

文章编号: 1002-2082(2008)03-0452-06

光控二维光子晶体光开关

谭春华^{1,2}, 黄旭光^{1,2}

(1. 光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510631;

2. 华南师范大学 信息光电子科技学院, 广东 广州 510631)

摘要: 提出了一种调节液晶光子晶体光子带隙的方法。二维三角介质柱形光子晶体位于 2 块熔凝石英片之间, 在介质柱之间填充各向同性排列的液晶, 受偏振紫外光照射后, 光诱导液晶分子定向排列, 通过光诱导液晶分子取向改变液晶的折射率。数值模拟结果表明: 通过外界光场控制所填充的向列相液晶分子的方向可以对这种二维三角形介质柱光子晶体的禁带结构进行调节。该可调光子晶体可控制波导中 TM 模和 TE 模的选择性传输, 因而可应用于制作全光光开关。

关键词: 光子晶体; 液晶; 平面波展开法; 光子禁带

中图分类号: O734; O437

文献标志码: A

Two-dimensional photonic crystal optical switch controlled by polarized light

TAN Chun-hua^{1,2}, HUANG Xu-guang^{1,2}

(1. Laboratory of Photonic Information Technology, Guangzhou 510631, China; 2. School of Information Photoelectric Science & Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: A novel method to control the photonic band gap of 2-D photonic crystal is proposed. The two-dimensional photonic crystal, which composes of triangular dielectric cylinders between which liquid crystal (phenylacetylene) is filled, is placed between two vitreosil substrates. After the liquid crystal in the isotropic arrangement is illuminated by polarized UV light, the light-induced liquid-crystal molecule arranges orientationally. Results of numerical simulation show that the structure of the forbidden band of the 2-D triangular photonic crystal can be tuned by manipulating the photoinduced direction of the nematic LC molecules by the aid of external light field. Since the selective transmission of TM- and TE- polarized modes in the waveguide can be controlled by the adjustable photonic crystal, it can be used to manufacture the all-optical switch in photonic integrated circuits.

Key words: photonic crystal; liquid crystal; plane wave expanding method; photonic forbidden band

引言

自光子晶体^[1-2]的概念提出以来, 迄今已取得异常迅猛的发展。由于光子带隙的存在, 导致光子晶体产生了许多崭新的物理性质, 使其可被用来设

计制作各种器件以应用于光电集成、光传输和通讯等领域, 如制作光子晶体高反射镜和滤波镜、光子晶体激光器、光子晶体传感器、光子晶体光纤等。广阔的应用前景^[3-4]使光子晶体成为当今世界范围的

收稿日期: 2007-04-20; 修回日期: 2007-05-11

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(04010398)

作者简介: 谭春华(1969—), 男, 湖南株洲人, 博士, 讲师, 主要从事光电子材料的研究工作。E-mail: tch@scnu.edu.cn

一个热点。

目前所做的光子晶体绝大多数是不可调的, 光子晶体做出来以后, 禁带的位置和形状就不能再发生变化。如果光子晶体的禁带可调, 例如通过施加电场、磁场或者改变温度来改变折射率和晶格结构等参数, 从而实现对光子禁带的自如控制, 那必然将产生一系列的新效应和新现象, 使基于光子晶体的光调制器(如光开关、偏光片、光衰减器等)成为可能。

可调光子晶体由于上述潜在的应用价值而受到越来越多的关注。可调光子晶体指的是光子晶体的禁带宽度、禁带中心等发生改变或迁移。光子禁带的位置和形状取决于光子晶体中介质材料的折射率配比以及不同介电系数材料的占空比和“晶格”结构, 通过施加电场、光场、磁场或者改变温度来改变组分的折射率和晶格结构等参数对光子带隙加以调节, 即上述参数的变化可调节光子带隙的频率范围。由于落在禁带中的光子不能在晶体中传播, 因而可通过调控光子带隙来相应地调控光在光子晶体中的传输。

在研究可调光子晶体的过程中, 人们注意到了液晶。液晶具有晶体的各向异性, 是一种双折射材料, 液晶的折射率对于液晶分子的取向十分敏感, 而液晶分子的排列方式受外界环境(如电场、磁场等)变化影响, 如向列相液晶的分子取向会随温度或电(磁场)的变化而发生改变, 液晶材料的折射率也随之变化。液晶材料的这种优异的调制特性使它得到了广泛的应用。如果在光子晶体中填充上液晶材料, 由于外部温度和电场可以改变液晶分子的取向, 进而改变液晶的折射率, 故用这种填充液晶的光子晶体就可以得到可调节的带隙结构^[5-13]。目前, 许多基于这一原理的器件都已出现。K. Yoshino^[15]和H. Takeda^[15]报道了填充液晶的合成欧泊和反欧泊型可调光子晶体波导, 通过控制温度和电场可对光子晶体波导的光学性能进行调节; C. Y. Liu 等人从理论上证实了在光子晶体中填充液晶后, 通过电场对液晶进行调制就可以调节光子晶体禁带结构, 进而用于制作场敏偏光片^[16-17]; 文献^[18]认为在Y型波导的线缺陷区域填充液晶后, 光在不同条件下会分别沿Y型波导的2个支臂进行传输。迄今, 利用电场控制液晶分子的取向来调节光子晶体光子带隙的研究已较深入, 但采用偏

振光对液晶分子取向进行调制, 从而调节液晶光子晶体禁带结构的技术还未见报道。

本文提出利用偏振紫外光对二维三角介质柱型光子晶体的光子禁带进行调节, 并对禁带结构进行了数值分析。模拟结果表明: 在外界偏振紫外光的影响下, 液晶分子的取向发生改变, 继而引起液晶折射率的变化, 从而对光子晶体的光学性能进行调节。需要指出的是, 本文所用的方法取消了电场调制装置中的电极和取向层, 响应时间短, 有利于实现光控光的全光器件。这种光子晶体波导可用于制作光开关和偏光片, 在全光网络和全光计算方面具有潜在的应用价值。

1 数值方法

通常用平面波展开法来计算光子晶体的禁带结构, 它的基本思想是将电磁场以平面波的形式展开, 将麦克斯韦方程组化成一个本征方程, 通过求解该方程的本征值得到传播光子的本征频率。在光子晶体中填充液晶后, 其内传输的电磁场就会受到液晶分子旋转方向的影响, 因此, 对于填充液晶的二维光子晶体, 在其内传输的电磁波满足下面的方程^[15]:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \vec{H}(r) \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(r) \quad (1)$$

式中: 电介质张量 $\epsilon(r) = \epsilon(r + R)$, 是与基本变换所产生的周期性变化的晶格矢量有关的函数; $\nabla \cdot \vec{H}(r) = 0$ 。利用二维空间的周期性, 把上述周期函数展开为傅里叶级数:

$$\epsilon_{ij}(r) = \sum_G \epsilon_{ij}(G) \exp(iG \cdot r) \quad (i, j = x, y) \quad (2)$$

式中 G 为倒格矢。由于液晶具有双折射特性, 所以它通常有 2 种介电系数: 一种是正常介电系数 ϵ^o ; 另一种是反常介电系数 ϵ^e 。对于图 1 所示的介质柱型光子晶体, 假设液晶的指向矢沿 $x-z$ 平面。当传输光的电场方向垂直于液晶的指向矢时, 液晶呈现正常折射率; 当传输光波的电场方向平行于液晶的指向矢时, 液晶呈现反常折射率。二维向列型液晶的介电张量元可以表示为

$$\epsilon_{xx}(r) = \epsilon^o(r) \sin^2 \varphi + \epsilon^e(r) \cos^2 \varphi \quad (3)$$

$$\epsilon_{zz}(r) = \epsilon^o(r) \cos^2 \varphi + \epsilon^e(r) \sin^2 \varphi \quad (4)$$

$$\epsilon_{xz}(r) = \epsilon_{zx}(r) = [\epsilon^e(r) - \epsilon^o(r)] \cos \varphi \sin \varphi \quad (5)$$

式中: φ 是液晶指向矢的旋转角; $n = (\cos \varphi, \sin \varphi)$ 是液晶分子指向矢(见图 1)。

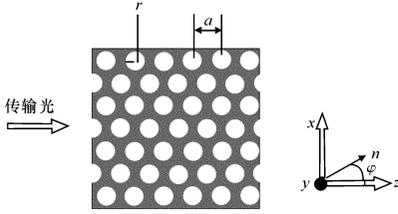


图 1 二维三角形分布的介质柱型光子晶体
(黑色部分填充液晶)

Fig. 1 Cylindrical photonic crystal structure with 2-D triangular distribution (The void between cylinders is filled with liquid crystal)

光子晶体光子带隙的结构和组成光子晶体材料的折射率对比有关, 因而, 如果 2 种材料的折射率(或介电常数)对比发生变化, 相应的光子带隙结构也会发生改变。本文的基本思想是用偏振紫外光作控制光控制液晶分子指向矢的取向, 结构如图 1 所示。填充液晶的光子晶体置于平行于纸面排列的 2 块熔凝石英片之间, 光子晶体厚度约 $30 \mu\text{m}$ 。当液晶光子晶体未加偏振光时, 受呈各向同性熔凝石英表面的影响, 液晶分子的取向是随机无序的, 此时液晶的平均折射率 $n_{\text{LC}}^{\text{ave}} = 2n_{\text{LC}}^{\circ} + n_{\text{LC}}^{\text{e}}/3$; 当用一束校准的紫外偏振光^[19](高压汞灯光源, 格兰棱镜用于获得偏振光, 平均光强为 $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 能量大于液晶分子在熔凝石英表面的吸附能)作为控制光垂直光子晶体表面入射, 在偏振紫外光的诱导下, 原来呈各向同性的液晶分子会定向排列, 液晶分子的指向矢会偏向于垂直偏振光的方向, 因而我们可通过调节偏振紫外光来控制液晶分子的取向。当偏振紫外光(控制液晶分子的指向矢)平行于传输光的电场方向时, 液晶呈现反常折射率 n_{LC}^{e} ; 而当液晶分子的指向矢垂直于传输光的电场方向时, 液晶呈现正常折射率 n_{LC}° 。需要指出的是, 由于受熔凝石英表面吸附的影响, 液晶分子的指向矢只能在平行于熔凝石英表面的平面内偏转。

借助介电张量来讨论液晶光子晶体的光传输问题。(1) 式由一系列周期系数的微分方程组成, 定义 e_G 方向垂直于二维平面。运用布洛赫定理, 将旋度方程(1)展开为

$$H(r) = \sum_G h(G) e_G \exp[i(k + G) \cdot r] \quad (6)$$

式中 k 为第一 Brillouin 区的波矢量或称 Bloch 波矢。将(2)式 ~ (6)式代入(1)式, 乘以 e_G 得到:

$$\sum_{G'} H_{G,G'} h(G') = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 h(G) \quad (7)$$

(7)式使得电磁波在光子晶体中的传播问题变成了求解一个无穷矩阵的本征值问题。得到本征值的关键是采用数值计算的方法求解反介电张量的傅里叶系数, Ho-Chan-Soukoulis (HCS)^[20]方法是最有效的计算方法, 其核心是: 先计算介质函数的傅里叶变换, 取倒数后获得相应的傅里叶变换系数。采用 289 个平面波计算光子晶体能带结构误差小于 1%。HCS 方法相对直接计算方法具有较快的收敛速度。

电磁波在二维光子晶体中的传播存在着 2 种独立的偏振态: 横电模 (TE) 和横磁模 (TM)。定义横电模为传输光电场方向平行于介质柱, 而横磁模为传输光电场方向垂直于介质柱。本文对填充 phenylacetylene 液晶的光子晶体进行研究, 并假设 phenylacetylene 液晶的工作温度在晶态转变点温度与液态转变点温度之间并忽略吸收损耗。phenylacetylene 液晶的正常折射率和反常折射率分别为 $n_{\text{LC}}^{\circ} = 1.590$ 和 $n_{\text{LC}}^{\text{e}} = 2.223$ 。

2 数值模拟与分析

下面研究填充 phenylacetylene 液晶二维三角形分布的介质柱型光子晶体的禁带结构。未填充液晶前的光子晶体各参数如下: 晶格常数为 a , 介质柱 (Si) 的折射率为 $n_0 = 3.4$, 介质柱半径为 r , 且 $r/a = 0.2$ 。本文讨论未填充液晶及施加偏振紫外光使液晶分子指向矢平行和垂直传输光方向 3 种情况下光子带隙的变化, 利用平面波展开法可以得到填充 phenylacetylene 液晶的光子晶体的禁带结构, 如图 2 所示。由图 2 可以看出, 当三角形分布的介质柱型光子晶体中没有填充液晶时, 光子晶体对横磁模 (TM) 的禁带范围比填充液晶后的要大, 而且有一大一小 2 个禁带, 其中较大禁带的归一化频率 ($\omega a / 2\pi c$, 其中 ω 是角频率, c 是真空中光速) 范围是 $0.281 \sim 0.449$, 较小禁带的归一化频率范围是 $0.573 \sim 0.597$, 此外还存在一个对横电模 (TE) 的小禁带, 频率范围是 $0.826 \sim 0.881$ 。当光子晶体的介质柱之间填充液晶且受到偏振紫外光照射时, 可以发现禁带结构发生较大变化, 其中又分 2 种情

况: 1) 当偏振紫外光垂直于光子晶体表面且和传输光垂直时,其诱导液晶分子的指向矢平行于传输光方向,对横磁模的一个较大的禁带频率范围改变为 $0.26571 \sim 0.33714$,而较小的一个禁带消失;对横电模的禁带频率范围改变为 $0.64286 \sim 0.66$; 2) 当偏振紫外光平行于传输光方向时,其诱导液晶分子的指向矢垂直于传输光的方向,对横磁模的禁带频率范围改变为 $0.24213 \sim 0.25363$,而对横电模的禁带消失。由此可以看出,三角形分布的介质柱型光子晶体的空气孔中填充液晶后,其禁带结构发生明显改变,主要表现在以下3个方面:首先,较

大禁带的上限发生显著改变,而下限的改变则不明显,并且当液晶的旋转角不同时,禁带宽度显著不同;其次,当填充液晶后,对横磁模(TM)起作用的一个小禁带($0.573 \sim 0.597$)消失;第三,当液晶旋转角为 90° 时,对横磁模(TE)起作用的一个小禁带($0.64286 \sim 0.66$)消失。这种受偏振紫外光照射后禁带范围的变化和横电模禁带的消失直接决定了光子晶体的用途。需要指出的是,光子晶体的禁带结构不仅与液晶分子的取向有关,还与 r/a (光子晶体介质柱的半径与晶格常数的比值)有关,其关系如图3所示。

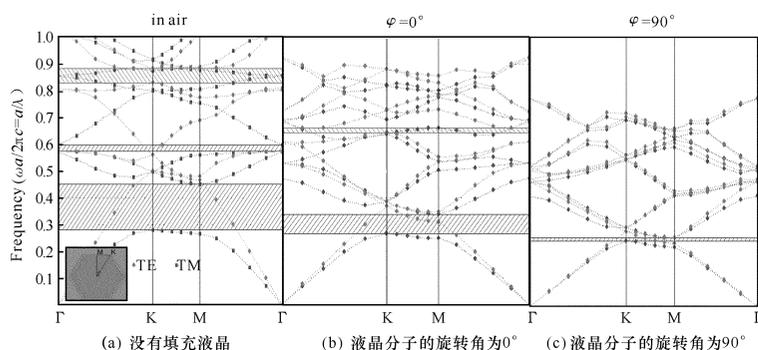


图2 填充液晶的二维三角介质柱光子晶体禁带结构示意图

Fig. 2 Calculated photonic crystal forbidden band structures of 2-D triangular Si of filling LC

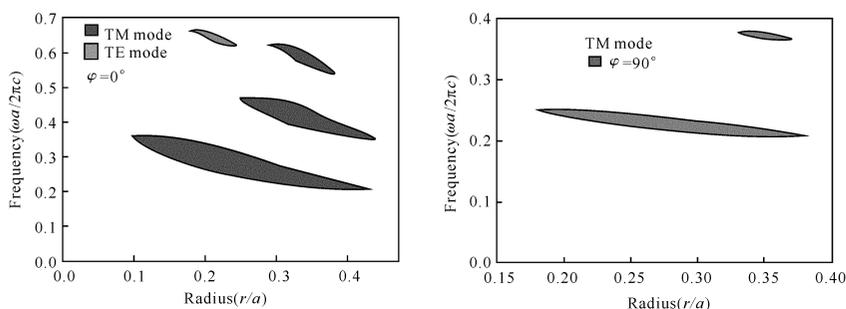


图3 填充phenylacetylene液晶的介质柱型光子晶体的禁带结构随 r/a 的变化

Fig. 3 Variation of Si photonic crystal forbidden band structure of filling LC with r/a

由图3可以看出,三角形分布的介质柱型光子晶体中填充液晶后,禁带结构随着 r/a 的变化有以下规律:光子晶体的禁带随着半径的增加而减小;受偏振激光照射后,TE模的一个小禁带消失。上图不仅给出如何选择 r/a 来确定合适的禁带的频率范围和宽度,还证明三角形分布的介质柱型光子晶体的禁带结构会因偏振激光的照射而发生改变,

故可以利用液晶来对禁带结构进行调制。

3 光子晶体光开关和偏光片

由于液晶分子的取向受外加偏振紫外光的控制,我们可以通过控制外界偏振光来对填充液晶的光子晶体的禁带进行调节。这种禁带可调的介质柱型光子晶体可以作为光开关和偏光片。该光子晶体

(光子晶体结构参数: $r/a=0.2$)不存在完全光子带隙,当偏振紫外光使液晶分子的指向矢平行于传输光时,归一化频率为0.33的未偏振光只有TE态可在光子晶体中传输,TM态不能传输;而当液晶分子的指向矢在偏振紫外光的诱导下垂直于传输光时,TE和TM态均可在光子晶体中传输。当 $\varphi=0^\circ$ 时,归一化频率为0.65的TE偏振光不能在光子晶体中传输,而当 $\varphi=90^\circ$ 时,这种偏振光可以传输。因而我们可以利用偏振紫外光来控制某一频率的偏振光在波导中的开关。

4 结束语

本文提出的调制光子晶体带隙的方法是通过偏振紫外光束控制填充于二维三角形光子晶体介质柱间的液晶分子的取向来改变液晶的折射率,从而实现光子晶体带隙进行调制的。采用平面波展开法对二维三角形介质柱光子晶体禁带结构进行数值分析,数值模拟结果证实,填充液晶后的光子晶体的带隙结构因施加偏振紫外光而改变。这种光调制方法较之电调控方法具有响应速度快、结构简单、更易制作及可与其他光子器件进行集成等优点。这种光子晶体可用于制作全光光开关和偏光片。

参考文献:

[1] YABLONOVITCH. Inhibited spontaneous in solid-state physics and electrons [J]. *Physical Review Letters*,1987,58(20):2059-2062.

[2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Physical Review Letters*,1987,58(23):2486-2489.

[3] 李启成. 光子晶体光纤的原理、结构、制作及潜在应用[J]. *应用光学*,2005,26(6):390-393.
LI Qi-cheng. Principle, configuration, manufacture and potential application of photonic crystal fiber [J]. *Journal of Applied Optics*,2005,26(6):49-52. (in Chinese)

[4] 银燕,袁乃昌. 光子晶体在座舱罩雷达散射截面减缩中的应用[J]. *应用光学*,2006,27(5):390-393.
YIN Yan, YUAN Nai-chang. Application of photonic crystal in radar cross-section reduction of scattering on airplane canopy[J]. *Journal of Applied Optics*,2006,27(5):390-393. (in Chinese)

[5] KOSMIDOU E P, KRIEZIS E E, TSIBOUKIS T D. FDTD analysis of photonic crystal defect layers filled with liquid crystals[J]. *Optical and Quantum*

Electronics,2005,37(2):149-160.

[6] MITOV E N, DESSAUD N. Polymer-stabilized cholesteric liquid crystals as switchable photonic broad bandgaps [J]. *The European Physical Journal E*,2004,32(6):212-217.

[7] JONES D C, COOK G. Theory of beam coupling in a hybrid photorefractive-liquid crystal cell [J]. *Optics Communications*,2004,232(1-6):399-409.

[8] STEFANO G, DIEDERIK S W, VOS W L. Liquid crystal infiltration of complex dielectrics [J]. *Physica B*,2003,338(1-4):143-148.

[9] KEE Chul-sik, KIM Ki-hong, LIM H. Tuning of anisotropic optical properties of two-dimensional dielectric photonic crystals [J]. *Physica B*,2003,338(1-4):153-158.

[10] WEISS S M, HAURYLAU M, FAUCHET P M. Tunable photonic bandgap structures for optical interconnects [J]. *Optical Materials*,2005,27(5):740-744.

[11] HIROSHI F. Fabricating high-quality opal films with uniform structure over a large area [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*,2004,275(1):277-283.

[12] SAADO Y, GOLOSOVSKY M, DAVIDOV D, et al. Fabrication of artificial crystals with tunable lattice constant via self-assembly of floating magnetic particles [J]. *Synthetic Metals*,2001,116(1-3):427-432.

[13] HIDETOSHI O, SATOSHI F, HITOSHI K, et al. Electric field-induced orientation of organic microcrystals with large dipole moment in dispersion liquid [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*,2000,169(1-3):251-258.

[14] YOSHINO K, SHIMODA Y, KAWAGISHI Y, et al. Temperature tuning of the stop band in transmission spectra of liquid-crystal infiltrated synthetic opal as tunable photonic crystal [J]. *Applied Physics Letters*,1999,75(7):932-934.

[15] TAKEDA H, YOSHINO K. Tunable photonic band schemes of opals and inverse opals infiltrated with liquid crystals [J]. *Journal of Applied Physics*,2002,92(10):5958-5662.

[16] LIU Chen-yang, CHEN Lien-wen. Tunable field-sensitive polarizer using hybrid conventional waveguides and photonic crystal structures with nematic liquid crystals [J]. *Optics Communication*,2005,256(1-3):114-122.

- [17] LIU Chen-yang, CHEN Lian-wen. Tunable band gap in a photonic crystal modulated by a nematic liquid crystal [J]. Physical Review B, 2005, 72 (B1):45133-45137.
- [18] LIU Chen-yang, CHEN Lian-wen. Tunable photonic crystal waveguide coupler with nematic liquid crystals [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(8):1849-1851.
- [19] YAROSHCHUK O. Light-induced liquid crystal alignment on the non-organic isotropic surface [J]. Materials Science and Engineering C, 1999, 26(8): 119-121.
- [20] HO K M, CHAN C T, SOUKOULIS C M. Existence of photonic gap in periodic structures [J]. Physical Review Letters, 1990, 65(25):3152-3155.

兵器系统期刊出版管理工作会议在南京召开

2008年4月22日至24日,兵器系统期刊出版管理工作会议在南京召开。兵器系统30多个期刊的主任(社长)/主编参加了会议。会上,集团公司期刊管理办公室徐亚洲副主任作了《提高质量,改革创新,推动兵器工业期刊出版工作向前发展》的报告。报告内容共分三部份,一、兵器系统期刊出版工作近年来取得的成绩;二、当前期刊出版工作面临的形势;三、当前存在的主要问题以及今后主要的任务。徐亚洲副主任还公布了“兵器系统优秀科技期刊奖”的评选结果,《应用光学》荣获集团公司优秀科技期刊二等奖。

会上,中国兵工学会许毅达副秘书长作了《办好科技期刊,为兵器工业营造良好的自主创新环境》的专题报告。报告分析了我国科技期刊的发展现状,指出了我国科技期刊在管理、办刊理念、办刊质量方面存在的问题,介绍了中国科协为提高中国科技期刊所做的工作及取得的成效。许毅达副秘书长在报告中结合兵器系统科技期刊的现状,提出应重视和加强科技期刊工作,建议加强期刊管理、改善办刊条件,营造创新氛围,培养创新人才,将科技人员发表论文作为量化成员单位考核标准及人才评价指标之一。

会上,获得兵器系统优秀科技期刊一等奖的《工程塑料应用》杂志社孙安垣社长、《计算机集成制造系统》编辑部张淑坤主任以及《汽车维修与保养》李强主编分别介绍了办刊经验,受到与会人员的好评。在座谈时,《应用光学》编辑部杨大军副主编谈了期刊近3年来的快速进展。据万方数据报告,《应用光学》2007年的影响因子比2005年提高了2倍多,达到0.54。这是《应用光学》编辑部坚持联合办刊、开门办刊、刊外办刊和读者、作者、编委、审稿专家、编辑互动的结果。杨大军副主编还汇报了《应用光学》今后的发展思路,面向经济,面向国防,服务社会,服务企业,继续坚持以期刊质量为中心,努力使期刊国际化,增强编辑的业务能力,积极争取优秀稿件、广告,缩短发稿周期,争取较短时间内实现期刊的社会、经济双效益。