

# Comparative Study on Transmission Spectrum of Optical Quantum Well Containing Negative Refractive Index Materials

Xiufu Tang

School of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Hechi Guangxi  
Email: 269364978@qq.com

Received: Jun. 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jun. 21<sup>st</sup>, 2019; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The transmission matrix method is used to study the transmission characteristics of a one-dimensional symmetric structured optical quantum well  $(AB)_m(CDDC)_n(BA)_m$  constructed with materials with positive and negative refractive index, and compare with the full positive refractive index materials. The results show that when the barrier layer  $(AB)_m(BA)_m$  of the optical quantum well is a mixed structure of positive and negative refractive index materials, the three transmission peaks of the transmission spectrum are narrower than the transmission peak of the optical quantum well of the full positive refractive index material, and the forbidden band becomes wider. When the well layer  $(CDDC)_n$  is a material mixing structure, the transmission spectrum only shows a transmission peak at the center frequency position, and the transmission peak becomes wider; when the barrier layer and the well layer are simultaneously mixed structures, the transmission spectrum is only one transmission peak appears at the center frequency position, and the transmission peak becomes narrower, and the forbidden band becomes significantly wider. When the barrier layer or the well layer is completely negatively refractive, the transmission spectrum exhibits transmission peaks, the transmission peaks become wider, and the forbidden band widening. The study of the transmission spectrum characteristics of the optical quantum well constructed with a mixture of positive and negative refractive index materials provides a theoretical basis for the design and manufacture of new optical devices.

## Keywords

Optical Quantum Well, Negative Refractive Index, Transmission Spectrum, Transmission Peak, Photonic Crystal

---

# 含负折射率材料光量子阱透射谱对比研究

唐秀福

河池学院物理与机电工程学院, 广西 河池

Email: 269364978@qq.com

收稿日期: 2019年6月7日; 录用日期: 2019年6月21日; 发布日期: 2019年6月28日

## 摘要

利用传输矩阵法研究含正负折射率材料构造的一维对称结构光量子阱 $(AB)_m(CDDC)_n(BA)_m$ 传输特性, 并通过对比全正折射率材料光量子阱的透射谱, 结果表明: 当光量子阱的垒层 $(AB)_m(BA)_m$ 为正负折射率材料混合结构时, 透射谱出线三条透射峰, 较全正折射率材料光量子阱透射峰变窄, 禁带变宽; 当阱层 $(CDDC)_n$ 为材料混合结构时, 透射谱仅在中心频率位置出现一条透射峰, 且透射峰变宽; 当垒层和阱层同时为混合结构时, 透射谱仅在中心频率位置出现一条透射峰, 且透射峰变窄, 禁带明显变宽; 当垒层或阱层全负折射率材料时, 透射谱出现三透条射峰, 透射峰变宽, 禁带变宽。正负折射率材料混合构建的光量子阱的透射谱特性, 为设计和制造新型光学器件提供理论依据。

## 关键词

光量子阱, 负折射率, 透射谱, 透射峰, 光子晶体

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

20世纪以来, 光电材料一直作为科研领域的前沿科学, 成为众多专家学者研究的热门。其中光子晶体由于其具有传统的光学材料所没有的光波控制特性, 可以用来制作各种全新的高性能光学器件, 拓宽了光电子技术的应用范围, 在通讯、医疗、军事等领域被视为最具潜力的新型材料之一。随着光子晶体研究的不断深入, 普通的光子晶体能带结构已经不能满足人们的理论及实际生产需要, 即对光子晶体材料提出更高的要求, 负折射率材料构成的光子晶体开始进入研究者的视野。所谓的负折射率材料(Negative index materials)是指的介电常数和渗透率都是负的介质材料, 1968年 Victor Veselago 发表文章理论上假设负折射率材料的存在, 直到2000年和2001年, 第一次证明有负折射率的人工材料出现, 光波在此类介质中相速度和群速度方向相反, 即能量传播的方向和相位传播的方向相反, 频移情况呈逆多普勒效应。利用负折射率材料的特殊性, 研究者们通过构建光量子阱等特殊的光子晶体结构来改变光在光子晶体中的传输特性, 达到操纵光波传输的目的, 这些光量子阱在光的传输上显示出其特有的性质, 但对负折射率材料构建的光量子阱的研究还较为稀缺, 本文利用负折射率材料合理构建光量子阱, 并对其传输特性进行研究, 进一步丰富光子晶体的研究, 同时利用这些特性设计和制造新型的滤波器、激光二极管、激光器和光放大器等提供理论基础。

## 2. 研究模型和方法

构造对称光量子阱模型 $(AB)_m(CDDC)_n(BA)_m$ , A、B、C、D是组成量子阱的光子晶体的薄膜介质,  $m$ 和 $n$ 是基元介质排列周期数, 研究中取 $m=3, n=2$ 。各介质层的计算、研究取值参数分别为:  $n_A = n_C = \pm 3.7$ ,  $n_B = n_D = \pm 1.5$ , 光学厚度  $n_A d_A = n_B d_B = n_C d_C = n_D d_D = \pm 0.25\lambda_0$ ,  $\lambda_0$ 为光子晶体中心波长, 当介质为负折

射率材料时取负号。计算和研究方法采用光子晶体研究中广泛应用的传输矩阵法，就是用矩阵的形式来描述电磁波在多层介质中的传播情况，在由  $N$  层介质交替排列构成的晶体中，任意介质两层边的场矢量  $E_1, H_1, E_{11}, H_{11}$  的模可用特征矩阵联系起来

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{11} \\ H_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\frac{i}{\eta_b} \sin \delta \\ -i\eta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ H_{11} \end{bmatrix}$$

其中  $M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}$ ,  $\delta_j = -\frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_j} h_j \cos \theta_{i2} = -\frac{2\pi}{\lambda} n_j h_j \cos \theta_{i2}$ ,  $\eta_j = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\varepsilon_j} \cos \theta_i$ ,  $\varepsilon_j$  是第  $j$  层介电常数，因此一维光子晶体场矢量分布为：

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = (M_N) \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} = M_1 M_2 \cdots M_N \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix}$$

式中矩阵  $M$  就是一维周期性结构的特征矩阵，通过求解通过 `madlb` 计算模拟传输矩阵可得出光子晶体的透射系数、反射系数以及透射率、反射率和内部电场分布等[1]-[16]，该部分内容在很多文献内都有详细的描述，在此不做重复阐述。

通过模拟结果如图 1 所示：(a)图为  $n_C = 3.7, n_D = 1.5$  时(CDDC)<sub>10</sub> 的能带结构；(b)图  $n_C = -3.7, n_D = 1.5$  时(CDDC)<sub>10</sub> 的能带结构；(c)图为  $n_A = 3.7, n_B = 1.5$  时(AB)<sub>3</sub>(BA)<sub>3</sub> 的能带结构；(d)图为  $n_A = -3.7, n_B = 1.5$  时(AB)<sub>3</sub>(BA)<sub>3</sub> 的能带结构；此外如果保持 A、C 介质层的折射率不变，改变 D、C 层折射率的符号也可以得到类似(b)(d)的结果；如果 A、B 介质同时为负折射率材料时(AB)<sub>3</sub>(BA)<sub>3</sub> 的能带结构与(c)图相同，如果 C、D 同时为负折射率材料时(CDDC)<sub>10</sub> 的能带结构与图(a)相同，由于文章篇幅有限在此不列出。综

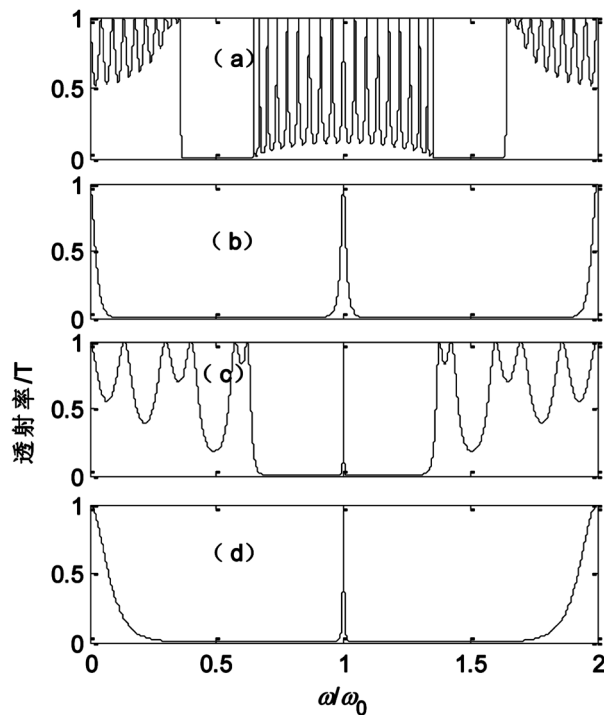


Figure 1. Transmission of (CDDC)<sub>10</sub> and (AB)<sub>3</sub>(BA)<sub>3</sub>  
 图 1. (CDDC)<sub>10</sub> 和 (AB)<sub>3</sub>(BA)<sub>3</sub> 透射谱

合图 1 结果可以看出, 含负折射率材料的光子晶体的禁带宽度增大, 无论介质中是否含有负折射率材料层,  $(\text{CDDC})_{10}$  的能带中心都和  $(\text{AB})_3(\text{BA})_3$  的禁带中心都重合于  $1.0\omega/\omega_0$  处, 且在  $0.65\omega/\omega_0$  至  $1.35\omega/\omega_0$  完全处于  $(\text{AB})_3(\text{BA})_3$  的禁带中, 故可以构成了一个以  $1.0\omega/\omega_0$  为对称中心的一维阱结构的阱。

### 3. 计算结果与分析

#### 3.1. 垒层含负折射率材料时光量子阱的透射特性

在模型  $(\text{AB})_3(\text{CDDC})_2(\text{BA})_3$  中, 保持光学厚度不变,  $(\text{CDDC})$  周期结构相当于在对称中心插入一个缺陷层, 故在光量子阱中该处将产生强烈的局域效应, 该处在透射谱上将出现对应的缺陷模透射峰。如图 2 所示: 当介质层均为正折射率材料时, 图(a)在禁带中对称出现了三条透射率为 100% 的透射峰。如图(b)所示, 保持其他参数不变, 将光量子阱垒层  $(\text{AB})_3(\text{BA})_3$  中的 A 介质层变为负折射率材料时, 透射谱保持三条透射峰, 但是透射峰更加精细, 且透射峰之间的距离变大, 同时光量子阱的禁带宽度变大; 当保持其他参数不变, 将垒层中的 B 介质层变为负折射率材料时, 如图(c)所示, 射谱保持三条透射峰, 但是透射峰进一步精细化, 透射峰的距离变大, 同时光量子阱的禁带宽度变大。如图(d)所示当垒层 A、B 均为负折射率材料时, 三条透射峰之间距离继续增大, 禁带宽度较(b)和(c)变窄, 但是透射峰的宽度变大。

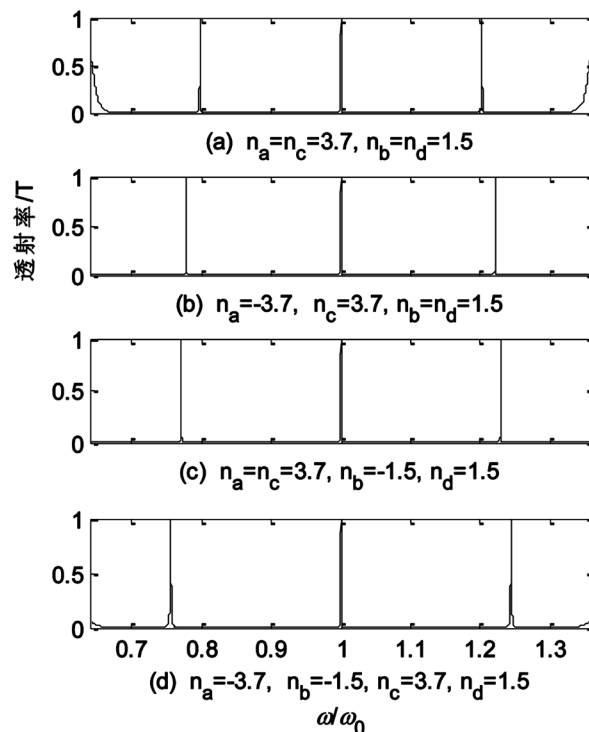


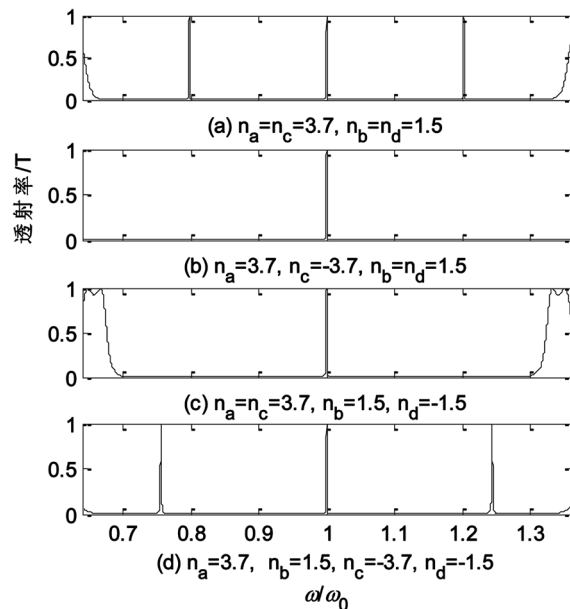
Figure 2. Transmission of  $(\text{AB})_3(\text{CDDC})_2(\text{BA})_3$  when the barrier layer is a mixed structure

图 2.  $(\text{AB})_3(\text{CDDC})_2(\text{BA})_3$  垒层变为负折射率时, 光量子阱透射谱的变化

#### 3.2. 阱层含负折射率材料时光量子阱的透射特性

如图 3 所示, 在光量子阱  $(\text{AB})_3(\text{CDDC})_2(\text{BA})_3$  中, 依次改变阱层介质的折射率, 使其变为负折射率。结果对照全正折射率材料量子阱透射谱图(a), 可以看出当 C 层为负折射率材料时, 如图(b)所示, 透射谱只在中心频率处形成一个透射峰, 量子阱的禁带宽度变大; D 层为负折射率材料时, 如图(c)所示光子晶体同样只在中心频率处出现一个透射峰, 但是量子阱禁带宽度变小; 当 C、D 介质层同时为负折射率

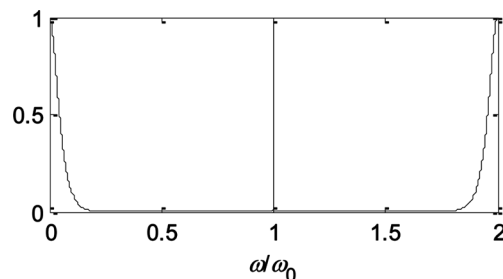
材料时,如图(d)所示,此时透射谱中出现三条透射峰,较图(a)中的透射峰之间的距离增大,禁带宽度也增大。出现以上情况可以理解为,当光量子阱层 C、D 其中一层为负折射率材料时,阱层光子晶体的能带如图 1(b)所示通带宽度急剧向频率中心收缩,并与垒层 $(AB)_3(BA)_3$ 的透射峰位置重合,形成极强的局域态,使得 $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$ 的三个缺陷透射峰产生了简并,从而只在对称中心位置出现单一透射峰态。当 C、D 层同时为负折射率材料时,阱层 $(CDDC)_2$ 的能带结构和 C、D 同时为正折射率材料是相同的,所以此时和全正材料一样出现三条缺陷模透射峰。



**Figure 3.** Transmission of  $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$  when the well layer is a mixed structure  
**图 3.**  $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$  阱层改变为负折射率时,量子阱透射谱的变化

### 3.3. 阱层和垒层同时含负折射率材料时光量子阱的透射特性

当光量子阱 $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$ 的垒层和阱层同时含有负折射率材料时(除所有垒层或所有阱层为负材料外,该情况在 2.1 和 2.3 已经讨论过。),其透射谱的分布都类同,在此不一一罗列,以 A、C 介质层为负折射率材料为例,如图 4 所示光子晶体中心波长位置出现非常精细的单一透射峰,而量子阱的禁带宽度较 2.1 和 2.3 各情况都有明显增大。因为当垒层 $(AB)_3(BA)_3$ 和阱层 $(CDDC)_2$ 的其中一介质层为负折射率材料时,阱层通带宽度急剧向频率中心收缩,并与垒层透射峰重合,在中心位置形成简并共振态,出现单一透射峰。同时,由于此时的垒层和阱层禁带宽度都比正折射率材料构成的垒层和阱层结构的禁



**Figure 4.** Transmission of  $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$  when  $n_a = n_c = -3.7$ ,  $n_b = n_d = 1.5$   
**图 4.** 当  $n_a = n_c = -3.7$ ,  $n_b = n_d = 1.5$  时,  $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$  透射谱

带宽度大, 所以光量子阱 $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$ 的禁带宽度就出现了明显的增大。

#### 4. 结论

选定一维对称结构光量子阱 $(AB)_3(CDDC)_2(BA)_3$ , 利用传输矩阵法研究由正折射率材料和负折射率材料混合结构的光量子阱透射谱特性, 发现由负折射率材料构建的光量子阱具有更强的局域特性, 结论与文献[10][14]结论吻合, 综合以上研究得出结论:

1) 当的阱层全部为正折射率材料, 垒层为混合结构时, 量子阱关于频率中心对称出现 3 条缺陷模透射峰, 较全正折射率材料量子阱, 其透射峰更窄, 禁带宽度更大。

2) 当垒层全部为正折射率材料, 阱层为正混合结构时, 量子阱在频率中心只出现一个透射峰, 较正折射率材料量子阱, 其透射峰更宽。

3) 当垒层或阱层全部为负折射率材料时, 量子阱频率中心对称出现 3 条缺陷模透射峰, 较正折射率材料量子阱, 其透射峰更宽, 禁带宽度更大。

4) 当的垒层或阱层均为正负折射率材料混合结构时, 量子阱在频率中心只出现一个精细透射峰, 较正折射率材料量子阱, 其透射峰更窄, 禁带宽度明显增大。

含负折射率材料光量子阱透射特性的研究将为光子晶体理论研究和新型光电器件的设计具有一定的理论参考意义。

#### 基金项目

广西高校中青年教师基础能力提升项目(2018KY0502)。

#### 参考文献

- [1] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2061. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>
- [2] John, S. (1987) Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, **58**, 2486-2489. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>
- [3] 苏安, 高英. 含双负介质一维光子晶体量子阱的透射谱研究[J]. 量子电子学报, 2010, 27(5): 1007-5461.
- [4] 苏安, 高英俊, 蒙成举. 双重势垒一维光子晶体量子阱内部局域电场分布[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0216002.
- [5] 苏安, 蒙成举, 高英俊. 激活性杂质对光子晶体量子阱滤波器特性的调制[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0306001.
- [6] 苏安, 蒙成举, 高英俊. 实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1006001.
- [7] 苏安, 彭金松, 潘继环, 等. 结构周期数对光子晶体量子阱透射品质影响的研究[J]. 广西物理, 2013, 34(13): 1003-7551.
- [8] 苏安, 蒙成举, 高英俊. 左手介质对一维光量子阱透射谱的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 012302.
- [9] 许江勇, 苏安, 潘继环, 等. 双负介质对一维光子晶体量子阱透射谱的影响[J]. 激光与红外, 2013, 42(8): 1007-2276.
- [10] 潘继环, 苏安, 蒙成举. 双负介质对光子晶体透射能带谱的简并效应研究[J]. 光学技术, 2014, 40(3): 1002-1582.
- [11] 潘继环. 双正、双负和单负介质光子晶体能带的比较研究[J]. 河池学院学报, 2014, 34(2): 1672-9021.
- [12] 苏安, 李忠海, 莫传文, 等. 光子晶体滤波器的滤波品质调制因素研究[J]. 河池学院学报, 2014, 34(5): 78-82.
- [13] 潘继环, 苏安, 唐秀福, 等. 缺陷奇偶性对光子晶体光传输特性的影响[J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 705-709.
- [14] 韦吉爵, 李忠海, 莫传文, 等. 两种因素对光子晶体缺陷模的影响[J]. 河池学院学报, 2015, 35(2): 40-44.
- [15] 潘继环, 李志海, 黄金玉. 介质光学厚度对双负材料光子晶体透射峰带宽的调制[J]. 河池学院学报, 2015, 35(2): 1672-9021.
- [16] 唐秀福. 光子晶体研究方法对比与实例分析[J]. 河池学院学报, 2015, 35(2): 45-49.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)