

赅带隙光子晶体中原子集合的自发辐射动力学*

顾本源[†] 王雪华

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 介绍了三维赅带隙光子晶体中原子集合的自发辐射衰减分布特性,发现不同的原子集合弥散组态,其原子自发辐射呈现十分宽或窄的有限的寿命分布,纯粹光子晶体效应可导致加速和抑制衰减过程并存,从理论上揭示了现有的实验结果的重大分歧的缘由.

关键词 赅带隙光子晶体,原子自发辐射

CHARACTERISTICS OF THE DECAY DISTRIBUTION OF SPONTANEOUS EMISSION FROM AN ASSEMBLY OF ATOMS IN PHOTONIC CRYSTALS WITH PSEUDOGAPS

GU Ben-Yuan[†] WANG Xue-Hua

(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract The characteristics of the decay distribution of spontaneous emission from an assembly of atoms in photonic crystals with pseudogaps are described. Calculations show that quite wide or narrow lifetime distributions can occur for different spreading configurations of the atoms. The pure photonic crystal effects may lead to coexistence of both accelerated and inhibited decay processes. Our results clarify theoretically the substantial discrepancies in recent reported experiments.

Key words photonic crystals with pseudogaps, spontaneous emission of atoms

自从 1987 年先驱者 Yablonovitch^[1]和 John^[2]开创性提出光子晶体这一概念,人为地在空间周期性地排列介电材料,构成人造晶体以来,光子晶体的结构、制备和量子电动力学特性,日益受人们关注和得到广泛的研究^[1-9].光子晶体最重要的性质之一是存在若干电磁波不容许传播的频率区域,称它们为光子带隙.在科学和技术方面,有着潜在的应用.例如,制作滤波器,光学开关,微腔,设计高效的激光器等.

当裸原子的跃迁频率落在光子晶体的带隙之中时,其自发辐射性质到底发生哪些变化呢?它会被完全抑制或部分地被禁止?采用不同的光子的色散模型时,便会得到很不相同的结论.人们各持己见,争论不休.例如,一维光子晶体的各向同性色散模型,它可预言许多新现象,如反常拉姆能级移动、原子自辐射的振荡行为、反常超辐射速率以及增强的量子干涉效应^[3,4].但是它有着一个致命的弱点,其光子态密度近带边存在奇异性,不合物理道理.为了避免这一奇异性,引进各向异性色散模型^[7,8].它能

预言强的扩散场和光子扩展态共存;另一方面,它否定了光子-原子束缚态与光子传播态共存.人们已经认识到光子局域态密度的精确计算对预言光子晶体的实际量子电动力学性质至关重要.李志远^[9]等人实际计算了三维光子晶体中光子局域态密度.应用全矢量电磁场理论,并且考察近带边光子局域态密度行为,得出结论:Weissropf - Wigner 微扰近似对三维光子晶体还是适用的.但是,他们没有考虑原子与光场之间的耦合显著增强的效应.最近,我们首次从实际计算得到色散关系,并应用格林函数方法一般性地处理光子晶体二能级原子的自发辐射问题.同时还修正了长期以来在计算光子局域态密度上采用的不正确的电场本征模在晶格点群对称操作下的变换关系,使局域态密度计算简化归结到约化第一布里渊区内,大大节省了计算时间.我们指出,在光子晶体中,光场与原子之间局域耦合强度会有显著

* 2002-02-24 收到初稿,2002-03-14 修回

† 通讯联系人. E-mail: guby@aphy.iphy.ac.cn

的增强,从而导致光子晶体中二能级原子的自发辐射呈现多样性^[10].

最近我们进一步深入研究了三维带隙光子晶体中原子集合的自发辐射动力学过程^[11].由于制作可见光频段的三维绝对带隙光子晶体面临着很大困难,因此,目前实验上研究其量子电动力学特性时多局限于带隙光子晶体上.在这种光子晶体中,辐射衰减抑制效应首次于10多年前见诸报道^[3].随后广泛的实验研究表明,非光子晶体效应可以解释导致原子辐射寿命改变的大部分起因^[4].最近在人造蛋白石样品中^[5],染料分子均匀分布在背底溶液中,实验上观察到原子自发辐射寿命分布,包含加速和抑制两分量.但是,当染料分子均匀地分布在二氧化硅小球内部一球面壳层内时^[6],仅仅观察到单一的衰减寿命.由此可见,实验结果出现重大分歧.

最近我们的理论工作^[11]就是致力于揭开这一面纱,让它们露出庐山真面目.由于实验样品是三维带隙光子晶体,不同于有完整带隙的光子晶体,即使原子的跃迁频率落在带隙之中,也只能抑制部分传播方向上辐射光波,况且原子与光子之间的相互作用强烈地依赖于原子的位置.所以,我们必须考察原子的集合,应用全矢量电磁场分析,严格和正确地计算光子局域态密度,抛弃各种近似的色散模型.考虑到原子-光场相互作用依赖于原子位置,定义了寿命分布函数,采用格林函数方法,导致计算原子集合的辐射衰减普遍表达式,从而研究其辐射动力学过程,解释了目前存在重大分歧的实验结果.

我们针对实验,考察了两块样品:样品1(PC1)折射率为 $n = 1.3$,介电小球浸在折射率为 $n_b = 1.49$ 的背底材料中,以及填充因子为 $f = 0.74$ (定义为介电小球体积与单胞体积之比);样品2(PC2)折射率 $n = 1.45$, $n_b = 1.33$ 以及 $f = 0.65$.这两块样品沿(111)方向有带隙.图1给出染料原子(或分子)均匀分布在背底介质中的自发辐射寿命分布.这里使用三个不同的参考寿命值.假定,裸原子跃迁频率落在带隙的低带边.可以清楚地看到,呈现出十分宽的寿命分布.同时观察到,整个寿命分布函数含有辐射加速和抑制两个分量.实线、点线和虚线分别对应于参考寿命值 $\tau_f = \tau_v, \tau_v/1.2$ 和 τ_v/n_b ,其中 τ_v 代表真空中原子自发辐射寿命.这结果与Petrov等人的实验结果吻合^[5].

图2给出在PC2样品中,染料分子分布在半径为 r_0 的介电小球内部不同半径 r 的球层表面上时,原子(或分子)的寿命分布函数.实线对应于 $r = 0.6r_0$,

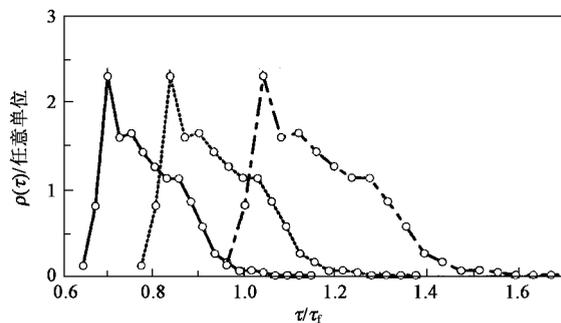


图1 在光子晶体样品1中,原子(或分子)均匀地分布在背底介质材料中时原子的寿命分布

点线为 $r = 0.8r_0$ 的情形.根据实验报道^[6],设定探测光频率落在带隙的中央处.此时,观察不到光子带隙的效应,导致单一的衰减寿命.其原因是在这一特定的原子空间组态下,由于晶体的对称性,此时球面上许多位置点是物理上彼此等价的,原子处在这些位置上时,其寿命均相等.理论预言与实验^[6]结果吻合.

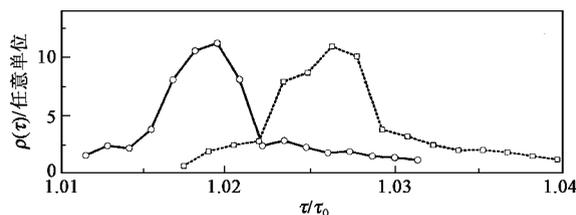


图2 在光子晶体样品2中,原子(或分子)均匀地分布在半径为 r_0 的介电小球内部的不同球层表面上时,其寿命分布(球层的半径为 r ,实线对应于 $r = 0.6r_0$,点线对应于 $r = 0.8r_0$)

总之,通过我们的理论分析,表明原子(或分子)的自发辐射衰减的动力学性质强烈地依赖于原子(分子)在光子晶体中分布组态情况.一般地说,单一平均自发辐射寿命概念在光子晶体中不再适用了.纯粹的光子晶体效应能够导致原子(分子)自发辐射加速和抑制现象共存.理论结果澄清了不同实验结果出现重大分歧的物理真谛,有利于进一步深入地理解光子晶体中量子电动力学性质.

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Phys. Rev. Lett. ,1987 58 2059
- [2] John S. Phys. Rev. Lett. ,1987 58 2486
- [3] Martorell J, Lawandy N M. Phys. Rev. Lett. ,1990 65 :1877
- [4] Tong B Y, John P K, Zhu Y-T *et al.* 1993 ,10 356
- [5] Petrov E P, Bogomolov V N, Kalosha I I *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 81 77
- [6] Megens M, Wijnhoven G E J G, Lagendijk A *et al.* Phys. Rev. A , 1999 59 4727 ;

Megens M, Schriemer H P, Lagendijk A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83 :5401 ;
 Petrov E P, Bogomolov V N, Kalosha I I *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83 :5402
 [7] John S, Wang J. Phys. Rev. Lett., 1990, 64 :2418 ; Phys. Rev. B, 1991, 43 :12772 ;
 John S, Quang T. Phys. Rev. A, 1994, 50 :1764 ; Phys. Rev. A, 1997, 56 :4273 ; Phys. Rev. Lett., 1995, 74 :3419 ; Phys. Rev. A, 1996, 76 :1320

[8] Zhu S Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84 :2136 ;
 Yang Y, Zhu S Y. Phys. Rev. A, 2000, 62 :013805
 [9] Li Z Y, Lin L L, Zhang Z Q. Phys. Rev. Lett., 2000, 84 :4341 ;
 Li Z Y, Xia Y. Phys. Rev. A, 2001, 63 :043817-1
 [10] Wang X H, Gu B Y, Wang R Z. Eur. Phys. J. D, 2002, to be published
 [11] Wang X H, Wang R Z, Gu B Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88 :093902-1

·物理新闻·

如果宇宙是一台计算机(If the Universe Were a Computer)

现在人类生活在一个庞大的计算机系统中,科学家们都喜欢把任何系统进行数值化,如一杯水、一个地区的经济数据、一个 DNA 序列和一组神经网络.根据信息论,这些系统都可以用二进位制的比特(Bit)来计量.因此两年前美国 MIT 的信息论权威、著名的 Seth Lloyd 教授提出了一个令人惊奇的问题:“从天体大爆炸以来,宇宙究竟具有多少信息量?”换句话说,就是如果宇宙是一台计算机,它在大爆炸后已经完成了多少次计算,包含了多少的信息量?

为了回答这个问题,在现有物理学定律的基础上,他选择了两个参量来描述宇宙,一个是能量,另一个是熵.首先,他认为,在初态时能量是贮存于物质中的并保持为一个常数,因此可以利用爱因斯坦的著名公式 $E = mc^2$ 来估算宇宙的能量,在考虑了引力场的影响后,大约需要用 10^{20} bit 来完成宇宙中拥有的约 10^{80} 万个基本粒子能量的计算.

其次是熵的计算,他认为系统的熵是与它的温度紧密相关的,因此他通过黑体辐射公式来得到宇宙的温度,为完成对熵的计算需要 10^{90} bit 的计算量.这仅仅是给出了宇宙具有的最小的信息量.最后 Seth Lloyd 教授认为,这只是一个描述宇宙动力学演化的一个程序,并没有解决宇宙学中的什么问题,惟一的进展是可以将信息科学与物理过程联系起来.

(云中客摘自 Physical Review Letters, 10 June 2002)

(上接第 539 页)

种情况下,热回滞可能更大.在一级相变过程中,材料不是处于热力学平衡态.温度 T 和磁场 H 不再是决定物质状态的独立变量.材料所处的状态不仅依赖于 T 和 H ,而且与热的历史密切相关.如果材料在进入磁场之前已经处于铁磁有序态,它将不可能通过磁化放热排出磁熵,接下来的制冷循环将成为无效.

最近,在莫斯科大学, $Gd_5Si_2Ge_2$ 的绝热磁化温度 $\Delta T_{ad}(T)$ 被测试.结果显示,数据点大幅度地离散跳跃.究其原因,正是由于加磁场前样品的初始状态不确定,导致了 $\Delta T_{ad}(T)$ 数据点的离散.这种离散在逐步升温的比热测量和 $M - T$ 测量中不可能被观

测到.

致谢 感谢国家自然科学基金(批准号:19974051)的资助.

参 考 文 献

[1] Tegus O *et al.* Nature 2002, 415 :150
 [2] Dai W *et al.* Progress in Natural Science 2001, 11 :417
 [3] Dai W *et al.* J. Magnet. Magnet. Mater. 2000, 218 :25
 [4] 戴闻.低温物理学报, 1993, 15 :51 [Dai W. Chin. J. Low Temperature Phys., 1993, 15 :51 (in Chinese)]

(中国科学院理化技术研究所 戴闻;
 中国科学院物理研究所 陈远富)