

Analysis of Slow Light Effect of Photonic Crystal by GaAs Hexagonal Scatterers

Haonan Liu¹, Jinyu Pei², Hang Sun¹, Hao Wang¹, Yong Wan^{1*}

¹College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao Shandong

²Qingdao No. 2 High School, Qingdao Shandong

Email: *wanyongqd@hotmail.com

Received: Oct. 1st, 2019; accepted: Oct. 21st, 2019; published: Oct. 28th, 2019

Abstract

The dispersion curves of two defect-free structures are calculated by photonic crystal by gallium arsenide (GaAs) hexagonal scatterers in this paper, and the group refractive index, group velocity, bandwidth and normalized band width product are obtained, respectively. The results show that for the perfect structure, when the upper and lower bottom surface is the same and $r = 0.05 \mu\text{m}$, the normalized band width product is 0.262, and when the upper and lower bottom surface is different and $r = 0.05 \mu\text{m}$, the normalized band width product is 0.250, so both structures have good slow light effect.

Keywords

GaAs, Scatterers, Photonic Crystal, Slow Light

砷化镓六边形散射元构建的光子晶体慢光效应分析

刘浩楠¹, 裴瑾瑜², 孙航¹, 王皓¹, 万勇^{1*}

¹青岛大学物理科学学院, 山东 青岛

²青岛市第二中学, 山东 青岛

Email: *wanyongqd@hotmail.com

收稿日期: 2019年10月1日; 录用日期: 2019年10月21日; 发布日期: 2019年10月28日

摘要

本文采用砷化镓(GaAs)六边形散射元构建的光子晶体, 分别计算了两种无缺陷结构的色散曲线, 得到其

*通讯作者。

群折射率、群速度、带宽和归一化带宽积。研究表明：对于完美结构：上下底面相同 $r = 0.05 \mu\text{m}$ 时，归一化带宽积为0.262；上下底面不同 $r = 0.05 \mu\text{m}$ 时，归一化带宽积为0.250，两种结构都有很好的慢光效应。

关键词

砷化镓，散射元，光子晶体，慢光

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太阳能电池是一种将光能转换为电能的半导体器件，是太阳能利用的重要形式。半导体介质柱(或孔)结构，被认为是最有陷光潜力的太阳能电池器件材料之一。现有研究中，采用的纳米结构多为一维结构，采用的机理也是通过漫反射陷光，有些研究提出了硅纳米线二维结构，但没有与光子晶体结构的禁带和慢光理论结合起来[1] [2] [3]。

光子晶体是一种介质折射率在空间中呈周期性排列的人工功能材料，光子晶体主要有光子禁带和光子局域的性质。利用这些性质，可以对光进行调制，产生慢光效应。即光波的群速度明显低于真空中的光速的情况。当光波入射在光子晶体中产生慢光效应后，由于光波的群速度大幅度下降，会有更大的机会激发半导体材料中的自由电子。慢光效应可以使半导体材料对光波的吸收更加充分，从而极大地提高其吸收率和转换效率[4] [5] [6] [7]。

砷化镓(GaAs)是三代半导体的代表，具有折射率高、带宽大和结构稳定等优点[8]，所以本文采用 GaAs 六边形排布的六边形光子晶体结构，通过慢光机理分析，分别对两种不同结构的无缺陷波导进行了模拟，得到其群折射率、群速度、带宽和归一化延迟带宽积等参数，由此可以分析不同结构的慢光效应，为光子晶体结构在太阳能电池应用中提供理论支撑。

2. 结构设计和及慢光机理

六边形散射元的完美结构如图 1 所示，本文主要通过调节其散射元边长的大小来进行不同群速度的分析。研究的模型为六边结构模型：散射元介质为空气，填充介质为砷化镓(GaAs)；设晶格常数为 a ，散射元边长为 r ，平移距离为 d 。

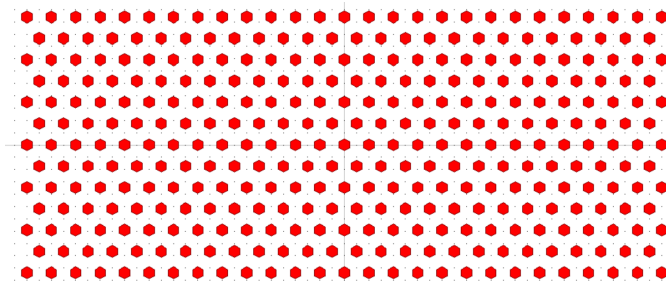


Figure 1. Perfect structure by hexagonal scatterers

图 1. 六边形散射元完美结构

光子晶体的研究方法有很多, 本文是基于平面波展开法来进行计算。众所周知, 群折射率 n_g 可以用公式(1)来表示, 其中 c 为光速, v_g 为群速度。

$$n_g = \frac{c}{v_g} \quad (1)$$

公式(1)表明, 当在光子晶体中的群折射率越高的时候, 入射到光子晶体中的光波的群速度将越慢, 越利于半导体材料对光波的吸收。同时, 群折射率可以用公式(2)进行表示, 其中 k 为波数, ω 为入射光的中心角频率。

$$n_g = c \frac{dk}{d\omega} \quad (2)$$

而且波数 k 和频率 f 关系可以用公式(3)表示, 其中的 a 为晶格常数。

$$f = \frac{\omega a}{2\pi c} \quad (3)$$

由此, 波导的慢光效果可以用归一化延迟带宽积来表示, 它是群折射率 n_g 与相对带宽的乘积, 如公式(4):

$$n_g \Delta\omega / \omega = n_g \Delta f / f \quad (4)$$

3. 不同结构的慢光特性分析

本文针对六方结构六边形散射元这一模型展开研究, 目的在于寻找群折射率较大的模型, 减缓光波的传播速度, 增加半导体材料对光波的吸收率和转换效率。为了便于比较, 主要对散射元边长的大小进行分析, 找到比较平坦的群折射率曲线。

3.1. 上下层相同结构的慢光分析

针对六边形散射元上下层相同结构, 主要对散射元边长的大小进行分析, 找到比较平坦的群折射率曲线, 分别对 $r = 0.05 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.10 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.15 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.20 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.25 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.30 \mu\text{m}$ 进行模拟分析, 对这六种模型的模拟结果如图 2 所示。

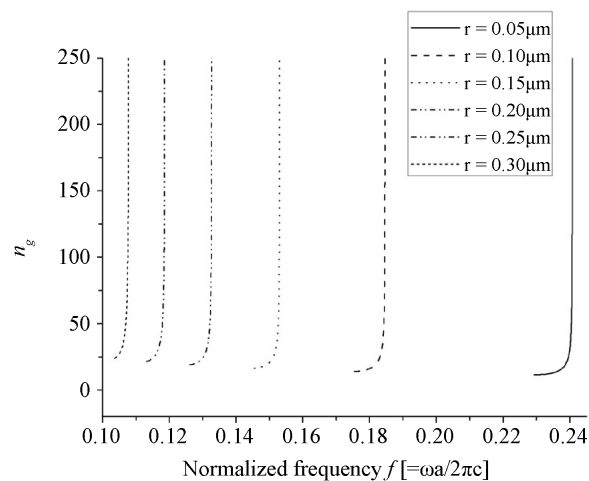


Figure 2. Group refractive index curve of the structure with same in the upper and lower layers of GaAs

图 2. GaAs 上下层相同结构的群折射率曲线

从图 2 中可以看出, r 从 $0.05 \mu\text{m}$ 增加到 $0.30 \mu\text{m}$ 的过程中, 群折射率在逐渐增加, 相应的归一化频率在逐渐向低频移动, 但是其平坦部分的频率范围在逐渐减小。这表明在该模型中, 散射元边长越小其慢光效果越明显, 半导体材料对光波的吸收率也就越高。具体数据如表 1 所示。

Table 1. $n_g, v_g, n_g \frac{\Delta\omega}{\omega}$ for the GaAs structure with same in the upper and lower layers

表 1. GaAs 上下层相同结构的 $n_g, v_g, n_g \frac{\Delta\omega}{\omega}$

r	n_g	$\frac{\Delta\omega}{\omega}$	v_g	$n_g \frac{\Delta\omega}{\omega}$
$0.05 \mu\text{m}$	13.0	0.020	$0.076c$	0.262
$0.10 \mu\text{m}$	14.5	0.012	$0.069c$	0.171
$0.15 \mu\text{m}$	16.6	0.010	$0.060c$	0.170
$0.20 \mu\text{m}$	19.4	0.008	$0.052c$	0.157
$0.25 \mu\text{m}$	21.5	0.006	$0.047c$	0.131
$0.30 \mu\text{m}$	24.2	0.004	$0.041c$	0.095

3.2. 上下层结构不同的慢光分析

针对吸收层材料为 GaAs、上下层边长不同的光子晶体结构, 也可以通过散射元边长的大小变化, 找到比较平坦的群折射率曲线。取底层 $r = 0.30 \mu\text{m}$ 不变, 上层分别对 $r = 0.05 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.10 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.15 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.20 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.25 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.30 \mu\text{m}$ 进行模拟分析, 对这六种模型的模拟结果如图 3 所示。

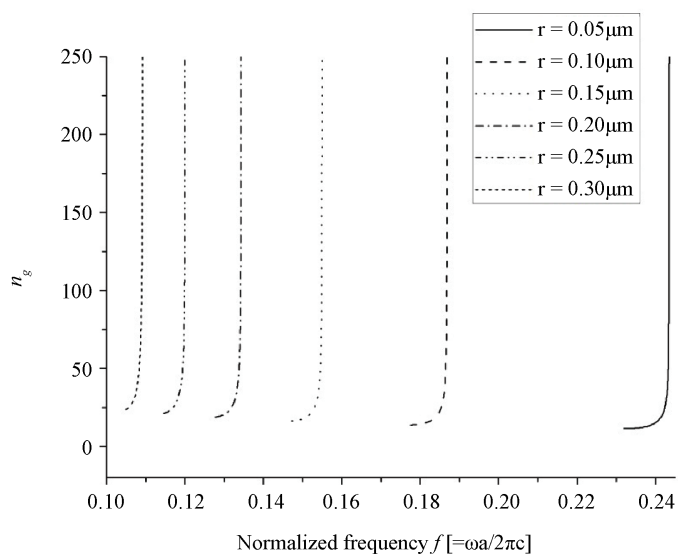


Figure 3. Group refractive index curves with different upper and lower layers

图 3. 上下层结构不同的群折射率曲线

从图 3 中可以看出, 当散射元半径逐渐增加的时候, 其归一化频率在逐渐降低, 群折射率呈现出逐步升高的趋势, 具体的数据如表 2 所示。

Table 2. $n_g, v_g, n_g \frac{\Delta\omega}{\omega}$ for the GaAs structure with different the upper and lower layers**表 2.** GaAs 上下层不同结构的 $n_g, v_g, n_g \frac{\Delta\omega}{\omega}$

r	n_g	$\frac{\Delta\omega}{\omega}$	v_g	$n_g \frac{\Delta\omega}{\omega}$
0.05 μm	12.9	0.020	0.078c	0.258
0.10 μm	14.3	0.011	0.070c	0.167
0.15 μm	16.8	0.010	0.060c	0.168
0.20 μm	19.9	0.008	0.050c	0.158
0.25 μm	21.9	0.006	0.046c	0.128
0.30 μm	25.2	0.004	0.040c	0.092

需要说明的是：(1) 从表 1 和表 2 中可以看出，不论上下层结构相同和上下层结构不同，随着边长 r 的逐渐减小，其归一化延迟带宽积都在不断的增大，其慢光效果逐渐变好；(2) 将表 2 与表 1 比较可知，下上下底面相同 $r = 0.05 \mu\text{m}$ 时，归一化带宽积为 0.262。上下底面不同 $r = 0.05 \mu\text{m}$ 时，归一化带宽积为 0.250。说明二者都有很好的慢光效应，但后者实际加工较为复杂；(3) 在无缺陷结构模拟的基础上，还可以设计线缺陷结构、点缺陷结构和耦合腔结构[9] [10] [11]。

4. 结论

本文通过采用 GaAs 六边形散射元构建的光子晶体，分别计算了两种无缺陷结构的色散曲线，得到其群折射率、群速度、带宽和归一化带宽积。可见，通过建立模型和模拟计算，可以得到结构的群折射率、群速度、带宽和归一化延迟带宽积等参数。这样就可以按照研究需求进行模拟，选择相应的慢光结构和模式，这些研究有利于光子晶体在对太阳能利用等很多方面的应用。

参考文献

- [1] Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., *et al.* (2011) Solar Cell Efficiency Tables. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, **19**, 565-572. <https://doi.org/10.1002/ppp.1150>
- [2] Bella, F., Mobarak, N.N., Jumaah, F.N., *et al.* (2015) From Seaweeds to Biopolymeric Electrolytes for Third Generation Solar Cells: An Intriguing Approach. *Electrochimica Acta*, **151**, 306-311. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.11.058>
- [3] Xing, S., Broderick, L.Z. and Kimerling, L.C. (2014) Photonic Crystal Structures for Light Trapping in Thin-Film Si Solar Cells: Modeling, Process and Optimizations. *Optics Communications*, **314**, 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.07.085>
- [4] 陈培专, 侯国付, 索松, 等. 硅基薄膜太阳能电池一维光子晶体背反射器的模拟设计与制备[J]. 物理学报, 2014, 63(12): 1-5.
- [5] Mutitu, J.G., Shi, S.Y., Chen, C.H., *et al.* (2008) Thin Film Silicon Solar Cell Design Based on Photonic Crystal and Diffractive Grating Structures. *Optics Express*, **16**, 15238-15248. <https://doi.org/10.1364/OE.16.015238>
- [6] Wan, Y., Jiang, C.-Y., Wang, X.-M., Liu, H.-N., Wang, H., Cai, Z.Y. and Guo, X.X. (2019) Ultrathin and Easy-Processing Photonic Crystal Absorbing Layers to Enhance Light Absorption Efficiency of Solar Cells. *APL Materials*, **7**, 1-7. <https://doi.org/10.1063/1.5091574>
- [7] Zheng, G.G., Xu, L.H., Pei, S.X., *et al.* (2013) Theoretical Analysis of Performance Improvement of Thin Film Solar Cells with Two-Dimensional Photonic Crystals and Distributed Bragg Reflector Texture Structures. *Optics Communications*, **309**, 318-322. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.08.005>
- [8] 沈宏君, 李婷, 卢辉东, 黄仙健, 李新兰. 利用陷光结构增加硅薄膜太阳能电池的吸收效率[J]. 发光学报, 2016,

37(7): 816-822.

- [9] Wan, Y., Fu, K., Li, C.H. and Yun, M.J. 2013) Improving Slow Light Effect in Photonic Crystal Line Defect Waveguide by Using Eye-Shaped Scatterers. *Optics Communications*, **286**, 192-196.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.025>
- [10] 万勇, 韩文娟, 贾明辉, 云茂金, 郭月, 孙蕾. 圆弓形散射元构建的耦合波导的慢光特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 136-144.
- [11] Wan, Y., Xu, S., Li, M.-X., Liu, M.-N., Jiang, C.-Y. and Yuan, F. (2018) Slow Light Effect with High Group Index and Wideband by Saddle-Like Mode in PC-CROW. *Frontier of Physics*, **13**, 1-7.
<https://doi.org/10.1007/s11467-017-0719-1>