

# 可调光子晶体研究进展\*

王东栋 王永生<sup>†</sup> 张希清 何志群

(北方交通大学光电子技术研究所 北京 100044)

**摘要** 可调光子晶体是光子晶体研究中的一个新领域. 文章简单介绍了当前可调光子晶体的发展状况, 阐述了其调制机理及存在的问题, 同时论述了可调光子晶体的发展趋势.

**关键词** 可调光子晶体, 光子禁带, 液晶, 光子双晶体, 介电系数

## Tunable band gaps in photonic crystals

WANG Dong-Dong WANG Yong-Sheng<sup>†</sup> ZHANG Xi-Qing HE Zhi-Qun

(Institute of Optoelectronic Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** Tunable photonic crystals is a new field in photonic crystals research. A brief introduction is given of tunable photonic crystals development. The tuning mechanisms and potential problems are discussed. Current trends of development are reviewed.

**Key words** tunable photonic crystals, photonic band gaps, liquid crystals, photonic bicrystals, dielectric constant

光子晶体<sup>[1,2]</sup>, 又称光子禁带材料, 是将两种不同介电常数的介质材料在空间按一定的周期(尺寸在光波长量级)排列所形成的一种人造“晶体”结构. 光子晶体中介电系数是空间的周期函数, 类似于半导体材料中的电子在周期性势场作用下形成能带结构, 如果介电系数对光子的周期性调制足够强, 在光子晶体中传播的光子能量也会有带状结构, 带与带之间会出现光子“禁带”, 频率落在禁带中的光子不能在晶体中传播. 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<sup>[3]</sup>. 一般来说, 介质材料折射率比值越大, 光子禁带效应越明显. 目前已知的最有前途的晶格结构就是“金刚石结构”(密堆积面心立方结构).

自1987年Yablonovitch提出光子晶体的概念以来, 光子晶体在零阈值激光器、光波导、发光二极管等方面显示了巨大的应用价值<sup>[3]</sup>, 有关光子晶体的研究得到了广泛的关注. 这些应用都基于光子晶体的两个基本特征: 抑制自发辐射<sup>[1]</sup>和光子局域态<sup>[2]</sup>.

目前所做的光子晶体绝大多数都是不可调的.

光子晶体做出来以后, 禁带的位置、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、晶格结构等参数, 从而实现光子禁带的自如控制, 那必然将产生一系列的新效应、新现象, 使基于光子晶体的光调制器成为可能. 近年来陆续有人提出液晶光子晶体<sup>[4-11]</sup>、光子双晶体<sup>[12,13]</sup>、超导光子晶体<sup>[22]</sup>等新型的禁带可调光子晶体. 与传统的光电器件相比, 可调光子晶体最大的优势就在于尺寸小, 易于集成, 非常适合应用于将来的“集成光路”中<sup>[14]</sup>.

### 1 液晶光子晶体

由于液晶分子的几何形状和排列方式, 使它成为很好的光学各向异性材料, 而且液晶分子的排列方式对外界环境变化(如温度、电场、磁场等)非常敏感. 以向列相(N相)液晶为例<sup>[15]</sup>, N相液晶是由长径比很大的棒状分子所组成(见图1), 分子质心

\* 北方交通大学2002年校重点基金资助项目  
2003-03-24收到初稿, 2003-05-20修回

† 通讯联系人, E-mail: YShWang@center.njtu.edu.cn

随机分布,在分子长轴方向上则保持相互近于平行.液晶分子彼此平行排列的平均倾向用单位矢量  $n$  表示,称为指向矢( director ). 如果外界温度改变达到相变点(从 N 相到各向同性相)液晶分子取向变得完全无序,或者外加电(磁)场,液晶分子长轴随着外场方向偏转,这些都会使液晶的指向矢发生改变,液晶材料的折射率也随之变化.

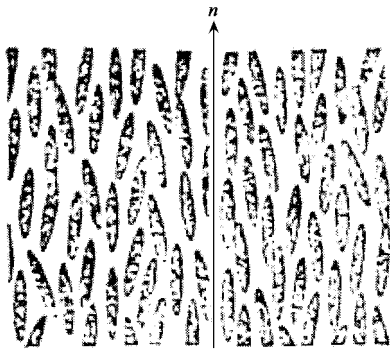


图1 向列相液晶示意图<sup>[15]</sup>

液晶材料优异的调制特性使它得到了广泛应用,如制作连续可调的彩色滤光器<sup>[16]</sup>、有效腔长可调的光学微腔<sup>[17]</sup>等.在自组装法制作蛋白石( opal )光子晶体<sup>[18]</sup>取得成功以后,很快就有许多研究组把不同的液晶材料填充到光子晶体结构中<sup>[4-11]</sup>去,制成液晶光子晶体的复合结构,然后通过改变外界条件(温度、电场、磁场等)来研究光子禁带的变化特性.例如1999年Katsumi Yoshino等人将N相液晶ZLI1132( Merck )掺入到通过沉积 SiO<sub>2</sub> 小球制成的三维光子晶体的缝隙中<sup>[7]</sup>,由于与 SiO<sub>2</sub> 折射率比值的显著变化(液晶材料的折射率远大于空气),液晶光子晶体的禁带位置与掺入前相比,有一明显的红移(见图2).值得注意的是,光子禁带的位置还随着温度的变化而移动,尤其在该液晶从各向同性相到向列相的相变点(70℃左右)附近,液晶的折射率发生阶变(见图3),光子禁带也有一明显的移动(见图2插图).这些实验初步显示了液晶光子晶体的可调性,但这种基于蛋白石结构的液晶光子晶体调制效率很低,甚至不能产生或者关闭完全的光子禁带.

模板法( template method )制作反蛋白石结构( inverse opal )光子晶体技术<sup>[19]</sup>出现以后, Kurt Busch 和 Sajeev John 提出在反蛋白石结构光子晶体中部分掺入液晶<sup>[4]</sup>,理论计算和实验结果都表明,这种液晶光子晶体的调制效率有了大幅提高,在光子晶体研究领域引起了充分的关注<sup>[5]</sup>.

反蛋白石结构,即低介电系数的小球(通常是

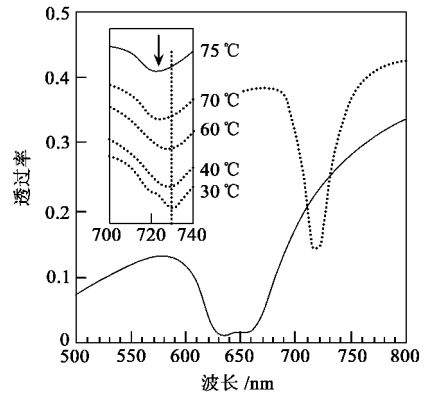


图2 液晶光子晶体的透射谱(实线为掺入前;虚线为掺入后),插入图是透射谱随温度的变化特性<sup>[7]</sup>

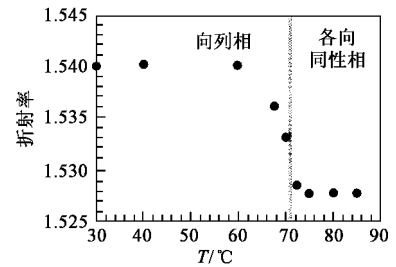


图3 蛋白石光子晶体中 N 相液晶折射率的温度特性<sup>[7]</sup>

空气小球)以面心立方密堆积结构分布于高介电系数的连续介质中,应用于该领域有着蛋白石结构不可比拟的优越性:首先,空隙占空比的显著提高(从约24%增至近76%)大大增加了液晶的掺入量,使整个复合结构的调制性更强;其次,空隙尺寸的增大使液晶分子受空间限制更小,外界条件变化时的重新取向更为自由,液晶折射率变化也更明显,而且不同材料表面对液晶分子的作用也不同,模板法这种方法本身也大大拓宽了制作三维光子晶体的选材范围,使我们有可能按照实际需要来选择合适的材料.

2002年, Masanori Ozaki<sup>[11]</sup>小组采用模板法用聚合物( polymer )材料制作了反蛋白石光子晶体,并且掺入液晶材料5CB(见图4).与原来蛋白石结构中施加电场前液晶分子近于杂乱的取向相比,该结构中液晶分子的平均取向保持了基本平行(见图4),并且在施加电场后液晶分子长轴的重新取向能够与外场近于完全平行,结果禁带位置在不大的电场(270V)作用下向短波方向移动了近40nm(图5),充分显示了反蛋白石结构的优越性.

液晶光子晶体的优势在于这种器件尺寸小、调制电压低、耗电功率小、容易集成.但是由于液晶材

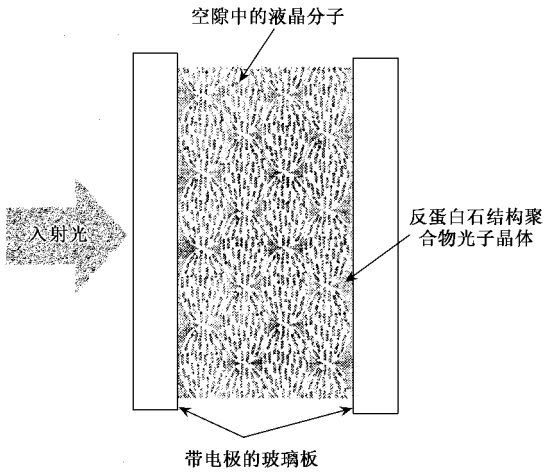


图4 掺入液晶的反蛋白石结构聚合物光子晶体示意图  
(无外场时空隙中液晶分子平均取向大致平行,垂直于入射光;在外电场作用下液晶分子重新取向,外场足够强时取向与入射光近于完全平行<sup>[11]</sup>)

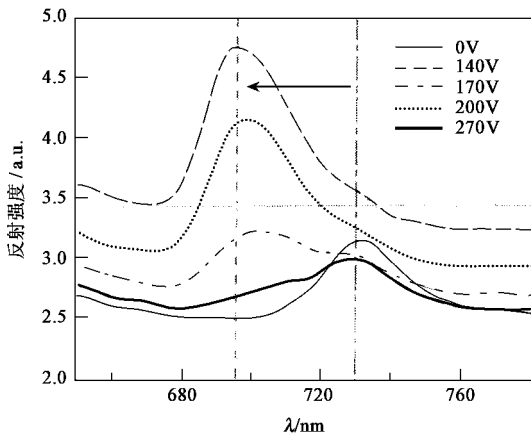


图5 掺入液晶的反蛋白石结构聚合物光子晶体光子禁带的电压调制特性<sup>[11]</sup>

料调制的快慢取决于液晶分子重新取向的速度( ms 量级 ),所以液晶光子晶体调制的响应时间较长。

## 2 半导体光子晶体

由洛伦兹( Lorenz )色散理论,半导体材料中介电系数  $\epsilon(\omega)$  与材料的等离子体频率  $\omega_p$  有关,而  $\omega_p$  又与材料中自由载流子的浓度  $N$  有很大关系,这样就有可能通过改变半导体中自由载流子的浓度来改变介电系数  $\epsilon(\omega)$ 。Halevi 等人考虑并计算了自由载流子浓度与光子禁带之间的关系<sup>[20]</sup>,结果表明,在自由载流子浓度足够高的情况下,光子禁带对自由载流子浓度变化存在强烈依赖性(图6),Halevi 据

此提出,可通过电流注入或温度变化来改变自由载流子浓度,从而调制半导体光子晶体的光子禁带。2001年,Leonard<sup>[21]</sup>等人用强激光(  $\text{GW}/\text{cm}^3$  量级 )变密度激发硅材料光子晶体的方法来改变自由载流子浓度,观察到了不同激发密度下光子禁带的显著变化,实现了对光子晶体的全光超快速调制。

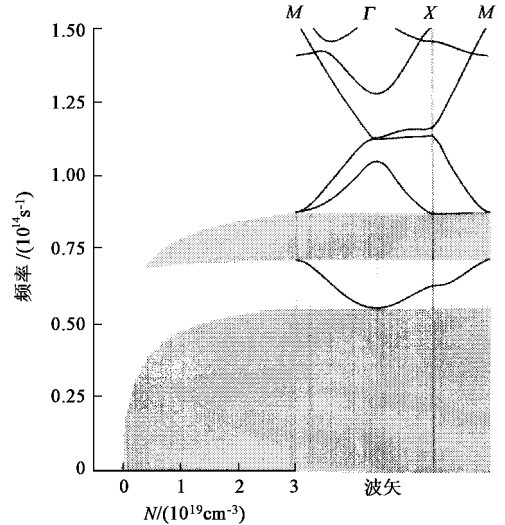


图6 光子禁带随自由载流子浓度变化关系图(左侧)和自由载流子浓度  $N = 3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  时光子禁带图(右侧),阴影部分为光子禁带<sup>[20]</sup>

## 3 光子双晶体

近来 Kopperschmidt P 等人提出了制作光子双晶体的设想。对于各向异性的单晶体来说,光在晶体中传播的方向不同,折射率就不同。多晶是由大量的微小单晶体(称为晶粒)随机堆砌而成,相对取向不同的晶粒交界面会出现折射率的不同。如果晶粒间相对取向发生周期性变化(如图7所示),在整个多晶体中就出现了折射率的周期性变化,这样就实现了用单一的介质材料来制作光子晶体<sup>[12]</sup>。这种光子双晶体与一般光子晶体最大的不同在于,光在晶体中传播的方向不同,界面两侧折射率的比值也会发生变化,一些方向上界面两侧折射率可能相同。

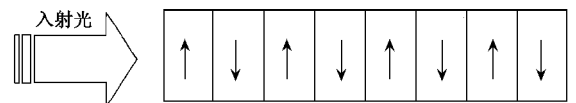


图7 一维光子双晶体示意图<sup>[12]</sup>

一些单晶体在外电场作用下光学常数会发生很

大变化. 如果用这些电光晶体来制作上述的光子双晶体, 在外电场的作用下, 晶粒的光学常数分别发生改变, 晶粒界面处的折射率对比随之发生显著变化, 从而实现了用外电场对光子禁带的调制<sup>[13]</sup>. Koperschmidt 计算了一维光子双晶体在不同电压下的透射率(图8). 随着外加电场的改变, 光子双晶体的光子禁带也随之产生或者消失.

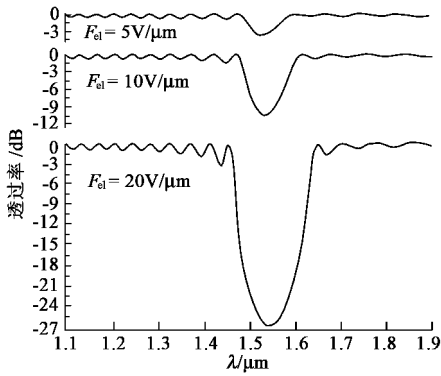


图8 一维光子双晶体在不同电压下的透射谱<sup>[13]</sup>

与液晶光子晶体相比, 光子双晶体最大的优势就在于调制速度大大提高( ns 量级), 但它所需的外电场较高. 这种新型可调的光子晶体有可能用于高速光开关、光调制器等.

### 4 超导光子晶体

在该领域中国科学家也做出了自己有特色的工作. 南京大学的闵乃本等人提出了用超导材料制作可调光子晶体的设想<sup>[22]</sup>. 超导材料中介电系数方程可表示为

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{c^2}{\omega^2 \lambda_L(0)^2} \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^4 \right],$$

基于超导材料介电系数的这种温度依赖性, 超导光子晶体表现出了良好的温控特性. 他们用平面波展开法计算了二维四方结构超导光子晶体中 E 模式电磁波在不同温度下的禁带结构. 计算结果表明, 当温度降到  $0.86T_c$  ( $T_c$  为超导体超导相变温度) 以下时, 由于最低光子能带的平坦化, 在最低和第二能带之间出现了完全的光子禁带(见图9), 并且光子禁带宽度受温度变化影响很大(见图10), 光子禁带宽度可以在 0.0 到 0.157 之间连续调节, 当温度高于  $0.86T_c$  时, 光子禁带完全消失. 超导光子晶体的这种温度依赖性可用来做温控光开关.

### 5 其他方法

除了上述方法以外, 人们还尝试通过改变“晶

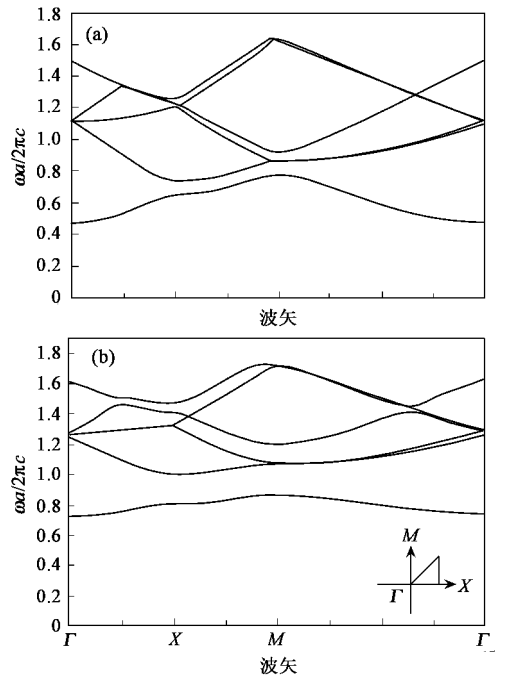


图9 超导光子晶体的不同温度下的能带结构 (a) 温度为  $0.9T_c$  (b) 温度为  $0.01T_c$ , 最低能带明显平坦化<sup>[22]</sup>

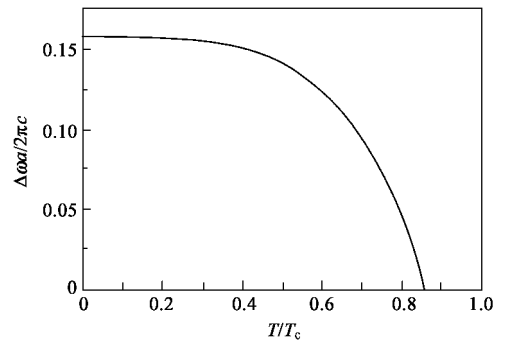


图10 超导光子晶体光子禁带宽度的温控特性<sup>[22]</sup>

格”结构来调节光子禁带. 例如当蛋白石结构光子晶体受到较弱外力的作用时, 以面心立方结构密排的蛋白石结构会发生轻微的偏移, 这可能会导致双重的效应: 首先由于受力后光子晶体对称性下降, 受力前原结构的赝势可能成为完全的光子禁带, 其次晶体结构的变化必然使光子禁带的位置和宽度发生变化, 从而实现了利用外力来调节光子禁带<sup>[23]</sup>.

对于各向异性的铁电或者铁磁材料来说, 其介电系数(或磁导率)受外电场(磁场)影响很大, 一般表示为  $\epsilon(E)$  [ $\mu(H)$ ]. 如果用这些材料来制作光子晶体, 在外场作用下, 介电系数  $\epsilon$  (或磁导率  $\mu$ ) 的显著变化必将对光子禁带产生影响, 目前在该领域进

行了大量的理论探讨,得出了一些很有意义的结果<sup>[24-25]</sup>。

## 6 展望

由于光子具有的速度快、可实现交叉通过和并行处理等优势,用光子代替电子来传输和处理信息已成为信息技术发展的梦想,光纤的广泛应用是朝这个方向迈出的重要一步。但是目前在信息的输入端和输出端还必须将信息转换为电信号并通过电子电路来处理,这个过程在很大程度上成为限制信息传输和处理速度的一个“瓶颈”。要解决这个问题就必须发展能够直接处理光信号的“集成光路”,将光源、光调制器、光波导等光功能器件集成到“芯片”尺寸级的器件中去,这是传统的光调制器无法满足的。基于各种不同机理的可调光子晶体的出现,使这个问题得到了解决。目前液晶光子晶体发展相对比较成熟,已经出现了不同结构、不同填充材料的液晶光子晶体,其他可调光子晶体目前还处于理论探讨的远景阶段。随着各种可调光子晶体技术的最终成熟并投入使用,必将对信息产业和其他相关产业产生重大影响。

### 参 考 文 献

[ 1 ] Yablonovitch E. *Phys. Rev. Lett.* ,1987 ,58 :2069  
 [ 2 ] John S. *Phys. Rev. Lett.* ,1987 ,58 :2486  
 [ 3 ] Krauss , Thomas F , De La Rue *et al.* *Progress in Quantum Electronics* ,1999 ,23 51  
 [ 4 ] Busch K , John S. *Phys. Rev. Lett.* ,1999 ,83 967

[ 5 ] Yablonovitch E. *Nature* ,1999 ,401 539  
 [ 6 ] Yoshino K , Satoh S , Shimoda Y *et al.* *Jpn. J. Appl. Phys.* , 1999 ,38 1961  
 [ 7 ] Yoshino K , Shimoda Y , Nakayama K *et al.* *Appl. Phys. Lett.* ,1999 ,75 932  
 [ 8 ] Leonard S W , Mondia J P , John S. *Phys. Rev. B* ,2000 ,61 : R2389  
 [ 9 ] Kang D , Clark N A , Baughman R H *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2001 86 #052  
 [ 10 ] Mertens G , Roder T , Huber K *et al.* *Appl. Phys. Lett.* ,2002 , 80 1885  
 [ 11 ] Ozaki M , Shimoda Y , Kasano M *et al.* *Adv. Mater.* ,2002 ,14 ( 7 ) :514  
 [ 12 ] Kopperschmidt P , kimerling L C. *Phys. Rev. B* ,2000 , 63 : 045101-1  
 [ 13 ] Kopperschmidt P. *Appl. Phys. B* ,2001 ,73 717  
 [ 14 ] Andrew Watson. *Science* ,1998 ,282 207  
 [ 15 ] 阿力甫·沙吾提. *新疆师范大学学报* ,2001 20( 4 ) :71[ Ali-fu · shawuti. *Journal of Xinjiang Normal University* ,2001 20 ( 4 ) :71( in Chinese ) ]  
 [ 16 ] Sharp G D , Johnson K M , Doroski. *Opt. Lett.* ,1990 ,15 523  
 [ 17 ] Becker H , Friend R H , Wilkinson T D. *Appl. Phys. Lett.* , 1998 72 1266  
 [ 18 ] Lawandy N M , Balachandran R M , Gomes A S L *et al.* *Nature* ,1994 ,368 #36  
 [ 19 ] Imhof A , Pine D J. *Nature* ,1997 ,389 948  
 [ 20 ] Halevi P , Ramos-Mendieta F. *Phys. Rev. Lett.* ,1999 75 932  
 [ 21 ] Leonard S W , van Driel H M , Birner A *et al.* *IEEE Wednesday Afternoon/Qels 2001/* ,159  
 [ 22 ] Chen Y B , Zhang C , Zhu Y Y *et al.* *Mater. Lett.* ,2002 55 : 12  
 [ 23 ] Busch K , John S. *Phys. Rev. E* ,1998 58 3896  
 [ 24 ] Alex Figotin , Godin Yuri A. *Phys. Rev. B* ,1998 57 :2841  
 [ 25 ] Scalora M , Dowling J P , Bowden C M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1994 ,73 1368

### · 物理新闻与动态 ·

## 青蛙利用水波来捕捉昆虫

### ( Good vibrations help a frog locate tasty prey )

生活在南非的一种青蛙会利用水面的振动来测定昆虫的位置,并将它们捕获。青蛙在水中是不可能看清周围环境的,但它们利用昆虫在水面上的晃动所形成的水波来取得信息。水波告诉青蛙昆虫所在位置的方向,同时还能告诉青蛙这是哪一类昆虫所形成的水波。那么青蛙是如何测定这些信息的呢?原来在青蛙的表皮上有180个感应器,一般称之为侧向线器官(lateral-line organ)。这些感应器分布在青蛙的眼睛、头部和颈部的表皮与体内。

为了研究这个问题,德国慕尼黑大学的Leo van Hemmen教授和他的研究组提出了一个简单的模型来解释南非青蛙的这种功能。模型计算给出了引人注目的结果。从模型中看出,青蛙从有限的180个灵敏的感应器所接收到的信息中可

以重建出水波的波形。侧向线器官内有4—8个标志性的结构能将水波发生偏转,每发生一次偏转就会刺激其周围的毛状细胞生成一个电脉冲讯号,脉冲与偏转在时间上是同步的。将这180个感应器所发出的电脉冲讯号综合起来,利用这样丰富的信息量足以使青蛙对其周围所产生的水波形状作出相当精确的估计,这项综合工作,甚至在侧向线器官中有某些部分的功能不发挥作用的情况下也能让青蛙正确无误地测出波形。如果有两个昆虫在不同方向上产生水波时,模型也显示出了青蛙是如何对两个昆虫定位并区别出它们在种类上的差别,因此这个模型显然能应用于其他动物的探测器官上,例如鳄鱼就具有与青蛙类似的探测器官。

(云中客 摘自 Physical Review Letters ,10 October 2003 )