

# 太赫兹频段一维介质光子晶体中的 史密斯-帕塞尔辐射特性模拟

史宗君, 唐效频, 兰峰, 杨梓强

(电子科技大学 物理电子学院 太赫兹研究中心, 四川 成都 610054)

**摘要:** 基于 Smith-Purcell (SP) 效应, 采用粒子模拟的方法探讨了电子束团激发一维介质光子晶体中的 SP 辐射特性. 模拟研究了单个束团激发一维介质圆柱光子晶体产生的 SP 辐射现象, 并对周期束团激发的 THz 频段的相干 SP 辐射进行了模拟分析. 研究表明, 提高介质的相对介电常数和增加光子晶体的层数都可使辐射强度增加, 选择合适的参数能够有效地增强 THz 频段的相干 SP 辐射强度.

**关键词:** Smith-Purcell 辐射; 电子束团; THz; 相干辐射

**中图分类号:** O734 **文献标识码:** A

## Simulation of terahertz Smith-Purcell radiation from one-dimensional dielectric photonic crystal

SHI Zong-Jun, TANG Xiao-Pin, LAN Feng, YANG Zi-Qiang

(Terahertz Research Centre, School of Physical Electronics,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** This paper presents a study of Smith-Purcell (SP) radiation properties with the particle-in-cell (PIC) simulation. The model supposes one-dimension (1D) dielectric cylindrical photonic crystal driven by a single electron bunch and a train of periodic bunches, respectively. The results show that the radiation from a single electron bunch is enhanced by increasing the dielectric constant and layers of the photonic crystal. The terahertz (THz) coherent SP radiation is obtained by exciting the photonic crystal with periodic electron bunches. The coherent radiation strength is improved by choosing proper operating parameters.

**Key words:** photonic crystal, SP radiation, electron bunch, THz, coherent radiation

**PACS:** 41.60.Bq, 07.57.Hm

### 引言

光子晶体是一种折射率周期变化的电介质材料<sup>[1-3]</sup>, 应用前景极为广泛, 将是新一代光子器件的基础. 研究电子在光子晶体中所激发的物理现象, 对研究太赫兹科学技术, 特别是太赫兹源的发展具有重要意义. 众所周知, 电子贴近金属周期光栅表面飞过, 将激励起电磁辐射波, 其辐射波长  $\lambda$  与辐射角度  $\theta$ 、电子相对速度  $\beta$ 、光栅周期  $d$  的关系遵从 SP 辐射公式<sup>[4]</sup>  $\lambda = d(1/\beta - \cos\theta)/|n|$ ,  $n$  是辐射阶数.  $\theta$  为垂直于光栅平面内观测点与电子注运动方向的

夹角. 显然, 辐射波长将随观测角度变化.

近年来, 电子通过周期金属光栅结构表面产生的辐射已成为 THz 源开发研究的一个热点. 国内外不少研究学者已对金属周期光栅结构中的 SP 辐射现象进行了研究<sup>[5-10]</sup>, 2005 年, MIT 的 S. E. Korbly 等人利用周期电子束团获得了频率为 240 GHz 的相干 SP 辐射<sup>[5]</sup>. 2005 年, J. T. Donohue 和 J. Gardelle 模拟分析了电子注通过平板金属矩形光栅的 Smith-Purcell 辐射特性, 以此来验证相关理论<sup>[8]</sup>. 2006 年, 李大治等人<sup>[9-10]</sup>也利用 Magic 粒子模拟软件研究了基于周期束团的 THz 波段相干 SP 辐射和超辐射

收稿日期: 2012-10-18, 修回日期: 2013-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(11075032, 10975031)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11075032, 10975031)

作者简介 (Biography): 史宗君 (1974-), 女, 重庆人, 副教授, 博士, 主要从事太赫兹电子学方面的研究. E-mail: shizongjun@163.com

Received date: 2012-10-18, revised date: 2013-09-04

现象.

本文对电子束团经过介质光子晶体表面所产生的 SP 辐射现象进行了研究. 采用粒子模拟<sup>[11]</sup>的方法分析了单个电子束团经过一维介质光子晶体中的 SP 辐射特性, 探讨了介电常数的改变和光子晶体层数的增加对辐射特性的影响, 并分析了周期束团激发的 SP 辐射现象.

## 1 模拟模型

选取的一维圆柱介质光子晶体模拟模型如图 1 所示. 电子束团从左端阴极发射, 为了防止电磁波的反射, 四周设为吸收边界条件. 在粒子模拟结构中, 圆柱介质结构及电子束团参数设置如表 1 所示: 周期长度为  $d = 173 \mu\text{m}$ , 电子电压 40 kV. 此参数条件下电子与该一维圆柱介质最低阶慢波模式的注波相互作用色散特性如图 2 所示, SP 辐射最低频率高于图中注波相互作用 P 点的慢波频率.

表 1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

参数	尺寸	参数	尺寸
圆柱周期	$d = 173 \mu\text{m}$	束团高度	$\sigma = 24 \mu\text{m}$
周期数目	$N = 20$	电流	$I = 480 \text{ mA}$
圆柱半径	$r = 62 \mu\text{m}$	束团-圆柱间离	$\delta = 34 \mu\text{m}$
电子电压	$U = 40 \text{ kV}$	介电常数	$\epsilon_r = 2.05/4.5$
束团长度	$T = 0.1 \text{ ps}$		

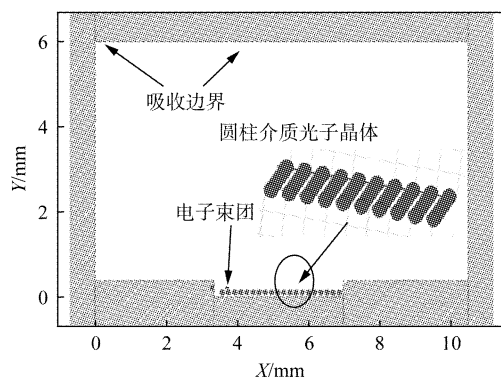


图 1 模拟结构图

Fig. 1 Simulation geometry

## 2 单个束团产生 SP 辐射现象的研究

### 2.1 辐射机理的探讨

为了避免电荷场的干扰, 以下观测量均为横向磁场  $B_z$ . 图 3 给出了电子束团激发的某一时刻  $z$  方向磁场的等势线分布图, 从图 3 可以看出电子束团经过一排周期介质圆柱时, 也会产生类似周期金属

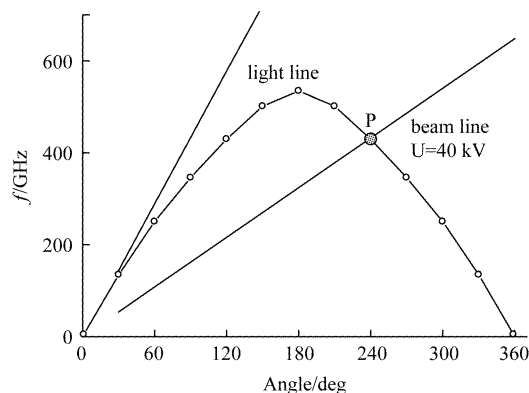


图 2 一维圆柱介质光子晶体色散曲线

Fig. 2 Dispersion curve of the 1D dielectric cylindrical photonic crystal

光栅的 SP 辐射现象, 经过八个圆柱时有八圈 SP 辐射等势线产生, 产生磁场的等势线环数与经过圆柱的个数一致. 但是辐射等势线环的形状有了较大的改变, 在光栅中一般产生的辐射环类似半圆<sup>[9-10]</sup>, 而经过一排介质圆柱时只出现四分之一圆的等势线, 且环间的距离随角度变化不明显. 图 3 (b) 给出了 74.036 ps 后, 单电子束团经过圆柱后, 不再继续产生 SP 辐射.

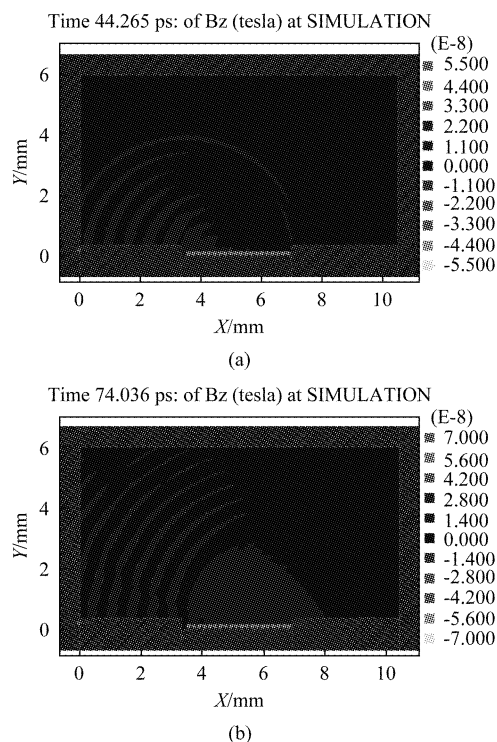


图 3 磁场  $B_z$  的等势线分布图 (a)  $t = 44.265 \text{ ps}$ , and (b)  $t = 74.36 \text{ ps}$

Fig. 3 Contour map of  $B_z$ , (a)  $t = 44.265 \text{ ps}$ , and (b)  $t = 74.036 \text{ ps}$

图4(a)、(b)给出了以圆柱中心位置为圆心, 5.346 mm 为半径, 观察角度  $158^\circ$  处  $z$  向磁场随时间变化及相应的 FFT 变换频谱图. 从图4(a)可以看出单个电子束团经过一排圆柱光子晶体表面时产生 SP 辐射的个数与圆柱的周期数相同. 从图4(b)可以得到频率 481.5 GHz 产生的 SP 辐射, 与理论公式  $\lambda = d(1/\beta - \cos\theta)/|n|$  计算得到的辐射频率 481.4 GHz 基本一致.

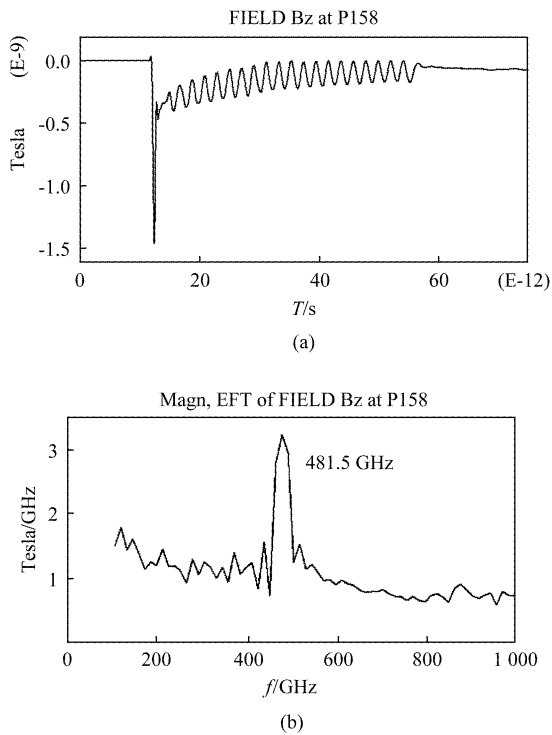


图4 观察角度  $158^\circ$   $z$  方向磁场变化 (a)  $B_z$  随时间的变化, (b) 相应的 FFT 频谱图  
Fig. 4 The variation of  $B_z$  with time observed at  $158^\circ$  (a) and its FFT results (b)

图5给出了  $|n|=1$  的 SP 辐射的频率随角度的变化曲线图, 其中实线为理论值, 理论计算辐射频率范围 0.471 ~ 1.035 THz, 空心圆代表统计的部分模拟值, 从图5可以看出数值模拟结果与理论计算值基本一致.

## 2.2 不同参数的 SP 辐射强度比较

图6给出了观察角度为  $116^\circ$ , 单个电子束团经过一排圆柱上方和两排圆柱中间产生的 SP 辐射比较, 单层圆柱参数设置与表1相同, 两排圆柱只是在电子的上方对称地加入一排同周期的介质圆柱. 从图6(a)看出, 单电子束团经过两排圆柱中间产生的 SP 幅度 (实线) 与经过单排圆柱产生的 SP (虚线) 相比显著增强. 这一点从图6(b)对应的频谱图也可以

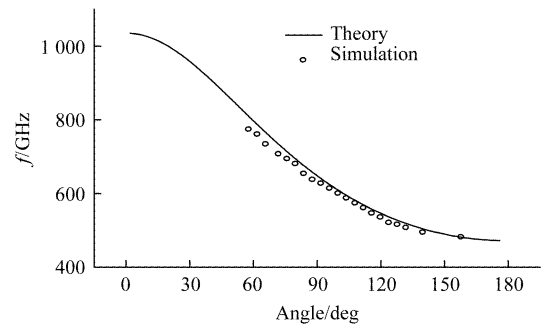


图5 SP 辐射的频率随角度的变化曲线图  
Fig. 5 SP radiation frequency as a function of angle

看出. 电子束团经过单排介质圆柱光子晶体表面时, 在频率为 0.549 THz 处产生的辐射幅度为  $2.8 \times 10^{-12}$ , 当电子束团经过两排介质光子晶体中间时, 在 0.545 THz 处产生的辐射强度增至  $5.8 \times 10^{-12}$ , 约为单排辐射强度的两倍. 因此可以考虑通过增加光子晶体的层数来增强 SP 辐射.

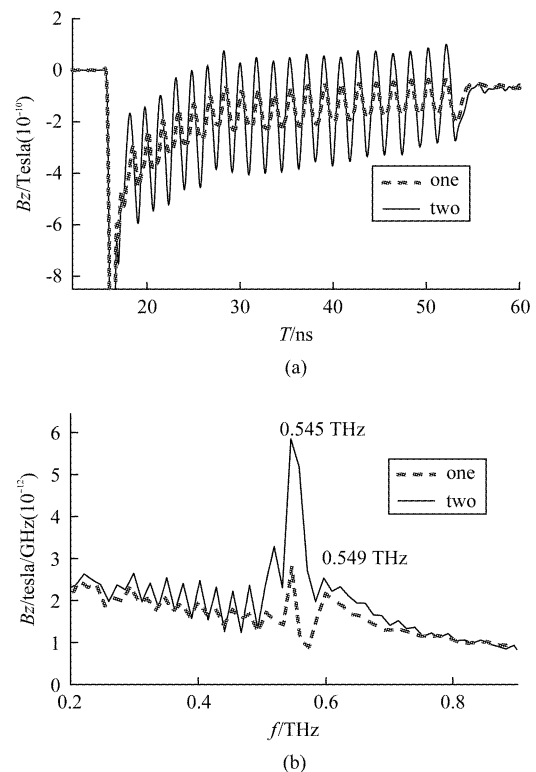


图6 观察角度  $116^\circ$  单层与双层圆柱  $z$  方向磁场变化 (a)  $B_z$  随时间的变化, (b) 相应的 FFT 频谱图  
Fig. 6  $B_z$  versus time for dielectric cylinder with one or two layers observed at  $116^\circ$  (a) and their FFT results (b)

图7为其它工作参数不变, 介电常数变化时, 单个电子束团经过一排光子晶体表面产生 SP 辐射比较, 图7(a)为角度为  $116^\circ$  时得到的  $z$  向磁场幅度随

时间的变化曲线图, (b) 为相应的频谱图. 其中虚线和实线分别表示相对介电常数为 2.05 和 4.5 介质表面的 SP 辐射. 从图 7(b) 中看到相对介电常数为 4.5 的光子晶体在 0.545 THz 处产生的辐射幅度为  $3.5 \times 10^{-12}$  Tesla, 比相对介电常数为 2.05 的介质圆柱产生幅度约为  $2.8 \times 10^{-12}$  Tesla 有所提高. 可以通过改变光子晶体的材料来增强 SP 辐射, 但提高的幅度不如增加光子晶体层数明显.

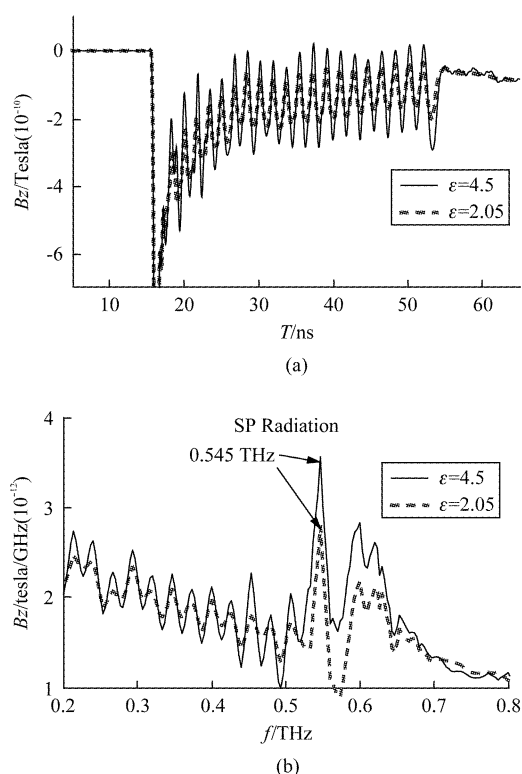


图 7 角度为  $116^\circ$ , 相对介电常数 2.05 与 4.5 产生 SP 辐射强度比较 (a)  $z$  向磁场幅度随时间变化, (b) 相应的 FFT 频谱图, 其中虚线和实线分别对应相对介电常数为 2.05 和 4.5 的材料

Fig. 7  $B_z$  versus time for dielectric cylinder with dielectric constant 2.05 and 4.5, respectively observed at  $116^\circ$  (a) and their FFT results (b)

### 3 周期束团激发的 THz 波段相干 SP 辐射现象研究

单电子束团能有利于理解 SP 辐射机制, 但辐射是瞬间的, 实际器件都是利用连续的周期束团产生的辐射, 因此对周期束团的 SP 辐射进行了分析. 首先模拟了重复频率 0.3 THz 的周期束团激发相对介电常数为 2.05 单层介质圆柱光子晶体产生的相干 SP 辐射. 由于束团重复频率的二次和三次谐波在 SP 辐射 0.471 ~ 1.035 THz 的范围内, 因此观察了

$B_z$  的 FFT 频谱中的 0.6 THz 与 0.9 THz 幅值沿角向变化的情况, 可以预期将获得相干 SP 辐射. 图 8 给出了 SP 辐射对应的频率和角度的关系, 从图中可以看出二次和三次谐波 SP 辐射出现了峰值点, 但相干辐射峰值点不是很突出.

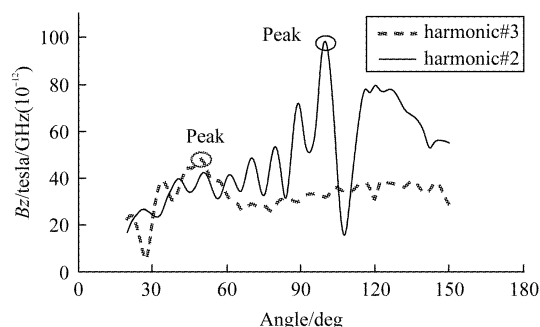


图 8 单层介质圆柱  $B_z$  分量 FFT 幅值随观察角度的变化  
Fig. 8 The FFT amplitude of  $B_z$  as a function of angle for dielectric cylinder with one layer

为了增强辐射, 根据前面的模拟结果, 将单层变为双层介质柱, 相对介电常数取 4.5, 并在光子晶体圆柱下表面加上一层厚度为  $50 \mu\text{m}$  的金属平板. 图 9 给出了改进参数后的模拟结果. 从图中可以看出二次谐波即频率为 0.6 THz 的辐射占优, 其最大辐射的角度在  $100^\circ$ , 与理论计算  $102^\circ$  偏差较小, 三次谐波即频率为 0.9 THz 的辐射也出现了明显的峰值点, 其最大辐射的角度在  $40^\circ$ , 与理论计算  $42^\circ$  偏差较小. 说明这种相干辐射所产生的辐射为束团重复频率的谐波, 又满足 SP 辐射公式预期的频率, 即为相干 SP 辐射. 图 10 给出了改进参数后, 观察角度  $100^\circ$  辐射峰值点  $z$  向磁场幅度随时间变化, 及相应的 FFT 频谱图, 从图中可以看出辐射频谱为周期束团重复频率 0.3 THz 的谐波, 二次谐波频率 0.6 THz 的辐射强度占优. 图 11 给出了  $z$  向磁场等势线分布图. 从图 11 可以明显看出存在两个方向的 SP 相干辐射, 与图 9 得到的结果相一致.

### 4 结论

通过对单个束团经过一排介质光子晶体表面所产生的 SP 辐射现象研究表明, 在一维介质光子晶体表面也存在类似金属光栅的 SP 辐射现象, 与光栅的辐射相比, 其辐射的等势线范围较小, 只有四分之一圆弧, 且随角度变化不明显. 提高介质圆柱的介电常数和增加光子晶体的层数都可使辐射强度增加, 说明选择合适的参数能够有效地增强 SP 辐射. 研究了

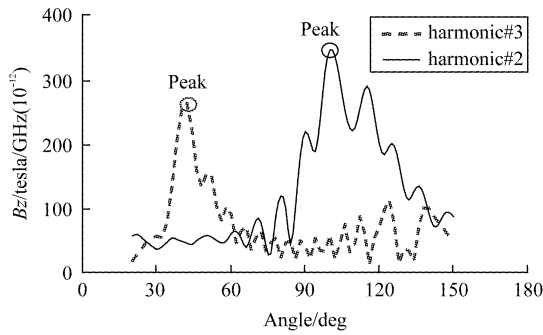


图9 改进参数后的  $B_z$  分量的 FFT 幅值随观察角度的变化  
Fig. 9 The FFT amplitude of  $B_z$  as a function of angle for improved parameters

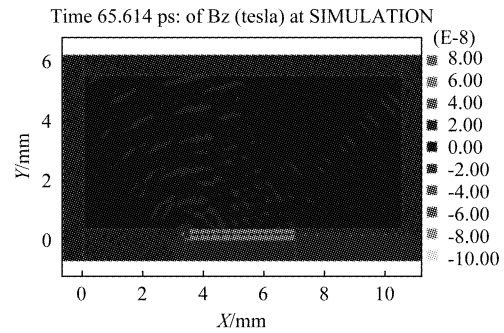


图11 周期束团驱动的  $B_z$  磁场等势线图  
Fig. 11 Contour map of  $B_z$  for periodic bunches

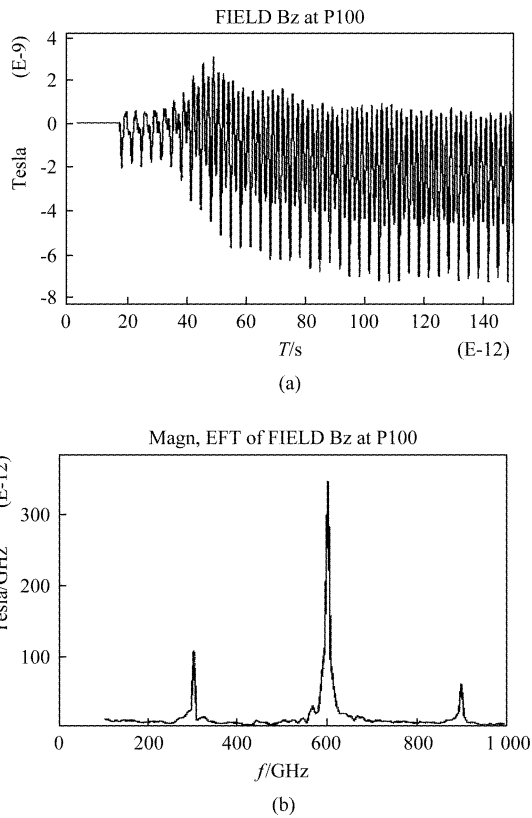


图10 改进参数后,观察角度  $100^\circ$  辐射峰值点的模拟结果  
(a)  $z$  向磁场幅度随时间变化,(b)相应的 FFT 频谱图  
Fig. 10 The variation of  $B_z$  with time for improved parameters observed at  $100^\circ$  (a) and their FFT results (b)

周期束团经过一排介质光子晶体表面所产生的相干 SP 辐射现象. 研究表明,无论从  $z$  方向磁场的等势线图来看,还是从辐射磁场随角度的变化来看都能得到 THz 频段的相干 SP 辐射现象. 对于周期束团的情况,改进和选择合适的工作参数能得到方向性

更好的相干 SP 辐射,该模拟结果为设计新型 THz 辐射源提供了思路.

## REFERENCES

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**:2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**:2486-2489.
- [3] Kennedy D. Breakthrough of the year [J]. *Science*, 2006, **314**(5807):1850-1855.
- [4] Smith S. J., Purcell E. Visible light from localized surface charges moving across a grating[J]. *Phys. Rev.*, 1953, **92**(15):1069.
- [5] Korbly S. E., Kesar A. S., Sirigiri J. R., et al. Observation of frequency-Locked coherent terahertz Smith-Purcell radiation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(5):054803-1-4.
- [6] ZHAN Yong-Xin, GONG Yu-Bin, YUE Ling-Nan. Study of the Smith-Purcell in photonic crystals [J]. *Vacuum Electronics*(詹永欣,宫玉彬,岳玲娜.光子晶体的 Smith-Purcell 效应探讨,真空电子技术),2009, **2**:51-54.
- [7] Shi Z J, Yang Z Q, Liang Z, et al. Coherent terahertz Smith-Purcell radiation from a two-section mode[J] *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, **607**(3):367-371.
- [8] Donohue J. T. Simulation of Smith-Purcell radiation using a particle-in-cell code[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2005, **8**(9):060702.
- [9] Li D, Yang Z, Imasaki K, et al. Three-dimensional simulation of super-radiant Smith-Purcell radiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(2):201501.
- [10] Li D, Yang Z, Imasaki K, et al. Particle-in-cell simulation of coherent and super-radiant Smith-Purcell radiation [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beam*, 2006, **9**(4):040701.
- [11] Bruce Goplen. *MAGIC's MANUAL* [M]. Virginia: Mission Research Corporation, 1996: 25-100.