

光折变空间孤子研究进展*

张冰志 崔虎 余卫龙[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室 广州 510275)

摘要 光折变空间孤子是目前非线性光学领域的热点课题之一. 光折变空间孤子以其低功率、快响应和强非线性效应等特点以及在全光开关、光波导、光互联等方面的潜在应用而受到人们的关注. 文章详细介绍了光折变空间孤子的产生机制并综述其研究历史及发展现状.

关键词 非线性光学, 光折变空间孤子, 综述, 光折变效应, 光致异构空间孤子

Photorefractive spatial solitons

ZHANG Bing-Zhi CUI Hu SHE Wei-Long[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract Photorefractive spatial solitons are becoming an important field in nonlinear optics, and are the focus of considerable research due to their interesting features of formation at very low power, fast response and large nonlinearity, besides potential applications in all-optical switching, optical waveguides, optical interconnects etc. We describe the physical mechanism of the formation of photorefractive spatial solitons, and review the history and current status of research in this field.

Keywords nonlinear optics, photorefractive spatial solitons, review, photorefractive effect, photoisomerization spatial solitons

1 引言

孤子现象是由英国科学家 Russell 在 1834 年发现的^[1]. 当时他在一条浅且窄的运河中观察到一个突起水峰可以保持其轮廓和速度不变在河中向前传播很长一段距离. 这个发现引起了科学家的关注和兴趣. 因为当时人们认为, 一个完整的水波应该是一部分突起在水面上而另一部分在水面之下. 这种只有突起部分的水波是不是一种完整的波呢? 为什么这种波传播时速度不变? 这个问题直到 1895 年才由 Korteweg 提出著名的 KdV 方程给予了理论上的解释, 孤子才为学术界普遍接受并得到了广泛的研究^[2]. 如今, 孤子、分形、混沌已经成为非线性领域的三大研究热点^[3].

物理系统中的孤子具有在传播过程中能量不扩散, 波形不发生改变的特点, 所以早期人们通常称孤子为“孤立波”. 直到 1965 年 Zabusky 和 Kruskal 在

数值计算中发现等离子体中孤立波在碰撞过程中体现出粒子的一些性质, 所以将其命名为孤子. 孤子的概念被提出以后, 孤子理论得到迅猛的发展^[4], 究其原因孤子现象广泛存在于各种物理系统中. 涡旋星系的密度波、浅水波、等离子体中的电荷密度波、生物分子系统(如 DNA 链)中的激子波、超流氦-3 中的声波、玻色-爱因斯坦凝聚中的物质波等等, 都与孤子有关^[5].

光学领域中所发现的孤子称为“光学孤子”. 光脉冲或光束在线性介质中传播时会在时间上或空间上展宽. 时间的展宽是因为材料的色散效应, 空间的展宽是由于光束的衍射效应. 如果在非线性介质中传播的光脉冲或光束, 其时间或空间上的展宽能够被介质的非线性效应所抵消, 则可以形成“光学时

* 国家自然科学基金(批准号 10574167)资助项目

2008-01-14 收到初稿 2008-02-18 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: shewl@mail.sysu.edu.cn

间孤子”或“光学空间孤子”^[6-10]. 光脉冲在块材介质中传播,其时间和空间上可能同时被展宽. 如果介质的非线性效应恰好同时平衡时间和空间上的展宽效应,则形成“光学时空孤子”,也称“光学子弹”^[11,12]. 在共振情况下的光孤子现象也被发现,例如自感应透明孤子、腔共振孤子等等.

2 光折变效应及其光折变空间孤子

光学空间孤子由 Chiao^[13]等人首次提出. 他们首次在理论上证明介质中的非线性克尔(Kerr)效应可以平衡光束传播的衍射效应,从而形成光学空间孤子. 由于克尔效应比较弱,要产生克尔孤子需要很大的光强(一般需要 $1\text{MW}/\text{cm}^2$ 的光强),不利于实际的应用,所以人们一直在寻找弱光下能形成的孤子. 自从 1992 年 Segev 等人首次在理论上预言光折变空间孤子^[14]以来,由于光折变孤子可以在很低的功率(微瓦至毫瓦^[15]),很短的响应时间内(最短可达到 ns 数量级^[16])形成的特点,以及其在全光开关^[17,18]、光波导^[19-24]等方面的潜在应用价值,光折变空间孤子的研究形成了光学空间孤子研究的新一轮热潮.

所谓光折变空间孤子是指光束在光折变材料中由于光折变效应与光束的衍射发散作用相互平衡而形成一种无衍射的向前传播的光束. 图 1 为光折变铌酸锶钒(SBN)晶体中观察到的孤子光束和自由衍射光束图像. 从图 1 可以很清楚地看到,自由衍射光束的直径随传播距离的增大而增大,光束逐渐变宽,能量向周围散开(图 1 的下部);而孤子光束沿着传播方保持不变形状,能量不发散(图 1 的上部).

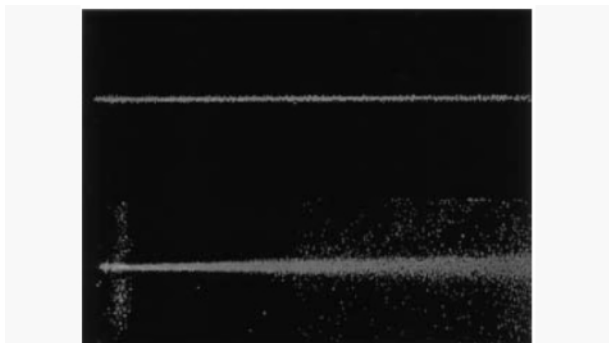


图 1 从一块长 5.5mm 的 SBN 晶体顶部观察到的 $10\mu\text{m}$ 宽的孤子传播图(图上部)和光束在晶体中自由衍射图(图下部). 图的左边为光束的入射面,右边为出射面^[46]

光折变效应是由贝尔实验室的 Ashkin 等人于

1965 年意外发现的^[25]. 其定性的过程可概括如下: 在光的照射下,光折变材料内部激发出载流子,这些载流子因在外加电场或光伏场作用下而发生漂移以及由于浓度梯度而发生扩散,从光照区迁移至暗区,然后被陷,空间电荷分离形成空间电荷场,再通过线性电光效应——泡克尔斯效应(Pockels effect)使材料的折射率发生相应的变化. 直到 1979 年, Kukhtarev 等人提出带输运模型来描述光折变效应,人们才能定量地解释所观察到的光折变现象^[26]. 根据带输运模型,单色信号光的光折变过程由速率方程、连续性方程、电流方程和泊松方程来描述,

$$\frac{\partial N_D^+}{\partial t} = (N_D - N_D^+) (\chi S_s I_s + \beta) - \gamma n N_D^+, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial N_D^+}{\partial t} + \frac{\nabla \cdot \mathbf{J}}{q}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = q\mu n \mathbf{E}_{sc} + k_B T \mu \nabla n + \mathbf{J}_{ph}, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}_{sc}) = q(N_D^+ - N_A - n), \quad (4)$$

其中 n 是载流子数密度, N_D 是总施主数密度, N_D^+ 是已电离的施主数密度, N_A 是为补偿已电离施主的受主数密度, I_s 是入射的信号光光强, \mathbf{E}_{sc} 是晶体内的空间电荷场, S_s 是信号光的光激发截面, β 是热激发速率, γ 是复合率系数, μ 是载流子的迁移率, \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{J}_{ph} 为光伏电流密度, ϵ 是低频介电常数, q 是载流子电荷, k_B 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度. 考虑一维稳态情况,此时信号光产生的光伏电流密度 $J_{ph} = \kappa_s S_s I_s$, 其中 κ_s 为信号光的有效 Glass 系数. 设外加电场 E_0 沿 x 方向,信号光沿 z 方向传播,即边界条件为: $E_{sc}(x \rightarrow \infty, z) = E_0$, $I_s(x \rightarrow \infty, z) = I_\infty$. 此时由 Kukhtarev 方程组在线性激发近似和线性复合近似下($N_D^+ \approx N_A$)可以得到空间电荷场的表达式:

$$E_{sc} = E_0 \frac{I_\infty + I_d}{I_s + I_d} - \frac{k_B T}{q} \frac{d}{dx} \ln(I_s + I_d) - E_p \frac{I_s - I_\infty}{I_s + I_d}, \quad (5)$$

其中 $E_p = \kappa_s \gamma N_A / q\mu$, $I_d = \beta / S_s$. (5)式第一项表示外加电场作用下漂移机制对空间电荷场的贡献,第二项为扩散机制的贡献,第三项为光伏效应的贡献. 空间电荷场通过线性电光效应使材料的折射率发生变化为 $\Delta n = -n_b^3 \gamma_{eff} E_{sc} / 2$, 其中 n_b 为材料对应入射光的本底折射率, γ_{eff} 为有效电光系数. 为了获得较大的非线性效应,我们希望晶体具有较大的 γ_{eff} . 通常选择信号光束为非常光(e光)入射到光折变晶体中,即信号光波矢方向垂直于光轴方向,光波电场分量方向平行于光轴方向.

理论上,为了得到光折变空间孤子,我们必须要知道光束在光折变晶体中演化所满足的方程.众所周知,光是一种电磁波,它的行为是由 Maxwell 方程组支配.因此,将光折变效应引起的折射率变化规律和 Maxwell 方程组相结合就可以得出光束在光折变晶体中演化所满足的方程.考虑单色的线偏振光,且在傍轴近似和慢变振幅近似条件下,可以得到入射光束的电场分量满足如下的广义非线性薛定谔方程:

$$i2k \frac{\partial E}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 E + \frac{2k^2}{n_b} \Delta n \cdot E = 0, \quad (6)$$

其中 $k = k_0 n_b$, k_0 是入射光在真空中的波数, E 是光场的复振幅,则形式上的光强 $I_s = |E|^2$, $\nabla_{\perp}^2 (= \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2)$ 是拉普拉斯算符.如果考虑的是 $(1+1)$ 维空间孤子,则 $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2$. 空间孤子解就是非线性偏微分方程(6)式的一类“特殊解”.通常设 $(1+1)$ 维孤子解的形式为 $E(x, z) = U(x) \exp(i\Gamma z)$, 其中实函数 $U(x)$ 是描述孤子的横向分布,实数 Γ 是所谓的孤子传播常数,其物理意义是非线性引起的光束“相移”.可以看出, $|E(x, z)|^2 = U^2(x)$, 即随着光束在 z 轴的传播,光强分布不变.所以空间孤子的特殊之处在于物理上的特点——能量不扩散,波形不变.另外要说明的是,在线性情况下,由 Maxwell 方程组同样可以得到波形不变的解,即所谓的“不衍射”光束,例如,平面波,正(余)弦波, X 波(是一种不衍射光束,因为它的形状与字母 X 相似而得名), Bessel 波, Mathieu 波等等^[27-32], 但这些波的能量都要延伸到无穷远边界处,严格地说是不能在物理上实现的.而对于光空间孤子(除了暗孤子),能量是局域在有限宽度内,无穷远边界场的大小为零.

可以看出,光折变晶体中空间电荷场的形成过程是比较复杂的,以至于我们很难直接体会到光折变效应与光束的衍射之间的相互平衡而形成空间孤子的过程.抛开复杂的数学公式,我们可以唯象地用两种简单的物理图像来理解空间孤子的形成.第一是透镜效应,第二是波导效应.光通过非线性效应改变介质折射率,从而改变其光学厚度(光程),等效作用就是在介质中诱导出光学透镜.如果所形成透镜的聚焦效应恰好平衡衍射效应,则光束保持轮廓不变即光学空间孤子形成.波导效应是指光在非线性介质中传播时,诱导出非均匀的折射率改变,从而形成了像平面波导或光纤一样的波导结构,而入射光恰好是诱导出波导的传输模,这样光就会被约束

在波导中,从而形成光空间孤子.

现已发现并广泛研究的光折变空间孤子有以下几种基本类型:准稳态孤子、屏蔽孤子和光伏孤子、屏蔽光伏孤子.其中准稳态孤子是瞬态的,其他类型孤子都是稳态孤子.稳态孤子可以用(5)式和(6)式很好地描述.当光束不是太窄或者光折变材料的扩散效应不强的情况下,通常忽略(5)式中的扩散项.否则必须考虑扩散效应对光束的影响.

2.1 准稳态孤子

准稳态孤子是人们最早发现的一类光折变空间孤子. Segev 和 Crosignani 等人^[14]的理论模型表明,入射光束的不同空间频率的平面波相互干涉,并通过光折变效应在光折变材料中写入折射率光栅,使介质折射率发生改变,进而形成空间孤子.准稳态孤子是一种时变孤子,它只存在于光折变光栅形成之后和外加电场被显著屏蔽之前的时间窗口里.晶体等效于一个电阻和一个电容的串联.我们利用 RC 电路的充电、放电这个简明的物理图像来说明准稳态孤子的形成机制.信号光激发载流子,载流子在外电场(或控制光诱导的直流光伏场)作用下漂移,形成空间电荷场,达到完全屏蔽时, $E_{sc} \propto E_{ext} / (I_s + I_d)$, 其中 E_{ext} 是外电场或光伏场.在电容充电放电过程中,晶体中的电场强度为

$$E(t)_{on} = E_{sc} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right],$$

$$E(t)_{off} = E_{sc} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right), \quad (7)$$

其中晶体电阻 $R = L / (qnS)$, 电容 $C = S\epsilon / L$. L 为晶体沿着电场方向的长度, $n \propto (I_s + I_d)$ 为激发的载流子浓度, S 为晶体的横截面积.这样我们就从理论上得到了某时刻的晶体中的电场分布及对应的折射率分布.在光折变光栅形成之后和外加电场被显著屏蔽之前的时间窗口里,利用(6)式和孤子边界条件便可以得到准稳态孤子解.

准稳态光折变空间光孤子的首例实验观察是由 Duree 等人^[33]在 1993 年在掺杂铋酸锶钡(SBN)晶体中做出的.他们发现准稳态孤子在微瓦的入射功率下即可产生,其横向尺寸只依赖于入射光束的横向尺寸,而不依赖于入射光束的绝对光强.1994 年, Segev 等人^[34]给出了瞬态孤子稳定性的理论分析,并且通过实验证明了在小的微扰范围内瞬态孤子是稳定的.1995 年, Duree 等人^[35]首次观察到一维准稳态暗孤子和二维的涡旋孤子. Morin 等人^[36]通过

实验证明,准稳态光折变空间光孤子可在块状光折变材料中形成波导,这种波导可以在很低的光功率下形成,但它可诱导光折变不敏感的高功率长波光束,且能长时间保留下来.1996年,Fresengeas等人^[37]对光折变空间孤子的时变行为(即随时间而变的电场分布、电场振幅等)进行了详细的理论分析并通过实验得到了验证.1998年,他们又报道了一种形成一维准稳态亮孤子的新机制^[38].1999年,Maufoy等人^[39]利用Kukhtarev带传输模型研究了一维准稳态孤子及其相关性质.2000年,我们小组^[40]首次发现并报道了不需要外加电场的一维全光准稳态孤子.2001年,我们又报道了全光双准稳态孤子的实验结果^[41],这种新的准稳态孤子具有显著的光开关效应.图2显示了在掺铜的钾钠铌酸锶钡(Cu:KNSBN)光折变晶体中形成的一维全光准稳态孤子.孤子形成的时间窗口是11—46s.

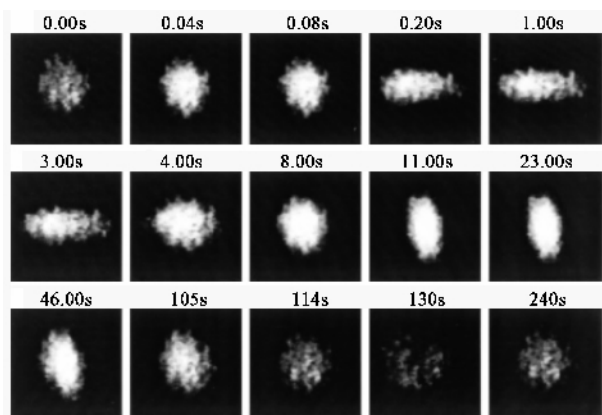


图2 Cu:KNSBN光折变晶体中的准稳态孤子.信号光和诱导光波长分别是514.5nm和488nm,对应光强分别为100 μ W和380mW^[40]

后来,Chauvet^[42]等人又在铌酸锂(LiNbO₃)晶体中观察到准稳态暗孤子,他们发现铁掺杂浓度和激发模分布对光孤子宽度有一定的影响.

2.2 屏蔽孤子

屏蔽型光折变空间孤子是一种稳态孤子,起源于光激发载流子(电子或空穴)对外加电场的非均匀屏蔽.当晶体没有光伏效应并忽略扩散效应的情况下,由(5)式知道稳态时晶体内部的空间电荷场 $E_{sc} \propto E_0 / (I_s + I_d)$.实验上一般需要另外一束均匀的背景光 I_b ($\gg I_d$),这样 $E_{sc} \propto E_0 / (I_s + I_b)$.在线性电光效应作用下,折射率变化 $\Delta n \propto -\gamma_{eff} E_0 / (I_s + I_b)$.下面我们介绍一个简明的物理图像来理解屏蔽孤子形成机制.如果我们把晶体看作一块平均电

阻率为 σ 的电阻,则在外加电场下通过晶体的电流密度 $J = E_0 / \sigma$.另外我们根据欧姆定律的微观表达式可以得到 $J = q\mu n E_{sc}$,其中 $n \propto (I_s + I_b)$ 为激发的载流子浓度.这样我们就可以直接得到 $E_{sc} \propto E_0 / (I_s + I_b)$.这个简单的分析和带传输模型得到的结果完全相同.对于 $\gamma_{eff} > 0$ 的晶体来说,其自聚焦或是自散焦的性质由外加电场 E_0 的方向决定.当外加电场沿着光轴方向($E_0 > 0$)时,光束光强越大的地方折射率变化(Δn)越大,晶体是自聚焦型的;当外加电场逆着光轴方向($E_0 < 0$)时,光束光强越大的地方折射率变化(Δn)越小,晶体是自散焦型的.如果 $\gamma_{eff} < 0$,情况则反过来.这种光学空间孤子最早是由Segev等人^[43]在1994年从理论上预言的.他们计算了亮、暗孤子的光强分布及存在曲线.

1995年,Christodoulides和Carvalho^[44]从描述光折变效应的带传输模型出发,推导出了有外加电场时光折变晶体中的空间孤子演化方程,给出了方程的数值积分形式的稳态亮、暗及灰空间孤子解.通过孤子的动态演化行为模拟,他们还发现当孤子受到小的扰动时,屏蔽孤子是稳定的.当入射光束横截面与孤子分布明显不同或有较大差别时,光束在晶体中发生压缩和膨胀的过程.同年,Shih等人^[45]用514.5nm的氩离子激光,在加有电场的SBN光折变晶体中,观察到了稳态的二维亮孤子,这是人们首次在实验中观测到的屏蔽孤子.

1996年,Shih等^[46]在SBN光折变晶体中产生了(2+1)维稳态亮屏蔽孤子,观察到了屏蔽孤子的自弯曲现象,此外,他们还成功地在晶体中写入了(2+1)维波导.Singh和Christodoulides^[47]利用数值模拟方法研究了稳态条件下亮屏蔽孤子的动态演化过程以及屏蔽孤子的稳定性,并进一步探索了空间电荷场的高阶项对亮屏蔽孤子的影响^[48],结果表明,在电荷场高阶项作用下,尤其是在强外加电场作用下,光束的自弯曲效应非常明显.Carvalho等^[49]利用微扰分析法研究了由光折变介质内电荷扩散效应引起的亮屏蔽孤子的自弯曲过程,发现亮孤子光束在传播过程中,光束中心沿着一条抛物线的轨道向前传播.同年,Christodoulides等人^[50]证明在有外加电场的光折变介质中存在着稳态非相干耦合亮-亮、暗-暗及亮-暗屏蔽孤子对,这种孤子对是由一对具有偏振方向和波长都相同但互不相干的光束耦合而成的.同年,Chen等人^[51,52]在有外加电场的SBN晶体中,观察到了这种非相干耦合屏蔽孤子对.另外一个重要的实验是,Mitchell等人在SBN光折

变晶体中实现了部分非相干光束的自陷. 他们在入射激光射入晶体前先通过一个旋转漫反射器, 该反射器在光束横截面处引入随机相位, 这样光束的空间相干性被破坏. 当这束光入射到光折变晶体时, 在适当条件下形成的光束自陷即是部分非相干孤子.

1997年, Christodoulides 等人^[53]作出了部分非相干屏蔽孤子的相干密度理论. 同年, Mitchell 和 Segev^[54]利用光谱范围为 380—720nm 的白炽灯作为光源, 在有外加电场的光折变晶体中观察到了时间和空间都不相干的白光光束的自陷, 并形成了非相干白光屏蔽孤子. 如今人们已经提出多种理论来描述部分非相干孤子, 例如非相干自洽模理论^[55]、互相关密度函数理论^[56]、Winger 变换理论^[57]等等. 最近人们发现这些理论实际上是等价的^[58, 59]. 1998年, Chen 等人报道了部分空间非相干屏蔽暗孤子的实验观察^[60], Christodoulides 等人则作出了非相干屏蔽暗孤子的理论^[61]. 这些实验和理论上的发现标志着人们对非线性光学的认识由相干到非相干的一个飞跃. 光折变材料独特的性质为实现非相干空间孤子提供了很好的平台, 促进了相干非线性光学向非相干非线性光学的发展.

1999年, Belic 等人^[62]讨论了非相干屏蔽孤子的缠绕与不缠绕问题, 他们用数值模拟的方法发现, 非相干屏蔽孤子的相互作用通常会导致光束首先发生旋转, 接着衰减, 最终融合成一个孤子. 2000年, 他们又发现屏蔽孤子具有与粒子相类似的特性, 并用经典粒子的观点研究了屏蔽孤子的传播问题^[63]. 之后, 他们又研究了三维屏蔽孤子之间的各向异性相互作用, 详细地探讨了初始分离位置和入射角度对相互作用行为的影响^[64]. 2004年, Rotschild 等人^[65]报道了考虑扩散效应时屏蔽孤子沿相反方向传播的相互作用行为. 他们发现扩散效应对孤子对向传播有较大的影响, 其中一束光束表现为被吸引, 另外一束表现为被排斥.

目前, 关于屏蔽孤子的研究主要向晶格孤子的方向发展. 晶格孤子是在离散孤子的基础上发展起来的. 离散孤子只是对应半无限带隙中的晶格孤子. 早期人们在实验中观察到的离散孤子大多是在砷化铝镓 (AlGaAs) 波导阵列中^[66—70]. AlGaAs 的光学克尔非线性需要很大的光强 (实验上通常采用脉冲激光), 而且波导阵列的制作只能局限在 (1 + 1) 的维度上, 这些因素给离散孤子的实际应用带来了不少麻烦. 2002年, Efremidis 等人提出了在光折变材料中利用光学诱导光学晶格的方法来实现晶格孤

子^[71]. 很快 Fleischer 等人就在实验上实现了 (1 + 1) 和 (2 + 1) 维的光学晶格^[72, 73]. 光折变材料中形成孤子需要的光强仅是 mW/cm^2 量级, 所以在光折变材料中利用光学诱导光学晶格的方法实现晶格孤子近年来引起人们广泛关注.

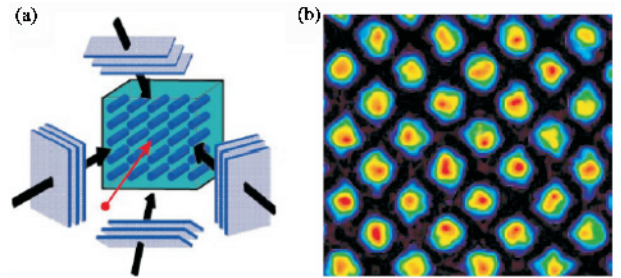


图3 (a) 典型的光诱导光学晶格实验配置 (b) 晶体出射面的光学晶格^[73]

2003年, Fleischer 首次在光诱导光学晶格中实现二维的基本晶格孤子. 他们的实验原理如图 3(a) 所示. 由四束接近平面波的光束 (晶格光束) 相互干涉在光折变晶体表面形成周期性调制的光斑 (如图 3(b) 所示), 另外一束探测光 (孤子光束) 在晶体中形成孤子. 他们实验的成功之处是充分利用了光折变晶体 SBN 的各向异性的特点, 当晶格光束在晶体中是正常 (o) 光而孤子光束是非常 (e) 光, 晶格光束在晶体中传播所感受的非线性远远小于孤子光束, 因为 SBN 晶体的电光系数 $r_{33} = 1340 \gg r_{13} = 67 \text{ pm}/\text{V}$. 这样晶格光束在晶体中的传播接近于线性传播, 而孤子光束是非线性传播. 这种方法的本质是全息法. 晶格孤子的理论是折射率调制只发生在横向两个维度上, 传播方向上要保持不变. 图 3(b) 中的晶格光束在传播过程中是线性的, 但它仍能保持其形状不变, 这似乎和孤子的概念一样. 这里要指出的是, 它们有着本质的区别. 孤子是传播过程中衍射和非线性的平衡所形成的一种能量局域态, 其传播过程轮廓不变. 全息法形成的晶格光束是属于一种“不衍射”光束 (正弦光束), 它在传播过程中轮廓也不变, 但它不是一种能量局域态. 实际上, 连续介质中的孤子我们可以理解为平面波“晶格”中的孤子, 而现在所讨论的晶格孤子则是在正弦晶格中的孤子. 如今, 另外一些“不衍射”光束诱导的晶格, 如 Bessel, Mathieu 晶格中所形成孤子也引起了人们的关注^[74—81].

利用全息法生成的光学晶格存在调制不稳定因素. 为了克服这个因素, 陈志刚小组利用光学掩模部

分非相干光的方法生成光学晶格^[82, 83]。这样形成的晶格更加稳定,更容易用来观察晶格孤子。他们实验选用 SBN 光折变晶体,光源用氩离子($\lambda = 488\text{nm}$)激光器。强度调制板(mask)将经过旋转散射板(diffuser)的部分相干光进行空间调制,然后通过透镜成像,在晶体的入射面上形成二维周期性光强分布。另外,从同一激光器分束出来的相干光束作为孤子光束,与点阵光并行传播。在此基础上他们很快观察到了二维的基本离散孤子、矢量离散孤子、偶极孤子、涡旋孤子和类项链孤子^[82, 84-86],等等。

2.3 光伏孤子

光伏孤子也是一种稳态孤子,它是由光伏效应引起的光伏电流形成光伏场,进而诱导晶体发生折射率改变而形成的。当晶体没有外加电场和背景光,同时忽略扩散效应的情况下,由(5)式可知稳态时晶体内部的空间电荷场 $E_{sc} \propto -E_p(I_s - I_\infty)/(I_s + I_d)$ 。在线性电光效应作用下,折射率变化 $\Delta n \propto \gamma_{\text{eff}}E_p(I_s - I_\infty)/(I_s + I_d)$ 。对于 $\gamma_{\text{eff}} > 0$ 的晶体来说,其自聚焦或是自散焦的性质由光伏场 E_p 的正负性决定。当光伏场沿着光轴方向($E_p > 0$)一般为空穴型光伏晶体,例如 Cu:KNSBN 晶体,光束光强越大的地方折射率变化(Δn)越大,晶体是自聚焦型的;当光伏场逆着光轴方向($E_p < 0$)一般为电子型光伏晶体,例如 Fe:LiNbO₃ 晶体,光束光强越大的地方折射率变化(Δn)越小,晶体是自散焦型的。

关于光伏孤子最早报道要追溯到 1994 年,Valley 等^[87]推导出了光束在光伏介质中的传播方程,给出了亮、暗孤子解,并对光伏孤子的宽度随光强的关系作了探讨。1995 年,Taya 等人^[88]用波长为 488nm 在 LiNbO₃ 晶体中观察到了宽度约 20 μm 的光伏暗孤子。在进一步的研究中,他们又观察到了由多个(1+1)维的暗光伏孤子^[89]形成的 Y 结形状的波导,这些波导对被诱导的光束有分束作用,而且可以在暗处长时间保存。1997 年,Chen 等人^[90]报道了二维光伏涡旋孤子的实验结果,这些孤子可以是圆形的也可以是椭圆形的,他们还观察到了涡旋光束的调制不稳定性。同年,Segev 等人^[91]从理论上分析了闭路和开路条件下的(1+1)维的亮、暗空间孤子,他们发现用一个外加电阻可以实现对光伏暗孤子的开关效应,但外加电阻对光伏亮孤子影响较小。1999 年,我们小组^[92]在掺铜的钾钠铋酸锆钡(Cu:KNSBN)光折变晶体中首次观察到了(2+1)维的亮光伏孤子,并利用背景光引入的等效电场对

所观察到的孤子的特性进行了解释。图 4 是主要实验结果。第一列和第二列是水平方向的光强分布。第一列最上一个子图是没有晶体时出射面处的光强分布,第二列最上一个子图是入射面处的光强分布。第一列下面三个子图是没有背景光时出射面处的光强分布(仅发生微弱自聚焦);第二列下面三个子图是有背景光时出射面处的光强分布(形成孤子)。第三列是垂直方向的光强分布,其中右边最上一个子图是入射面处的光强分布,下面三个子图是有背景光时出射面处的光强分布(形成孤子)^[92]。

2000 年,刘思敏、凌振芳等人^[93]对维持圆对称的光伏涡旋孤子作了分析,并给出了光伏光折变介质中空间电荷场的形式解,讨论了(2+1)维光束在自散焦的 Fe:LiNbO₃ 晶体中的传播行为。研究发现,在适当的近似条件下,光伏光折变非线性可以支持圆对称的涡旋孤子。2002 年,他们小组在 Fe:LiNbO₃ 晶体中实现了涡旋孤子,并研究了由它们写入的圆形和椭圆形波导性质^[94]。并对光折变晶体中的写入波导进行了广泛而深入的研究。其实,早在 1996 年,他们已经在 Fe:LiNbO₃ 晶体中写入一维和二维的条形和格形波导^[95, 96];1998 年成功地写入圆形和环形波导^[97]。他们这种写入波导的方法和技术有良好的应用前景。2006 年,Peng Zhang 等人在 Fe:LiNbO₃ 晶体中利用两个相互垂直的一维暗光伏孤子诱导出条形波导^[98]。同年,卢克清等人^[99]详细地综述了基于光折变光伏孤子诱导光波导的特性。

最近,我们发展了光伏孤子的理论,提出了考虑背景光光伏效应的光伏孤子理论。考虑背景光时, $E_{sc} \propto -E_p(I_s + RI'_b)/(I_s + I'_b + I_d)$,其中 $I'_b = S_b I_b / S_s$, S_s , S_b 分别为信号光和背景光的光激发截面, $R(= \kappa_b / \kappa_s)$ 为背景光和信号光的 Glass 系数之比。这样光伏晶体的非线性性质不仅与 E_p 有关,同时还与 R 系数有关。对于自聚焦型(自散焦型)的光伏晶体,我们可以通过选择背景光波长调节 R 系数使之成为自散焦(自聚焦)晶体。2001 年,我们^[100, 101]首次在折射率改变为正的晶体(Ce:KNSBN)中观察到光伏暗孤子,并发现改变 R 参数,使之小于 1 或大于 1 可以实现亮、暗孤子的转换,如图 5 所示。

最近我们^[102]又从理论和实验上研究了折射率改变为负的 LiNbO₃ 中光伏亮孤子的存在性,发现在信号光和背景光的四种偏振组合状态下都能够形成亮孤子。考虑背景光效应,光伏晶体可以实现自散焦

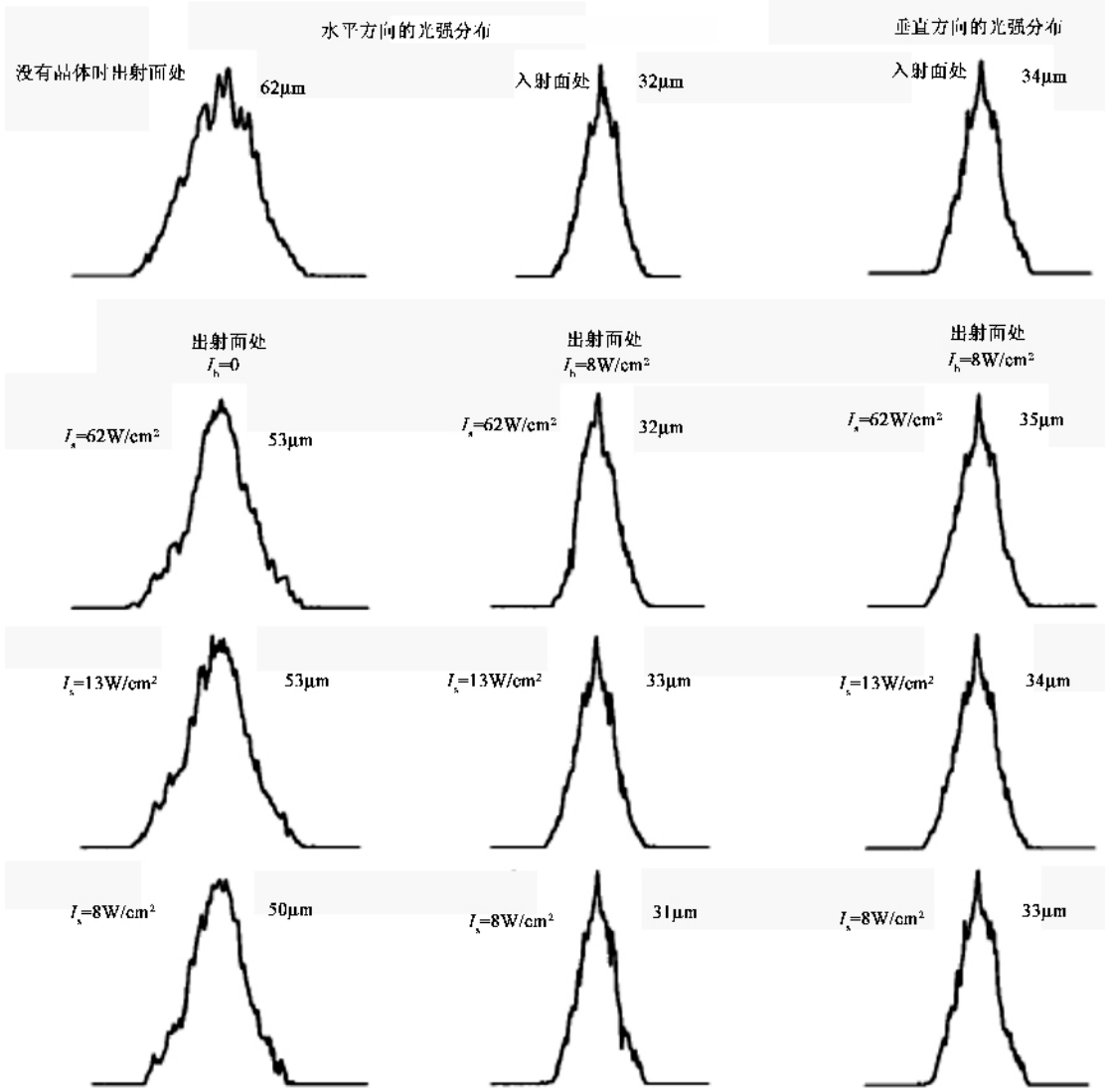


图 4 Cu:KNSBN 光折变晶体中二维亮光伏孤子的主要实验结果

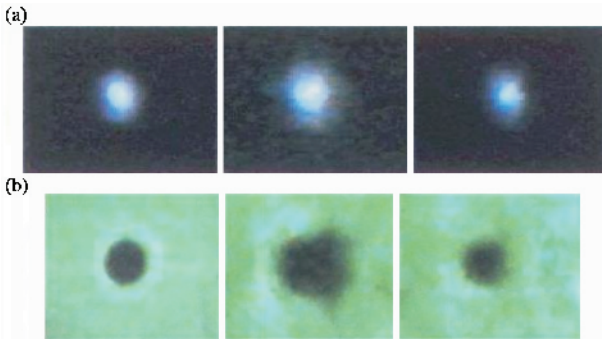


图 5 在折射率改变为正的 光折变晶体 Ce:KNSBN 中形成亮孤子和暗孤子 (a)形成亮孤子 (b)形成暗孤子^[100]. 第一列为晶体入射面的信号光光斑,第二列是没有背景光时晶体出射面处信号光光斑,第三列是有背景光时形成孤子的信号光光斑

与自聚焦互换,这类似于在玻色-爱因斯坦凝聚中利用外加磁场或者外加光场通过 Feshbach 共振效

应来改变 s 波色散长度的大小和正负,从而改变非线性性质^[103-106]. 光伏孤子为我们认识其他一些非线性领域的孤子现象提供了一个很好的模拟实验环境.

2001 年,我们小组从理论上预言了复色光光伏空间孤子的存在,并在实验上观察到了这种孤子^[107]. 复色光光伏孤子的稳定性随后分别利用半解析和数值方法给予证明^[108,109]. 2002 年,我们又从理论和实验上研究了由部分空间非相干光形成的部分空间非相干光伏空间孤子^[110]. 此后,我们利用数值方法仔细研究了光伏孤子的相互作用,包括同向作用,反向作用以及多孤子作用,并给出了定性的物理解释^[111-113]. 2006 年, Lee 等人^[114]用实验的方法研究了不同相位差对光伏孤子相互作用行为的影响,他们在 Fe:LiNbO₃ 中观察到了同相的两个光伏

亮孤子相互吸引并融合,而反相时相互排斥.

当光伏晶体具有较强的扩散效应时,例如 Cu : KNSBN 光伏晶体,在光束宽度和晶体扩散长度接近时,我们就必须考虑扩散效应对孤子形成的影响. 光伏光折变非线性效应同屏蔽光折变效应一样是饱和和非线性效应,所以扩散效应对光伏孤子的影响类似对屏蔽孤子的影响. 我们小组研究了扩散对光伏孤子相互作用的影响^[115]. 另外,扩散效应的研究大都针对亮孤子,而对暗、灰孤子研究的则鲜有报道. 最近我们仔细研究了扩散对光伏暗、灰孤子影响. 我们报道这方面的工作后,国外 Christodoulides 小组也独立地发表类似的工作^[116,117].

目前,光伏晶体中的离散孤子也引起人们的关注. 德国克劳斯塔尔工业大学 Kip 小组利用钛扩散技术在 LiNbO₃ 光伏光折变晶体中形成永久的波导阵列,并详细研究了此晶体中形成的光伏离散孤子的性质^[118]. 在实验上,他们发现形成亮或暗光伏离散孤子时,一束与孤子光对向传播的斜入射探测光会被孤子光阻碍而发生反射^[119];在理论上,他们发现在此波导阵列中可以形成两种模式的暗离散孤子^[120]. 最近他们在实验中又观察到这种自散焦的光折变晶体中的高阶孤子^[121].

最近,我们提出利用背景光在光伏光折变晶体中诱导光学晶格,进一步形成光伏晶格孤子^[122]. 同背景光诱导的屏蔽晶格孤子不同之处在于形成光伏晶格孤子的条件(自聚焦或自散焦条件)可以通过改变背景光和孤子光的波长来控制,光伏非线性的强弱可以通过背景光光强来控制. 整个过程是全光的. 理论上,我们在自散焦的 LiNbO₃ 光伏光折变晶体中得到了基本孤子、高阶孤子和偶极孤子,并研究了它们的存在区域和稳定性.

2.4 屏蔽-光伏孤子

有外加电场的非光伏晶体中可以形成屏蔽孤子,而在没有外加电场的光伏光折变晶体中可以形成光伏孤子. 在光伏场和外电场共同作用下而形成的光折变空间孤子称为屏蔽-光伏孤子,它也是一种稳态孤子. 刘劲松、卢克清、侯春风等人^[123-131]证明了在加外电场的光伏光折变晶体中形成屏蔽-光伏孤子,他们认为这种孤子不能简单地等同于屏蔽孤子或光伏孤子,而是兼有这两种孤子的性质. 从形式上讲,屏蔽光伏孤子可看作屏蔽和闭路光伏孤子的统一形式. 从物理上讲,屏蔽孤子可看作屏蔽光伏孤子在外加电场比光伏场强得多时的特例;闭路光

伏孤子可看作屏蔽光伏孤子在外加电场为零时的特例. 由于这种孤子起源于晶体内部空间屏蔽电场对外加电场的非均匀屏蔽和光伏效应两种物理过程的共同作用,因而被称为屏蔽-光伏孤子. 在进一步的研究工作中,刘劲松等人^[125]利用微扰方法,分析了亮屏蔽-光伏孤子在扩散效应作用下的自偏转特性. 理论分析和数值模拟都表明,亮屏蔽-光伏孤子的光束中心沿着一条抛物线轨迹偏转,中心空间频率分量随传播距离线性移动,且空间位移和偏向角都与外加电场与光伏场之和的绝对值成正比. 2000年,他们还还对屏蔽-光伏孤子的稳定性进行了研究. 数值模拟结果表明,当初始入射光束的峰值幅度、宽度或分布函数与孤子光束有微小差别时,入射光束在既有外加电场又存在光伏效应的光折变晶体内传播过程中,可通过自整形而演化成孤子光束,即在小的扰动作用下屏蔽-光伏孤子是稳定的. 但是,当初始入射光束与孤子解具有明显差异(即扰动较大)时,光束在传播的过程中将经历周期性的压缩与膨胀,光束峰值幅度随传播距离而发生振荡;扰动越大,振荡越强烈^[126]. 同年,侯春风等人^[130]又从理论上研究了屏蔽光伏灰孤子的存在性,发现灰孤子也能在有外加电场的光伏晶体中存在. 另外,他们还给出了在小振幅情况(即 $|u|^2 \ll 1$)下的屏蔽-光伏亮、暗孤子解析解,并给出了考虑扩散效应时孤子的自弯曲距离的显式表达式^[131]. 最近,他们又从理论上研究了非相干耦合屏蔽-光伏孤子^[132,133]以及非相干耦合屏蔽-光伏孤子族的存在性和其他性质^[134,135].

2006年,卢克清等人仔细分析了屏蔽-光伏孤子所诱导的光波导的性质,发现由暗屏蔽-光伏孤子诱导的波导只支持一种波导模即单模波导. 当忽略屏蔽效应时,其诱导的波导等效于光伏孤子所诱导的波导;忽略光伏效应时,其诱导的波导则等效于屏蔽孤子诱导的波导^[136]. 同年,Robert Jäger 在用 Fe : LiNbO₃ 晶体做成的棱镜中,利用屏蔽-光伏孤子全反射,形成了零半径的 90° 弯曲波导^[137]. 这可望用于集成光学器件.

2.5 其他类型的光折变空间孤子

2.5.1 具有中心反演对称性的光折变晶体中的光学空间孤子

与非中心对称光折变材料不同,中心对称光折变材料中形成空间孤子时,材料折射率的非线性变化是由克尔效应引起的. 关于具有中心反演对称性

的光折变晶体的首例报道见于 1997 年 Segev 等^[138]的预言,他们从理论上证明了中心对称光折变材料中也可以形成亮、暗空间孤子,并对孤子的存在曲线进行了详细的讨论. 1998 年, DelRe 等^[139]在有外加电场的中心对称钽铌酸锂钾(KLTN)光折变晶体中,观测到了亮空间孤子,实验结果与理论预言吻合得非常好. 同年, Crosignani 等人^[140]研究了无外加偏压时中心对称光折变材料中光束的自聚焦和自陷,发现当晶体在临界铁电转变相附近时,非线性响应与扩散场的平方成正比,此时也能形成光学空间孤子. 2006 年, Ciattoni 等人^[141]又研究了镶嵌在具有体光栅结构的中心对称的光折变材料中的光学空间孤子,并对受轻微扰动的光孤子的传播问题进行了探讨.

2.5.2 光折变聚合物孤子

上世纪 90 年代初,人们发现了有机聚合物光折变材料. 相对于无机光折变材料而言,有机聚合物光折变材料具有成本低廉、容易制造、且可以根据人们需要而进行设计等优点,已受到人们广泛的研究关注. 目前,有机聚合物光折变材料通常分为两类:主客体式和主链侧链式. 其中主客体式是指以某种聚合物为基体,向其中掺杂各种功能小分子,以提供产生光折变效应所必须的各种成分,也称为掺杂型. 这种类型根据基体的种类又可分为:以光学非线性生色团聚合物为基体、以载流子传输体聚合物为基体、以惰性聚合物为基体三种形式. 主链侧链式是把各种功能小分子作为侧链全部聚合在某一聚合物的主链上,也称为全功能型. 其中以光电导聚合物为基体、掺杂高浓度非线性生色团的主客体式聚合物在非线形光学领域得到广泛应用. 其光折变效应表现为:在光照下,材料中的光敏化剂提供了可迁移的电荷,在扩散作用和外加电场作用下,这些电荷被迁移至别处,并在迁移过程中被各种陷阱俘获而固定下来,从而在材料中形成光强调制的空间电荷场,这个空间电荷场进而使聚合物的非线性生色团重新取向,并通过取向增强效应和电光效应使材料的折射率发生改变^[142]. 如果这种材料的折射率改变对光束产生的聚焦作用能够抵消光束的衍射效应,则可以在光折变聚合物材料中形成光学空间孤子. 关于主客体式光折变聚合物可以支持亮、暗空间孤子的首例报道是由 Shih 等人^[143]提出的. 他们详细地分析了亮、暗孤子的存在曲线^[144]. 侯春风等人^[145]则给出了稳态情况下光折变聚合物中光波演化方程的亮、暗和灰孤子解,并讨论了不同孤子态的偏振特性

及孤子宽度与外加电场的关系. 郝中华等人^[146]研究了主客体式光折变聚合物中空间亮孤子的动态演化特性,讨论了振幅微扰和宽度微扰对其传播特性的影响. 结果表明,入射波在较小微扰情况下,孤子波经短距离传播后能够演化为亮孤子波;当微扰较大时,光波不能在聚合物中稳定传播,而是呈现周期性震荡现象. 2003 年, Chen 等人^[147]首次从实验上研究了有机聚合物光折变材料形成光学空间孤子. 不久后,他们又研究了这种材料中空间孤子产生的波导特性^[148]. 2004 年,我们小组^[149]对光折变聚合物中的双色光空间孤子进行了理论分析,证明了具有两个频率成分的信号光束可以在光折变聚合物中形成亮亮、暗暗和亮暗空间孤子.

2.5.3 双光子光折变空间孤子

上述空间孤子的研究都是针对单光子光折变材料. 2003 年, Castro - Camus 等人^[150]提出了一个新的双光子光折变模型. 随后,侯春风等人^[151]率先对基于双光子光折变效应的空间孤子进行了研究. 随后他们预测了亮孤子、暗孤子、灰孤子、非相干耦合亮 - 亮、暗 - 暗及亮 - 暗双光子空间孤子对可以存在于双光子光折变材料中^[152-154]. 最近,卢克清等人预言,不仅灰孤子,灰孤子对和灰孤子簇也可以存在于双光子光折变材料中^[155].

2.5.4 光折变全息孤子

2002 年, Cohen 等人提出了一种新型的光折变空间光孤子:全息孤子^[156]. 形成全息孤子的物理机理是全息聚焦:两束光波在非线形介质中通过干涉而产生折射率光栅,并通过布拉格反射而相互耦合,导致每一束光波能够相干地进入另一光束之中,当被反射的光束相对于原光束来说存在 $\pi/2$ 相位延迟时,就会产生聚焦效应而导致两束光波同时变窄. 当两束光之间的能量耦合是对称的即没有单向的能量传递,这两束光能同时演化成空间孤子. 这时的全息孤子实际上是以孤子对形式存在的. 2003 年,刘劲松提出存在非对称能量传递时形成的全息孤子. 这时只有一束信号光可以演化为空间孤子^[157]. 2004 年,刘劲松得到了对称能量传递情况下的非对称全息孤子,并详细研究了这种非对称全息孤子的存在曲线^[158]. 最近他们小组在 Cu:KNSBN 光伏晶体中观察到了二维全息孤子^[159].

2.5.5 光致异构聚合物空间孤子

光致异构聚合物空间孤子是指利用含有偶氮苯等有机生色团的聚合物的光致异构非线性效应形成的光学空间孤子. 下面简单介绍一下光致异构非线性

性效应. 在含有偶氮苯等有机生色团的聚合物中, 生色团分子可以有两种异构体: 顺态(cis 态)和反态(trans 态)异构体. 以有机生色团为 DR1 和基底为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的聚合物为例, 两种异构体分子结构如图 6 所示.

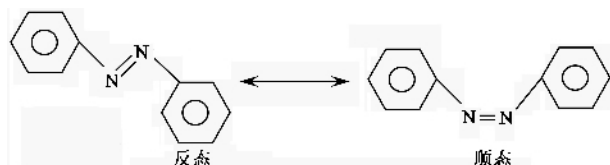


图 6 聚合物中反态(trans 态)和顺态(cis 态)异构体分子

没有光照时, 生色团分子大多数处于 trans 态. 在适当波长的光抽运下, trans 态和 cis 态异构体分子可以互相转化, 这就是光致异构效应. 对同一波长的光, 顺态和反态异构体对应不同的折射率, 因此, 光照可产生光致异构折射率改变. 光致异构折射率改变在适当条件下可为负或正, 且不同光强的光照射时所产生的折射率改变大小也不同, 因此, 我们可以在这种非线性介质中形成暗、灰或亮孤子. 由于它不是由光折变效应引起的折射率改变, 所以光致异构空间孤子不是传统意义上的光折变空间孤子, 而是一种广义的光折变空间孤子. 2004 年, 光致异构聚合物孤子首次被报道^[160], 随后, Bian 等人^[161]在含偶氮苯生色团聚合物中观察到线偏振的光学空间孤子, 孤子诱导的折射率改变可保留数小时, 他们将孤子的机制解释为光诱导的分子重取向. 光致异构聚合物材料的光学性质通常是各向同性的, 形成线偏振孤子时, 可以任意选择光束传播方向和偏振方向, 而光折变材料的各向异性使得形成孤子需要选择一定的方向配置. 另外光致异构孤子可以是圆偏振的, 而光折变材料中是无法实现圆偏振孤子的. 2005 年, 我们小组在这种聚合物中首次在实验上实现了(1+1)维圆偏振光学空间孤子, 并同时给出理论解释^[162]. 更进一步的理论分析发现, 横截面光强分布圆对称、圆偏振的光束也可以形成二维稳定的空间孤子^[163]. 这种圆偏振的光学空间孤子是很有意义的. 2006 年, 我们小组又从理论上分析了光致异构孤子在各种信号光和背景光偏振组态下的存在性, 并给出几种偏振组态的亮、暗孤子存在曲线^[164]. 最近, 我们又分析了光致异构聚合物材料中暗条纹的 Y 型分裂^[165], 并在光致异构角烧孔理论基础上, 采用 Landau - de Gennes 平均场模型, 研究分子重取向对光致异构的影响, 进一步讨论其对光

致异构空间孤子的影响^[166]. 如今, 光致异构空间孤子已引起了人们的重视.

2.5.6 其他类型的空间孤子

目前, 在向列相液晶和铅玻璃中也观察到了光学空间孤子^[167, 168]. 因为支持这类空间孤子的非线性是非局域的, 通常称之为非局域光学空间孤子. 所谓非局域非线性是指介质对光场的非线性响应不仅与该点的光场有关, 而且还与空间中其他点的光场有关^[169-171]. 传统的光折变晶体中的扩散非线性项就是一种非局域非线性. 扩散非线性是不对称的非局域非线性, 而向列相液晶和铅玻璃中非局域非线性是对称的. 理论上已经证明, 多种在局域均匀非线性介质中不能稳定传播的光学空间孤子能够在对称非局域非线性介质中稳定传播, 例如, 环状涡旋孤子、旋转偶极孤子、多极孤子、随机相位孤子(非相干孤子)、Azimuthons(是一种在方位角方向上光强存在空间调制的涡旋孤子)、拉格朗日 - 厄密孤子簇等等^[172-177]. 基于此, 非局域光学空间孤子研究引起了人们的关注. 国内代表性的工作是郭旗研究小组做的^[169, 171].

3 展望

光学空间孤子与时间孤子一样, 因其能量在传播过程中不发散而引起人们的研究兴趣. 如今时间孤子在光纤通信领域已经得到应用; 光折变空间孤子以其低功率、快响应、强非线性效应等特点使其在实验上容易实现, 并为进一步的应用提供了有利的条件. 它在光开关、光波导、光互联等方面的潜在应用价值已引起人们的关注. 如今光折变空间孤子已从早期的低维度、单峰结构、标量孤子的研究转向高维度、复杂结构、矢量孤子的研究. 不同物理领域里的孤子现象背后都存在着相似的理论(数学)结构, 光折变空间孤子容易观察, 有关研究成果使人们能够直接地模拟和研究其他非线性效应和相应的孤子现象. 光折变孤子的研究有广阔的发展前景.

参考文献

- [1] Russell J S. Report of wave. In 14th meeting of the british association for advancement of science. London, 1844, 311—390
- [2] Korteweg D J, De Vries G. Phil. Mag., 1895, 39 #22
- [3] 张祖全. 混沌、分形及孤子. 武汉: 武汉出版社, 2004 [Zhang Z Q. Chaos, Fractal and Soliton. Wuhan: Wuhan Press, 2004 (in Chinese)]
- [4] Zabusky N J, Kruskal M D. Phys. Rev. Lett., 1965, 15 240
- [5] Segev M. Optics & Photonics News, 2002, 2 27

- [6] Hasegawa A , Tappert F. Appl. Phys. Lett. , 1973 , 23 :142
- [7] Hasegawa A , Tappert F. Appl. Phys. Lett. , 1973 , 23 :171
- [8] 陈志刚. 物理 , 2001 , 30 :752 [Chen Z G. Wuli(Physics) , 2001 , 30 :752 (in Chinese)]
- [9] 王晓生, 余卫龙. 中山大学学报(自然科学版) 2001 , 40 : 32 ; 2001 , 40 :16 [Wang X S , She W L. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatSeni , 2001 , 40 :32 ; 2001 , 40 :16 (in Chinese)]
- [10] 侯春风, 李师群, 李斌等. 物理学进展 , 2001 , 21 :237 [Hou C F , Li S Q , Li B *et al.* Progress in Physics , 2001 , 21 : 237 (in Chinese)]
- [11] Malomed B A , Mihalache D. Wise F *et al.* J. Opt. B :Quantum Semiclass. Opt. , 2005 , 7 :R53
- [12] Liu X , Qian L J , Wise F W. Phys. Rev. Lett. , 1999 , 82 : 4631
- [13] Chiao R Y , Garmire E , Townes C H. Phys. Rev. Lett. , 1964 , 13 :479
- [14] Segev M , Crosignani B , Yariv A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1992 , 68 :923
- [15] Duree G C Jr , Shultz J L , Salamoet G J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1993 , 71 :533
- [16] Segev M , Shih M , Valley G C. J. Opt. Soc. Am. B , 1996 , 13 :706
- [17] Shi T T , Chi S. Opt. Lett. , 1990 , 15 :1123
- [18] Shalaby M , Barthelemy A. Opt. Lett. , 1991 , 16 :1472
- [19] Taya M , Bashaw M C , Fejer M M *et al.* Phys. Rev. A , 1995 , 52 :3095
- [20] Taya M , Bashaw M C , Fejer M M *et al.* Opt. Lett. , 1996 , 21 :943
- [21] Law C T , Zhang X , Swartzlander G A *et al.* Opt. Lett. , 2000 , 25 :55
- [22] Kip D , Anastassiou C , Eugenieva E *et al.* Opt. Lett. , 2001 , 26 :524
- [23] Wesner M , Herden C , Pankrath R *et al.* Phys. Rev. E , 2001 , 64 :036613
- [24] Shih M , Chen Z , Mitchell M *et al.* J. Opt. Soc. Am. B , 1997 , 14 :3091
- [25] Ashkin A , Boyd GD , Dziedzic J M *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1966 , 9 :72
- [26] Kukhtarev N V , Markov V B , Odulov S G *et al.* Ferroelectrics , 1979 , 22 :949
- [27] Durnin J. J. Opt. Soc. Am. A , 1987 , 4 :651
- [28] Durnin J , Miceli J J , Eberly J H. Phys. Rev. Lett. , 1987 , 58 :1499
- [29] Lu J , Greenleaf J F. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control , 1992 , 39 :19
- [30] Gutiérrez-Vega J C , Iturbe - Castillo M D , Chávez - Cerda S. Opt. Lett. , 2000 , 25 :1493
- [31] Chávez-Cerda S , Gutiérrez-Vega J C , New G H C. Opt. Lett. , 2001 , 26 :1803.
- [32] Manela O , Segev M , Christodoulides D N. Opt. Lett. , 2005 , 30 :2611
- [33] Duree G , Morin M , Salama G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1995 , 74 :1978
- [34] Segev M , Crosignani B , Di Porto P *et al.* Opt. Lett. , 1994 , 19 :1296
- [35] Duree G , Morin M , Salama G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1995 , 74 :1978
- [36] Morin M , Duree G , Salama G *et al.* Opt. Lett. , 1995 , 20 : 2066
- [37] Fressengeas N , Maufoy J , Kugel G *et al.* Phys. Rev. E , 1996 , 54 :6866
- [38] Fressengeas N , Wolferberger D , Maufoy J *et al.* Opt. Commun. , 1998 , 145 :393
- [39] Maufoy J , Fressengeas N , Wolferberger D *et al.* Phys. Rev. E , 1999 , 59 :6116
- [40] She W L , Lee K K , Lee W K. Phys. Rev. Lett. , 2000 , 85 : 2498
- [41] 余卫龙, 李荣基. 物理学报 , 2001 , 50 :886 [She W L , Lee W K. Acta Physica Sinica , 2001 , 50 :886 (in Chinese)]
- [42] Chauvet M J. Opt. Soc. Am. B , 2003 , 20 :2515
- [43] Segev M , Valley G C , Crosignani B *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1994 , 73 :3211
- [44] Christodoulides D N , Carvalho M I. J. Opt. Soc. Am. B , 1995 , 12 :1628
- [45] Shih M , Segev M , Valley G C *et al.* Electron. Lett. , 1995 , 31 :826
- [46] Shih M , Leach P , Segev M *et al.* Opt. Lett. , 1996 , 21 :324
- [47] Singh S R , Christidoulides D N. Opt. Commun. , 1995 , 118 : 569
- [48] Singh S R , Carvalho M I , Christodoulides D N. Opt. Commun. , 1996 , 130 :288
- [49] Carvalho M I , Singh S R , Christodoulides D N. Opt. Commun. , 1995 , 120 :311
- [50] Christodoulides D N , Singh S R , Carvalho M I *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1996 , 68 :1763
- [51] Chen Z , Segev M , Coskun T H *et al.* Opt. Lett. , 1996 , 21 : 1436
- [52] Chen Z , Segev M , Coskun T H *et al.* Opt. Lett. , 1996 , 21 : 1821
- [53] Christodoulides D N , Coskun T H , Mitchell M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1997 , 78 :646
- [54] Mitchell M , Segev M. Nature , 1997 , 387 :880
- [55] Pasmnik G A. Sov. Phys. JETP , 1974 , 39 :234
- [56] Mitchell M , Segev M , Coskun T *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1997 , 79 :4990
- [57] Hall B , Lisak M , Anderson D *et al.* Phys. Rev. E , 2002 , 65 :035602
- [58] Christodoulides D N , Eugenieva E D , Coskun T H *et al.* Phys. Rev. E , 2001 , 63 :035601
- [59] Lisak M , Helczynski L , Anderson D. Opt. Commun. , 2003 , 220 :321
- [60] Chen Z , Mitchell M , Segev M *et al.* Science , 1998 , 280 :889
- [61] Christodoulides D N , Coskun T H , Mitchell M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 , 80 :5113
- [62] Belić M R , Stepken A , Kaiser F. Phys. Rev. Lett. , 1999 , 82 :544
- [63] Belić M R , Stepken A , Kaiser F. Phys. Rev. Lett. , 2000 , 84 :83
- [64] Stepken A , Kaiser F , Belić M R. J. Opt. Soc. Am. B , 2000 , 17 :68
- [65] Rotschild C , Cohen O , Manela O *et al.* J. Opt. Soc. Am. B , 2004 , 21 :1354
- [66] Eisenberg H S , Silberberg Y , Morandotti R *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 , 81 :3383
- [67] Morandotti R , Peschel U , Aitchison J S *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1999 , 83 :2726
- [68] Ablowitz M J , Musslimani Z H. Phys. Rev. Lett. , 1998 , 87 : 254102
- [69] Morandotti R , Eisenberg H S , Silberberg Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2001 , 86 :3296
- [70] Christodoulides D N , Lederer F , Silberberg Y. Nature , 2003 , 424 :817
- [71] Efremidis N K , Sears S , Christodoulides D N *et al.* Phys. Rev. E , 2002 , 66 :046602
- [72] Fleischer J W , Carmon T , Segev M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2003 , 90 :023902
- [73] Fleischer J W , Segev M , Efremidis N K *et al.* Nature , 2003 , 422 :147
- [74] Kartashov Y V , Vysloukh V A , Torner L. Phys. Rev. Lett. , 2004 , 93 :093904

- [75] Kartashov Y V , Egorov A A , Vysloukh V A *et al.* Phys. Rev. E , 2004 , 70 :065602
- [76] Kartashov Y V , Egorov A A , Vysloukh V A *et al.* J. Opt. B : Quantum Semiclass. Opt. , 2004 , 6 :444
- [77] Kartashov Y V , Egorov A A , Vysloukh V A *et al.* Phys. Rev. E , 2004 , 70 :065602(R)
- [78] Kartashov Y V , Egorov A A , Torner L. Phys. Rev. Lett. , 2005 , 94 :043902
- [79] Wang X , Chen Z , Kevrekidis P G. Phys. Rev. Lett. , 2005 , 96 :083904
- [80] Fischer R , Neshev D N , Lopez-Aguayo S *et al.* Opt. Express , 2006 , 14 :2825
- [81] Kartashov Y V , Egorov A A , Vysloukh V A *et al.* Opt. Lett. , 2006 , 31 :238
- [82] Martin H , Eugenieva E D , Chen Z *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 :123902
- [83] 陈志刚 , 许京军 , 楼慈波. 物理学报 , 2005 , 34 :12 [Chen Z G , Xu J J , Lou C B. Wul(Physics) , 2005 , 34 :12 (in Chinese)]
- [84] Chen Z , Bezryadina A , Makasyuk I *et al.* Opt. Lett. , 2004 , 29 :1656
- [85] Yang J K , Makasyuk I , Bezryadina A *et al.* Opt. Lett. , 2004 , 29 :1662
- [86] Neshev D N , Alexander T J , Ostrovskaya E A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 :123903
- [87] Valley G C , Segev M , Crosignani B *et al.* Phys. Rev. A , 1994 , 50 :R4457
- [88] Taya M , Bashaw M C , Fejer M M *et al.* Phys. Rev. A , 1995 , 52 :3095
- [89] Taya M , Bashaw M C , Fejer M M *et al.* Opt. Lett. , 1996 , 21 :943
- [90] Chen Z , Segev M , Wilson D W *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1997 , 78 :2948
- [91] Segev M , Valley G C , Bashaw M C *et al.* J. Opt. Soc. Am. B , 1997 , 14 :1772
- [92] She W L , Lee K K , Lee W K. Phys. Rev. Lett. , 1999 , 83 :3182
- [93] 凌振芳 , 郭儒 , 刘思敏等. 物理学报 , 2000 , 49 :455 [Ling Z F , Guo R , Liu S M *et al.* Acta Physica Sinica , 2000 , 49 :455 (in Chinese)]
- [94] 陆猗 , 刘思敏 , 汪大云. 物理学报 , 2002 , 51 :1300 [Lu Y , Liu S M , Wang D Y. Acta Physica Sinica , 2002 , 51 :1300 (in Chinese)]
- [95] Zhang G Q , Liu S M , Xu J J *et al.* Chin. Phys. Lett. , 1996 , 13 :101
- [96] Liu S M , Zhang G Q *et al.* Chin. Phys. Lett. , 1996 , 13 :737
- [97] 刘思敏 , 杨小明 , 田国云等. 物理学报 , 1998 , 47 :432 [Liu S M , Yang X M , Tian G Y *et al.* Acta Physica Sinica , 1998 , 47 :432 (in Chinese)]
- [98] Zhang P , Ma Y H , Zhao J L *et al.* Appl. Opt. , 2006 , 45 :2273
- [99] Lu K Q , Zhao W , Yang Y L *et al.* J. Mod. Opt. , 2006 , 53 :2137
- [100] She W L , Lee W K. Opt. Lett. , 2001 , 26 :1093
- [101] 余卫龙 , 王晓生 , 何国岗等. 物理学报 , 2001 , 50 :2166 [She W L , Wang X S , He G G *et al.* Acta Physica Sinica , 2001 , 50 :2166 (in Chinese)]
- [102] She W L , Xu C C , Guo B *et al.* J. Opt. Soc. Am. B , 2006 , 23 :2121
- [103] Fedichev P O , Kagan Y , Shlyapnikov G V *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1996 , 77 :2913
- [104] Kagan Y , Surkov E L , Shlyapnikov G V. Phys. Rev. Lett. , 2004 , 79 :2604
- [105] Inouye S , Andrews M R , Stenger J *et al.* Nature , 1998 , 392 :151
- [106] Roberts J L , Claussen N R , Burke J P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 , 81 :5109
- [107] 王晓生 , 何国岗 , 余卫龙等. 物理学报 , 2001 , 50 :496 [Wang X S , He G G , She W L *et al.* Acta Physica Sinica , 2001 , 50 :496 (in Chinese)]
- [108] 欧阳世根 , 江德生 , 余卫龙. 物理学报 , 2004 , 53 :3033 [Ouyang S G , Jiang D S , She W L. Acta Physica Sinica , 2004 , 53 :3033 (in Chinese)]
- [109] Zhang B Z , Wang H C , She W L. Chin. Phys. , 2007 , 16 :1052
- [110] 王晓生 , 余卫龙. 物理学报 , 2002 , 51 :573 [Wang X S , She W L. Acta Physica Sinica , 2002 , 51 :573 (in Chinese)]
- [111] 江德生 , 欧阳世根 , 余卫龙. 物理学报 , 2004 , 53 :3777 [Jiang D S , Ouyang S G , She W L. Acta Physica Sinica , 2004 , 53 :3777 (in Chinese)]
- [112] 江德生 , 余卫龙. 物理学报 , 2005 , 54 :2090 [Jiang D S , She W L. Acta Physica Sinica , 2005 , 54 :2090 (in Chinese)]
- [113] 江德生 , 余卫龙. 物理学报 , 2007 , 56 :245 [Jiang D S , She W L. Acta Physica Sinica , 2007 , 56 :245 (in Chinese)]
- [114] Lee W K , Chan T S. J. Opt. Soc. Am. B , 2006 , 23 :1920
- [115] 颜利芬 , 王红成 , 余卫龙. 物理学报 , 2006 , 55 :5257 [Yan L F , Wang H C , She W L. Acta Physica Sinica , 2006 , 55 :5257 (in Chinese)]
- [116] 颜利芬 , 王红成 , 张冰志等. 物理学报 , 2007 , 56 :4627 [Yan L F , Wang H C , Zhang B Z *et al.* Acta Physica Sinica , 2007 , 56 :4627 (in Chinese)]
- [117] Carvalho M I , Facão M , Christodoulides D N. Phys. Rev. E , 2007 , 76 :016602
- [118] Chen F , Stepić M , Rüter C *et al.* Opt. Express , 2005 , 13 :4314
- [119] Smirnov E , Rüter C E , Stepić M *et al.* Opt. Express , 2006 , 14 :11248
- [120] Smirnov E , Rüter C E , Stepić M *et al.* Phys. Rev. E , 2006 , 74 :065601(R)
- [121] Smirnov E , Rueter C , Kip D *et al.* Opt. Lett. , 2007 , 32 :1950
- [122] Zhang B Z , Wang H C , Cui H *et al.* J. Opt. A : Pure Appl. Opt. , 2008 , 10 :015101
- [123] 刘劲松 , 卢克清. 物理学报 , 1998 , 47 :1509 [Liu J S , Lu K Q. Acta Physica Sinica , 1998 , 47 :1509 (in Chinese)]
- [124] Liu J S , Lu K Q , Xu J *et al.* Proc. SPIE. , 1998 , 3554 :81
- [125] Liu J S , Lu K Q. J. Opt. Soc. Am. B. , 1999 , 16 :550
- [126] Liu J S , Zhang D Y , Liang C H. Chin. Phys. 2000 , 9 :667
- [127] 卢克清 , 唐天同. 物理学报 , 1999 , 48 :2070 [Lu K Q , Tang T T. Acta Physica Sinica , 1999 , 48 :2070 (in Chinese)]
- [128] Lu K Q , Tang T T , Zhang Y. Phys. Rev. A , 2000 , 61 :053822
- [129] Lu K Q , Zhang Y P , Tang T T *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2001 , 18 :233
- [130] Hou C F , Li Y , Zhang X *et al.* Opt. Commun. , 2000 , 181 :141
- [131] Hou C F , Li Y , Yuan B H *et al.* Chinese Journal of Laser B , 2000 , 9 :551
- [132] 侯春凤 , 袁保红 , 孙秀冬等. 物理学报 , 2000 , 49 :1969 [Hou C F , Yuan B H , Sun X D *et al.* Acta Physica Sinica , 2000 , 49 :1969 (in Chinese)]
- [133] Hou C F , Zhou Z X , Sun X D *et al.* Optik. , 2001 , 112 :17
- [134] Hou C F , Zhou Z X , Yuan B H *et al.* Appl. Phys. B , 2001 , 72 :191
- [135] Hou C F , Li B , Sun X D *et al.* Chin. Phys. , 2001 , 10 :310
- [136] Lu K Q , Zhang M Z , Zhao W *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2006 , 23 :2770
- [137] Jäger R , Gorza S P , Cambournac C *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2006 , 88 :061117
- [138] Segev M , Agranat A. J. Opt. Lett. , 1997 , 22 :1299
- [139] DelRe E , Crosignani B , Tamburrini M *et al.* Opt. Lett. , 1998 , 23 :421

- [140] Crosignani B , DelRe E , Porto P D *et al.* *Opt. Lett.* , 1998 , 23 912
- [141] Ciattoni A , Rizza C , DelRe E *et al.* *Opt. Lett.* , 2006 , 31 : 1690
- [142] Moerner W E , Silence S M *et al.* *Chem. Rev.* , 1994 , 94 127
- [143] Shih M F , Sheu F W. *Opt. Lett.* , 1999 , 24 1853
- [144] Sheu F W , Shih M F. *J. Opt. Soc. Am. B* , 2001 , 18 785
- [145] 侯春风,阿不都热苏力,杜春光等. *物理学报*, 2001 , 50 : 2159[Hou C F , Abdurusul , Du C G *et al.* *Acta Physica Sinica* , 2001 , 50 2159 (in Chinese)]
- [146] 郝中华,刘劲松. *物理学报*, 2002 , 51 818[Hao Z H , Liu J S. *Acta Physica Sinica* , 2002 , 51 818 (in Chinese)]
- [147] Chen Z , Asaro M , Ostroverkhova O *et al.* *Opt. Lett.* , 2003 , 28 2509
- [148] Asaro M , Sheldon M , Chen Z *et al.* *Opt. Lett.* , 2005 , 30 : 519
- [149] 王晓生,余卫龙. *光学学报*, 2004 , 24 507[Wang X S , She W L. *Acta Optica Sinica* , 2004 , 24 507 (in Chinese)]
- [150] Castro - Camus E , Magaña L F. *Opt. Lett.* , 2003 , 28 1129
- [151] Hou C F , Pei Y B , Zhou Z X *et al.* *Phys. Rev. A* , 2005 , 71 : 053817
- [152] Hou C F , Zhang Y , Jiang Y Y *et al.* *Opt. Commun.* , 2007 , 273 544
- [153] Zhang Y , Hou C F , Sun X D. *Chin. Phys.* , 2007 , 16 159
- [154] 张宇,侯春风,孙秀冬. *物理学报*, 2007 , 56 3261 [Zhang Y , Hou C F , Sun X D. *Acta Physica Sinica* , 2007 , 56 3261 (in Chinese)]
- [155] Lu K Q , Zhao W , Yang Y *et al.* *Appl. Phys. B* , 2007 , 87 : 469
- [156] Cohen O , Carmon T , Segev M *et al.* *Opt. Lett.* , 2002 , 27 : 2031
- [157] Liu J S. *Opt. Lett.* , 2003 , 28 : 2237
- [158] 刘劲松. *物理学报*, 2004 , 53 3014[Liu J S. *Acta Physica Sinica* , 2004 , 53 3014 (in Chinese)]
- [159] Liu J S , Liu S X , Zhang G Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.* , 2007 , 91 11113
- [160] Wang X S , She W L , Lee W K. *Opt. Lett.* , 2004 , 29 277
- [161] Bian S , Kuzyk M G. *Appl. Phys. Lett.* , 2004 , 85 1104
- [162] Wang X S , She W L. Wu S Z *et al.* *Opt. Lett.* , 2005 , 30 : 863
- [163] Wang X S , She W L. *Phys. Rev. E.* , 2005 , 71 026601
- [164] Wang X S , She W L , Lee W K. *J. Opt. Soc. Am. B* , 2006 , 23 212
- [165] 黎扬钢,王晓生,余卫龙等. *物理学报*, 2005 , 54 5663 [Li Y G , Wang X S , She W L *et al.* *Acta Physica Sinica* , 2005 , 54 : 5663 (in Chinese)]
- [166] Zhang B Z , Wang H C , She W L. *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* , 2007 , 9 395
- [167] Assanto G , Fratolocchi A , Peccianti M. *Opt. Express* , 2007 , 15 5248
- [168] Rotschild C , Cohen O , Manela O *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2005 , 95 213904
- [169] Guo Q , Luo B , Yi F *et al.* *Phys. Rev. E* , 2004 , 69 016602
- [170] Xie Y Q , Guo Q. *Opt. Quant. Electron.* , 2004 , 36 1335
- [171] Ouyang S G , Guo Q , Hu W. *Phys. Rev. E* , 2006 , 74 : 036622
- [172] Briedis D , Petersen D E , Edmundson D *et al.* *Opt. Express* , 2005 , 13 435
- [173] Lopez-Aguayo S , Desyatnikov A S , Kivshar Y S *et al.* *Opt. Lett.* , 2006 , 31 1100
- [174] Rotschild C , Segev M , Xu Z *et al.* *Opt. Lett.* , 2006 , 31 : 3312
- [175] Lopez-Aguayo S , Desyatnikov A S , Kivshar Y S. *Opt. Express* , 2006 , 14 7903
- [176] Buccoliero D , Desyatnikov A S , Krolikowski W *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2007 , 98 : 053901
- [177] Cohen O , Buljan H , Schwartz T *et al.* *Phys. Rev. E* , 2006 , 73 : 015601

· 物理新闻和动态 ·

超越原子核滴线

近来发现了几种新的重同位素,至少其中之一超出了中子滴线.在以核内的中子数为横坐标,以质子数为纵坐标的核素图上,在原子核的丰质子一侧和丰中子一侧,各有一条边界线,分别称为质子滴线和中子滴线,超出滴线外的原子核中的核子是不能束缚在一起的.然而,目前人们对核力的了解还不足以用理论准确计算出滴线的位置.这就需要通过实验来寻找可能存在的原子核.

最近在美国 Michigan State 大学国家超导回旋加速器实验室(NSCL)上进行的一项实验中,用一种钙离子束轰击钨靶,生成了大量的不同的核素,用灵敏的探测器对这些核素进行了鉴别.两个新发现的核素镁-40 和铝-43 并没有什么新奇之处.但是另一个核素铝-42 是很不寻常的,因为从理论上讲,对于这样大的原子核,其所具有的奇数个质子和奇数个中子是不能束缚在一起的.

这几个新发现的核素在几毫秒内就衰变掉了,但是从核的标准来讲,这时间已经算相当长了.为什么要研究这些瞬间即逝的原子核呢?虽然在自然界并不存在这些核,但它们在恒星中或新星中产生重元素(包括那些组成地球和我们身体的重元素)的过程中起着一定作用.负责这项研究工作的 Thomas Baumann 认为,可能还存在着更重的铝的同位素,值得去探索核素图上新的稳定岛,而不应仅仅探索元素周期表上最边缘的稳定岛.有关论文发表在 *Nature* , 25 October 2007 上.

(树华 编译自 Physics News Update Number , 25 October 2007)