

表2

最小功率 单模(mW)	光束直径 (nm)	发散度 (mrad)	偏振度	纵模间隔 (MHz)	重量 (kg)	标称工作 电流(mA)	工作电压 (VDC)	产品编号
0.2	0.63	1.26	随机	732	0.34	4.5	1600	05LGR025
0.5	0.77	1.07	随机	438	0.61	6.5	2400	05LGR151
0.75	0.75	0.92	随机	373	0.61	6.5	2650	05LGR173
0.3	0.75	0.92	500:1	373	0.61	6.5	2650	05LGR173
1.5	0.80	0.86	随机	328	0.68	6.5	3000	05LGR193

参 考 文 献

- [1] D. L. Perry, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-7**(1971), 102.
- [2] W. Luhs, B. Struve, G. Litfin, *Laser und Optoelektronik*, **Nr. 4**(1986), 319.
- [3] 林贞平, 王广浩, *激光杂志*, **4**(1990), 185.
- [4] S. Inatsugu and J. R. Halmes, *Phys. Rev. A*, **4**(1973), 1678.
- [5] 游大江、李 桦、郑乐民等, *北京大学学报(自然科学版)*, **2**(1983), 75.
- [6] J. M. Bridges and W. L. Wiese, *Phys. Rev. A*, **2**(1970), 285.
- [7] Robert G. Knollenberg, *SPIE*, **742**(1987), 2.
- [8] 于澍生、李庆国、杜龙龙等, *中国激光*, **12**(1993), 892.
- [9] 邓鸿林, *激光集锦*, **3**(1993), 17.
- [10] *Melles Griot Laser & Instruments Guide*, (1994), E. 3.

光学双稳态研究 20 年*

李 淳 飞

(哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150001)

摘 要 综述了光学双稳态的概念和理论以及光学双稳态器件的分类和材料研究. 重点介绍了半导体光双稳器件研究的发展, 并且指出了光学双稳态研究的最新进展、应用前景和目前的困难.

关键词 光学双稳态, 光双稳器件

自从 1975 年贝耳实验室的吉布斯等人在实验中发现光学双稳态以来, 光学双稳态研究在 20 年中有很大进展. 各种形式的光学双稳态现象不断发现, 使人们对光学双稳态的认识不断加深; 各种光学双稳态器件的材料和结构不断发展, 使光学双稳态作为一种以光控光的器件更接近实际应用. 本文试图以通俗和简练的方式较系统地介绍光学双稳态的基本概念、主要理论和光双稳器件的分类. 重点介绍研究最多的半导体双稳器件的发展. 并讨论光双稳器件对材料性能的要求以及它们目前在应用研究中的新进展. 作者谨以此文纪念光学双稳态研

究 20 周年.

1 光学双稳态的概念

光学双稳态是指光学系统中在一定的输入范围内对给定的输入存在着两种可能的输出状态的现象. 值得注意的是, 这两种状态必须可以互相转换. 以光强状态为例, 具有光学双稳态的系统, 其输出光强和输入光强的关系呈现如图 1 所示的滞后回线. 光学双稳态的必要条件

* 1995年2月13日收到初稿, 1995年6月7日收到修改稿.

是系统同时具有光学非线性和反馈机制两个因素. 反馈的作用是重要的, 两个输出状态的稳定性是由系统的负反馈决定; 而两个输出间的快速转换则起因于系统的正反馈.

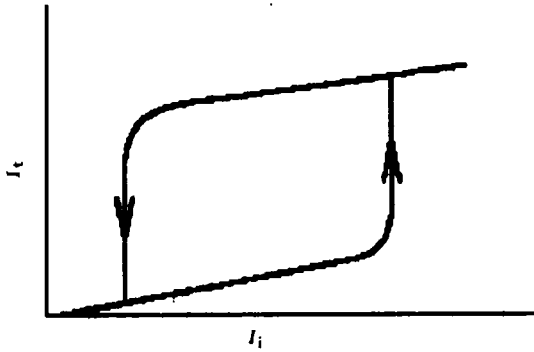


图1 光学双稳态特性曲线

具有光学双稳态的光学器件称之为光双稳器件. 非线性法布里-珀罗标准具是典型的光双稳器件. 这种器件由非线性光学材料和反馈光腔构成, 如图2. 其外形很像一个激光器. 不同的是其中的介质不是激光放大介质, 而是非线性介质. 在强光的作用下, 介质的非线性参数(非线性吸收系数或非线性折射率)发生变化, 从而引起透射光强发生变化. 光强的变化进一步引起非线性参数的变化. 在光腔的反馈作用下, 这种变化形成正反馈过程, 因而产生光学双稳态.

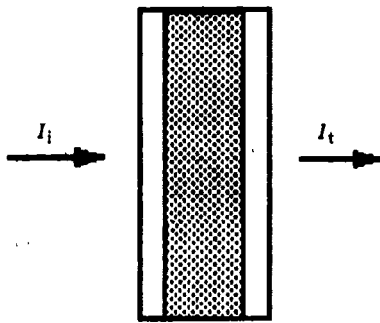


图2 非线性标准具光双稳器件

2 光学双稳态的理论

典型的光学双稳器件和激光器同样都有光学谐振腔, 激光器的谐振腔理论完全适用于光双稳器件. 与激光理论一样, 光学双稳态理论也具有经典理论、速率方程理论和半经典理论等形式. 甚至有人建立了光学双稳性与激光器的统一理论. 在光与物质作用的描述中对激光器其增益系数为正号, 而对光学双稳性改为负号, 变成吸收系数. 尽管光双稳态在理论处理方法上与激光有相似之处, 而且从热力学观点来看两者皆属于耗散系统, 但是两者有着本质的区别. 可以证明激光器是第二类热力学相变系统, 而光学双稳态则是第一类热力学相变系统. 此外, 光学双稳态还有其不同的理论描述, 如图解法、势阱模型、突变理论、相变模型等.

1969年 Szoke 等人首先在理论上预言了吸收型光学双稳态的存在^[1]. 他用速率方程理论导出了光通过含饱和吸收体的标准具而形成的输出和输入光强间的双稳关系——态方程. 并给出了产生光学双稳态的阈值条件. 1975年贝耳实验室的吉布斯和 McCall 等人首先在含 Na 蒸气的法布里-珀罗腔中进行实验时发现了色散型光学双稳性^[2]. 他们用法布里-珀罗标准具理论计算了态方程和阈值条件. 1976年意大利的 Bonifacio 和 Lugiato 等人发表了他们的半经典平均场理论^[3], 用于解释吸收光学双稳态. 他们将描述光波在非线性和二能级系统中传输的二阶波动方程及二能级系统的薛定谔方程通过各种近似变成三个分别描述二能级系统的吸收、色散和粒子数反转的一阶方程——布洛赫方程. 从而推导出光双稳态方程和阈值条件. 以后他们又研究了在一个环腔中存在二能级原子系统的情况, 发表了包含吸收和色散在内的稳态光双稳理论^[4]. 以后稳态理论的发展是进一步研究谱线增宽、驻波效应以及光束的横向效应等因素对光学双稳态的影响.

光学双稳态的动态行为可以分为两类. 一类是不稳定性. 它是研究当系统的输入光强不

物理

变时由于系统内在的原因而发生不稳定输出的现象,包括周期振荡、分岔和混沌等。产生不稳定性的原因很多,通常较多的原因是系统内有两种作用相反的非线性机制相互竞争(McCall 不稳定性)^[6],或者因为反馈系统的延时作用(Ikeda 不稳定性)^[6]。双稳态不稳定性理论的发展推动了激光器不稳定性的研究。另一类是瞬态行为,它研究输入光的强度与相位发生瞬态变化或外加控光脉冲作用引起系统输出的瞬态变化规律^[7]。总之,光学双稳态是研究具有反馈的非线性光学系统的稳态和动态行为的光学前沿课题。光学双稳态的研究开辟了非线性光学的新领域,它对激光物理学、凝聚态物理学、非平衡态物理学和非线性科学的发展起了促进作用。下面我们还要谈到,光双稳器件的研究还有力地推动了光学计算、光学信息处理和光电子材料技术的发展。

3 光双稳器件的分类

光双稳器件是一种具有反馈的非线性光学系统。可以按反馈的性质不同而分成全光的和混合的两种。多数混合光双稳器件是基于光电效应(二阶非线性光学效应)和探测器光电转换过程。光电效应又分为外光电效应和内光电效应两种。例如具有反馈的电光调制器是外光电效应混合光双稳器件^[8],半导体自电光效应器件(SEED)是内光电效应混合光双稳器件^[9]。此外利用磁光效应、声光效应、压电效应等也可以实现光双稳态;电光混合光双稳器件由于它的非线性被电场加强而具有很低的功耗,而且通过调节电场可以方便地改变光学双稳特性。但是这种器件的开关速度比较低,开关时间在 ns 以上。

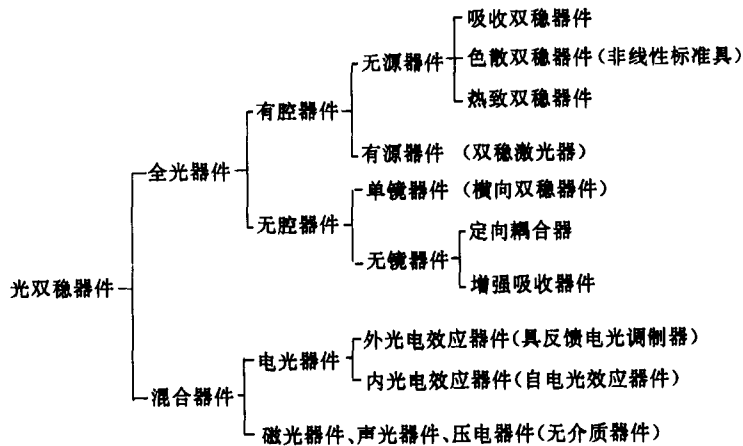
全光双稳器件是靠纯光学的方法实现反馈,按其介质的性质不同可以分为有源的和无源的两类。有源的是指其介质包含增益部分,例如双区(吸收区和增益区)共腔的半导体双稳激光器^[10]。多数全光双稳器件的介质是被动介

质。例如上面提到的非线性法布里-珀罗标准具。全光双稳器件是基于三阶非线性光学效应的器件。这类光双稳器件可按其介质的非线性机制不同而分为两类;其中一类器件的非线性主要是由于强光引起介质的吸收系数发生变化,称之为吸收型(振幅型)光双稳器件。另一类则是由于强光引起介质的折射率发生变化,称之为色散型(相位型)光双稳器件。目前所研究的光双稳器件大多数是色散型光双稳器件。吸收型器件有两种,一种工作在共振频率,呈现饱和和吸收特性^[11];另一种工作在非共振频率,呈现反饱和吸收特性^[12]。在饱和和吸收情况下,因为线性吸收远大于非线性吸收,光双稳性很难实现。在反饱和吸收情况下,因为是基于激发态吸收,需要很强的输入光才能产生光学双稳态。还有一种全光被动光双稳器件,其非线性起源于光的热效应:热致非线性吸收或热致非线性色散,被称为热光双稳器件。这种光双稳器件的开关速度比较慢。

电子型全光色散性光双稳器件的开关速度取决于器件材料的响应时间和反馈光腔的响应时间。一般可达 ns 量级。为了加快开关速度,采用无腔的结构以及采用快速响应的非线性介质是光双稳器件的重要发展方向。例如一种用双芯石英光纤构成的定向耦合波导器件^[13],其开关速度可高达 ps 量级。此外还有一种利用激光的横向场分布随光强变化(自聚焦效应)的横向光双稳器件,只需用单个反射镜即可工作^[14]。无腔双稳器件并不是不需要反馈,它只是利用材料内部的反馈而已。例如 SEED 器件也是这样一种器件(增强吸收器件)。光双稳器件的分类列于表1。

光双稳器件还能按介质的不同性质、状态、结构加以分类,如原子分子气体、液体、晶体、液晶、溶胶、半导体、有机材料、等离子体,以及体、薄膜、波导、光纤、量子限制材料等。也可按器件所用的各种非线性光学效应加以分类。总之,光双稳器件如同激光器一样有众多的种类。

表1 光双稳器件的分类



4 半导体光双稳器件

目前以半导体材料为主的光电子器件(如激光器、探测器等)和高速电子器件的制造工艺已经比较成熟,特别是Ⅲ-V族半导体器件,包括短波长的GaAs和长波长的InP体系,由于光通信技术的推动而发展迅速,它们已经从体

器件发展为量子阱器件.为了实现半导体的光电子混合集成,也不可缺少半导体的光双稳器件.另一方面从材料的光学非线性来看,半导体也是最好的材料.半导体的非线性折射率(n_2)的量级范围在 $1-10^{-11} \text{cm}^2/\text{kW}$,有机材料一般为 $10^{-11}-10^{-12} \text{cm}^2/\text{kW}$,而玻璃只有 $10^{-13} \text{cm}^2/\text{kW}$.在半导体材料中由于非线性机制不同存在很大的差异,见表2^[7].

表2 半导体的非线性特性及其机制

材料	机制	温度(K)	波长(μm)	非线性折射率 $n_2(\text{cm}^2/\text{kW})$	响应时间(s)
GaAs(体)	自由激子	10	0.82	0.4	10^{-9}
GaAs/AlGaAs	自由激子	300	0.84	0.2	20×10^{-9}
GdS	束缚激子	2	0.49	0.015	10^{-9}
CuCl	双激子	17	0.39	10^{-6}	10^{-12}
InSb	电子带填充	77	5.5	1	4×10^{-7}
InSb	双光子	300	10.6	2×10^{-4}	5×10^{-8}
InAs	电子带填充	77	3.1	0.03	3×10^{-7}
HgCdTe	等离子体	77	10.6	0.4	2×10^{-6}
HgCdTe	双光子	300	10.6	3×10^{-5}	4×10^{-7}
ZnSe, ZnS	热效应	300	0.514	10^{-5}	10^{-3}
Si, Ge	感应极化	300	10.6	10^{-11}	

由表2可见GaAs量子阱材料是室温条件下光学非线性最强的一种半导体材料,而且它具有ns量级的非线性响应时间,可以作成

具有ns开关速度的光双稳器件.这种器件的开关速度主要受半导体载流子复合寿命的限制,为了提高开关速度,可以将器件的厚度尺寸

做得很小,比如小于 $1\ \mu\text{m}$,利用表面复合响应提高开关速度.另外也可以采用掺杂质的办法提高器件的开关速度.量子阱半导体器件还有一个优点,就是可以利用调节阱宽的办法随意改变工作波长.

近年来人们用 GaAs 量子阱材料研制了许多不同类型的光双稳器件.例如室温法布里-珀罗标准具器件^[15]、激光二极管双稳器件、光波导法布里-珀罗双稳器件、定向耦合器双稳器件、自电光效应器件(SEED)、NIPI 电荷输运器件^[16]等.其中 GaAs/GaAlAs 量子阱标准具是 1982 年由美国亚里桑那大学光学科学中心的 H. M. Gibbs 研究组首先研制成的室温光双稳器件.开关时间为 20 ns.但是这种器件消耗的功率较大,一块由百万个尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 的器件组成的阵列需要消耗 100 W 激光功率,因而不能实用.光电混合的 SEED 器件是一个外加几伏电压的 p-i-n 量子阱结构.尺寸为 $5 \times 10\ \mu\text{m}$ 的器件,开关能量可低至 4 pJ.对于开关功率 $50\ \mu\text{W}$ 的器件,开关时间可达 80 ns.现已做成对称和反射形式(S-SEED).而且已研制成高度集成的列阵器件.现在美国已将 64×128 个 $10\ \mu\text{m}$ 的器件做在一个芯片上.一块由百万个 $10\ \mu\text{m}$ 的器件组成的阵列仅消耗 2 瓦激光功率.这种器件已开始应用.NIPI 是一种量子阱的 p-i-n-i 结构,它通过光生载流子的输运产生对内部电场的光调制,从而引起吸收和折射率的很大变化.使百万器件只须几百毫瓦的入射光,但是响应时间却长如液晶的毫秒级.量子阱定向耦合器双稳器件是一种具有两条靠得很近的条波导,利用迅衰场效应实现光束在波导间相互转换的平面光波导器件,有光电混合的和全光的两种.其中全光的量子阱定向耦合器,无需谐振腔和电极,具有 ps 开关速度,这种器件有希望应用于未来的集成光学系统.

5 光双稳器件的材料

据研究^[15]光双稳器件可能达到的极限指标如下:开关能量趋于 1 fJ,开关时间趋于

25 卷(1996 年)第 5 期

0.1 ps.要想使器件达到高指标,选择好的非线性光学材料是关键所在.为了减小开关能量,必需增强光学非线性,即寻找非线性极化率大的材料.目前已知的非线性材料中除了起因于分子取向的液晶以外,就是基于带隙共振吸收的半导体材料.但是液晶的非线性响应时间只有秒或毫秒量级,而半导体材料的非线性响应时间可达纳秒或皮秒量级,显然优于液晶.在实际应用中对非线性材料除了要求非线性强和响应时间短之外,还要求其线性吸收系数小.否则器件的透射率太低,不利于级联,而且热损耗太大.工作在共振波长下的半导体材料的吸收较大,例如 GaAs 的吸收系数约为 10^4 ,不易满足这个要求.但是工作在非共振波长而且光学非线性较弱的有机材料和玻璃材料却具有较小的吸收系数和较短的响应时间.几种非线性光学材料的比较如表 3 所示.

表3 几种光学非线性材料的特性比较

非线性材料	$n_2(\text{m}^2\text{W}^{-1})$	$\alpha_0(\text{cm}^{-1})$	$\tau(\text{s})$
铁电液晶	10^{-7}	10^3	10^{-3}
半导体 GaAs	10^{-8}	10^4	10^{-8}
有机材料 PTS	10^{-16}	10^{-1}	10^{-12}
玻璃 SiO_2	10^{-20}	10^{-5}	10^{-14}

可见光学非线性的特性之间是相互矛盾的,比如非线性强的材料往往响应时间长且吸收系数大.想要找到每种特性都是最好的材料几乎不大可能.只有根据应用的需要适当选择非线性特性较好的材料.同时还要考虑材料的价格和加工的难易.近年来人们开始有兴趣研究具有共轭 π -电子非线性机制的有机高分子材料.这类材料如果工作在非共振反饱和和吸收状态,具有吸收系数小、响应速度快、无需谐振腔、加工容易、价格低廉等优点.但是这类材料的物理化学稳定性及要求输入激光功率密度较高等问题尚需进一步解决.

6 光学双稳态研究与应用展望

光学双稳态是在激光发现 15 年以后发现

的一种新的非线性光学现象。目前研究这种现象的基本理论已经比较完善。需要进一步研究的内容是在一些新型材料或新型结构中形成光学双稳态的具体机制。今后主要的问题是研制可供实用的光双稳器件。这些器件不仅必须能与电子器件竞争,而且必须满足并行处理光学系统的要求。

同一个光双稳器件或者几个光双稳器件的组合在不同的工作状态下可能具有不同的输出-输入特性,则可以获得不同的光学信息处理功能。如光开关、光存储、光限幅、光调制、光放大、光振荡以及各种二值逻辑、多值逻辑、阈值逻辑、模糊逻辑等。因此光双稳器件可以广泛用于光通信、光计算、光传感、以及激光的控制和光学精密计量技术中。光双稳器件就像电子学中的晶体管一样,是实现光信息处理的基本单元。有人把基于光双稳器件的光学信息处理称为非线性光学信息处理。

全光的双稳器件一般都利用三阶非线性光学效应,要求有较大的输入光强阈值,吸收损耗很大,而且热效应难于克服。因此到目前为止全光的双稳器件无法实用。但是,半导体电子集成电路的发展,已经有可能实现把Ⅲ-V族半导体电子器件、激光器、探测器和光电混合开关器件集成在一起,实现光电混合处理。因此近年来半导体的光电混合双稳器件发展较快,应用较广。例如GaAs量子阱SEED器件近年来很受人们的重视。考虑到空间光互连和光学并行处理的需要,人们正在研究将SEED、电子器件以及半导体激光器和探测器组合集成,使之成为多功能的可控的灵巧像元(smart pixels),再把成千上万的灵巧像元集成为阵列器件。这种阵列器件可以应用于光通信的光交换装置和光计算的光互连网络中,以及在用于图像处理的光学神经网络中用作光学神经元。另一种灵巧像元阵列器件是具有高集成度的快速液晶空间光调制器,它是用铁电液晶和微电子驱动电路构成

的二维阵列,这种器件有希望较快地获得应用。

总之,光学双稳态的研究已走完20年的路程,它的基本原理以及对它的稳态和动态行为的理论研究已经比较完善。但是要把它作为以光控光的全光开关器件还面临许多难以克服的困难。最主要的困难是强光学非线性或低阈值能量与快响应时间和低光强吸收的矛盾。这也是非线性材料本身的困难。因此,为使光双稳器件达到比现有电子器件更为优越的实用目标还有一条很长的路要走。

参 考 文 献

- [1] A. Szoke, V. Daneu, J. Goldhar et al., *J. Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 376.
- [2] S. L. McCall, H. M. Gibbs, G. G. Churchill et al., *Bull. Am. Phys. Soc.*, **20**(1975), 636.
- [3] R. Bonifacio and L. A. Lugiato, *Opt. Commun.*, **19**(1976), 172.
- [4] R. Bonifacio and L. A. Lugiato, *Lett. Nuovo Cimento*, **21**(1978), 517.
- [5] S. L. McCall, *Phys. Lett.*, **32**(1978), 284.
- [6] K. Ikeda, *Optical Commun.*, **30**(1979), 257.
- [7] H. M. Gibbs, *Optical Bistability, Controlling Light with Light*, Chapter 5, Academic Press, (1985).
- [8] P. W. Smith, *Opt. Eng.*, **19**(1980), 456.
- [9] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen et al., *Appl. Phys. Lett.*, **45**(1984), 13.
- [10] G. J. Lasher, *Solid State Electron.*, **7**(1964), 707.
- [11] D. E. Grant and H. J. Kimble, *Opt. Commun.*, **44**(1983), 415.
- [12] Chun-Fei Li, Lei Zhang, Miao Yang et al., *Phys. Rev. A*, **49**(1994), 1149.
- [13] S. R. Friberg, A. M. Weiner, Y. Silberberg et al., *Opt. Lett.*, **13**(1988), 904.
- [14] J. E. Bjorkhom, P. W. Smith and W. J. Tomlinson, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18**(1982), 2016.
- [15] H. M. Gibbs, S. L. McCall, T. N. C. Venkatesan et al., *Appl. Phys. Lett.*, (1979), 451.
- [16] A. Larsson and J. Maserjian, *Appl. Phys. Lett.*, **59**(1991), 1946.