

# 具有变态光子带隙结构的相对论 Cherenkov 辐射源的研究\*

高 喜<sup>1)†</sup> 杨梓强<sup>1)</sup> 侯 钧<sup>1)</sup> 亓丽梅<sup>1)</sup> 兰 峰<sup>1)</sup> 史宗君<sup>1)</sup> 李大治<sup>2)</sup> 梁 正<sup>1)</sup>

1) 电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) 日本激光技术综合研究所, 大阪)

(2008 年 6 月 10 日收到, 2008 年 7 月 8 日收到修改稿)

提出了一种变态光子带隙结构, 研究了由这种结构构成的周期慢波系统的 Cherenkov 辐射源的特性. 利用高频仿真软件以及三维粒子模拟软件对变态及常态光子带隙慢波系统中类  $TM_{0n}$  模的色散特性及注-波相互作用物理过程进行了模拟研究. 结果表明, 在变态光子带隙慢波系统中, 类  $TM_{0n}$  模纵向场分量沿角向分布均匀性得到明显改善, 能有效抑制非对称模式, 提高输出频谱纯度及注-波相互作用效率.

关键词: Cherenkov 辐射源, 变态光子带隙结构, 慢波系统, 三维粒子模拟

PACC: 5240M, 4270Q

## 1. 引 言

在光子带隙结构(PBG)中通常存在通带和禁带, 通过构建缺陷结构, 频率处在禁带中的电磁波模式就被限制在缺陷结构内传播. 利用 PBG 结构的这一特性, 能有效实现频率或模式选择, 使器件工作于单频或单模状态<sup>[1-5]</sup>. PBG 结构应用于毫米波及 THz 器件方面已开展了诸多研究工作. Smirnova 等<sup>[6]</sup>将 PBG 结构应用于 17 GHz 的高梯度加速器中, 对器件进行模式选择, 成功实现了器件单模(类  $TM_{01}$  模式)工作. Sirigiri 等<sup>[7]</sup>将 PBG 谐振腔代替普通回旋管中的谐振腔, 在过模结构情况下实现了模式、频率单一的毫米波信号输出. Bailey 等<sup>[8]</sup>提出将 PBG 结构应用于毫米行波管中. Chen 及 Liu 等<sup>[9, 10]</sup>提出将介质 PBG 结构应用于 8 mm 及 THz 波段的返波管中, 详细分析了 PBG 慢波结构的色散特性、耦合阻抗等冷腔特性. 上述研究中所采用的 PBG 结构都是将金属或者介质杆按三角形晶格排列而成的, 其缺陷结构的内层金属杆或介质柱是按照正六边形方式排列. 然而, PBG 结构内层柱的排列方式将影响缺陷模式电场的分布, 尤其是 PBG 慢波结构中工

作模式为类  $TM_{0n}$  模的纵向电场分量沿缺陷内表面分布不均匀, 因而易于激励起非对称模式. 为此, 本文提出将缺陷内层金属杆的正六边形排列变成圆排列的变态结构, 以改善光子带隙慢波结构中缺陷内表面电场分布的均匀性.

## 2. 变态光子带隙结构

图 1 中的黑点表示按三角形晶格排列的金属 PBG 结构, 同时在 PBG 结构的中心抽取 7 根金属杆形成缺陷, 我们把这种结构叫常态 PBG 结构. 根据三角形晶格的金属 PBG 结构的能带特性<sup>[11]</sup>, 选取晶格常数  $a = 3.8 \text{ mm}$ , 金属杆半径  $r = 0.5 \text{ mm}$ . 保持图 1 中其他金属杆的位置不变, 只将正六边形中点处的金属杆移到白色圆圈位置, 使内层金属杆处在正六边形外接圆的圆周上, 我们称之为变态 PBG 结构. 在变态 PBG 结构中, 一方面增加了缺陷半径, 从而增加了功率容量; 另一方面, 由于缺陷的边界修正成圆边界, 对工作模式为类  $TM_{0n}$  模, 内表面的角向分布均匀性可得到很大改善, 同时有利于抑制非对称模式.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60571020)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB310401)资助的课题.

† E-mail: gaoxi\_2594@yahoo.cn

### 3. 高频系统色散特性

在变态或者常态 PBG 结构的纵向周期性放置金属模片,就形成了变态或常态 PBG 高频慢波系统 (PBG SWS),其物理模型如图 2 所示. 两种慢波结构参数的选取如表 1 所示. 慢波结构的色散特性用 HFSS 商用软件求得<sup>[12]</sup>. 取图 2 中的一个周期单元,同时将两个端面设为周期边界(在 HFSS 中为 master/slave 边界),固定周期边界上的相位差  $\varphi = m(n\pi)$ ,其中  $m = 0, 1, \dots, n$ ;  $n$  为大于 1 的整数,本文取  $n = 5$ ,即  $\varphi = 0, \pi/5, 2\pi/5, 3\pi/5, 4\pi/5, \pi$ ,分别计算类  $TM_{01}$  模式的本征频率,从而可得到慢波系统中类  $TM_{01}$  模式的色散曲线,计算结果如图 3 所示. 图中虚线和实线分别为光线和 550 kV 电子注的色散线. 由类  $TM_{01}$  模式的色散特性可知,在  $\pi$  模点附近高频周期结构中传播的电磁波为慢波,而慢波场主要集中在高频周期结构的表面附近,因此其电场分布受缺陷内层导体排列形式的影响较大. 利用 HFSS 软件,计算了两种 PBG SWS 中  $4\pi/5$  模点的腔体  $Q$  值. 结果表明,变态及常态 PBG SWS 单腔  $Q$  值分别为 9274.9 和 5381.4,因此变态 PBG SWS 中的  $Q$  值得到大幅度提高,从慢波结构横向泄漏出去的能量减少,这将有益于改善 Cherenkov 辐射源的特性.

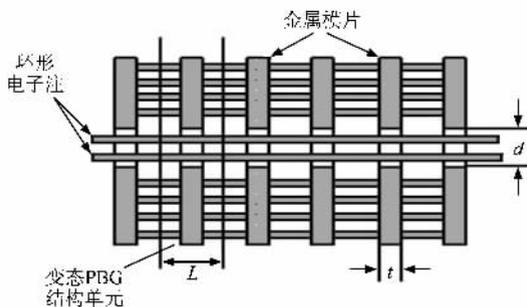


图 2 变态光子带隙结构的高频系统

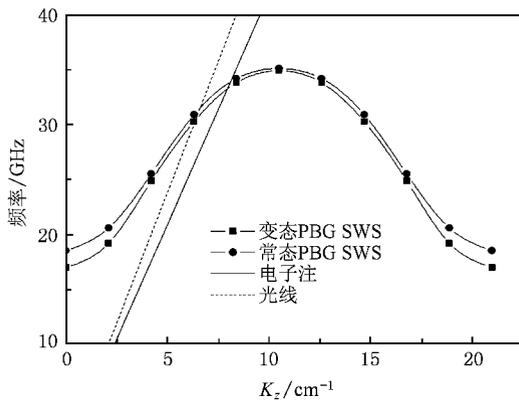


图 3 慢波结构色散曲线

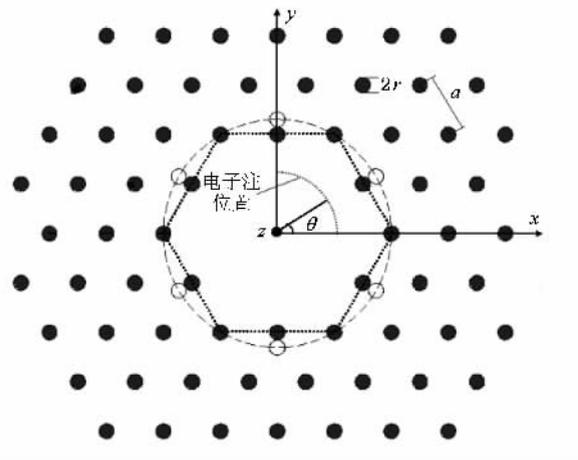


图 1 变态光子带隙结构示意图

表 1 变态 PBG SWS 及常态 PBG SWS 参数

	变态 PBG SWS	常态 PBG SWS
慢波结构结构周期 $L/\text{mm}$	3	3
金属模片厚度 $t/\text{mm}$	2	2
金属模片内半径 $\frac{d}{2}/\text{mm}$	6.3	5.8
周期数 $N$	12	12

### 4. 三维粒子模拟研究

为了进一步分析比较变态及常态 PBG SWS 中注-波互作用的特性,采用 3-D Chopic 进行了粒子模拟分析. 图 4 为三维粒子模拟结构的纵向剖面图. 模拟中所有金属都设为良导体,由于高频结构横向是开放的,因此用吸收边界将整个结构封闭起来以吸收从高频结构横向泄露出来的电磁波. 在结构左端有一小块金属用作发射环形电子注,电子注电压为 550 kV,电流为 2 kA,电子注距离金属模片表面的

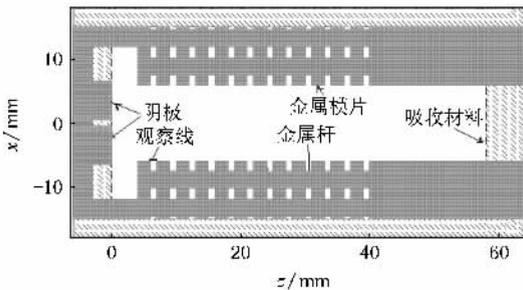


图 4 粒子模拟结构示意图

距离为 1 mm. 模拟过程中纵向引导磁场为 4 T.

图 5 给出了粒子模拟变态及常态 PBG SWS 中工作模式的电场在相互作用腔以及输出端横截面上的分布. 由图 5(a)(b)可以看出,在变态 PBG SWS 中,工作模式表面电场沿角向分布较均匀,然而在常态 PBG SWS 中,工作模式在角向有六个最大值分布. 常态 PBG SWS 中缺陷模式电场的这种不均匀分

布一方面要影响注-波相互作用效率;另一方面极易激励起其他非对称模式. 图 5(c)(d)为相应输出端模式的场分布. 可以看出,变态 PBG SWS 中输出的模式为标准  $TM_{01}$  模,而常态 PBG SWS 中输出的模式沿角向分布不均匀,有可能是由相互作用腔中激励的非对称模式与  $TM_{01}$  模式的场叠加导致的.

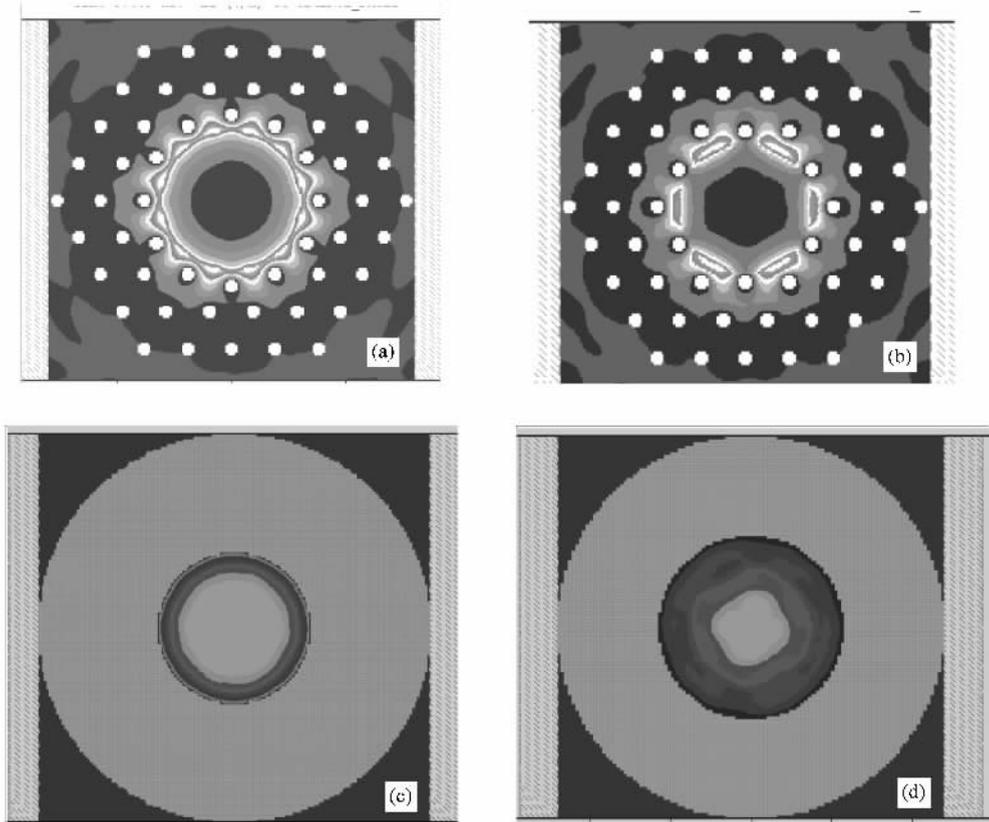


图 5 变态及常态 PBG SWS 相互作用腔及输出端的模式场的分布图 (a)变态 PBG SWS 腔中的模式场,(b)常态 PBG SWS 腔中的模式场 (c)变态 PBG SWS 输出端模式场,(d)常态 PBG SWS 输出端模式场

模拟计算中我们观察了变态及常态 PBG SWS 腔中任意横截面上电子注位置处(即固定半径  $r$ ) $E_z$  场随角向  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ ) 的变化关系,观察位置如图 1 中的圆弧线,得到结果如图 6 所示. 从图中可以看出, PIC 模拟结果与 HFSS 模拟冷腔的结果基本一致,常态 PBG SWS 中  $E_z$  场随  $\theta$  角的变化起伏较大,而变态 PBG SWS 中  $E_z$  场只有很小的波动. 进一步表明,在慢波系统中引入变态 PBG 结构,缺陷模式场的角向分布均匀性得到了明显改善.

图 7 为沿慢波结构第一个腔体表面观察线上得到的  $E_z$  场分量经 FFT 变换后的频谱图. 图 7(a),(b)显示变态及常态 PBG SWS 的工作主频分别为

35.967 和 36.259 GHz,与图 3 中电子注与类  $TM_{01}$  模色散曲线交点处的频率基本一致. 在变态 PBG SWS 只观察到单一的工作频率,而 PBG SWS 中除了主频外,还出现了寄生振荡频率 38.739 GHz. 为了确定频率为 38.739 GHz 寄生振荡的模式,计算了单腔中该频率点的本征模式的电场分布,结果如图 8 所示,发现为类  $TM_{21}$  模. 与图 5(d)中的电场分布结果相比,证明在常态 PBG SWS 中由于缺陷内层金属柱排列不具备圆柱对称性,激励了非对称的类  $TM_{21}$  模式的寄生振荡. 图 9 为器件输出功率随时间的演化曲线. 结果表明,采用变态 PBG SWS,器件的输出功率有较大幅度的提高,由常态 PBG SWS 的 70 MW 提高

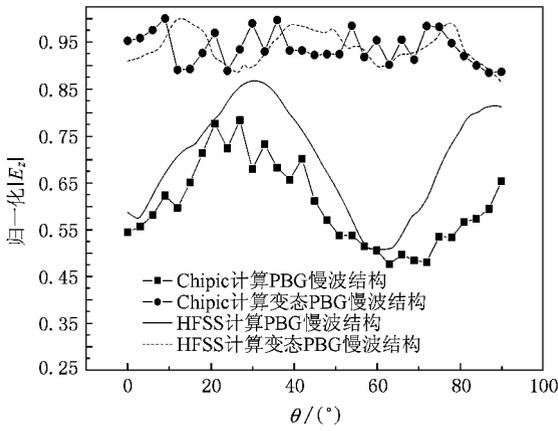


图 6 变态及常态 PBG SWS 腔中任意横截面上  $E_z$  场沿角向分布

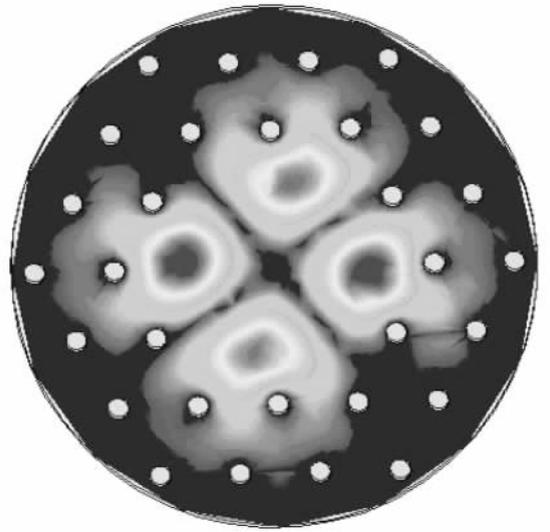


图 8 常态 PBG 腔中类  $TM_{21}$  模式的电场分布

到 110 MW 效率由 6.4% 提高到 10% .

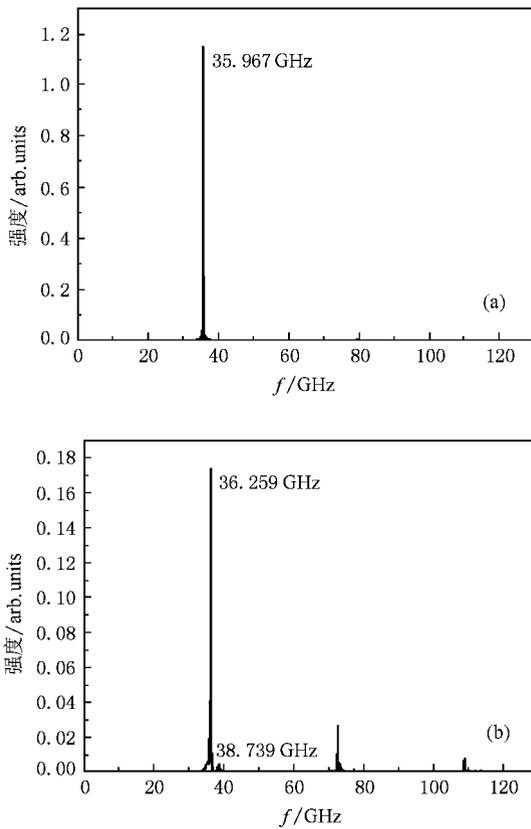


图 7 慢波结构中第一个腔体表面  $E_z$  场分量的 FFT 变换谱 (a) 变态 PBG SWS ,(b) 常态 PBG SWS

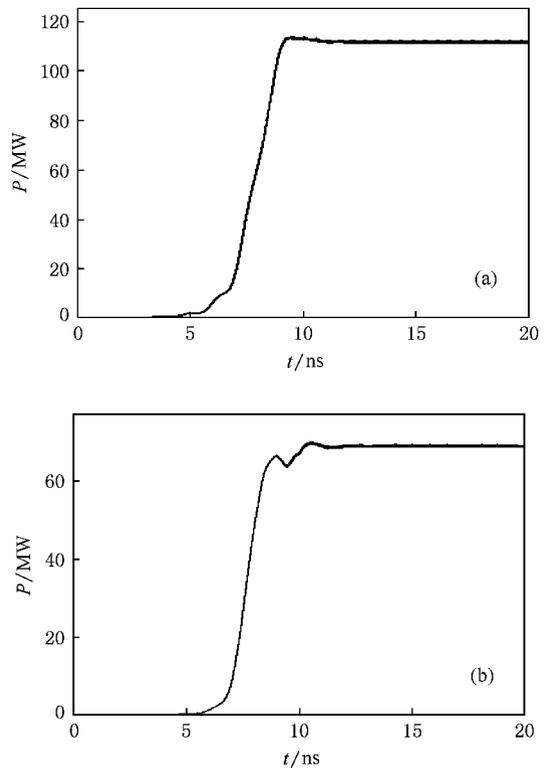


图 9 器件输出功率随时间的演化曲线 (a) 变态 PBG SWS , (b) 常态 PBG SWS

### 5. 结 论

本文通过三维模拟技术研究了变态及常态 PBG

SWS 中的相对论 Cherenkov 辐射特性. 研究结果表明,对常态 PBG SWS 缺陷内层金属杆呈正六边形排列,导致模式场沿角向分布不均匀,因此容易激励起非对称的类  $TM_{21}$  模式;在变态 PBG SWS 中,缺陷内层导体修正为圆排列,腔体内模式场分布相对均匀,

能有效抑制非对称寄生振荡模式 输出模式纯 频谱 单一 , 同时注-波相互作用效率得到明显提高 .

- [ 1 ] Joannopoulos J D , Meade R D , Winn J N 1995 *Photonic Crystals* ( New Jersey : Princeton University Press ) p69
- [ 2 ] Liu H W , Sun X W , Li Z F , Qian R , Zhou M 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3082 ( in Chinese ) [ 刘海文、孙晓玮、李征帆、钱 蓉、周 2003 物理学报 **52** 3082 ]
- [ 3 ] He Y J , Su H M , Tang F Q , Dong P , Wang H Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 ( in Chinese ) [ 何拥军、苏惠敏、唐芳琼、董 鹏、汪河洲 2001 物理学报 **50** 892 ]
- [ 4 ] Wang H , Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 ( in Chinese ) [ 王 辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172 ]
- [ 5 ] Zhuang F , He S L , He J P , Feng S S 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 355 ( in Chinese ) [ 庄 飞、何赛灵、何江平、冯尚申 2002 物理学报 **51** 355 ]
- [ 6 ] Smirnova E I , Kesar A S , Mastovsky I , Shapiro M A , Temkin R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 074801
- [ 7 ] Sirigiri J R , Kreischer K E , Machuzak J , Mastovsky I , Shapiro M A , Temkin R J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5628
- [ 8 ] Bailey A G , Smirnova E I , Earley L M , Carlsten B E 2005 *Proc. SPIE* **6120** 612004
- [ 9 ] Chen B , Qian B L , Zhong H H 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 862 ( in Chinese ) [ 陈 波、钱宝良、钟辉煌 2006 强激光与粒子束 **18** 862 ]
- [ 10 ] Liu X J , Lei H , Yu T , Feng J J , Liao F J 2008 *Opt. Commun.* **281** 102
- [ 11 ] Smirnova E I , Chen C , Shapiro M A , Sirigiri J R , Temkin R J 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 0021
- [ 12 ] Gao X , Yang Z Q , Xu Y , Qi L M , Li D Z , Shi Z J , Lan F , Liang Z 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Research A* **592** 292

## Relativistic Cherenkov source with modified photonic band-gap cells \*

Gao Xi<sup>1)†</sup> Yang Zi-Qiang<sup>1)</sup> Hou Jun<sup>1)</sup> Qi Li-Mei<sup>1)</sup> Lan Feng<sup>1)</sup>  
Shi Zong-Jun<sup>1)</sup> Li Da-Zhi<sup>2)</sup> Liang Zheng<sup>1)</sup>

1  $\times$  Research Institute of High Energy Electronics , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China )

2  $\times$  Institute for Laser Technology , 2-6 Yamada-oka , Suita , Osaka 565-0871 , Japan )

( Received 10 June 2008 ; revised manuscript received 8 July 2008 )

### Abstract

A relativistic Cherenkov source with slow wave system consisting of modified photonic band-gap cells is proposed and investigated. The high frequency structure simulator and three-dimensional particle-in-cell simulation code are used to study the dispersion characteristic of  $TM_{01}$ -like mode and the interaction between electromagnetic wave and electron beam. The results show that , in the slow wave system with modified photonic band-gap cells , the  $TM_{01}$ -like mode has much better azimuthal symmetry , the non-axisymmetry mode can be efficiently suppressed and the operation efficiency can be enhanced greatly.

**Keywords :** Cherenkov source , modified photonic band-gap cells , slow-wave system , three-dimensional particle-in-cell simulation

**PACC :** 5240M , 4270Q

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60571020 ) and the National Basic Research Program of China ( Grant No. 2007CB310401 ).

† E-mail : gaoxi\_2594@yahoo.cn