

增益对一维周期结构慢光传输特性的影响*

沈云^{1)†} 傅继武¹⁾ 于国萍²⁾

1)(南昌大学物理学系, 南昌 330031)

2)(武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072)

(2014年2月24日收到; 2014年4月14日收到修改稿)

本文以一维周期结构为例, 对增益与慢光之间的影响做了更进一步的深入研究. 研究发现, 增益对有限长和无限长一维周期结构中的慢光效应具有不同的影响. 对无限长结构, 增益的加入会减弱结构的慢光效应. 而对于实际应用中存在的有限长周期结构, 增益补偿在一定情况下会增强其慢光效应. 文章的研究对促进周期结构作为慢光器件尤其是作为可调谐慢光器件在密度光子集成中的广泛应用具有积极意义.

关键词: 增益, 慢光效应, 一维周期结构, 有限长

PACS: 42.70.Qs, 78.67.Pt, 42.90.+m

DOI: 10.7498/aps.63.174202

1 引言

由于在光缓存、数据同步、光存储和信号处理以及控制光与物质相互作用等研究方面有很多潜在应用, 慢光的研究一直受到广泛关注^[1,2]. 其中, 利用周期结构来获得慢光是一种重要的方法. 光波在周期性变化的材料中传播时, 受空间周期性分布的介电函数的调制, 会产生光子能带. 在布里渊边界处, 由于带隙作用所致的不连续, 其色散曲线被压得很平, 斜率变得很小^[3], 而色散曲线的斜率代表了光脉冲传输的群速度, 由此, 在带隙边缘处可以得到较小的群速度. 相较其他结构而言, 周期结构还具有结构紧凑微小、光子控制特性独特、可在室温运行, 以及设计灵活, 理论上可通过改变结构参数在任意波长上实现慢光等特点, 在全光通信系统和全光信息处理的应用中具有无可比拟的优势. 尤其是, 一维周期结构制作简单并易于理论计算和模拟而备受关注, 目前, 利用一维周期结构实现慢光, 包括最近利用一维渐变周期结构实现慢光“安屎疔痘”倍加兄匾研究^[1,4,5]. 另一方面, 与

增益介质^[6,7]相结合, 利用增益介质来调节周期结构内耦合损耗以及直接通过调节增益介质本身色散进而影响整个结构的慢光传输特性目前也有研究涉及^[8-10]. 特别是, 由于增益可以通过外场加以调节, 获得可灵活调节的慢光传输特性, 在同步器、时分复用、平衡器、逻辑门等方面有广泛应用潜力^[11-13], 该方面的研究具有十分重要意义. 针对增益与慢光之间的影响, 最近, Grgić 等进一步做了具体的研究并取得了重要成果, 其研究表明: 在周期结构中, 增益的加入可以影响结构的色散特性, 大的增益最终反而会减弱周期结构中的慢光效应^[14].

本文以一维周期结构为例, 对增益与慢光之间的影响做了更深入研究. 研究发现, 增益对有限长和无限长一维周期结构中的慢光效应具有不同影响. 对无限长结构, 增益的加入会减弱结构的慢光效应. 而对于实际应用中存在的有限长周期结构, 增益补偿在一定情况下会增强其慢光效应. 文章的研究对促进周期结构作为慢光器件在密度光子集成中的广泛应用具有积极意义.

* 国家自然科学基金(批准号: 61265002)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: shenyunoptics@gmail.com

2 一维周期结构及一般慢光特性

一维周期结构如图 1(a) 右下所示, 由折射率为 n_1 和 n_2 , 厚度为 w_1 和 w_2 的两种介质交替排列组成. 当该结构为无限长时, 其色散关系满足 [15]

$$\cos Kd = \cos(k_1 w_1) \cos(k_2 w_2) - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right) \times \sin(k_1 w_1) \sin(k_2 w_2), \quad (1)$$

其中波数 $k_i = n_i \omega / c (i = 1, 2)$, 周期 $d = a + b$, K 是传播方向上的 Bloch 波矢, ω 为入射频率, c 为真

空光速. 对于由 N 个周期单元构成的有限长一维结构, 则可从其透射率推知带隙结构, 其透射率接近 0 的频率区域就是结构的光子禁带 [16], 相应色散关系可通过利用传输矩阵方法先求出透射系数 t_N , 然后根据透射相移与 Bloch 波矢在整个结构上累计相移 $\varphi_N = KNd$ 相等的关系而进一步由公式 $KNd = \tan^{-1}(t_{Ni}/t_{Nr})$ 计算得出 [10,17,18], 其中, t_{Ni} 和 t_{Nr} 分别为透射系数 t_N 的虚部和实部. 当色散关系确定后, 光波通过周期结构的群速度可由 $v_g = d\omega/dk$ 计算得到, 对应的群折射率为 $n_g = c/v_g$.

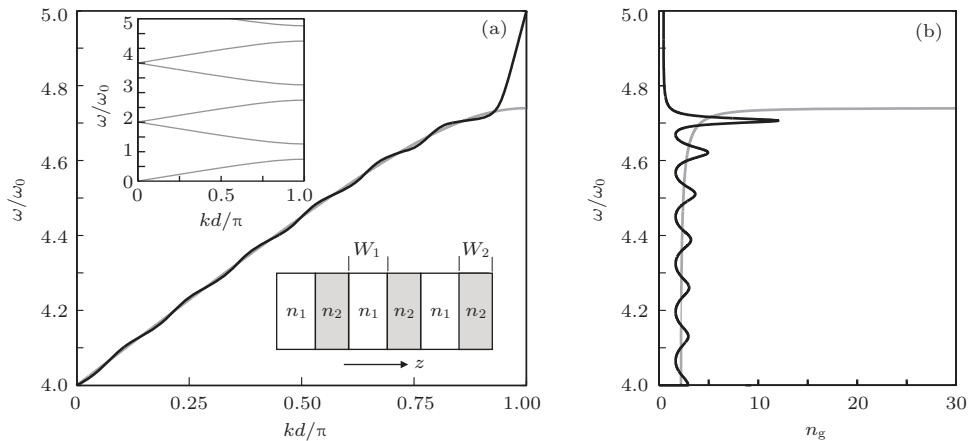


图 1 无限长及有限长一维周期结构 (a) 色散曲线 (下插图为一维周期结构图, 当其无限长时, 所对应色散曲线在 ω/ω_0 位于 (0, 5.5) 范围时如上插图所示); (b) 群折射率曲线; 图中, 黑色、灰色实线分别对应无限、有限长结构相应计算结果

为了研究的方便, 本文选取在 1550 nm 附近具有无损耗特性的 SiO_2 和具有增益特性的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 作为介质 n_1 和 n_2 , 相应折射率 $n_1 = 1.4444$ [19], 增益为 0 时 $n_2 = 3.3466$ [20]; 厚度 w_1 和 w_2 满足 $n_1 w_1 = n_2 w_2 = \lambda_0/4$, λ_0 设定为 7350 nm, 频率表示形式为 ω_0 . 根据方程 (1), 具有上述结构参数的无限长一维周期结构其在 ω/ω_0 位于 (0, 5.5) 范围内的色散曲线如图 1 右上图所示. 其中, 位于 (4, 5) 范围内的色散曲线如图 1 灰色曲线所示. 从该灰色曲线可以看出, 由于带隙的存在, 在 $\omega/\omega_0 = 4.7$ 附近, 色散曲线被压得很平, 斜率变得很小, 尤其是 $\omega/\omega_0 = 4.741$, 对应波长为 1550 nm 时, 色散曲线变为近似水平. 既然色散曲线的斜率代表了光脉冲传输的群速度, 在带隙边缘沿 $\omega/\omega_0 = 4.7$ 附近, 其较小以致能达到 0 的群速度可以得到. 与该灰色色散曲线对应的群折射率 n_g 如图 1(b) 中灰色曲线所示, 可以看出, 在 $\omega/\omega_0 = 4.741$ 附近, n_g 确实急剧上升至 ∞ 趋势, 即群速度急剧降为 0. 另一方面, 当该一维结构选

取 7 个周期单元时, 在 ω/ω_0 位于 (4, 5) 范围内的色散曲线如图 1 黑色曲线所示, 可以看到, 随着频率的上升色散曲线呈扭动变化, 当前参数情况下在 $\omega/\omega_0 = 4.741$ 附近, 斜率先是逐渐变平坦达到一个最小值, 随后又变陡峭并延伸到带隙之中. 与之对应的群折射率 n_g 如图 1(b) 黑色曲线所示, 其在 $\omega/\omega_0 = 4.707$ 达到最大值 12.01, 即对应于最小群速度 v_g . 比较图 1 中的黑色曲线和灰色曲线可知, 与无限长一维周期结构 (灰色曲线) 相比, 有限长结构 (黑色曲线) 不能达到无限长结构所能得到的在带隙边缘光速几乎减慢为 0 的效果, 而只能在带隙附近得到有限的最小群速度. 一般来说, 之所以能带边缘能得到群速度接近 0 的慢光, 是因为光在周期结构中传播时不断向前和向后发生 Bragg 反射, 当向前和向后反射能流接近时, 形成驻波 [3]. 显然, 无限长尺寸能很好的在带隙处形成向前和向后反射能流的平衡, 而有限长尺寸结构, 由于两端的截断, 在带隙附近打破了这种能流平衡, 导致群速度不能达到接近 0 的效果. 从图 1 可以看出, 有限

长与无限长结构其色散曲线(图1(a))和群折射率(图1(b))即使在不考虑增益的一般情况下,在带边的特性也是有显著差异的,显然,若考虑增益,其特性受到增益的影响将会迥异.

3 增益对无限及有限长结构特性影响

首先,我们考虑当图1(a)右下图结构为无限长一维周期结构时增益对其慢光特性的影响.计算中结构参数 w_1, w_2, ω_0 及 n_1 不变.当介质 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 折射率由 $n_2 = 3.3466$ 变为 $n_2 = 3.3466 - 0.008i$ 表现出增益特性时,其相应的色散曲线和群折射率分布如图2(a)和(b)红色虚线所示.为了便于比较, $n_2 = 3.3466$ 时的无限长一维周期结构色散曲线和群折射率也在图2(a)和(b)中以灰色实线给出.由图2(a)中的红色虚线可以看到,在带边 $\omega/\omega_0 = 4.741$ 附近,红色虚线随着频率的上升斜率先是逐渐变平坦达到一个最小值,随

后又变陡峭并延伸到带隙之中.与之对应的群折射率 n_g 如图2(b)红色虚线所示,其在 $\omega/\omega_0 = 4.736$ 达到最大值7.717,即对应于最小群速度 v_g .相比较而言,无限长一维周期结构无增益时色散曲线在带边 $\omega/\omega_0 = 4.741$ 处到达最平坦(图2(a)灰色曲线),群折射率 n_g 趋于 ∞ (图2(b)灰色曲线),由此,增益的加入反而减弱了结构的慢光效应.计算中我们也发现,当增益越大时,其 n_g 的最大值越小,即,增益的加大会更加减弱结构的慢光效应.另外,我们也计算了当 $n_2 = 3.3466 + 0.008i$ 表现出损耗特性时的色散曲线及群速度,分别如图2(a)和(b)中的蓝色点线所示.结果表明, n_2 及其共轭值导致同样的色散和群速度曲线.这说明,对于一维无限长周期结构,无论损耗还是增益的加入,都会减弱结构本身在带边处表现出的慢光效应.而且,增益或损耗越大,群折射率 n_g 最大值越小,慢光效应减弱越明显.

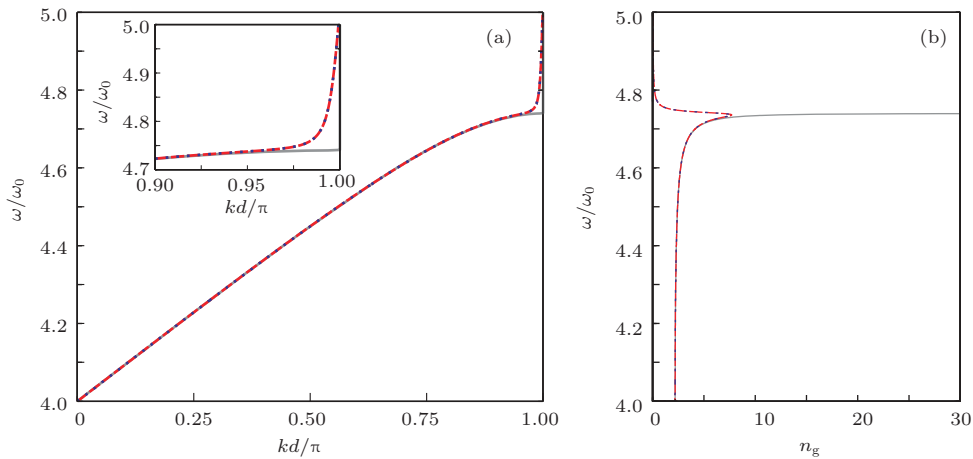


图2 (网刊色彩)无限长一维周期结构其 $n_2 = 3.3466$ (灰色实线)、 $3.3466 - 0.008i$ (红色虚线)时(a)色散曲线和(b)群折射率. $n_2 = 3.3466 + 0.008i$ 时与 $n_2 = 3.3466 + 0.008i$ 曲线重合.图(a)中带边 $\omega/\omega_0 = 4.741$ 附近局部放大曲线如插图所示

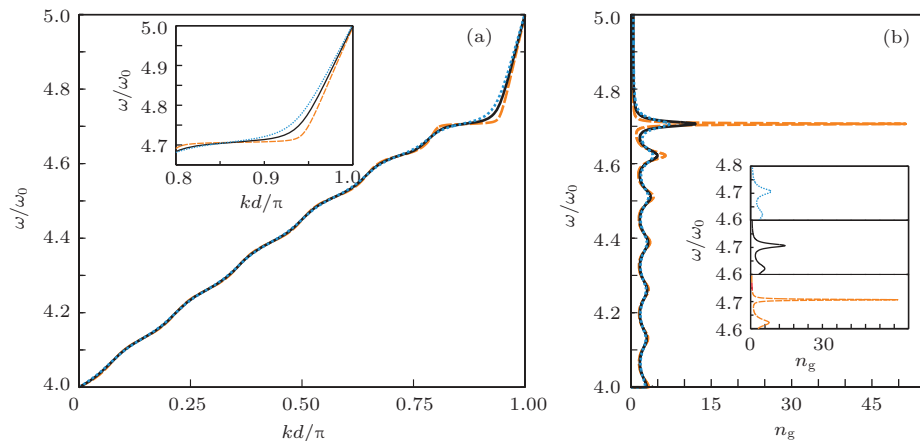


图3 (网刊色彩)有限长一维周期结构其 $n_2 = 3.3466$ (灰色实线)、 $3.3466 - 0.008i$ (橘红色虚线)、 $3.3466 + 0.008i$ (冰蓝色点线)时(a)色散曲线和(b)群折射率.图(a)及(b)中插图分别为带边 $\omega/\omega_0 = 4.741$ 附近的色散曲线局部图及各群折射率曲线局部图

当考虑图 1 (a) 右下图结构中为 7 个周期单元有限长一维结构时, $n_2 = 3.3466 - 0.008i$, 3.3466 和 $3.3466 + 0.008i$ 时的色散关系及群速度分别由图 3 (a) 及 (b) 中的橘红色虚线、黑色实线、冰蓝色点线表示. 图 3 (a) 表明, 各色散曲线随着频率的上升呈扭动状变化. 其中, 加入增益效应的 $n_2 = 3.3466 - 0.008i$ 所对应的橘红色色散曲线往来扭曲最剧烈, 在带边 $\omega/\omega_0 = 4.741$ 附近的扭动过程中, 斜率所能达到的最小值最小; 其次为无增益的 $n_2 = 3.3466$ 所对应的黑色曲线; 而加入损耗特性的 $n_2 = 3.3466 + 0.008i$ 所对应的冰蓝色色散曲线所能达到的最小值最大. 相应的, 色散曲线最平坦时其对应的群折射率最大, 图 3 (b) 中, $n_2 = 3.3466 - 0.008i$, 3.3466 和 $3.3466 + 0.008i$ 所对应的橘红色、黑色、冰蓝色曲线其最大群折射率分别为: 51.24, 12.01, 7.14. 群折射率局部图形如图 3 (b) 插图所示. 从图 3 可以看出, 与无增益一维有限长周期结构相比, 增益可以让一维有限长周期结构的色散曲线扭动程度加剧, 所能达到的最平坦斜率其平坦程度更强 (图 3 (a), 橘红色虚线), 尤其是在带边附近, 斜率最为平坦的地方其平坦程度能达到极强, 得到更小的慢光群速度及对应的更大的群折射率 (图 3 (b), 橘红色虚线), 增强了慢光效应. 而损耗的影响则减缓了色散曲线扭动程度, 使得色散曲线斜率所能达到的最值反而不如无增益结构, (图 3 (a), 冰蓝点线), 其最平坦处对应群速度和群折射率反而更大和更小 (图 3 (b), 冰蓝点线). 将上述结果与前面一维无限长周期结构其无论损耗还是增益的加入都会减弱结构本身在带边处表现出的慢光效应 (图 2) 的结论相比, 显然可知, 增益对无限长及有限长一维周期结构的慢光特性有不同的影响.

为了更加详细地探讨增益对无限及有限长一维周期结构的影响, 我们进一步计算了 n_2 虚部从 0 变化到 -0.008 时无限和有限长结构所得到的最大群折射率变化, 分别如图 4 黑色和灰色曲线所示. 从图中可以看出, 当增益逐渐增大, n_2 虚部从 0 变化到 -0.008 时, 无限长结构慢光群折射率 n_g 从接近 ∞ 逐渐变小到 7.717, 而有限长结构 n_g 从 12.01 逐渐增大到 51.24. 进一步证实, 增益对无限长及有限长一维周期结构的慢光特性有不同的影响. 这对 Grgić 等的研究认为在周期结构中大的增益最终反而会减弱周期结构中的慢光效应这一结果作了针对实际情况的拓展和补充.

需要指出的是, 本文虽然是选取了在 1550 nm 附近具有无损耗特性的 SiO_2 和具有增益特性的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 为介质 n_1 和 n_2 作为示例进行了探讨, 但研究发现, 其所得到的结论是可以扩展至一般结构参数有限长和无限长一维周期结构的. 对于不同结构参数, 其周期、基元尺寸、折射率对比等发生改变时, 结构相应禁带边沿位置会随之改变, 但特性则普遍遵循上述结论规律: 增益可增强有限长周期结构色散曲线尤其是在带边附近的扭动程度, 使所能达到的最平坦斜率其平坦程度比无增益时大, 即达到的最大群折射率更大. 另外需注意的是, 增益需保持在合理的范围内, 过大的增益会导致更为复杂的物理现象.

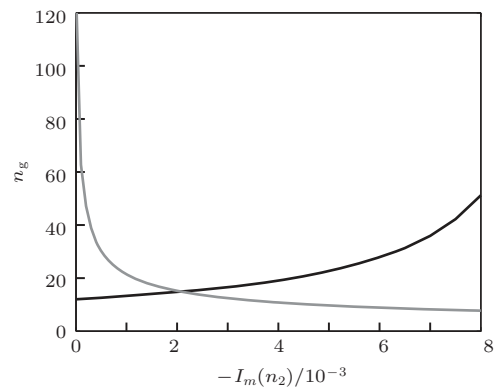


图 4 折射率参数 n_2 虚部从 0 变化到 -0.008 时有限长 (灰色实线) 和无限长 (黑色实线) 一维周期结构最大群折射率变化曲线

前文对图 1 中无限长周期结构能带边沿可得到群速度接近 0 的慢光而有限长结构群速度不能达到接近 0 的效果的物理机理原因已有所诠释: 是因为光在周期结构中传播时不断向前和向后发生 Bragg 反射, 当向前和向后反射能流接近时, 形成驻波 [3]; 无限长周期结构能很好的在带边处形成向前向后反射能流的平衡, 而有限长结构由于两端的截断, 在带边附近打破了这种能流平衡. 事实上, 图 2 和图 3 的结果可进一步由这种物理机理予以诠释. 由图 2 可知, 对于无限长周期结构, 无论 n_2 是损耗还是增益, 都会减弱结构本身在带边处表现出的慢光效应, 而且, 增益或损耗越大, 群折射率 n_g 最大值越小, 慢光效应减弱越明显; 这表明, 增益和损耗的加入, 破坏了在带边处形成向前向后反射能流的驻波平衡, 而且增益和损耗越大, 这种驻波平衡被破坏的越严重. 图 3 则表明, 有限长尺寸结构两端的截断打破了向前向后反射能流的驻波平衡, 在一定情况下, 加入增益, 可部分抵消这种截断所

导致的失衡,使慢光效应得到增强.

4 结 论

以一维周期结构为例,对增益与慢光之间的影响做了更进一步的深入研究.研究发现,增益对有限长和无限长一维周期结构中的慢光效应具有不同的影响.对无限长结构,增益的加入会减弱结构的慢光效应.而对于实际应用中的有限长周期结构,增益补偿会在一定情况下可增强其慢光效应.本文的结论对Grgić等研究认为在周期结构中大的增益最终反而会减弱周期结构中的慢光效应^[12]这一结果作了针对实际情况的拓展和补充.对促进周期结构作为慢光器件在密度光子集成中的广泛应用具有积极意义.同时,由于增益可以通过外场加以调节获得可灵活调节的慢光传输特性而在同步器、时分复用、平衡器、逻辑门等方面有广泛应用,本文的研究对拓展周期增益结构至该方面应用奠定了理论基础.

参考文献

- [1] Shen Y, Liu H, Fu J, Yu G 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 2444
- [2] Shen Y, Fan D H, Fu J W, Yu G P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 117302 (in Chinese) [沈云, 范定寰, 傅继武, 于国萍 2011 物理学报 **60** 117302]
- [3] Baba T, Mori D 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 2659
- [4] Shen Y, Yu G, Wang G 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 221916
- [5] Shen Y, Fu J, Yu G 2011 *Phys. Lett. A* **375** 3801
- [6] Xu L, Li M H, Zhang Y, Ma Y, Xu J, Huang X F, Chen K J 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1377
- [7] Liu X D, Xu X S, Wang Y Q, Zhang D Z, Cheng B Y 2003 *Chin. Phys.* **12** 992
- [8] Gantzounis G, Stefanou N 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 015202
- [9] Govyadinov A A, Podolskiy V A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 223902
- [10] Shen Y, Wang G P 2009 *Opt. Express* **17** 12807
- [11] Zhang B, Zhang L, Yan L S, Fazal I, Yang J Y, Willner A E 2007 *Opt. Express* **15** 8317
- [12] Willner A E, Zhang B, Zhang L, Yan L, Fazal I 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 691
- [13] Fazal I, Yilmaz O, Nuccio S, Zhang B, Willner A E, Langrock C, Fejer M M 2007 *Opt. Express* **15** 10492
- [14] Grgić J, Ott J R, Wang F, Sigmund O, Jauho A P, Mørk J, Mortensen N A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 183903
- [15] Yariv A, Yeh P 1984 *Optical waves in Crystals* (New York: Wiley Press)
- [16] Zhang H, Zhang Y, Su X, Liu C 2004 *Acta Sin. Quantum Opt.* **10** 38 (in Chinese) [张会云, 张玉萍, 苏希玉, 刘灿德 2004 量子光学学报 **10** 38]
- [17] Poon J K S, Scheuer J, Mookherjea S, Paloczi G T, Huang Y, Yariv A 2004 *Opt. Express* **12** 90
- [18] Bendickson J M, Dowling J P 1996 *Phys. Rev. E* **53** 4107
- [19] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (Orlando: Academic Press)
- [20] Alam M Z, Meier J, Aitchison J S, Mojahedi M 2007 *Opt. Express* **15** 176

Influence of gain on propagation properties of slow light in one-dimensional periodic structure*

Shen Yun^{1)†} Fu Ji-Wu¹⁾ Yu Guo-Ping²⁾

1) (*Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

2) (*Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

(Received 24 February 2014; revised manuscript received 14 April 2014)

Abstract

Recently, studies by Jure Grgic et al. (Phys. Rev. Lett. **108** 183903, 2012) show that in a periodic structure, the large gain can be eventually turned to decreasing the effect of slow light on the structure. In this paper, one-dimensional periodic structure are taken as an instance, and the influences of gain on slow light are further investigated. It is shown that different influences can exhibit in the finite-length and infinite-length one-dimensional periodic structure. For the infinite-length structure, the addition of gain can decrease the slow light effect, whereas for finite-length structure, the compensation of gain can, to a certain degree, increase the slow light effect. Our results verify a feasible way in the application of such a periodic structure, as a slow-light device, and especially as the tunable slow-light devices, in the high-density integration of optical circuits.

Keywords: gain, slow light effect, one-dimensional periodic structure, finite-length

PACS: 42.70.Qs, 78.67.Pt, 42.90.+m

DOI: [10.7498/aps.63.174202](https://doi.org/10.7498/aps.63.174202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61265002).

† Corresponding author. E-mail: shenyunoptics@gmail.com