

光与电子之间能量交换的一个诱因^{*}

张 涛[†]

(射线束技术与材料改性教育部重点实验室,北京师范大学核科学与技术学院

(低能核物理研究所)北京市辐射中心,北京 100875)

(2008 年 3 月 27 日收到,2008 年 6 月 7 日收到修改稿)

运用电子云导体模型分析了光与真空中自由电子之间相互作用,分析结果与已有理论一致.结合电子云导体模型对下列情况的分析:氮分子在飞秒强激光作用下的电离、X 射线与分子中电子的作用等,可以说明光与电子之间确实存在电磁感应相互作用,光与电子间能量交换的根源之一是它们之间的电磁感应相互作用.

关键词:电子,光,能量,电磁感应

PACC:4110H,7820B

1. 引 言

电磁波与物质相互作用普遍存在于自然界,是重要的科学和技术研究领域.在电磁波与分子中电子的相互作用研究中,一般主要考虑电磁波的电场 E 和磁场 B 对电子的作用,并且认为电场 E 占主导地位,相比之下,磁场 B 的作用较微弱,可以忽略.一般用光之电场与介质中电子作用的振子模型来解释折射现象,但这种振子模型给不出折射率较准确的计算方法.另外,在光与电子相互作用时,能量形式的转换是一个重要的特征,表现为电子吸收或放出光子,或者电子与光来回交换部分能量,这些过程中均伴随着电子动能或势能的变化.然而,至今对导致这种能量形式转换的因素还没有直观而明确的描述.本文说明了光与电子的电磁感应相互作用,用电磁感应作用观点分析光与电子相互作用的几种情况,从而阐明导致光与电子之间能量形式转换的一种诱因,即电磁感应相互作用因素.

2. 光与电子间电磁感应作用及其导致的折射现象

已有研究工作表明^[1,2],光与电子相互作用时,除了光波的电场作用和磁场作用外,还存在光波的电磁感应作用,即光波磁场变化量 $\partial B/\partial t$ 导致的感

生电动势对电子的作用;电子云导体模型可以用来定量研究这种电磁感应造成的光与电子云之间的能量交换.与光波电场作用引起电子云的极化、光波磁场作用引起电子云的磁化不同的是,光波的电磁感应作用可以引起电子云上的感生电流,这是电子吸收光波能量的方式之一.上述电子云的极化、磁化和感生电流均是在电子处于未跃迁情况下,电子对光波的响应,其中电子云的感生电流与其他两种响应(电子云的极化、磁化)有不同的相位.电子云导体模型理论与量子电动力学的不同之处在于:它们分别能够用于解决不同性质的问题;在有关光与电子相互作用方面,量子电动力学主要研究电子对光子的吸收和发射过程,涉及电子的能级跃迁,而电子云导体模型主要研究电子在不发生能级跃迁情况下,电子与光之间由于电磁感应而发生的能量交换过程,如光在物质中的折射等过程.

电子云导体模型的出发点是:一般情况下,光与电子之间存在电磁感应相互作用,这种作用可以导致光与电子之间交换能量(折射能).根据这一思想和能量守恒定律推导出介质折射率 n 表达式^[2]

$$n = 1 + \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i, \quad (1)$$

式中 z 是分子中所有电子的个数, i 表示分子中第 i 个电子, ρ 是介质中分子密度, V 是电子云等效体积, g 是电子的形状方位因子.这是在认为所有分子的空间取向一致条件下的结果.当介质中分子的空

^{*} 国家教育部优秀青年教师资助计划、北京市科技新星计划(批准号:952870400)资助的课题.

[†] E-mail: taozhang@bnu.edu.cn

间取向不一致时,上式应变为

$$n = 1 + \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i, \quad (2)$$

式中 g 是所有分子中第 i 个电子之 g 值的空间取向平均值.当介质中有多种分子时,有

$$n = 1 + \frac{1}{2} \sum \left[\rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i \right]_j, \quad (3)$$

这些表达式已经被用来对氦、氖、空气、若干种二元和三元溶液等多种介质的折射率进行计算,计算结果均与实测值很好符合^[2-6].这些计算结果支持了电子云导体模型的观点,即光与电子之间存在电磁感应相互作用,这种作用可以导致光与电子之间能量交换,折射过程起因于这种能量交换.

光的电磁感应导致的感生电动势,既可以影响局限于分子中的电子,也可以影响非局限于分子中的电子(如导电电子).在上述感生电动势作用下,这两种电子的行为有较大的差异.这里所说的光与电子的电磁感应相互作用,主要是指上述感生电动势对局限在分子中电子的作用.

根据(1)式可以得到 n - V 关系曲线.为简化起见,每个分子仅计算一个电子对折射率的贡献,并且此电子的电子云呈球形.此时 n - V 关系可以转变为 n - r 关系,如图1所示; r 是与球形电子云等效体积 V 对应的等效半径, $V = 4\pi r^3/3$.图1中还给出了光在介质中传播速度 v 与 r 的关系, $v = c/n$, c 是真空光速.图1中 r 最大值为 500 \AA ,即电子云最大线度为 1000 \AA .当入射光是钠光时,可以认为光波长显著大于 1000 \AA ,因此在钠光和电子云的线度为 1000 \AA 条件下,可以认为(1)式近似成立.由图1可见, v 随 r 增大而变小,当电子云的线度为 1000 \AA 时($r = 500 \text{ \AA}$), v 变得相当小,达到数十米每秒.在超导体中或里德伯原子中,有些电子云出现的空间线度可以达到千埃甚至更大,这些电子对折射率有相当大的贡献.

图1给出的关系曲线是在 g 保持不变条件下得到的结果,实际上,折射率影响因素较复杂,在一定条件下电子云的 V , g 值都可以随光的频率、强度以及其他因素的变化而改变.值得说明是,分子中电子能级跃迁过程或者电子能量显著变化过程对应着该电子的 V 急剧变化的过程^[1],而 V 急剧变化导致折射率 n 急剧变化(见(1)式),因此,电子能级跃迁过程(比如电子吸收光子而跃迁到较高能级)总是伴随着折射率的急剧变化过程.这一认识可以用来解释一般情况下介质对光强烈吸收时折射率急剧增大

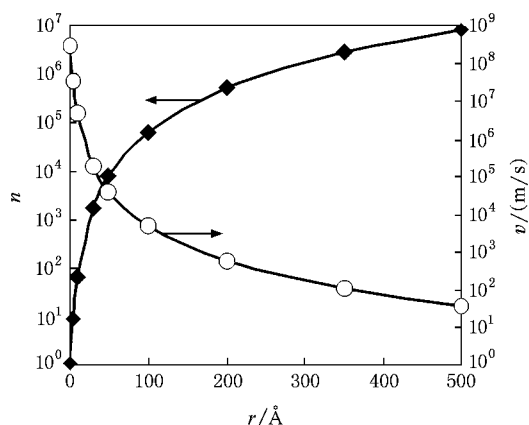


图1 根据(1)式得到的 n - r 关系曲线(图中同时给出 v - r 关系曲线. $\rho = 2 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$, $g = 2/3$)

的现象. Hau 等人^[7]进行了极慢光速实验,他们采用电磁感应透明技术,消除了介质中一些电子较高能级上的布居状态,使得这些电子可以获得超过原有能级的能量而不最终吸收光,提高了光的透射率.此时,这些电子的高能量状态对应着其显著增大的 V .根据(1)式,这些电子对折射率的贡献大大提高,使得光速显著减慢.可见,光与电子之间强烈的电磁感应作用应当是实现极慢光速的机理之一.

3. 光与电子作用导致的能级跃迁过程

电子云导体模型除了能用于研究非能级跃迁情况下电子与光的能量交换过程外,还能用来辅助研究某些电子能级跃迁过程. Alnaser 等人^[8]发现,在飞秒强激光作用下电离时,氮分子电离率随氮分子的空间方位改变而呈现规律性的变化;另外,众所周知, X 射线一般不会直接激发分子的外层电子,反倒是能量比 X 射线低的可见光或紫外光更容易激发分子的外层电子.这些现象可以用电子云导体模型予以直观而合理地解释^[1].对于前一个现象,氮分子空间方位的变化会引起氮分子外层电子的形状方位因子 g 改变,导致氮分子外层电子获得折射能 W_E 的变化,即^[2]

$$W_E = \frac{V}{2\mu_0 g} B_0^2 \sin^2 \omega t, \quad (4)$$

这里 μ_0 是真空磁导率, B_0 是激光磁场幅值, ω 是激光角频率, t 是时间.氮分子电离率随空间方位的变化规律与氮分子外层电子获得能量 W_E (折射能) 的变化规律一致,即 W_E 越大,氮分子电离率越高,从

而可以解释此实验结果.对于后一个现象,可以根据电子云等效体积 V 的变化来解释.在光波长的一定范围上,随波长减小电子云的 V 有效值会变小.比如当某 X 射线波长小于电子云尺度时,至少有下列两个因素导致 V 改变:1)该电子云空间上同时存在该 X 射线正、负方向的磁场,使得大部分时间里在该电子云空间上的磁通变化量几乎相互抵消为 0;2)该 X 射线的磁场不能充满该电子云空间.这两方面的因素使 V 的有效值变小,即电子云空间中净 dB/dt 占据的体积变小(与可见、紫外光等相比).根据(4)式,该电子云从该 X 射线获得的 W_E 较小,从而可能不足以使该电子云明显偏离基态.因此,可见光或紫外光作用下分子的外层电子的 V 值,要大于该 X 射线作用下分子的外层电子的 V 值,分子的外层电子从可见光或紫外光获得的能量要大于从该 X 射线获得的能量.相比之下,这些外层电子更容易被可见光或紫外光激发.

电子云导体模型对这些现象直观而合理的解释结果表明:在这些现象中,光与电子之间能量交换的诱因之一是光与电子间的电磁感应相互作用.

4. 光对真空中自由电子的作用

电子云导体模型还可以用来分析光与真空中自由电子之间的相互作用.一种极限的情况是 $V=0$, 尽管这样的电子不可能在分子中出现,但这种情况对应着真空中的自由电子,因为在合适的参考系中,真空中的自由电子可以看成静止的电子(这也是电动力学的处理方法.如果将真空中的自由电子看成匀速直线运动的电子,则可以从另外的途径取得与

下文同样的分析结论,这里从略),即真空中自由电子的电子云等效体积 $V=0$.根据(4)式,该电子从光波获得的能量(折射能) $W_E \propto V=0$,说明该电子不与光交换能量.这一结果与电动力学已有分析结果是一致的,即真空中的自由电子既不能吸收光子,也不能辐射光子.可见,从光与电子之间的电磁感应相互作用出发,可以直观而容易地解释为什么真空中的自由电子既不能吸收光子,也不能辐射光子.而从光电场对该电子的作用出发来解释此结论是较为困难的,因为处于光电场中的静止电子必定会被加速(综合考虑光磁场情况下也是如此),从而应该从光电场获得能量,即该电子应该吸收光的能量,或者说该电子应该吸收部分或全部光子的能量,这与上述电动力学的结论相矛盾.这说明,至少在光与真空中自由电子之间相互作用情况下,不能根据光的电场作用来判断电子是否吸收光的能量.

5. 结 论

电子云导体模型的出发点是:光与电子之间存在电磁感应相互作用,这种作用可以导致光与电子之间交换能量.运用电子云导体模型对光与电子之间相互作用的几种情况进行分析或计算,即1)多种介质折射率的计算,2)极慢光速实验,3)氮分子在飞秒强激光下的电离,4) X 射线与分子中电子的相互作用,5)光与真空中自由电子的相互作用等,这些分析和计算均能得出合理或者准确的结果,从而可以说明:光与电子之间确实存在电磁感应相互作用,光与电子间能量交换的根源之一是它们之间的电磁感应相互作用.

[1] Zhang T 2008 <http://www.paper.edu.cn>

[2] Zhang T 2004 *Chin. Phys.* **13** 1358

[3] Zhu M, Zhang T *International Journal of Modern Physics B* (to be published)

[4] Xin D Q, Zhu M, Xie Y L, Zhang T 2006 *Journal of Beijing Normal University* **42** 579 (in Chinese) [辛督强、朱 民、解延雷、张 涛 2006 北京师范大学学报(自然科学版) **42** 579]

[5] Xie Y L, Zhu M, Xin D Q, Zhang T 2007 *Journal of Beijing Normal University* **43** 47 (in Chinese) [解延雷、朱 民、辛督强、张 涛 2007 北京师范大学学报(自然科学版) **43** 47]

[6] Zhang T 2006 <http://www.paper.edu.cn>

[7] Hau L V, Harris S E, Dutton Z *et al* 1999 *Nature* **397** 594

[8] Alnaser A S, Voss S, Tong X M 2004 *Physical Review Letters* **93** 113003

A cause of energy exchange between light and electron^{*}

Zhang Tao[†]

(*Key Lab of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education
in Beijing Normal University , Institute of Nuclear Science and Technology (Institute of
Low Energy Nuclear Physics) , Beijing Radiation Center , Beijing 100875 , China*)

(Received 27 March 2008 ; revised manuscript received 7 June 2008)

Abstract

According to the electron-cloud-conductor model , there should exist interaction of electromagnetic induction between light and electron when they meet , and this interaction may result in the energy exchange between them. Energy exchange between light and free electron in vacuum is analyzed with the model , and the result consists with that of the existing theory. The model can also be used to explain the experimental result of ionization rate of N₂ molecules by short laser pulses and the behavior of ionization of molecules by X-ray. It is concluded that one of the root causes for energy exchange between light and an electron is electromagnetic induction between them.

Keywords : electron , light , energy , electromagnetic induction

PACC : 4110H , 7820B

^{*} Project supported by the Excellent Young Teachers Program of Ministry of Education , China and Beijing Science Technology New Star Program (Grant No. 952870400).

[†] E-mail : taozhang@bnu.edu.cn