

[17] Yin J P, Zhu Y F, Wang Y Z *et al.* Chin. Phys. Lett., 1999, 16(5):350-352  
 [18] Mamaev A V, Saffman M, Zozulya A A. Phys. Rev. Lett., 1996, 76(13):2262-2265

[19] Gahagan K T, Swartzlander Jr G A. Opt. Lett., 1996, 21(11):827-829  
 [20] Padegett M, Allen L. Phys. World, 1997(9):35-38  
 [21] Truscott A G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82(7):1438-1441

## 二阶非线性串级效应及其全光晶体管作用\*

李涛 田建国 周文远 张春平 张光寅

(南开大学物理学院光子学中心 天津 300071)

**摘要** 二阶非线性串级效应,特别是基频光波通过串级过程(二次谐波产生过程和随后的频率下转换过程)获得的相移,是实现全光信号处理的一条非常有希望的途径.文章对二阶非线性串级效应的物理原理和基于此的全光晶体管的研究进行了综合介绍.

**关键词** 二阶非线性串级效应,全光晶体管

### CASCADED SECOND-ORDER NON-LINEAR EFFECTS AND ALL-OPTICAL TRANSISTOR ACTION VIA CASCADED SECOND-ORDER NONLINEARITIES

LI Tao TIAN Jiann Guo ZHOU Wen Yuan ZHANG Chun-Ping ZHANG Guang-Yin

(*Photonics Center, Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

**Abstract** Cascaded second-order non-linear optical effects, specifically the phase-shift that a fundamental frequency wave experiences through cascading during second-harmonic generation and the successive down-conversion, are a promising route to all-optical signal processing. The physical principle of cascaded second-order nonlinear optical effects and their applications in all-optical transistor action are reviewed.

**Key words** cascaded second-order non-linear effects, all-optical transistor

## 1 引言

随着光通信、光计算和光学信息处理技术的发展,急需解决快速的全光信息处理技术.以开关器件为例,人们目前正以极大的热情进行全光开关的研究,这是基于以下几个原因:第一,全光开关可以突破限制电子开关单道传输速率的瓶颈;第二,电子开关吸收光而产生热,从而严重阻碍了信息的高速率传播;第三,全光开关可以避免由光电转换引起的各种问题.全光信息处理技术除全光开关外还包括超短光脉冲的产生、压缩、调制和放大等,而超短光脉冲的调制和放大又是这些技术的关键.因此,在光学和光子学领域,研究和制造具有类似电子管、晶体管作用的光子晶体管就成为一个引人注目的课题.

全光信息处理以前一直被认为是三阶非线性现象的领域,因而强三阶非线性极化率材料备受关注.

在这些材料中,折射率的变化依赖于光强  $I$ ,  $\Delta n = f(I)$ .在全光信息处理的研究中,由折射率变化而引起的非线性相移是最关键的量.基于光学 Kerr 效应的非线性相移和  $(2\pi/\lambda)n_2IL$  成比例,其中  $\lambda$  是光波波长,  $I$  是光强,  $L$  是光波相互作用长度.一般材料的非线性折射系数  $n_2$  很小,因此要获得大的非线性相移,必须增加光强和光波相互作用长度,这就使得实现集成化的全光器件困难重重.一般有两个途径来解决这个问题:第一,寻找和制造具有大的三阶非线性极化率的材料;第二,用另外的物理机理来实现非线性相移.

近几年来,人们把注意力集中到了利用二阶非线性串级效应来实现非线性相移的研究上.二阶非线性串级过程和三阶非线性过程类似,但是具有更高的效率.而且二阶非线性串级过程综合了二阶和

\* 1999-04-30 收到初稿,1999-07-12 修回

三阶非线性过程的优点:一方面既能够充分利用容易获得的材料又具有高效率,另一方面具有很大的灵活性并可以实现单一波长光束的输入和输出.二阶非线性串级效应具有丰富的物理内涵,除了可以用来实现全光器件(全光开关和全光晶体管等),在激光锁模、光脉冲压缩、孤子波等许多方面也有着广泛的应用.因此,研究二阶非线性串级效应具有重大的学术意义,而利用二阶非线性串级效应实现全光晶体管在光信息处理领域则具有潜在的应用价值.

## 2 研究历史和现状

在非线性光学发展的早期,人们已经认识到二阶非线性串级效应对三阶非线性有很大贡献,甚至可以导致孤子波的产生.二阶非线性串级效应的两个主要特征早在非线性光学发展的第一个十年就被人们预言存在:1967年, Ostrovski 第一次讨论了在二次谐波产生过程中基波的非线性相移<sup>[1]</sup>;1974年, Karamzin 和 Sukhorukov 预言了由于二阶非线性极化率而存在的孤子波<sup>[2]</sup>.到90年代为止,尽管关于二阶非线性串级效应及其相关现象的报道时有出现,但是作为一个领域来说并没有大的发展.两个直接测量非线性相移实验的出现成为二阶非线性串级效应研究蓬勃发展的标志.1989年, Belashenkov 报道了在 CDA 中在近位相匹配情况下基波的大于  $\pi$  的非线性相移<sup>[3]</sup>.1992年, Desalvo 等同样在近位相匹配情况下通过 Z 扫描方法测到了在 KTP 中的非线性相移<sup>[4]</sup>.研究全光信息处理的人们此时已经意识到要寻找能通过  $\chi^{(3)}$  得到大的非线性相移同时又没有大的损耗的材料是极端困难的.而此时具有很大的  $\chi^{(2)}$  的材料出现,准相位匹配技术的发展等使得二阶非线性串级效应为全光信息处理的研究提供了一条崭新的道路.

美国中央佛罗里达大学 (University of Central Florida) 的 Stegeman 和 Vanstryland 教授领导的小组在二阶非线性串级效应的研究及以此为基础实现全光开关和全光晶体管方面做出了许多开创性的成果<sup>[4-9]</sup>.目前二阶非线性串级效应及其全光器件的研究已成为热点,美国、德国、法国、日本等许多国家的研究成果都已见诸于各学术期刊,但在我国至今为止还没有这方面的报道.

## 3 二阶非线性串级效应的物理机理

二阶非线性串级效应的研究焦点为在二阶非线

性串级过程中基波的幅度变化和位相移动.为了使净输出回到输入基波的频率,二阶非线性串级过程需要两个连续的二阶非线性过程:先实现上转换过程 ( $\omega + \omega \rightarrow 2\omega$ , SHG), 然后紧跟着实现下转换过程 ( $2\omega - \omega \rightarrow \omega$ ); 或者先进行下转换过程 ( $\omega - \omega \rightarrow 0$ , 光学整流), 然后紧跟着再进行上转换过程 ( $\omega + 0 \rightarrow \omega$ ) 来达到这个目的.由于这种过程需要两个连续的二阶非线性过程,所以被命名为“二阶非线性串级过程”.

通过二阶非线性串级效应来获得非线性相移的物理实质是非常直接明了的:在位相失配的情况下,基波的能量并不能完全向谐波转换.光波的能量随着传播距离的变化在基波和谐波之间周期性地交换.设能量没有转换为谐波的基波以相速  $v_1$  传播,谐波以相速  $v_2$  传播,且  $v_1 \neq v_2$ .在谐波能量向基波转换的过程中,产生的基波和没有经历过频率上转换的基波在位相上不一致,即产生非线性相移. Kobayakov 和 Lederer 给出了二阶串级非线性的分析解<sup>[10]</sup>.

二阶非线性串级现象是十分丰富的,我们可以按照两种主要的位相匹配方法来进行讨论.

### 3.1 第一类位相匹配

在第一类位相匹配 ( $e + e \rightarrow o, o + o \rightarrow e$ ) 的情况下,我们又可以分为有无种子光输入两种情况进行讨论.

#### 3.1.1 无种子光输入的二次谐波产生 (SHG)

描述二次谐波产生的耦合波方程为

$$\frac{da_1(z)}{dz} = -i\kappa(-\omega; 2\omega, -\omega)a_3(z)a_1^*(z)e^{i\Delta kz}, \quad (1)$$

$$\frac{da_3(z)}{dz} = -i\kappa(-2\omega; \omega, \omega)a_1^2(z)e^{-i\Delta kz}, \quad (2)$$

式中  $\Delta k = 2k_1 - k_2$  为位相失配,  $\kappa(-2\omega; \omega, \omega) = \kappa(-\omega; 2\omega, -\omega) = \kappa$  (当全置换对称性满足时有效) 为非线性耦合系数.基波强度可以表示为  $I_1(z) = |a_1(z)|^2$ .对于无种子光输入的二次谐波产生,  $|a_1(0)|^2 = I_1(0)$ ,  $|a_3(0)|^2 = I_3(0) = 0$ .

在各种不同的输入条件下,耦合波方程的解包括了所有非线性相移的物理内容.通过对耦合波方程的求解,我们可以给出非线性相移的一些典型结果并作出简单的物理解释.

只有在非常严格的条件下(大的位相失配和小的非线性相移),由二阶非线性串级效应引起的非线性相移  $\phi^N$  才和光进入样品的距离  $z$ 、入射强度  $I$

成线性关系(和  $x^{(3)}$  引起的非线性相移相同). 二阶非线性相移的最显著特征是  $\phi^{NL}$  随着入射距离的增加呈阶梯状改变, 变化的最大步为  $\pi/2$ . 即使对于大的位相失配, 非线性相移的增加也是阶梯状的, 位相失配越大, 相移变化的步越小. 图 1 描述了在第一类位相匹配情况下, 非线性相移  $\phi^{NL}$  和基波透过率对于各种位相失配  $\Delta kL$  随归一化距离  $z/L$  变化的情况. 二阶串级非线性另一不同于  $Kerr$  非线性的特征是非线性相移随着强度的增加而明显饱和. 获得大的非线性相移的代价是基波能量向谐波的转移; 入射基波的强度越大, 基波向谐波转换能量越多, 非线性相移越大.

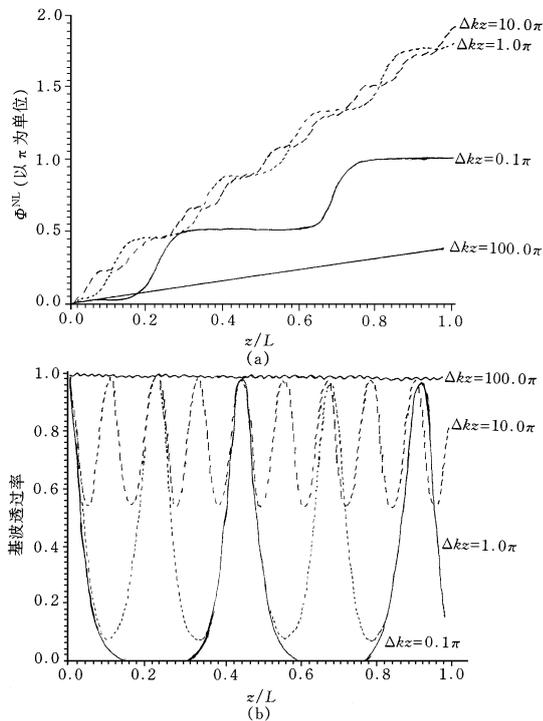


图 1 在位相失配取不同值时, 基波的非线性相移 (a)、透过率 (b) 和归一化距离  $z/L$  之间的变化关系 (— 传动比 = 1; --- 传动比 = 4/3; - - 传动比 = 2; ... 传动比 = 10)

### 3.1.2 有种子光输入的二次谐波产生 (SHG)

当一束二次谐波作为种子光输入时, 情况变得复杂起来. 输出基波的幅度和位相对于种子光和输入基波的相对位相  $\Delta\phi = \phi_3 - 2\phi_1$  非常敏感. 加入种子光的作用基本上相当于使位相匹配条件偏离  $\Delta kL = 0$ . 通过改变  $\Delta\phi$ , 可以使基波输出从最大变到最小. 除了用二次谐波作为种子光外, 一束弱的基波也可以作为种子光加入到一束强的二次谐波中去<sup>[6]</sup>. 在这种情况下, 对于大的位相失配, 基波的非线性相移并不显著地依赖于相对输入位相  $\Delta\phi$ .

### 3.2 第二类位相匹配

在第二类位相匹配 (两束独立的基波) 的情况下, 耦合波方程为

$$\frac{da_1(z)}{dz} = -iK(-\omega; 2\omega, -\omega)a_3(z)a_2^*(z)e^{i\Delta kz}, \quad (3)$$

$$\frac{da_2(z)}{dz} = -iK(-\omega; 2\omega, -\omega)a_1^*(z)a_3(z)e^{i\Delta kz}, \quad (4)$$

$$\frac{da_3(z)}{dz} = -iK(-2\omega; \omega, \omega)a_1(z)a_2(z)e^{-i\Delta kz}, \quad (5)$$

其中  $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$ .

相对于第一类位相匹配, 第二类位相匹配增加了一个自由度: 两束入射基波之间的相对强度. 两束入射基波之间的相对位相并不影响能量转换效率和非线性相移. Manley-Rowe 关系要求在二次谐波产生过程中从两束基波中转移出相同的能量, 因此较强的基波永远不会消耗尽. 当由上转换过程过渡到下转换过程时, 弱的基波位相改变  $\pi$ ; 当由下转换

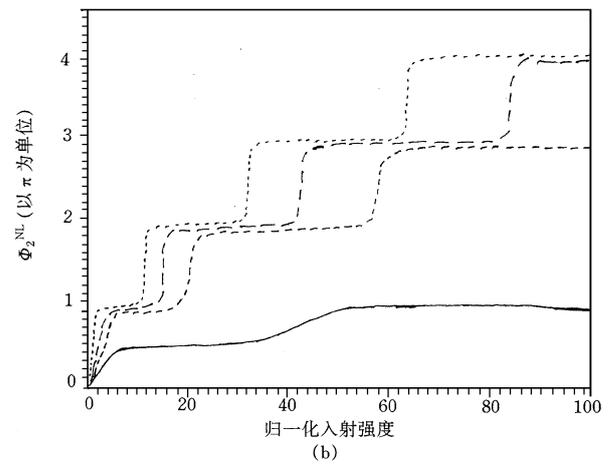
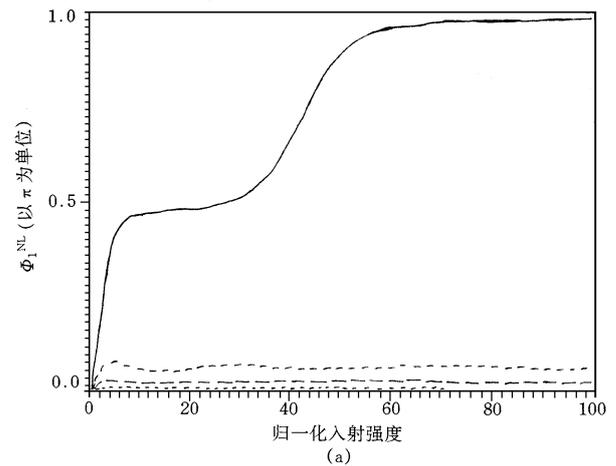


图 2 在  $I_1/I_2$  取各种值的情况下, 强的基波 (a)、弱的基波 (b) 各自经历的非线性相移和归一化输入强度之间的变化关系 ( $\Delta kz = 0.1\pi$ )

过程过渡到上转换过程时,二次谐波的位相改变  $\pi$ . 由于强的基波永远不耗尽,因此永远不经历非连续的位相改变.基波输出随传播距离和两束入射基波  $I_1$ 、 $I_2$  的相对强度振荡.当两束入射基波的强度接近时,基波的输出可以从最大值变到最小值.图2给出了在  $I_1/I_2$  取不同值的情况下,两束基波的非线性相移  $\varphi_1^L$ 、 $\varphi_2^L$  和归一化的入射强度之间的变化关系<sup>[7]</sup>.

#### 4 全光晶体管作用的实现

全光晶体管的操作类型可分为两种:位相控制型和幅度控制型.

##### 4.1 位相控制型

在二次谐波产生过程中,将一束弱的二次谐波作为种子光输入,输出基波的位相和幅度可以用种子光的位相或幅度来控制,从而实现小信号增益和晶体管作用.在这种方法中,如何控制二次谐波和入射基波的相对位相是一个关键问题.在 Hagan 等人的工作中<sup>[6]</sup>,他们让光波通过一个气体室,用改变气体室内压力的方法来控制二次谐波和入射基波之间的相对位相.图3给出了他们的实验装置.

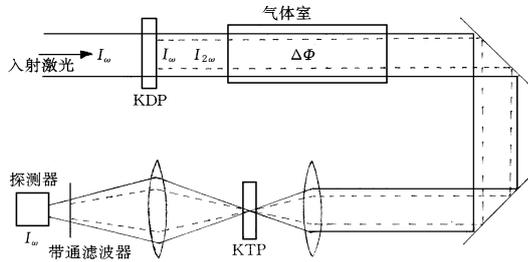


图3 位相控制型全光晶体管实验装置

##### 4.2 幅度控制型

位相控制型的晶体管在实现上比较困难,而利用第二类二次谐波产生过程中两束入射基波的相对强度变化来控制输出则具有很大的优越性.即使两束偏振方向互相垂直的入射基波不相干,对用这种方法产生晶体管作用也没有影响.当两束入射基波的能量(幅度)接近时,基波输出和二次谐波产生效率变化得非常迅速,因此可以利用这个特点来实现全光晶体管. Wang 等人利用两块用于第二类二次谐波产生的晶体,提出了一种对入射光束之间的相对位相不敏感的全光晶体管<sup>[8]</sup>.在这种实验装置中,泵浦光  $I_p(\omega)$  被分为两束偏振方向互相垂直、强度基本相同的光  $I_1(\omega)$ 、 $I_2(\omega)$ .  $I_1(\omega)$  在第一块晶体中与一束很弱的、偏振方向与之垂直的信号

光  $I_s(\omega)$  相耦合,并被以小于1的耦合效率所调制.被调制的泵浦光  $I_1(\omega)$  在第二块晶体中与  $I_1(\omega)$  作用,由于此时这两束光强度不同(但相差不大),因此当信号光  $I_s(\omega)$  有一微小变化时,输出光  $I_{out}(\omega)$  的幅度有很大变化,即调制被强烈地放大.这种装置最重要的特征是:用来对泵浦光  $I_1(\omega)$  进行调制的信号光  $I_s(\omega)$  可以和泵浦光  $I_1(\omega)$ 、 $I_2(\omega)$  均不相干.第一块晶体作为“耦合器”出现,而第二块晶体的作用是“放大器”.图4即为这种全光晶体管的实验装置图.

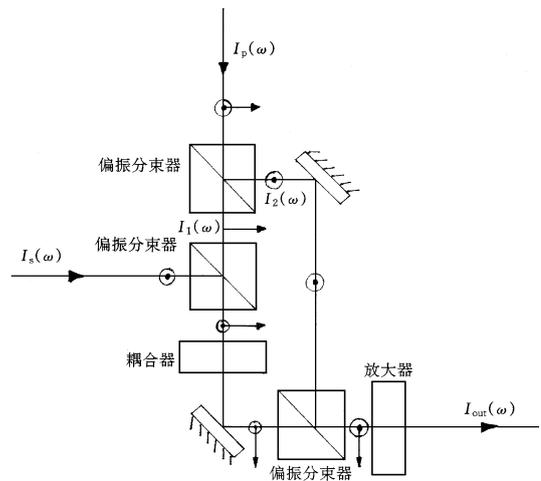


图4 幅度控制型全光晶体管实验装置

#### 5 展望

随着信息社会的发展,研究和制造超快速、小损耗的全光器件已成为全光信息处理急待解决的课题.传统的基于三阶非线性的全光器件由于受到种种限制,难以适应超快速、低驱动功率、可集成化等要求.研究以二阶非线性串级效应为基础的全光器件将成为人们新的突破口之一,然而和其他技术一样,这种方法的发展和成熟也依赖于材料的研制和开发.铌酸锂、KTP、有机材料和 III-V 族半导体材料等各有优缺点.随着这种材料的不断完善和新技术(如准位相匹配技术等)的不断发展,利用二阶非线性串级效应来实现全光晶体管等全光器件是大有希望的.

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Ostrovski L A. J. Exper. Theor. Phys. Lett., 1967, 5: 272 — 275
- [ 2 ] Karamzin Y N, Sukhorukov A P. J. Exper. Theor. Phys. Lett., 1974, 20: 339 — 342

(下转第 241 页)