

文章编号: 0253-2239(2005)05-665-5

# 不同晶格磁性光子晶体异质结的界面传导模\*

刘江涛<sup>1</sup> 周云松<sup>1\*\*</sup> 王福合<sup>1</sup> 顾本源<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>首都师范大学物理系, 北京 100037  
<sup>2</sup>中国科学院物理研究所, 北京 100080)

**摘要:** 利用平面波展开方法研究了两种二维磁性光子晶体(MPC)的带隙(PBG)结构,一种磁性光子晶体是在长方格子纯电介质背景上放置磁性介质长方形散射子,另一种是在三角形格子纯电介质背景上放置磁性介质圆形散射子。计算了这两种磁性光子晶体的带隙随磁导率的变化规律,发现这两种磁性光子晶体的带隙宽高比(带隙宽与带隙中心位置比)都比较大。在此基础上由这两种磁性光子晶体构成了磁性光子晶体异质结(MRRTC 异质结),并利用超原胞方法计算了这种异质结的带隙结构。研究发现 MRRTC 异质结无需从界面做晶格拉开或者侧向滑移就可在绝对带隙中产生界面传导模。分别从 MRRTC 异质结的界面处做晶格拉开和侧向滑移,发现传导模位置及形状发生了很大变化。

**关键词:** 光电子学; 光子晶体; 异质结; 传导模; 超原胞

中图分类号: O77 文献标识码: A

## Guide Modes in Magnetic Photonic Crystal Heterostructures Composed of Different Lattices

Liu Jiangtao<sup>1</sup> Zhou Yunsong<sup>1</sup> Wang Fuhe<sup>1</sup> Gu Benyuan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037  
<sup>2</sup> Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** The photonic-band-gap (PBG) structures of two-dimensional magnetic photonic crystals (MPCs) are investigated by using the plane wave expansion (PWE) method. One is composed of rectangular magnetic pillars embedded into host dielectric in rectangular lattice (RR type), the other consists of circle magnetic cylinders embedded into host dielectric in triangular lattices (TC type). The changes of PBG structures corresponding to the magnetic permeability are presented, and each sample is found with large ratio of gap-midgap. Based on the above results, the PBG structure of magnetic heterostructures composed of both RR type and TC type MPCs (MRRTC heterostructures) is investigated by use of PWE method combined with the supercell technique. The guide modes at the interface of MRRTC heterostructures are produced at absolute PBG without longitudinal gliding or displacement of the lattice. When introducing the relatively longitudinal gliding and transverse displacement of the lattice from the interface, the dispersion curves of guide modes vary apparently.

**Key words:** optoelectronics; photonic crystal; heterostructures; guide modes; supercell

### 1 引 言

自 1987 年 Yablonovitch<sup>[1]</sup> 和 John<sup>[2]</sup> 各自独立提出光子晶体(PCs)概念以来,人们对光子晶体的研究取得了迅猛的发展<sup>[3~8]</sup>。光子晶体的巨大的应用前景之一便是光波导,由于二维光子晶体中便于

制造线缺陷,所以二维光子晶体的光波导很有实际的应用价值。两块不同的半无限大二维光子晶体组成的光子晶体异质结结构是二维光子晶体光波导的一种类型<sup>[9~13]</sup>。李志远等<sup>[9]</sup>首先研究了正方格子圆形散射子异质结(SCSC 异质结),界面两边只有

\* 国家重点基础研究发展计划(001CB61040),北京市自然科学基金(1032003)和北京市教委科技发展计划(KM200310028108)资助的课题。

作者简: 刘江涛(1980~),男,湖南人,硕士,主要从事磁性薄膜物理、光子晶体方面的研究。E-mail: lj-t-ljt@163.com

\*\* 通信联系人。E-mail: 263zys@263.net

收稿日期: 2004-07-08; 收到修改稿日期: 2004-09-22

填充因子不同。结果表明,必须将两个子晶格沿着界面横向拉开或者纵向滑移才能在偏振带隙中产生传导模。如果传导模能够出现在绝对带隙中则是更为理想的结果。这种正方格子圆形散射子异质结没有绝对带隙的原因可能是由于界面两边不同的填充系数造成了两个子晶格的绝对带隙出现在不同的位置,交叠部分很小或者没有,那么整个异质结系统的绝对带隙可能消失。为了弥补这个不足,我们曾设想了一种镜面对称光子晶体异质结<sup>[11,12]</sup>,我们具体计算的结构是长方(正方)晶格上放置长方(正方)散射子的纯电介质和磁性光子晶体异质结。对比这些异质结的结构和特点,我们发现增加界面处的畸变性有利于产生局域模,为了验证这个观点,接着研究了不同晶格纯电介质光子晶体异质结,结果发现由长方格子上放置长方形散射子和三角形格子上放置圆形

散射子组成的光子晶体异质结(RRTC)不需要沿界面做任何拉开或者滑移,就可在绝对带隙中出现传导模<sup>[13]</sup>,这样的异质结更有利于实际制作。由于带隙重叠的不同的纯电介质光子晶体种类较少,而磁性光子晶体具有更宽的绝对带隙<sup>[12,14]</sup>,为了进一步研究,我们在 RRTC 异质结中引入磁性材料,这正是本文的工作。结果发现在长方形格子上放置长方形散射子与三角形格子上放置圆形散射子组成的磁性光子晶体异质结(MRRTC)同样不需要沿界面做任何拉开或者滑移,就可在绝对带隙中出现传导模。

## 2 计算原理和方法

当我们忽略材料的各向异性,这时电磁场由以下方程决定<sup>[11~15]</sup>:

$$\nabla \times \left\{ \frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \left[ \frac{1}{\mu(\mathbf{r})} \mathbf{B}(\mathbf{r}) \right] \right\} = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

将电磁场用平面波展开可以得到如下两个独立的本征值方程:

TE 模方程:

$$\sum_{\mathbf{G}'} \epsilon^{-1}(\mathbf{G}_0 - \mathbf{G}') \mu^{-1}(\mathbf{G}' - \mathbf{G})(\mathbf{K} + \mathbf{G}_0) \cdot (\mathbf{K} + \mathbf{G}') b_1(\mathbf{G}) = \frac{\omega^2}{c^2} b_1(\mathbf{G}_0), \quad (2a)$$

TM 模方程:

$$\sum_{\mathbf{G}'} \epsilon^{-1}(\mathbf{G}_0 - \mathbf{G}') \mu^{-1}(\mathbf{G}' - \mathbf{G})(\mathbf{K} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{K} + \mathbf{G}') b_2(\mathbf{G}) \frac{|\mathbf{K} + \mathbf{G}_0|}{|\mathbf{K} + \mathbf{G}|} = \frac{\omega^2}{c^2} b_2(\mathbf{G}_0), \quad (2b)$$

式中  $\mathbf{K}$  是第一布里渊区内的波矢,  $\mathbf{G}$  为倒格矢,  $\epsilon(\mathbf{G})$  和  $\mu(\mathbf{G})$  分别是  $\epsilon(\mathbf{r})$  和  $\mu(\mathbf{r})$  的傅里叶展开系数。

我们利用平面波展开方法<sup>[11~15]</sup>与超原胞方法<sup>[11~13]</sup>求解异质结的能带结构。平面波波数  $M$  和超原胞大小  $N$  应该取得足够大以保证结果正确,和文献<sup>[11,12]</sup>一样我们选择  $M = 1235, N = 8$ , 发现结果与  $M = 1863, N = 8$  以及  $M = 1501, N = 12$  这两组参量相比较带隙的带隙宽度误差为

$$\left| \frac{\Delta\omega - \Delta\omega'}{\Delta\omega} \right| \approx 2.8\%,$$

带隙中心位置误差为

$$\left| \frac{\omega_g - \omega'_g}{\omega_g} \right| \approx 1.0\%.$$

## 3 磁性光子晶体原型的带隙随磁性材料磁导率 $\mu$ 的变化规律

我们首先研究了 MRRTC 异质结(见图 1)两边的长方格子长方柱子光子晶体(MRRPC)和三角格

子圆形柱子光子晶体(MTCCPC)原型的带隙和填充磁性材料磁导率  $\mu$  的关系,结果如图 2、图 3 所示,其中  $\epsilon = 16$ , 长方格子长方柱子光子晶体和三角格子圆形柱子光子晶体填充率分别为  $f_1 = 0.52, f_2 = 0.64$ , 其它参量与前面一致。

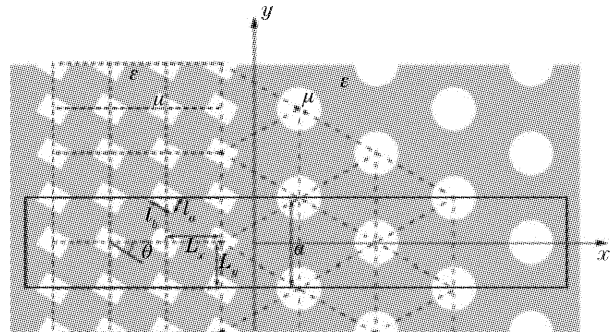


图 1 MRRTC 异质结构示意图

Fig. 1 Sketch of MRRTC heterostructures

从图 2 和图 3 中可以看出  $\omega_g$  随  $\mu$  的增大而减小,与其他非磁性光子晶体(NMPC)<sup>[15~17]</sup>对比可以发现磁性光子晶体的绝对带隙的中心位置远小于非

磁性光子晶体的中心位置。其中长方格子长方柱子光子晶体当  $\mu=2.0$  时出现绝对带隙,当  $\mu$  增大时,绝对带隙宽度  $\Delta\omega$  开始迅速增加,而带隙中心位置  $\omega_g$  迅速下降,当  $\mu \geq 2.4$  时  $\Delta\omega$  增长变慢。这样相对带隙大小  $\omega_r = \Delta\omega/\omega_g$  将随着  $\mu$  增加迅速增加。三角格子圆形柱子光子晶体的绝对带隙随  $\mu$  的变化规律与长方格子长方柱子光子晶体相似,不过三角格子圆形柱子光子晶体在  $\mu=1.0$  时绝对带隙已经出现,而当  $\mu \geq 2.4$  时,  $\Delta\omega$  迅速减小直至消失。

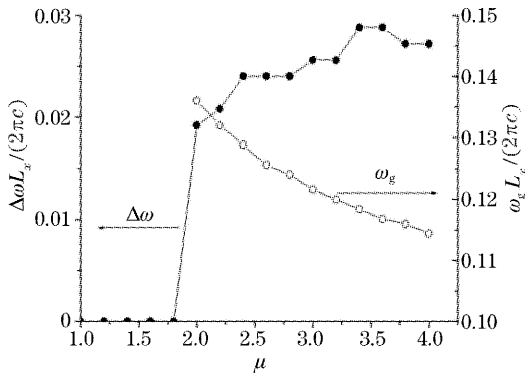


图 2 长方格子长方柱子光子晶体的带隙宽度  $\Delta\omega$  (实心点线)、中心位置  $\omega_g$  (圆圈线) 和磁导率  $\mu$  的关系  
 Fig. 2 The gap width  $\Delta\omega$  (solid circle) and the center position of gap  $\omega_g$  (opened circles) of the MRRTC as functions of the magnetic permeability

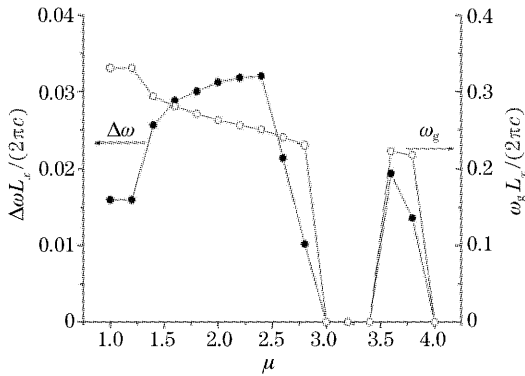


图 3 三角格子圆形柱子光子晶体的带隙宽度  $\Delta\omega$  (实心点线)、中心位置  $\omega_g$  (圆圈线) 和磁导率  $\mu$  的关系  
 Fig. 2 The gap width  $\Delta\omega$  (solid circle) and the center position of gap  $\omega_g$  (opened circles) of the MTRPC as functions of the magnetic permeability

此外,从图 2 和图 3 中可以看出长方格子长方柱子光子晶体的绝对带隙的中心位置  $\omega_g$  约为三角格子圆形柱子光子晶体的一半(如果  $a=L_y$ ),因而取  $a=2L_y$  可以使两者绝对带隙重叠(如图 1 所示)。并且当  $\mu=2.4$  时绝对带隙重叠最好。

### 4 MRRTC 异质结

图 1 是 MRRTC 异质结的示意图。阴影部分是介电常量为  $\epsilon$  的电介质,空白部分为磁导率为  $\mu$  的磁介质。 $y$  轴是界面,左右两边的光子晶体是半无限大的。左边的长方形磁性材料散射子长边和短边分别为  $l_b$  和  $l_a$ ,长方形晶格的短边和长边分别为  $L_y$  和  $L_x$ ,  $\theta$  是旋转角。右边三角形晶格的边长等于  $a$ ,圆形磁性材料散射子的填充率为  $f_2$ 。从图 1 中可以看出  $a=2L_y$ ,其原因如前所述。图 1 中粗黑线所包围的矩形是一个超原胞,它在界面两边各取了相同数量的原胞。在实际计算中,我们一共取  $N=8$  个原胞(左边取 8 个散射子,右边取 4 个散射子)组成超原胞。

其中参量选取如下: $\epsilon=16, \mu=5.76, l_a/l_b=0.84, L_y/L_x=0.8, \theta=28^\circ$ ,左右两边填充率分别为  $f_1=0.52, f_2=0.64$ 。这样选取的原因是能够保证界面左、右两边光子晶体原型的绝对带隙重叠得最好,其绝对带隙的宽度分别为  $\Delta\omega_1=0.032(2\pi c/a)$  和  $\Delta\omega_2=0.048(2\pi c/a)$ ,绝对带隙中心位置分别为  $\omega_{g1}=0.2502(2\pi c/a)$  和  $\omega_{g2}=0.2576(2\pi c/a)$  重叠的绝对带隙为  $\Delta\omega=0.032(2\pi c/a)$ ,相对带隙大小为  $\omega_r = \Delta\omega/\omega_g = 12.8\%$ 。

计算结果如图 4 所示。实线、虚线分别表示 TE 模(电场平行于  $xy$  平面)和 TM 模(电场垂直于  $xy$  平面)的色散关系,两条平行线给出了绝对带隙的范围,实心点线和圆圈线分别表示 TE、TM 局域模(位于带隙中的部分称为传导模)。本文中其它图线,若无特殊规定,都将按此解释其意义。可以看出,绝对带隙位于  $(0.2327, 0.264)(2\pi c/a)$ ,带宽  $\Delta\omega=0.0313(2\pi c/a)$ ,带宽与中心位置比  $\omega_r = 12.6\%$ 。在绝对带隙中有一条 TM 传导模,这个结果正是我们所期盼的。与 RRTC 纯电介质光子晶

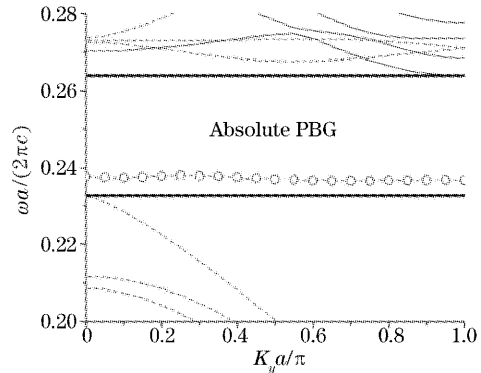


图 4 MRRTC 异质结的能带结构  
 Fig. 4 PBG structure of the MRRTC heterostructures

体异质结一样,在没有做任何晶格移动的情况下就产生了界面传导模。验证了由于界面两边的子晶体具有不同类型的布拉菲格子所引起的界面处畸变可以导致局域模的出现。此外,从图 4 中可以看出这条传导模比较平直,可以用来制作单色器。

下面对 MRRTC 异质结做进一步研究。通过移动格子调节绝对带隙和传导模,首先将图 1 中的界面左(右)边的散射子沿着界面( $y$  轴)整体向上(下)移动  $|dy|/2$ ,即侧向滑移  $dy$ 。当  $dy=0.20a$  时,也可得到较好的结果,如图 5 所示。坐落于绝对带隙  $(0.2243, 0.2633)(2\pi c/a)$  内仍只一条 TM 传导模,但这条传导模移到了绝对带隙的中心附近,这有利于提高光波导的传输特性。而且与图 4 相比带隙上沿基本不动,下沿下移了大约  $0.008(2\pi c/a)$ 。这样带隙宽度增加到  $\Delta\omega=0.039(2\pi c/a)$ ,相对带隙大小增大到  $\omega_r=15.9\%$ ,对于光波导来说,这个结果较为理想。

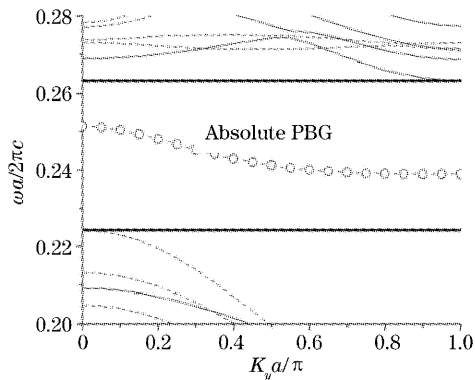


图 5 MRRTC 异质结滑移  $dy=0.2a$  时的能带结构

Fig. 5 PBG structure of the MRRTC heterostructures when

the lattice is slipped along the interface by  $dy=0.2a$

另有一种操作是左(右)边所有空气散射子沿着  $x$  轴整体向左(右)移动一段距离  $|dx|/2$ ,即所谓的

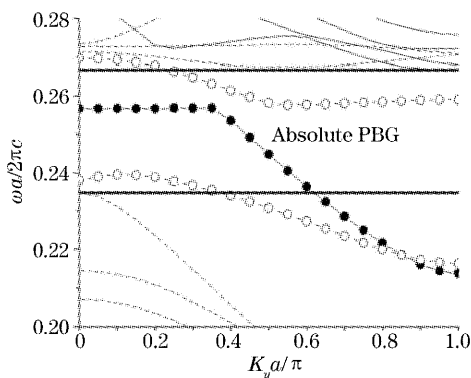


图 6 MRRTC 异质结拉开  $dx=0.45a$  时的能带结构

Fig. 6 PBG structure of the MRRTC heterostructures when

the lattice is separate from the interface by  $dx=0.45a$

拉开  $dx$  距离。取  $dx=0.45a$  时,得到了比较理想的结果,如图 6 所示。绝对带隙位于  $(0.2348, 0.2667)(2\pi c/a)$ ,带宽  $\Delta\omega=0.0319(2\pi c/a)$ 。主要改进在于新增了一条 TE 传导模,同时 TM 传导模也多了一条,这有利于提高光波导的传输频率范围。但带隙减小一些,且带隙中心位置稍微上移。

## 5 结 论

利用平面波展开方法与超原胞方法研究了不同晶格的磁性光子晶体异质结的界面态。研究发现 MRRTC 异质结和纯电介质 RRTC 异质结一样无需从界面做晶格拉开或者侧向滑移就可产生界面传导模,验证了由于界面两边的子晶体具有不同类型的布拉菲格子所引起界面处的畸变可以导致局域模的出现。而磁性材料的加入更可以减小界面两边的对称性,增加绝对带隙的相对宽度。与其它光子晶体异质结对比支持了增加晶格畸变和减小界面两边的对称性有利于局域模产生的观点。

## 参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phy. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 J. B. Pendry, A. Mackinnon. Calculation of photon dispersion relations[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(19): 2772~2775
- 4 Zhiyuan Li, Benyuan Gu, Guozhen Yang. Large absolute band gap in 2D anisotropic photonic crystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(12): 2574~2577
- 5 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single  $\mu$ mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 6 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. The transmission properties of photonic crystals without strict periodicity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 847~850 (in Chinese)  
朱志宏,叶卫民,季家榕等. 光子晶体非严格周期性对其传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 847~850
- 7 Han Shouzhen, Jin Chongjun, Cheng Bingying *et al.*. Defect states in two-dimensional amorphous photonic materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1271~1274 (in Chinese)  
韩守振,金崇君,程丙英等. 二维非晶光子材料的缺陷态[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1271~1274
- 8 Zhu Yanjie, Dong Xiaopeng, Yang Xiaoli *et al.*. Application and improvement of finite-difference time-domain algorithm in the analysis of optical waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 565~571 (in Chinese)  
朱燕杰,董小鹏,杨晓理等. 时域有限差分法在光波导分析中的应用及改进[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 565~571
- 9 Lan-Lan Lin, Zhi-Yuan Li. Interface states in photonic crystal heterostructures[J]. *Phys. Rev. (B)*, 2001, **63**(3): 033310-1~033310-4
- 10 Song Junfeng, Chang Yuchun, Wang Haisong *et al.*

- Transmission characteristic of photonic crystal waveguide[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 711~713 (in Chinese)  
宋俊峰,常玉春,王海嵩等. 光子晶体光波导传输特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 711~713
- 11 Yun-Song Zhou, Ben-Yuan Gu, Fu-He Wang. Guide modes in photonic crystal heterostructures composed of rotating non-circular air cylinders in two-dimensional lattices[J]. *J. Phys: Condens. Matter*, 2003, **15**(10): 4109~4118
- 12 Yun-Song Zhou, Ben-Yuan Gu, Fu-He Wang. Photonic-band-gap structures and guide modes in two-dimensional magnetic photonic crystal heterostructures[J]. *Eur. Phys. J. (B)*, 2004, **37**: 293~299
- 13 Liu Jiangtao, Zhou Yunsong, Wang Fuhe *et al.*. Guide modes at interface of photonic crystal heterostructures composed of different lattices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1845~1849 (in Chinese)  
刘江涛,周云松,王福合等. 不同晶格光子晶体异质结的界面传导模[J]. *物理学报*, 2004, **53**(6): 1845~1849
- 14 M. M. Sigalas, C. M. Soukoulis, R. Biswas *et al.*. Effect of the magnetic permeability on photonic band gaps[J]. *Phys. Rev. (B)*, 1997, **56**(3): 959~962
- 15 Rong-Zhou Wang, Xue-Hua Wang, Ben-Yuan Gu *et al.*. Effects of shapes and orientations of scatters and lattice symmetries on the photonic band gap in two-dimensional photonic crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(9): 4307~4313
- 16 Feng Shangshen, Shen Lingfang, He Sailing *et al.*. A two-dimensional pixel-type of photonic crystal structure with a large complete band gap at high frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1025~1029 (in Chinese)  
冯尚申,沈林放,何赛灵等. 高频区具有大带隙的二维像素型光子晶体结构[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1025~1029
- 17 Gaoxin Qiu, Fanglei Lin, Hua Wang *et al.*. Absolute band gaps in two-dimensional graphite photonic crystal[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(5): 302~304