

周期排列共振放大介质的小信号增益特性研究^{*}

陈 芳 曾健华 周建英[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2006 年 11 月 2 日收到, 2006 年 12 月 4 日收到修改稿)

研究一维周期排列共振放大介质的小信号增益特性. 研究结果表明小信号增益随着作用长度的增加表现出异常的放大特性. 在满足严格布拉格共振条件下, 介质折射率分布形成的带隙和增益效应之间的相互竞争决定了透射光场的变化. 进一步讨论了增益大小与激子参数和共振原子之间的依赖关系.

关键词: 周期共振放大介质, 小信号增益, 光子带隙

PACC: 7820P, 4270Q

1. 引 言

光子晶体又称光子带隙材料, 其概念由 Yablonovitch^[1]和 John^[2]于 1987 年分别独立提出. 它是一种由不同介电常数的材料按空间周期性排列形成的人工材料, 其最重要的特性是存在光子带隙, 即在线性激发条件下频率落在光子带隙范围内的光由于强烈的布拉格反射作用而不能在介质中传播. 其中一维光子晶体由两种不同介电常数的材料叠层而成, 并且只有在周期方向上存在光子带隙. 一维光子晶体因结构简单、计算难度小、制作方便等^[3]优点而在带隙结构分析^[4]、金属-介电光子晶体^[5]、二次谐波产生^[6,7]和克尔效应^[8]等非线性效应方面有着广泛的研究.

本文研究的一维主动光子晶体结构, 是把共振吸收或放大介质周期性地嵌入折射率均匀分布的材料中, 这种共振介质可以是二能级原子或者激子. 理论研究表明, 在一维主动光子晶体中, 由主动原子层或激子通过传播光场形成的阱间耦合作用可形成主动光子带隙^[9,10]. 这种主动光子晶体还具有吸收或增益特性. 近年来, 研究主要集中在具有吸收特性的主动光子晶体, 比如一维量子阱的布拉格压缩效应^[10]、超辐射^[11]、非线性光孤子产生的新机理^[12,13]、静止光脉冲的操控和应用等^[14,15]. 具有增益特性的材料在激光物理中有着极其重要的应用, 比如高效

率的激光放大器^[16]、分布反馈激光器^[17-19]、光参量振荡器^[20]等. 小信号增益是激光器中与激光工作物质有关的重要参量, 影响着振荡器和放大器的工作条件和输出性能. 一维主动光子晶体增益特性的研究主要集中在反射和透射系数、阈值条件^[21]以及色散关系、增益系数的影响因素等^[22]. 而一维增益纯主动光子晶体中的小信号增益特性的研究尚未见诸报道. 本文将给出晶体周期、增益作用长度、激子特性、单周期长度等因素与小信号增益之间的联系, 并对其物理机理予以分析.

2. 理论模型

增益可视为吸收的逆过程. 根据线性色散理论, 增益与色散同样满足 K-K 关系^[23,24], 以周期排列增益色散介质为研究对象, 仅考虑量子阱 1s-hh 激子极化率并忽略辐射的非均匀展宽, 假设所有的原子已被激发到上能级, 即 $\Delta n = n_2 - n_1 = n_2 = n$, n 为激发原子的总数, n_2, n_1 分别为上、下能级的原子数. 增益色散介质的线性极化率可参照文献^[25]中的表达式得出

$$\chi(\omega) = \frac{\epsilon_\infty \omega_{\text{LT}} \pi \alpha_B^2 \omega_0^2 / c^2}{\omega_0 - \omega + i\gamma}, \quad (1)$$

其中 ω_0 为激子的共振频率, ω 为入射光的频率, γ 为激子的非辐射均匀增宽, α_B 为激子的玻尔半径, ω_{LT} 为体材料中激子的纵横分裂参量, ϵ_∞ 为 $\omega = \infty$

^{*} 国家重点基础研究特别项目(批准号: 2004CB719805)和国家自然科学基金(批准号: 10374120)资助的课题.

[†] 通信联系人. E-mail: tstszy@mail.sysu.edu.cn

的介电常数, c 为真空中的光速. 考虑小信号增益特性的情况, 即平面波入射处于激发态的多层量子阱结构, 入射光强很小, 不足以产生增益饱和效应, 量子阱中原子层的反转粒子数 Δn 达到饱和状态, 与入射光强无关. 在近共振条件下, 将(1)式代入光波与单量子阱相互作用的麦克斯韦方程组, 通过求解可得到单量子阱的振幅反射系数 r 和透射系数 t ^[25], 即

$$r = \frac{i\Gamma_0}{\omega_0 - \omega + (\gamma + \Gamma_0)}, \quad (2a)$$

$$t = 1 + r, \quad (2b)$$

其中 Γ_0 为激子的辐射均匀增宽,

$$\Gamma_0 = \frac{\pi}{\sqrt{\epsilon_\infty}} \frac{e^2 f_{xy}}{mc S}, \quad (3)$$

Γ_0 正比于单位面积的激子-光子耦合强度 f_{xy}/S , e 为电子电荷, m 为电子质量.

用(2)式中的单层量子阱透射反射系数和传输矩阵法可计算出多周期量子阱结构的色散关系和光场的分布特性^[24]. 计算得到出射光场的强度 $I_{\text{OUT}} = r_N(\omega) I_{\text{IN}}$, $r_N(\omega)$ 为利用传输矩阵法得到的透射率, I_{IN} 为入射光强. 从而小信号增益可写为

$$g(\omega) = 10 \log_{10} \frac{I_{\text{OUT}}}{I_{\text{IN}}}. \quad (4)$$

通过(4)式可计算小信号增益和各影响因素的关系.

3. 计算结果与讨论

3.1. 严格共振时小信号增益与作用长度的关系

当入射光频率与布拉格共振频率严格共振时, 小信号增益随着作用长度的变化关系如图1所示. 计算中采用的激子参数为辐射均匀增宽 $\Gamma_0 = 0.026$ meV, 非辐射均匀增宽 $\gamma = 0.32$ meV, 共振频率 $\omega_0 = 1.491$ eV, 共振布拉格条件下的量子阱宽度为 $d_0 = \lambda_0/2$. 图中横坐标为作用长度 $L = Nd$, N 为介质周期数, d 为量子阱的单周期长度, 纵坐标为小信号增益值. 从图中可以看出, 当 $L < 14d_0$, 增益随着作用长度的增加而增大; $L = 14d_0$ 时增益达到最大值 34 dB; 当 $L > 14d_0$, 增益随着作用长度的增加而减小; $L = 29d_0$ 时, 增益减小到零; 再增加作用长度 L , 出射光场为零, 增益被抑制.

图2为满足布拉格共振条件时, 不同作用长度

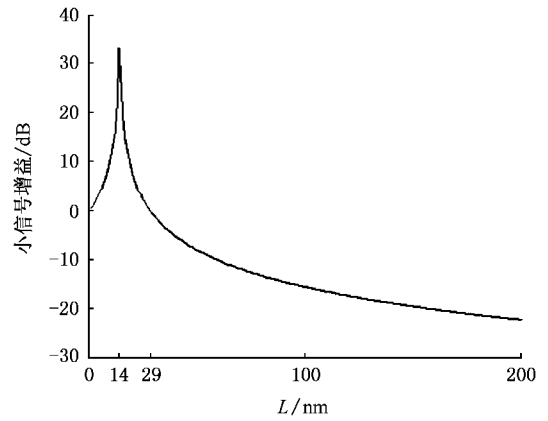


图1 严格共振条件下($\omega = \omega_0$)小信号增益大小随着作用长度 L 的变化

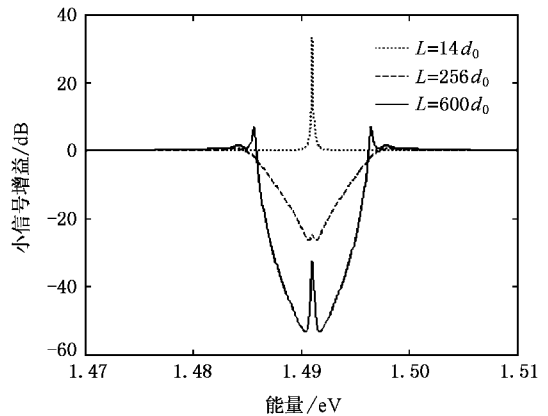


图2 共振布拉格条件下不同作用长度的小信号增益 $g(\omega)$ (点线为 $L = 14d_0$, 虚线为 $L = 256d_0$, 实线为 $L = 600d_0$)

L 下的小信号增益谱线. 当 $L = 14d_0$ 时在布拉格共振中心增益达到最大值 34 dB; 当 $L = 256d_0$ 时在共振中心附近形成带宽约为 0.01 eV 的带隙, 增益在带隙位置被完全抑制, 透射光场衰减至零; 当相互作用长度增加到 $L = 600d_0$ 时, 可观察到带隙宽度不变, 但在带边位置增益效应变大.

图1和图2中小信号增益和增益作用长度的关系是由布拉格结构形成的带隙和增益效应相互竞争形成的. 当周期从1增加到14时, 层数增加导致的增益加强的效应大大超过由于共振周期材料折射率分布而导致的透射光衰减, 增益效应起主要作用; 当层数在14至29之间时, 共振周期材料折射率分布引起的光场衰减和材料的共振增益共同作用, 共振中心附近的增益被抑制并逐渐减少; 层数为29时, 共振中心增益为零, 光场衰减效应和增益效应达到

平衡,材料对于信号光为透明,当作用长度继续增大时,共振周期折射率分布形成明显的带隙,阻止光场的进入^[26],增益效应被完全抑制,共振中心附近的小信号增益为零;继续增加 L 时,由于带边态密度较大引起了光场的增益效应较强,增益在带边位置有了恢复.远离布拉格共振中心时,入射小信号与共振介质没有互相作用.

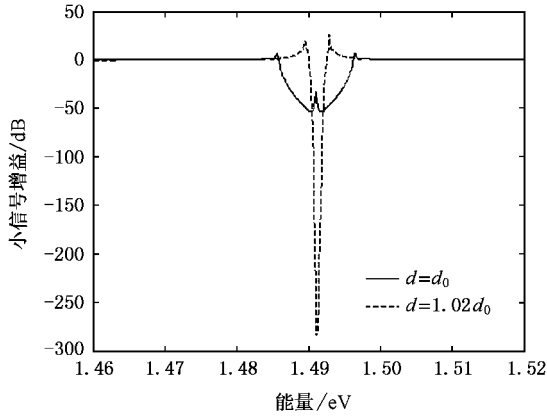


图3 $L = 600d$ 时布拉格共振与非布拉格共振的增益谱线比较 (实线为 $d = d_0$ 共振增益谱线,虚线为偏离共振条件 $d = 1.02d_0$ 时的增益谱线)

当单一周期长度不满足布拉格共振条件时,在

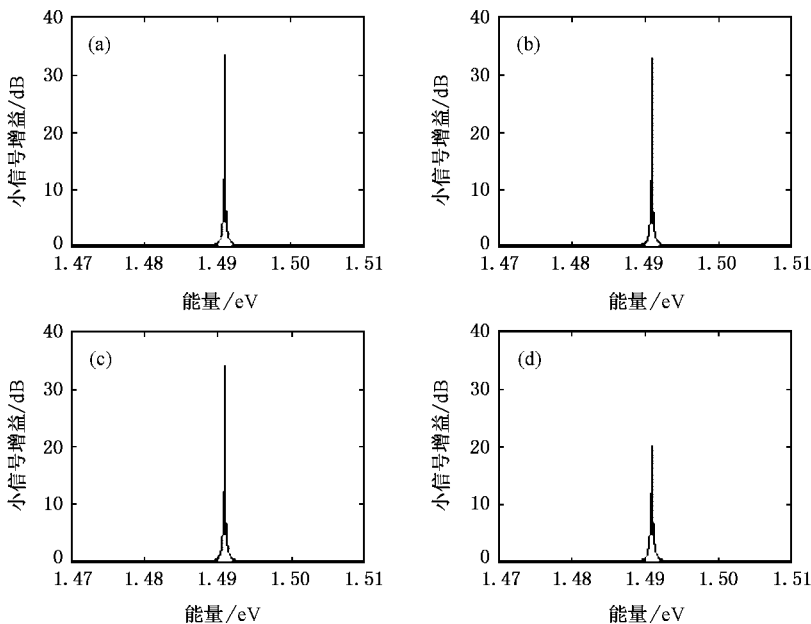


图4 不同作用长度、辐射均匀增宽的增益谱线 (a) $\Gamma'_0 = \Gamma_0, L_0 = 14d$; (b) $\Gamma'_0 = 0.75\Gamma_0, L = 18d$; (c) $\Gamma'_0 = 1.5\Gamma_0, L = 10d$; (d) $\Gamma'_0 = 1.73\Gamma_0, L = 10d$

共振频率附近不能形成一个明显的带隙.图3为周期 $N = 600$ 下,共振与非共振布拉格条件的增益谱线.实线为 $d = d_0$ 时的共振增益谱线,虚线为偏离共振条件 $d = 1.02d_0$ 时的增益谱线,从图中可以看出,布拉格共振条件是形成带隙,产生增益-带隙竞争效应的必要条件.

3.2. 严格共振时激子特性变化与小信号增益的关系

如(3)式所示,当改变激子特性——单位面积激子-光子耦合强度 f_{xy}/S 时,辐射均匀展宽随之变化,二者成正比.图4比较了增益作用长度和耦合强度同时变化的增益谱线.图4(a)中,各参数设定和图2中虚线一致,辐射均匀增宽和作用长度分别为 $\Gamma'_0 = \Gamma_0, L_0 = 14d_0$;图4(b)中,耦合强度减至原来的0.75倍,即 Γ_0 减至 $0.75\Gamma_0, L$ 增至 $14d_0$,小信号增益达到最大值;图4(c)中, Γ_0 增至 $1.5\Gamma_0, L$ 减至 $10d_0$,小信号增益达到最大值;图4(d)中, L 和图4(c)中一样, Γ_0 增至 $1.73\Gamma_0$,大于图4(c)中的 Γ_0 ,增益不增反减.以上结果表明,在 γ 不变的情况下,增益介质的作用长度和耦合强度均可影响该主动晶体的增益特性.

4. 结 论

本文给出了一维周期排列增益色散介质的小信号增益特性. 结果表明, 当满足严格共振布拉格条件时, 带隙所导致的透射波衰减与增益色散效应之间的相互竞争, 形成了小信号增益特性. 讨论了非共振布拉格时的小信号增益特性, 给出了作用长度和小信号增益之间的联系. 进一步给出了小信号增益和激子参数、共振条件之间的依赖关系. 小信号增益特

性将对主动光子晶体激光器或分布反馈激光器的研制有指导意义, 在光传输系统中, 信号光的放大同时也带来被视为噪声的小信号增益, 利用本文小信号增益在带隙中心被抑制的结论能提高系统的信噪比.

在实际应用体系中, 如分布反馈激光器, 需要考虑增益饱和效应, 仅考虑小信号增益给出的线性特性不足以描述体系的光学增益特性, 基于麦克斯韦-布洛赫 (Maxwell-Bloch) 方程的理论原则上可求解包括增益饱和效应、非线性效应的光场作用图像.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Zhang Y H, Qiu X J, Li H Q, Chen H 2001 *Physics* **30** 616 (in Chinese] 张拥华、仇欣杰、李宏强、陈 鸿 2001 物理 **30** 616]
- [4] Li R, Ren K, Ren X B, Zhou J, Liu D H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2520 (in Chinese] 李 蓉、任 坤、任晓斌、周 静、刘大禾 2004 物理学报 **53** 2520]
- [5] Zhou P, You H Y, Wang S Y, Li H Y, Yang Y M, Chen L Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2276 (in Chinese] 周 鹏、游海洋、王松有、李合印、杨月梅、陈良尧 2002 物理学报 **51** 2276]
- [6] Zhang H Z, Yang J B, Gao J Y 2003 *Chin. Phys.* **12** 0518
- [7] Zhu S H, Huang G X, Cui W N 2002 *Chin. Phys.* **11** 0919
- [8] Liu N H, Fu J W 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1418 (in Chinese] 刘念华、傅继武 2002 物理学报 **52** 1418]
- [9] Prineas J P, Ell C, Lee E S, Khitrova G, Gibbs H M, Koch S W 2000 *Phys. Rev. B* **61** 13863
- [10] Xiao W N, Zhao J, Wang W J, Li R H, Zhou J Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2293 (in Chinese] 肖万能、赵 霁、王维江、李润华、周建英 2003 物理学报 **52** 2293]
- [11] Hayes G R, Staehli J L, Oesterle U, Debeaud B, Phillips R T, Ciuti C 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2837
- [12] Mantsyzov B I, Sil'nikov R A 2001 *JETP Letters* **74** 456
- [13] Xiao W N, Zhou J Y, Prineas J P 2003 *Optics Express* **11** 3277
- [14] Li J T, Zhou J Y 2006 *Opt. Express* **14** 2811
- [15] Shao H G, Zhao J, Wu J W, Zhou J Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1420 (in Chinese] 邵惠国、赵 霁、吴佳文、周建英 2005 物理学报 **54** 1420]
- [16] Zhang H, Fan D Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2375 (in Chinese) [张 华、范滇元 2005 物理学报 **50** 2375]
- [17] Shen D X, Gu W Y, Xu D X 1999 *Chin. Phys.* **08** 0521
- [18] Hong Z, Yao X K 2004 *Chin. Phys.* **13** 1454
- [19] Pan J Q, Zhao Q, Zhu H L, Zhao L J, Ding Y, Wang B J, Zhou F, Wang L F, Wang W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5216 (in Chinese] 潘教青、赵 谦、朱洪亮、赵玲娟、丁 颖、王宝军、周帆、王鲁峰、王 圩 2006 物理学报 **55** 5216]
- [20] Deng C X, Li Z J, Zhu C H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4754 (in Chinese] 邓诚先、李正佳、朱长虹 2005 物理学报 **54** 4754]
- [21] Kozina O N, Melnikov L A 2003 *Proc. of SPIE* **5067** 194
- [22] Pawel C, Pawel S 2003 *Proc. of SPIE* **5230** 17
- [23] Yariv A 1975 *Quantum Electronics* (New York : John Wiley & Sons) p651
- [24] Bode H W 1940 *Bell Sys. Tech. J.* **19** 421
- [25] Andreani L C, Panzarini G 1998 *Phys. Rev. B* **57** 4670
- [26] Deutsch I H, Spreuw R J C, Rolston S L, Phillips W D 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1394

Small signal gain characteristics of periodically arranged resonant amplifying media^{*}

Chen Fang Zeng Jian-Hua Zhou Jian-Ying[†]

(*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

(Received 2 November 2006 ; revised manuscript received 4 December 2006)

Abstract

The characteristics of small signal gain are studied in a one-dimensional periodically arranged amplifying media. It is proved that the small signal gain characteristics shows special features with the increase of gain material length. The variation in gain is determined by the mutual competition between the photonic band gap formed by the refractive index of amplifying media and gain reaction under the resonant Bragg condition. Furthermore, we investigated the gain on the parameters of excitons and resonant atoms.

Keywords : periodically arranged resonant amplifying media, small signal gain, photonic band gap

PACC : 7820P, 4270Q

^{*} Project supported by The National Key Basic Research Special Foundation (NKBREF) (Grant No. G2004CB719805) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10374120).

[†] Corresponding author. E-mail : stszjy@mail.sysu.edu.cn