ ВО «Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны»
Минобороны России
(Россия, Ярославль)

doi: 10.18411/trnio-12-2021-118

Аннотация

В статье проводятся физические аналогии между процессом колебаний двух связанных маятников и явлениями, сопровождающими взаимодействие атомов в кристалле. Показано, что известные особенности колебаний двух связанных маятников отчетливо просматриваются на характерных закономерностях из различных разделов физики.

Ключевые слова: колебания, собственная частота, парциальная частота, связанные маятники, атомы в кристалле.

Abstract

The article draws physical analogies between the oscillation process of two connected pendulums and the phenomena accompanying the interaction of atoms in a crystal. It is shown that the known features of the oscillations of two coupled pendulums are clearly visible on the characteristic patterns from various branches of physics.

Keywords: oscillations, natural frequency, partial frequency, coupled pendulums, atoms in a crystal.

При изучении элементов зонной теории на занятиях по физике с курсантами принципиально важно объяснить им, как и почему происходит расщепление энергетических уровней атомов в зоны разрешенных значений энергии.

Расщепление энергетических уровней в зоны является общим свойством любых связанных систем, составленных их тождественных элементов. Это можно пояснить на примере системы, образованной из двух одинаковых связанных маятников, каждый из которых до связи обладал собственной частотой ν_0 . Если сопротивление движению маятника мало, то при совпадении частоты внешней гармонической силы с собственной частотой колебаний маятника ν_0 наступит явление резонанса.

Свяжем маятники с помощью легкой пружинки, масса которой по сравнению с массой маятников можно пренебречь. Легко убедиться, что в данном случае свойства каждого из маятников изменятся. Закрепив один из маятников, выведем другой из положения равновесия и отпустим его (рисунок 1). Частота колебаний маятника станет теперь больше его собственной частоты, поскольку возвращающая сила увеличилась, так как составляющей силе тяжести добавилась упругая сила деформированной пружинки.

Рисунок 1. Колебание 1 маятника при закрепленном 2 маятнике

Частота, с которой колеблется один из связанных маятников, когда второй закреплен, называется парциальной частотой. Резонанс в такой системе наблюдается при совпадении частоты вынуждающей силы с парциальной частотой ν_{Π} . Парциальная частота будет тем больше отличаться от собственной частоты колебаний маятников ν_0 , чем больше жесткость пружины, то есть чем сильнее связь. Система двух одинаковых маятников имеет две одинаковых парциальных частоты. В общем случае, когда связанная система состоит из нетождественных элементов (например, когда длины маятников различны), она обладает двумя различными парциальными частотами.

Теперь рассмотрим собственные колебания системы двух связанных тождественных маятников. Возможны два основных способа возбуждения гармонических колебаний этой системы [1].

Первый способ состоит в том, что оба маятника отклоняются от положения равновесия в одну сторону и на одинаковые углы, а затем одновременно отпускаются (рисунок 2). В этом случае маятники будут совершать колебания в одной фазе, с одинаковыми частотами и амплитудами. Поскольку эти колебания будут происходить без деформации пружинки (если бы она совсем отсутствовала), то частота собственных колебаний системы ν_{1C} будет равна собственной частоте колебаний свободных маятников ν_0 .

Рисунок 2. Синхронные синфазные маятники

При втором способе возбуждения собственных колебаний оба маятника отклоняются на одинаковые углы, но в противоположных направлениях. В данном случае маятники будут совершать колебания в противоположных фазах, но с одинаковыми частотами и амплитудами. Частота собственных колебаний $\nu_{2C} > \nu_{\Pi}$, так как деформация пружинки и возвращающая сила будут больше, чем при парциальных колебаниях.

При любом другом способе возбуждения колебаний системы они будут носить характер биений.

Таким образом, система из двух связанных тождественных маятников обладает двумя собственными частотами: ν_{1C} и ν_{2C} . Причем, чем сильнее связь между маятниками, тем больше отличаются собственные частоты от парциальной частоты [2].

Рисунок 3. Синхронные противофазные маятники

Резонансная кривая такой системы имеет два максимума, которые соответствуют совпадению частоты внешней гармонической силы с одной из собственных частот системы (рисунок 4). Иначе говоря, в результате установления взаимодействия произошло смещение и расщепление собственной частоты колебаний маятника ν_0 на две частоты ν_{1C} и ν_{2C} .

Рисунок 4. Резонансные частоты связанных маятников
а) критическая связь, б) сильная связь, в) еще более сильная связь

В теории колебаний доказывается, что если система образована из N тождественных элементов, каждый из которых до установления связи обладал собственной частотой колебаний ν_0 , то такая система обладает N различными собственными частотами: ν_{1C} , ν_{2C} , ν_{3C} , ..., ν_{NC} .

Движение электрона в атоме чрезвычайно сложно, однако вследствие его периодичности можно представить его, как колебательное. Расщепление энергетических уровней аналогично расхождению частот колебаний, происходящему при появлении связи между одинаковыми маятниками. Распространим выше описанный принцип на кристаллическую систему, которая состоит из N взаимодействующих тождественных атомов. Каждый атом в свободном состоянии обладает набором собственных частот, которым на энергетической диаграмме соответствуют определенные уровни энергии (рисунок 5). Каждый атом изображен в виде плоской потенциальной ямы, ограниченной потенциальными кривыми, выражающими зависимость потенциальной энергии электрона от его расстояния до ядра. Энергетическое состояние атома удобно изображать посредством энергетических уровней. При образовании кристалла по мере сближения атомов в результате усиливающегося взаимодействия происходит все большее смещение и расщепление собственных частот. При этом соответствующие им уровни энергии смещаются, расщепляются и расширяются, преобразуясь в полосы (или зоны) разрешенных значений энергии, состоящие из N близко расположенных уровней (рисунок 6). На каждом из этих уровней, согласно принципу Паули, может находиться не более двух электронов с антипараллельными спинами.

Рисунок 5. Образование энергетических зон в атоме
а) уровни изолированных атомов, б) энергетические зоны атомов в кристалле

Таким образом, энергетический спектр электронов, принадлежащих изолированным атомам, является линейчатым, а энергетический спектр электронов системы взаимодействующих атомов имеет полосатую структуру.

Ширина зон на энергетической шкале определяется степенью взаимодействия атомов, то есть в первую очередь, межатомными расстояниями. Поэтому энергетические уровни внутренних (ближе расположенных к ядрам) электронов испытывают меньшее расщепление, чем энергетические уровни более удаленных от ядра электронов.

При расстояниях порядка постоянной кристаллической решетки энергетические уровни внутренних электронов вообще не расщепляются. Часто зоны разрешенных значений энергии перекрываются, обращая ширину расположенной между ними запрещенной зоны в нуль. Обычно ширина зон валентных электронов составляет несколько электрон-вольт, а ширина запрещенных зон не превышает нескольких электрон-вольт.

Таким образом, в ряде случаев обращение к аналогии позволяет легче и доступнее пояснить следствия совершенно различных по сути и сложности физических систем [3].

1. Маркеев, А. П. О движении связанных маятников / А. П. Маркеев // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9. – № 1. – С. 27-38.
2. Изучение колебаний связанных маятников: учебно-методическое пособие к лабораторной работе № 20 / В.П. Алексеев, Е.О. Неменко, В.А. Папорков, Е.В. Рыбникова // ЯрГУ им. П.Г.Демидова, Ярославль, 2013. – С. 4-18.
3. Леонов, П. В. О некоторых физических аналогиях сопровождающих колебания связанных колебательных систем / П. В. Леонов // Физическое образование в ВУЗах. – 2003. – Т. 9. – № 1. – С. 110-120.