

使用谐振子势研究束缚态-束缚态相互作用 对高次谐波的贡献^y

蔡庆宇, 乔豪学, 李白文

(中国科学院武汉物理与数学研究所, 波谱与原子分子国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 用一维谐振子模型计算了强激光场中的高次谐波的产生, 给出了只有束缚态存在时高次谐波会很快衰减但是不存在平台部分, 而且高次谐波并不会产生明显的截断等一系列有明确物理意义的结论.

关键词: 强激光场; 束缚态; 一维谐振子; 高次谐波

中图分类号: O562 文献标识码: A

原子在强激光场中的一些非线性多光子现象诸如高次谐波的产生、阈上电离等引起了人们的兴趣. 特别是对高次谐波的研究相当活跃^[1]. 从 60 年代实验上首次观察到多光子以来, 实验上观察到在强激光场中的惰性气体原子产生的高次谐波的阶数高达 100 次以上^[2]. 这不仅为我们寻找新的物质光源(如 X 光源)提供了一种新的途径, 而且高次谐波的产生本身也具有深刻的物理机制. 在激光场的光强达到一定的数值时, 处于基态原子中的电子会发生隧道电离, 一般是称原子处在隧道电离区. 在这个区域, 原子所产生的高次谐波的强度随谐波的阶数的变化具有典型的特征: 前几个谐波的强度很快减小, 然后在较宽的能区内, 其强度变化较小而展示一个平台(Plateau), 最后在某一个最高阶处很快消失(Cut-off). 这一最高阶数满足经验公式 $N_{\max} = (I_{\text{at}} + 3.17U_p) / \omega$, 其中 I_{at} 为原子的电离能, ω 为激光的频率, U_p 为电子在激光场中的有质动力能^[3]. Corkum 和 Krause 等人分别用简单的三步模型和量子力学计算证实了由实验给出的经验公式. 在此基础上, Lewenstein 和 Becker 等人利用量子理论仅考虑原子的基态和连续态之间的相互作用来描述高次谐波的产生, 能够得到半解析的结果. 通常认为, 低阶的高次谐波主要来自束缚态-束缚态的贡献, 而高能谐波主要连续态的贡献. 本文就是利

用一维谐振子模型来研究高次谐波的特征. 由于一维谐振子势只存在束缚态, 所以通过对谐振子势的深入研究, 就可以使我们清楚了解到束缚态-束缚态相互作用对高次谐波产生的具体影响.

通常理论处理高次谐波谱的描述是^[4],

$$\begin{aligned} & |P(\omega)| \\ &= \left| \int \langle \phi(r, t) | d(t) | \phi(r, t) \rangle e^{-i\omega t} dt \right|^2, \end{aligned} \quad (1)$$

由 Ehrenfest 定理知:

$$d(t) = \frac{d^2}{dt^2} \langle r \rangle = - \frac{\partial H}{\partial r} \quad (2)$$

在这里, 最大的工作量是要求含时 Schrödinger 方程, 以便得到末态波函数.

$$\begin{aligned} & \left[- \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) + xE f(t) \right] \Psi(x, t) \\ &= i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t), \end{aligned} \quad (3)$$

$f(t) = \sin^2(\pi t / T_{\text{on}}) \sin(\omega t)$, $0 \leq t \leq T_{\text{on}}$; 否则, $f(t) = \sin(\omega t)$, $V(x) = x^2/2$. ω 是激光场的频率, 我们采用 split operator 方法^[5], 结合 FFT 方法^[6], 就可以得到末态波函数

$$\begin{aligned} & \Psi(t + \Delta t) = \\ & F^{-1} [e^{-\frac{1}{4}K^2 \Delta t} F [e^{-iV \Delta t} F^{-1} [e^{-\frac{1}{4}K^2 \Delta t} F [\Psi(t)]]]]]. \end{aligned} \quad (4)$$

^y 收稿日期: 2002 - 03 - 05; 修改日期: 2002 - 05 - 31

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目

作者简介: 蔡庆宇(1976-), 男(汉族), 河南夏邑人, 博士生, 从事原子分子物理研究.

激光场的强度为 $E_0=0.5$, 激光频率 $\omega=1$, 这样谐振子的能级间隔正好是一个光子的能量, 得到的高次谐波谱(见图 1)正好和经典模型的结论相符合. 因为只有束缚态-束缚态相互作用, 所以高次谐波谱只有衰减, 没有平台, 也没有明显的截断. 在图 2 中, 我们看到, 当 $E_0=0.5$, 激光频率 $\omega=0.3$ 非共振吸收时, 一样有高次谐波的出现, 只是这时高次谐波谱强度衰减的更快.

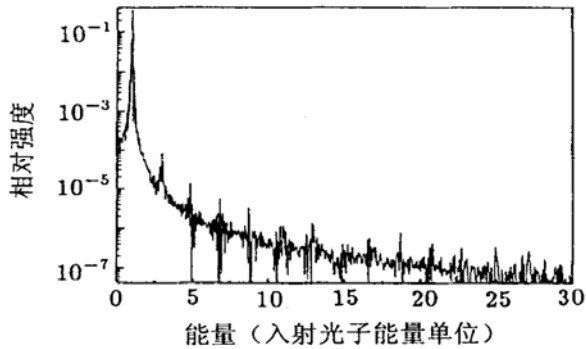


图 1 $E_0=0.5$, $\omega=1$ 时的高次谐波谱

我们使用一维谐振子模型研究束缚态-束缚态相互作用对高次谐波的贡献, 当激光频率是处于共

振吸收时, 仍然是得到了迅速衰减的谱, 而且在光子频率处于非共振吸收时, 衰减迅速而且谱峰很快消失. 多光子过程本身就说明了只允许能量一份一份的吸收的量子机制受到了破坏. 但是量子机制还是在起作用的, 高次谐波谱强度的迅速衰减就说明了这一点. 在只有束缚态-束缚态相互作用的时候, 高次谐波谱没有典型的平台, 也没有明显的截断, 这不仅符合经典的三步模型, 而且也展示了由于束缚态-束缚态相互作用才造成了通常的高次谐波谱强度在开始阶段明显的衰减.

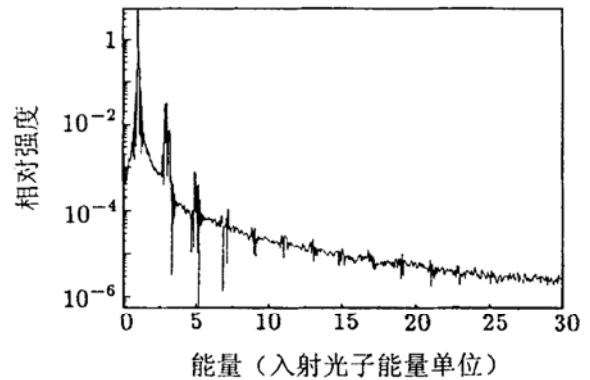


图 2 $E_0=0.5$, $\omega=0.3$ 时的高次谐波谱

参 考 文 献:

- [1] Protopapas M, Keitel C H, Knight P L. Atomic Physics with Super-high Intensity Laser[J]. Rep Prog Phys, 1997, **60**: 238.
- [2] Chu S I. Recent Developments in Semiclassical Floquet Theories for Intense-field Multiphoton Processes[J]. Adv At Mol Phys, 1985, **21**: 197.
- [3] Krause J L, Schafer K J, Kulander K C. High-order Harmonic Generation Using Intense Femtosecond Pulses[J]. Phys Rev Lett, 1993, **70**: 766.
- [4] Burnett K, Reed V C, Knight P L. Atom in Ultraintense Laser Fields[J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 1993, **26**: 561.
- [5] Bandrauk A D, Shen H. Exponential Split Operator Methods for Solving Coupled Time-dependent Schrödinger Equations[J]. J Chem Phys, 1993, **99**: 1 185.
- [6] Feit M D, Fleck Jr J A, Steiger A. Solution of the Schrödinger Equation by a Spectral Method[J]. J Comput Phys, 1982, **47**: 412.

(下转第 165 页 continued to page 165)