

第 1 章 绪 论

1.1 本文研究的背景和意义

1.1.1 超短光脉冲和激光器的锁模

超短光脉冲通常指的是脉冲宽度为皮秒(10^{-12} s 或 ps)或飞秒(10^{-15} s 或 fs)量级的光脉冲。超短光脉冲除了具有窄的脉冲宽度外,还具有高的峰值功率和较宽的光谱宽度等特点。基于其所具有的超快的时间分辨率,超短脉冲可应用在高速时间分辨和大容量光通信系统等领域^[1],并且在泵浦探测技术和时间分辨光谱技术领域得到了快速的发展。例如,A. H. Zewail 把超短脉冲应用在化学方面^[2],成功开辟了飞秒化学领域,并于 1999 年获得了诺贝尔化学奖。此外,由傅里叶变换可知,时域上较窄的脉冲宽度在频域上对应于较宽的光谱,周期性的脉冲在频域上对应等间距的梳齿,这使得超短脉冲可用于超精细光谱和光学频率梳等方面^[3],这方面的研究成果于 2005 年获得了诺贝尔物理学奖。超短脉冲的另一个特点是具有高的峰值功率,这使得超短脉冲在激光加工和生物医学等方面也具有广泛的应用^[4,5]。

锁模激光器是获得超短脉冲的常见方法,激光器锁模后所得到的脉冲宽度可以小于 100fs。根据增益介质的类型,激光器可分为半导体激光器、固体激光器和光纤激光器等。而光纤激光器由于其结构简单紧凑、稳定性高、散热性好、无需冷却、不需要准直和输出光束的质量高等特点,受到了人们的广泛青睐。自从 1990 年 M. E. Fermann 等人首次在光纤激光器中成功获得飞秒脉冲的锁模输出以来^[6],锁模光纤激光器得到了快速的发展。

激光器的锁模指的是输出光谱纵模之间的相位是相互锁定的。当激光器实现锁模后,相邻光谱纵模的相位差异为一定值(如图 1.1(a)所示)。在时域上则对应为周期性的脉冲序列(如图 1.1(b)所示),输出脉冲序列的重复频率与光谱的纵模间隔相等。脉冲的宽度与光谱的宽度成反比关系,脉冲的周期等于重复频率的倒数。

实现锁模的方法一般分为两大类,即主动锁模和被动锁模。主动锁模

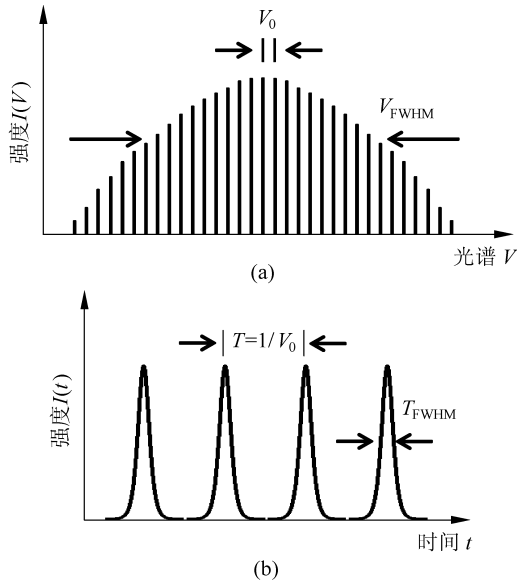


图 1.1 脉冲锁模时的(a)频域光谱和(b)时域脉冲序列

V_0 为相邻纵模的频率间隔, V_{FWHM} 为光谱宽度, t_{FWHM} 为脉冲的宽度, T 为脉冲的周期

一般指的是由外部向激光器提供调制信号,从而周期性地来改变激光器的增益或者损耗而达到锁模目的。而被动锁模是利用材料的可饱和吸收特性来实现激光器超短脉冲的产生。相比于被动锁模,主动锁模需要引入调制的器件,如声光调制器和电光调制器等。由于引入的器件为有源器件,所以需要外接电源或驱动,故结构一般比较复杂,并且成本偏高。此外,由于主动锁模的脉冲宽度反比于所用调制器件的调制频率,而调制器件的频率又不能无限提高,因此不利于产生很短的脉冲^[7]。而被动锁模是基于无源器件的可饱和吸收效应来实现激光器的锁模脉冲输出,激光器的腔结构更加简单。相比于主动锁模,被动锁模更容易获得窄的脉冲输出。接下来,本文主要针对被动锁模的光纤激光器来讨论。

1.1.2 被动锁模的实现方法

1.1.2.1 基于可饱和吸收体的锁模光纤激光器

可饱和吸收体的特点是它的透过率随着入射光功率的增强而增大(如图 1.2(a)所示),最终达到饱和。基于可饱和吸收体的锁模可追溯到

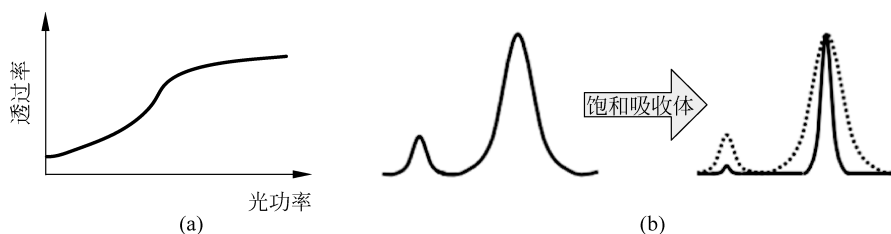


图 1.2 饱和吸收体的特点:(a)透过率随入射功率的增加而增大,
(b)对脉冲的压缩和整形以及对低强度噪声的抑制

20 世纪 70 年代。它的锁模机理可以理解为当光脉冲通过可饱和吸收体时,由于脉冲中心部分的强度较大,故其透过率较高,脉冲越靠近边沿的部分能量越小,所以其透过率较低。即当光脉冲通过可饱和吸收体时,边沿部分的损耗大于中央部分,使其通过可饱和吸收体后被窄化(如图 1.2(b)所示)。所以,可饱和吸收体还具有抑制噪声的作用。

被动锁模脉冲的形成过程比较复杂,只有当激光腔中的强脉冲多次被可饱和吸收体吸收并窄化后,才能形成超短脉冲。在此过程中,自相位调制(SPM)和群速度色散(GVD)对超短脉冲的形成也起了很大的作用。早期,适用于激光器锁模的可饱和吸收体是半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[8]。进入 21 世纪,碳纳米管成为了一种新的锁模器件^[9,10]。最近,石墨烯的发现为激光器的锁模开辟了新的篇章^[11,12]。后续我们将会对不同类型可饱和吸收体的锁模激光器进行更进一步的说明。

1.1.2.2 基于非线性光纤环形镜的锁模光纤激光器

在早期基于 SESAM 锁模的光纤激光器中,SESAM 的引入往往会破坏激光器的全光纤结构,而非线性光纤环形镜的引入很好的解决了这个问题。根据用非线性光纤环形镜来实现锁模的激光器腔的形状特点,通常称其为“8”字型激光器(“8”字腔)。“8”字腔早在 20 世纪 90 年代就被应用于激光器的锁模,锁模机理为基于加成脉冲的干涉效应。

图 1.3 为“8”字型激光器的结构图,其工作原理为用 50 : 50 的耦合器把入射光分成振幅相同但传播方向不同的两束光,具有放大作用的增益光纤放置在靠近耦合器的一端,使得一束光刚进入耦合器后即被放大,另一束光在即将离开环路时再被放大,这种结构即为非线性放大环形镜(NALM)。由于非线性相移的不同,通过调节 PC,可以使脉冲中央部分的

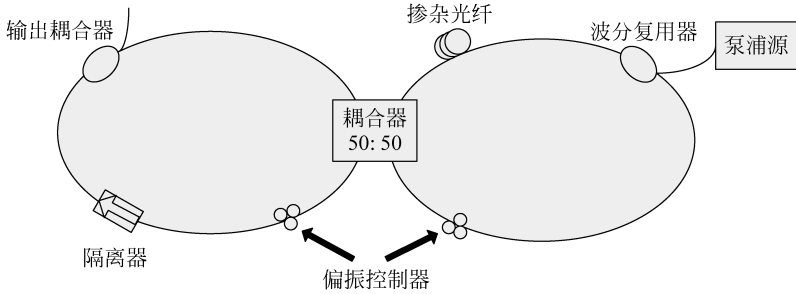


图 1.3 “8”字腔锁模光纤激光器示意图

光在 NALM 中被透过, 脉冲边沿部分的光被反射, 以此实现对光脉冲的整形和调制。

NALM 应用于光纤激光器的锁模始于 1991 年^[13-16]。当时, I. N. Duling III 获得了 314fs 的锁模脉冲输出^[17]。M. Nakazawa 等人利用 1.48 μm 的半导体激光器泵浦^[18], 获得了 290fs 的锁模脉冲输出, 锁模阈值仅为 50mW, 并且在锁模后可以进一步降低至 10mW。一般来说, 用“8”字型激光器很难直接获得小于 100fs 的光脉冲。但通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大之后, 再用色散位移光纤压缩, 就可以获得更窄的脉冲^[19]。

1.1.2.3 基于非线性偏振旋转的锁模光纤激光器

对于图 1.4(a)所示的环形腔而言, 非线性偏振旋转(NPR)的锁模过程可理解如下^[20]。对于在脉冲的峰值位置处, 从左端准直器出来的椭圆偏振光经过 1/4 波片后变成线偏振光, 产生的线偏振光经过 1/2 波片后旋转一定角度, 通过调节 1/4 波片和 1/2 波片, 来实现入射到偏振分束器(PBS)上光脉冲中心部位的强度尽可能的透过, 由于光脉冲不同位置的偏振态不同, 其两边低强度的部分被阻挡, 与偏振无关的隔离器(PI-ISO)用于保证激光器的单向运行, 从右边 1/4 波片出来的光为椭圆偏振光, 再通过准直器耦合到激光腔中。这样使得光脉冲在激光腔内往返一次后的脉冲宽度略有窄化, 这与在激光腔中使用饱和吸收体的情况类似。

对于图 1.4(a)中虚线的部分, 还可以由图 1.4(b)中虚线的部分代替, 两个偏振控制器(PC)和之间的偏振相关隔离器(PD-ISO)作为锁模器件, PD-ISO 用于隔离和起偏双重作用。在 1992 年, NPR 技术首次应用于锁模光纤激光器^[21-26], 并表现出良好的锁模特性。后来, 人们认识到腔内过大的反常色散对激光器的锁模并无益处, 通过在腔内使用正常色散(GVD)的掺铒光纤(EDF)后, 激光器输出的能量和峰值功率都有了很大的提高。

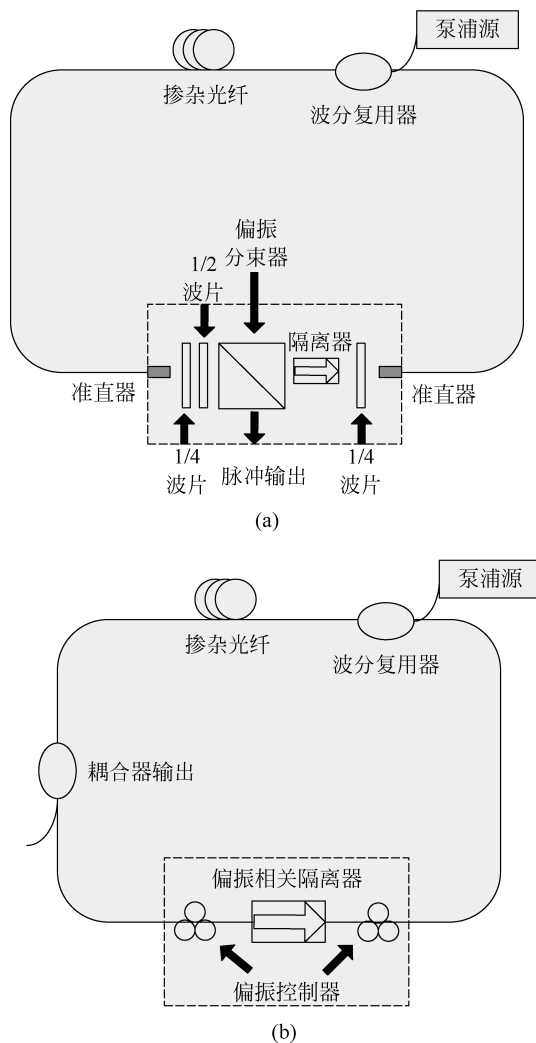


图 1.4 利用非线性偏振旋转效应来获得被动锁模光纤激光器的原理图
(a)非全光纤结构；(b)全光纤结构

1.2 锁模光纤激光器的分类

在被动锁模光纤激光器中,根据色散条件和输出脉冲类型的不同,可以把激光器分为以下几类。

1.2.1 孤子光纤激光器

孤子激光器最早产生于 20 世纪 90 年代初^[13,14]。在孤子光纤激光器中,其腔内的净色散值为负。由非线性薛定谔方程可知,在负色散的光纤中存在稳定的孤子解。对于激光器中的脉冲而言,腔内 SPM 所产生的正啁啾和 GVD 所产生的负啁啾可以互相平衡,使腔内的脉冲在传输的过程中以无啁啾孤子形式存在。

孤子光纤激光器输出的单脉冲能量一般为 0.1nJ 左右^[4],多余部分的能量以色散波的形式表现出来,对应于输出光谱中的 Kelly 旁瓣(Kelly Sideband)^[27]。当泵浦功率进一步增加时,腔内 GVD 所产生的负啁啾不足以补偿 SPM 所产生的正啁啾,由孤子面积定理的限制^[28],腔内的脉冲会发生脉冲分裂,进而出现多脉冲锁模或者谐波锁模的现象^[29-32]。

1.2.2 展宽脉冲光纤激光器

展宽脉冲光纤激光器又称为色散管理型光纤激光器,最早由 M. E. Fermann 提出^[33]。在这种激光器中,腔内同时包含反常色散元件和正常色散的元件,使腔内的净色散值为近零或者微负。展宽激光器中的光脉冲在激光腔内经历周期性的展宽和压缩,减小了非线性相移的累积,从而提高了激光器输出的脉冲能量。因此,相比于孤子光纤激光器,展宽脉冲光纤激光器输出的单脉冲能量可以提高一个数量级。当泵浦功率增加时同样会发生多脉冲锁模或者谐波锁模现象。

1.2.3 自相似光纤激光器

自相似光纤激光器的脉冲形状是抛物线形的,脉冲中的线性啁啾可以利用光栅对或者光纤进行无畸变地压缩,进而得到近似变换极限的脉冲。1993 年,D. Anderson 等人首先在理论上提出了自相似脉冲^[34]。研究指出,具有线性啁啾的脉冲在正常色散光纤中传输时,可以承受较高的功率而不发生脉冲分裂的现象^[35],因此具有更大的脉冲能量。2000 年,M. E. Fermann 等人首次在实验上证实了自相似脉冲的存在^[36]。

2004 年,Ilday 等人首次提出了自相似的锁模光纤激光器^[37]。光脉冲在激光器中的正常色散光纤中传输时,脉冲在非线性效应和光纤 GVD 的共同作用下,不断积累正啁啾,脉冲逐渐展宽而发生自相似演化,从而使

得输出脉冲在较高的能量时仍然具有较低的峰值功率,然后利用色散延迟线来补偿脉冲啁啾,以保证脉冲的自洽运行。自相似光纤激光器输出的单脉冲能量可以比孤子和展宽脉冲光纤激光器高一到两个数量级。

1.2.4 全正色散光纤激光器

2006年,康奈尔大学的 A. Chong 等人通过在激光腔内引入频谱滤波器,首次实现了全正色散的锁模光纤激光器^[38]。激光腔中所有器件的色散均为正常色散,并无其他色散补偿器件。在理论上,正常色散的介质是不能产生孤子脉冲的,但在腔中引入了一个可以提供振幅调制的频谱滤波器,从而实现了耗散孤子的锁模脉冲输出。激光器输出的单脉冲能量为 3nJ,尽管输出的脉冲含有很大的啁啾,但压缩啁啾后所得的脉冲宽度为 170fs。通常,全正色散光纤激光器光谱的两边较陡,由激光器直接输出的脉冲一般在皮秒量级,但通过压缩,可近似得到无啁啾的超短脉冲。

相对于孤子光纤激光器,全正色散光纤激光器输出的脉冲能量有一定的提升。这是由于脉冲在全正色散的腔内具有很大的啁啾,脉冲宽度较宽,所以峰值功率相对不高,从而避免了脉冲的分裂以及多脉冲的产生。

1.3 饱和吸收体的类型及其在锁模光纤激光器中的应用

1.3.1 半导体饱和吸收镜

相比于等效可饱和吸收体而言,在光纤激光器中,实际用到的可饱和吸收体更加简单和方便。实际中常用的饱和吸收体是半导体饱和吸收镜 (SESAM)。SESAM 一般是基于半导体材料的多量子阱器件(如 GaAs、InGaAs 等^[8]),也是在商用的被动锁模光纤激光器中较多使用的锁模器件。SESAM 早期被应用于 CO₂ 激光器和半导体激光器的锁模,后来也被人们用于固体激光器的锁模^[39],20 世纪 90 年代起,SESAM 开始被运用在光纤激光器的被动锁模^[40,41]。

目前,SESAM 在锁模激光器中得到了广泛的应用,基于 SESAM 的光纤激光器可以实现不同波段的锁模^[42-44]。

1.3.2 单壁碳纳米管

尽管 SESAM 在锁模光纤激光器得到了广泛的应用,但它仍然存在一

些不易克服的缺点,例如制作工艺复杂,价格昂贵,光损伤阈值较低,工作带宽窄等。所以,人们试图制备出更简单、更低成本、更宽的工作带宽、性能更优异的可饱和吸收体。在此背景下,单壁碳纳米管(SWNTs)很快进入了人们的视野。SWNTs为一维的碳材料,它的管径一般在几纳米到几十纳米之间,长度最高可达数微米。

SWNTs应用于光纤激光器的锁模最早始于2003年^[9],分为透射式和反射式两种结构^[9,10]。图1.5(a)为基于透射式结构锁模的光纤激光器,激光腔采用环形腔结构。980nm的激光二极管(LD)作为泵浦光通过980/1550nm的波分复用器(WDM)耦合到激光谐振腔中,增益光纤为6m长的掺铒光纤(EDF),两个隔离器(Isolator)用于确保激光器的单向运行,SWNTs被涂覆在石英的基片上放置于两个准直器(Collimator)和透镜(Lens)之间,带通滤波器(Bandpass Filter)用来调节激光器的波长,12m长的单模光纤(SMF)用于优化腔的色散,耦合器(Coupler)95%的能量输出腔外,用于参数测量。激光器输出光谱的半高全宽(FWHM)为3.7nm,输出孤子脉冲的宽度为1.1ps。

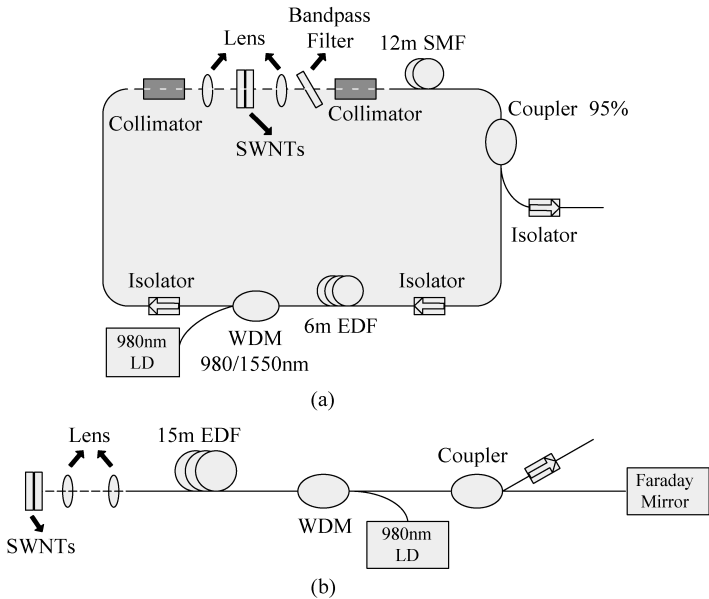


图 1.5 碳纳米管锁模光纤激光器:(a)透射式,(b)反射式(根据文献[9,10]绘制)

图 1.5(b)所示为反射式结构的激光器,腔的结构采用线性腔。此时 EDF 的长度改为 15m,SWNTs 左右两端的基片分别作了增透和高反处理,另一端的法拉第镜(Faraday Mirror)作为反射镜把光反射回激光腔内,腔中 20%的能量通过 Coupler 输出腔外,用于参数测量。激光器输出光谱的 FWHM 为 13.6nm,输出的脉冲宽度为 318fs 的高斯脉冲。

由于这两种激光器中都有空间元件的部分,因此需要准直和空间光耦合等,给激光器连续稳定的运转带来了不便。为了实现全光纤的结构,人们对如何实现 SWNTs 与光纤集成进行了很多改进。如将 SWNTs 与聚合物结合,制成薄膜后再粘附于光纤端面^[45,46],通过光诱导的方法,将 SWNTs 直接沉积于光纤端面^[47,48],利用倏逝场原理,把 SWNTs 转移到 D 型^[49,50]或锥形光纤上等^[51-55]。

自从 S. Y. Set 等人首次将 SWNTs 用于光纤激光器的锁模以来,SWNTs 在光纤激光器锁模中的优异特性已经被人们广泛证实。目前,SWNTs 已经在固体激光器^[56,57]、光纤激光器^[58-60]和波导激光器^[61,62]等多种类型的激光器中得到了广泛的应用。

1.3.3 石墨烯

石墨烯在锁模光纤激光器中的应用始于 2009 年。当时,英国剑桥大学的 T. Hasan 和 Z. Sun^[11],新加坡国立大学的 Q. Bao 和南洋理工大学的 H. Zhang^[12]等学者几乎在同一时间报导了基于石墨烯可饱和吸收体的锁模光纤激光器,激光器均为全光纤的结构。

在 T. Hasan 和 Z. Sun 所报导的文章中(如图 1.6(a)所示),泵浦光采用 980nm 的 LD,通过 WDM 耦合到激光腔中,增益光纤为高掺杂的 EDF,两个隔离器用来保持激光器的单向运行,耦合器的一部分作为输出,用于激光器的参数测量,另一部分耦合回腔内,以保证激光腔中有足够的增益,PC 用来优化激光腔中的偏振状态。此时的锁模器件采用自制的高分子聚合物的石墨烯样品,激光器输出光谱的中心波长在 1557nm 处,FWHM 为 3.2nm,得到了脉冲宽度为 800fs 的近变换极限的锁模脉冲输出。

在 Q. Bao 和 H. Zhang 所报导的文章中(如图 1.6(b)所示),他们利用原子层的石墨烯作为锁模器件,获得了 756fs 的锁模脉冲输出,信噪比为 65dB。激光器的结构与文献[11]的报道略有不同,泵浦源采用 1480nm 的激光器,并且腔中加了 100m 长的单模光纤。锁模后的重复频率为 1.79MHz,光谱的中心波长在 1565nm 处,FWHM 为 5nm。

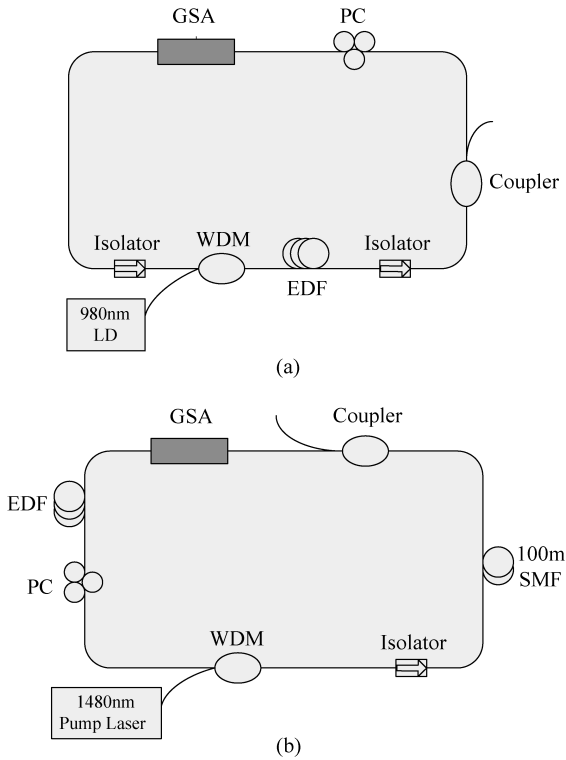


图 1.6 石墨烯锁模光纤激光器示意图:(a)根据文献[11]绘制,
(b)根据文献[12]绘制,GSA 为石墨烯可饱和吸收体

接下来,国内外的其他课题组也纷纷加入到石墨烯锁模激光器的研究之中,这部分内容将在本文的下一节中进行详细说明。

1.3.4 其他种类的可饱和吸收体

除了上述提到的可饱和吸收体外,一些其他具有良好可饱和吸收特性的吸收体也可用于激光器的锁模,如拓扑绝缘体材料(Bi_2Se_3 ^[63-68]、 Bi_2Te_3 ^[69-77]和 Sb_2Te_3 ^[78-83]等),二硫化钼(MoS_2)^[93-98],二硫化钨(WS_2)^[99,100],木炭粉末^[101-103]和金纳米颗粒^[104-106]等。其在激光器中的作用和锁模机理与之前提到的可饱和吸收体大致相同,激光器的结构也基本类似,所以在此处就不再详述。但无论哪一种可饱和吸收体,都有其各自的优点和缺点,本文将在第2章中对几种常用可饱和吸收体的性能进行比较。