

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

А. А. Афонин

Квантовая радиофизика

Учебное пособие

Рекомендовано
Научно-методическим советом университета
для студентов, обучающихся по специальностям
Радиофизика, Радиотехника и электроника

Ярославль 2009

УДК 621.38.01:53
ББК 386я73
А 94

*Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2009 года*

Рецензенты:

А. В. Проказников, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник
Ярославского филиала Физико-технологического института РАН;
НПФ "Яр"

Афонин, А. А. Квантовая радиофизика: учеб. пособие
А 94 / А. А. Афонин ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль :
ЯрГУ, 2009. – 100 с.
ISBN 978-5-8397-0672-9

Учебное пособие «Квантовая радиофизика» подготовлено в соответствии с учебной программой курса «Квантовая радиофизика».

В нём освещаются такие аспекты, как принципы работы и характеристики квантовых генераторов (лазера на розовом рубине, квантовых генераторов радиочастотного диапазона, полупроводниковых лазеров), резонансные явления в атомных структурах. Также рассмотрены устройства управления лазерным излучением и эффекты, на которых они основаны, даются сведения о нелинейных эффектах, используемых в оптических и СВЧ системах.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 010800 Радиофизика, 010801 Радиофизика и электроника (дисциплина "Квантовая радиофизика", блок ОПД, ДС), очной и заочной форм обучения.

УДК 621.38.01:53
ББК 386я73

ISBN 978-5-8397-0672-9

© Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова, 2009

Введение

Электродинамика рассматривает вещество с точки зрения усреднённых параметров, таких как ϵ , μ , σ и др. Они слабо связаны с квантовой природой вещества, и с их помощью невозможно объяснить многие явления.

Квантовая радиофизика – раздел физики, изучающий явления, сопровождаемые излучением и поглощением электромагнитных волн радиочастотного диапазона квантовыми системами: атомами, ядрами, молекулами и более сложными конденсированными системами.

Это и ядерный магнитный резонанс (ЯМР), и квантовый генератор, и космические излучения, обусловленные атомами и молекулами, находящимися в космическом пространстве (OH , H_2O , CH_3OH и т. д.), и излучение от компактных объектов космоса в радиочастотном диапазоне.

1. Теоретические основы квантовой радиофизики

1.1. Задача о частице в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме

Изучение квантовой радиофизики начнём с одной из самых простых задач квантовой физики – частица в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме (рис. 1.1).

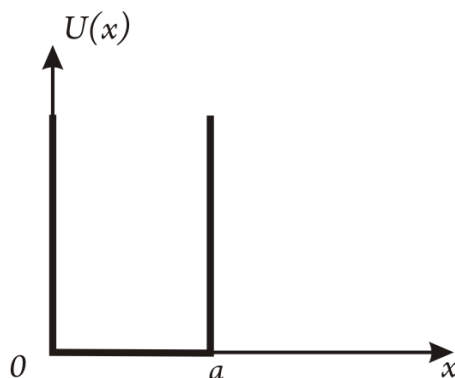


Рис. 1.1. Одномерная бесконечно глубокая потенциальная яма

Запишем уравнение Шрёдингера:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi. \quad (1.1.1)$$

Классическая функция Гамильтона выглядит следующим образом:

$$H = \frac{p^2}{2m} + U(x). \quad (1.1.2)$$

Тогда в квантовом виде

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \hat{U}(x). \quad (1.1.3)$$

В X -представлении импульс и координата выражаются так:

$$\begin{cases} \hat{p} = i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \\ \hat{x} = x. \end{cases} \quad (1.1.4)$$

Так как на частицу нет воздействия, изменяющегося во времени, то можно записать волновую функцию для стационарного состояния:

$$\psi(x, t) = \psi(x) e^{-i \frac{E}{\hbar} t}. \quad (1.1.5)$$

Подставим (1.1.3 – 1.1.5) в уравнение Шрёдингера и разделим переменные:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \psi_0'' + U(x) \psi_0 = E \psi_0(x). \quad (1.1.6)$$

Учитываем также и граничные условия:

- убывание на бесконечности,
- полная вероятность равна единице.

$$\psi_0'' + \frac{2m}{\hbar^2} (U(x) - E) \psi_0 = 0, \quad (1.1.7)$$

причём внутри ямы $U(x) = 0$:

$$\psi_0'' + k^2 \psi_0 = 0,$$

$$k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E,$$

$$\psi_0 = A \cos(kx) + B \sin(kx).$$

Получаем условие квантования: $\sin(ka) = 0$.

Тогда разрешённые значения k :

$$k_n = \frac{n\pi}{a}. \quad (1.1.8)$$

Отсюда можно получить уровни энергии такой системы:

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (1.1.9)$$

Таким образом, получается неэквидистантный спектр энергий.

Теперь можно записать волновую функцию для любой задачи в стационарном состоянии:

$$\psi_n(\vec{r}, t) = \psi_{0n}(\vec{r}) e^{-i \frac{E_n}{\hbar} t}. \quad (1.1.10)$$

Именно такая функция удовлетворяет стационарному уравнению Шрёдингера:

$$\hat{H} \psi_{0n} = E_n \psi_{0n}. \quad (1.1.11)$$

В общем же случае состояние системы описывается суперпозицией возможных состояний:

$$\psi = \sum_n a_n \psi_n. \quad (1.1.12)$$

Тогда среднее значение энергии можно определить таким образом:

$$\bar{E} = \sum_n |a_n|^2 E_n. \quad (1.1.13)$$

А вероятность нахождения частицы с энергией E_n

$$P_n = |a_n|^2. \quad (1.1.14)$$

1.2. Вероятность квантового перехода из состояния с энергией ξ_m в состояние с энергией ξ_n

Перейдем теперь к рассмотрению более важного для нас случая – квантового перехода из состояния с энергией ξ_m в состояние с энергией ξ_n (рис. 1.2).

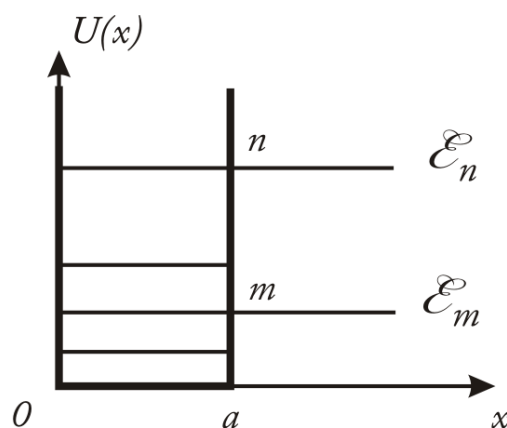


Рис. 1.2. Диаграмма уровней