

前沿领域综述

基于 600—2000 nm 抽运源的太赫兹
相干光源的最新进展*祁春超 欧阳征标[†]

(深圳大学太赫兹技术研究中心, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 深圳大学电子科学与技术学院, 深圳 518060)

(2011 年 1 月 18 日收到; 2011 年 3 月 31 日收到修改稿)

最近几年, 紧凑型、便携式、低廉、可调谐的太赫兹波源由于具有广泛的应用前景因而成为太赫兹领域的研究焦点. 波长为 600—2000 nm 范围的近红外光源由于具有体积紧凑、价格低廉、频率可调谐和工作稳定的特点, 所以频繁被选为太赫兹波产生的抽运源. 本文着重从双波长可调谐抽运源、内腔光参量振荡器太赫兹发生器两个方面进行了较系统的阐述. 分析表明, 近红外相对中红外双波长抽运光源由于具有更紧凑的结构而成为研究热点; 差频和非线性级联过程由于具有调谐范围宽的特点而成为产生太赫兹辐射的重要手段.

关键词: 太赫兹辐射, 近红外波段, 调谐宽度, 非线性级联过程

PACS: 07. 57. Hm, 42. 60. By, 42. 60. Pk, 42. 65. Yj

1. 引言

太赫兹 ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 波是指工作频率处于 0. 1—10 THz 范围内的电磁波. 太赫兹波 (也称为太赫兹射线) 之所以能引起科学工作者浓厚的研究兴趣, 并不是因为它神秘而鲜为人知的电磁辐射, 而主要是因为它具有很多独特的性质, 这些独特的性质赋予了太赫兹科学广泛的应用前景. 太赫兹波的独特性质主要表现在: 透视性、安全性、较高的光谱分辨本领等. 太赫兹波对很多介电材料和非极性的液体有良好的穿透性, 因此可以对非透明物体进行透视成像^[1-9]. 另外, 由于太赫兹波的波长大于空气中的烟雾粒子的尺度, 瑞利散射损耗极小, 所以能较好地穿透烟尘和浓雾, 是火灾救护或风尘环境监测中成像的理想光源. 此外, 相比 X 射线具有上千电子伏的光子能量, 太赫兹波的光子能量只有毫电子伏, 该能量比各种化学键的键能都低, 所以不

会发生电离反应, 即不会破坏物质的分子结构, 因此可以应用到安检^[10] 和生物检测^[11] 等场所, 实现无损检测. 特别是, 大量分子, 尤其是有机分子的振动和转动的跃迁谱均处于太赫兹频谱范围内, 因而可以利用光谱分辨率特性实现物体形貌和组成成分的分析^[12, 13].

太赫兹辐射的产生通常可以通过光学、电子学和超快光电子学这三种技术获得. 光学技术的特征是从高频向低频发展, 电子学技术则是从低频向高频发展, 超快光电子学技术则是从 1 THz 位置向两侧发展. 这三种技术提供的相干太赫兹辐射源基本上覆盖了整个太赫兹波段.

超快光电子学技术产生太赫兹辐射起源于 20 世纪 70 年代 Auston 和 Lee 的开拓性工作, 他们利用锁模钕玻璃激光分别在高阻硅^[14] 和半绝缘的砷化镓^[15] 样品上实现了光导开关. 之后, 太赫兹的产生和探测在该领域得到了较好的发展^[16-19].

电子学方法产生太赫兹辐射开始于 20 世纪 60

* 国家自然科学基金 (批准号: 60877034, 60471047), 广东省自然科学基金 (批准号: 8251806001000004) 和深圳科学基金 (批准号: 200720, 200805) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhouyang@szu.edu.cn

年代 Esaki 和 Gunn 的先驱工作, Esaki 研究小组在锗的 pn 结中发现了负电阻状态^[20], 而 Gunn 研究小组则在砷化镓中发现了耿氏振荡^[21]. 1971 年 Madey 利用周期磁场产生了电子的受激轫致辐射^[22], 自由电子激光器从此掀开了新的一页. 1993 年 Dyakonov 和 Shur 报道了弹道场效应管中的二维电子气能够发射和探测太赫兹辐射的理论预言^[23], 该理论预言在 2002 年和 2004 年分别被 Knap 等人^[24]和 Deng 等人^[25]用实验证实. 2002 年, 自然杂志报道了美国 Jefferson 实验室自由电子激光器的研究新进展, 他们产生的太赫兹辐射的平均功率高达 20 W, 甚至可以将火柴点燃^[26]. 利用返波管 (BWOs) 产生太赫兹辐射是另一种非常重要的电子学方法. 2001 年, Korolev 等人^[27]基于叉指慢波结构和多光束构造了 BWOs, 然而, 最终产生的太赫兹辐射的输出功率局限于几个 mW. 随着最近微加工技术的进展, 处于太赫兹范围的新一代真空电子装置得到很好发展^[28]. 2008 年, Tucek 等人^[29]报道了一种基于微型折叠波导的 BWOs, 该装置在 650GHz 频率处获得了 52 mW 的输出功率. 为了使太赫兹频率进一步提高, 2010 年, Mineo 等人^[30]利用波纹矩形波导代替了慢波结构波导, 使这种 BWOs 的工作频段进一步拓展到 0.9—1.1 THz 范围, 并且调谐宽度达到 200 GHz, 最大输出功率超过 100 mW.

光学方法产生太赫兹辐射的研究始于人们对红外波段的兴趣. 1881 年 Langley 为了研究红外射线而发明了辐射热计, 它利用物体的电阻随温度变化的特性来测量热辐射的能量. 在现在的很多实验室里, 辐射热计仍然是太赫兹波段最灵敏的直接探测器. 相比低亮度的热辐射光源, 激光具有高亮度、高相干、准直性好、单色性好等特点. 在 1963 年, 即激光器发明之后不久, Mathis 等人发明了发射远红外辐射的气体激光器^[31]. 1970 年, 美籍华裔科学家张道源 (Chang) 首次利用调 Q CO₂ 激光抽运 CH₃F 有机气体获得了 452, 496 及 541 μm 太赫兹激光^[32]. 对于半导体太赫兹激光器而言, 经历的时间并不算太长. 2002 年, Kohler 等人在液氮工作温度下实现了太赫兹波段的量子级联输出 (4.4 THz)^[33]. 目前在高于液氮温度的工作环境下可以以连续或脉冲的方式获得 1.19 THz 的激光输出^[34].

目前, 国内在太赫兹辐射源和太赫兹应用等方面研究比较接近前沿领域. 对于太赫兹辐射源方

面, 下面几个小组做了较多的研究性工作. 刘盛纲小组在 2008 年前后利用三维电磁波模拟软件从理论上提出了一种慢波结构的矩形耦合腔能够产生 120 GHz 的理论预言^[35, 36]. 唐传祥和黄文会小组最近提出了利用皮秒级超短电子束产生太赫兹相干辐射的方法, 通过调节电子束的重复频率有望实现辐射频率的调谐, 而且能量也会得到提高^[37]. 姚建铨小组最近几年在差频产生太赫兹方面做了比较多的探索性工作, 他们认为太赫兹波参量振荡器的特性 (包括频率调谐范围、太赫兹波增益、输出方向的稳定性) 可以通过短波长光抽运得到较好的改善, 同时也阐明了若要使用长波长的光作为抽运源, 则必须缩短振荡器的腔长^[38, 39]. 程祖海小组利用高功率 CO₂ 气体激光抽运 NH₃ 和 CH₃OH 气体, 在 3 THz 附近获得了 1.35 mJ 的太赫兹脉冲能量, 最近获得了 200 mJ 的单脉冲能量^[40—43]. 米贤武小组 2009 年^[44]利用两束具有相同时延和相移的相干叠加的光脉冲详细研究了半导体超晶格的太赫兹辐射和子带 (intraband) 极化特性, 他们发现当改变外加电场时, 太赫兹辐射线的蓝移和红移随之发生变化; 而当使用单脉冲驱动超晶格时, 仅出现蓝移, 并且其强度随着时间衰减.

2. 近十年可调谐太赫兹光源研究进展

基于 600—2000 nm 波段抽运源产生的可调谐太赫兹光源由于具有窄线宽、多频率的特点因而受到更大关注. 纵观最近几年获取这种太赫兹光源的理念来看, 设计结构紧凑、调谐频率范围宽、输出功率高的太赫兹光源成为研究的重点. 从设计方式来看, 可分为两类. 第一类是, 基于双波长可调谐抽运源的太赫兹光源的设计. 一般首先设计出双波长的可调谐抽运源, 然后将这种双波长可调谐的抽运源与非线性介质或光混合器 (PM) 相互作用, 最终产生期望的可调谐太赫兹光输出. 例如, 分布反馈式激光二极管 (DFB LDs)、掺铒光纤激光 (EDFLs)、可调谐连续差频 (DF) 光源等抽运源, 都是研究的热点. 第二类是, 抽运光的注入波长固定, 利用内腔光参量振荡器 (ICPO) 实现可调谐连续太赫兹波输出. 下面我们做系统介绍.

2.1. 第一类: 基于可调谐双波长抽运源的太赫兹波的产生

这部分我们重点从 DFB LDs, EDFLs, DF 三个

方面阐述.

2. 1. 1. 基于双波长 DFB LDs 的可调谐连续太赫兹波的产生

在过去几十年,利用光导天线(PCAs)和飞秒激光(fsL)产生的太赫兹波在太赫兹时域光谱(TDS)领域已获得重大进展^[45].但由于该装置体积庞大、昂贵、功率消耗大等缺点使其应用范围受到限制.在众多应用领域,频率可调谐、结构紧凑、成本低的连续波太赫兹光源成为用户关注的焦点.1991年Brown等人,2008年Belkin等人分别提出利用共振通道LDs^[46]和量子级联激光(QCLs)^[47]实现紧凑和连续波太赫兹辐射的设想,不过,利用QCLs产生太赫兹辐射要求在极低温度的工作环境下,且输出功率仅在毫瓦级.2005年,Gregory等人优化设计了光混合器(PM)^[48]和天线,最终实现了连续波太赫兹辐射,调谐宽度在0—2 THz之间,然而转换效率极低;同年,Ito等人利用集成天线单向光二极管(UTC-PD)或称为光拍源(OBSs)也实现了连续波太赫兹辐射^[49],在1THz输出功率达到10.9 μ W.从结构来看,这两种装置都相当紧凑.上述方案中的OBSs由两个可调谐分布反馈式(DFB)反射器或分布式布拉格反射器(DBR)LDs组成,且这两个LDs的波长不同^[50].由于这两个激光源彼此独立,所以在稳频上极其困难,而且要使两光束在空间上匹配也相当不容易.

从过去科研工作者对OBSs的研究的方向来看,主要可以分为三类.第一类是单节DFB LDs(single section DFB LDs).1998年,Gu等人^[51]以及2008年Klehr等人^[52]和Osborne等人^[53]改进了过去孤立激光源的缺点,他们设计了单腔产生双波长的办法.显然这是一种极好的想法,因为这种想法克服了稳频、同步、光束空间模式匹配等棘手的问题.然而,即便如此,可调谐性差却仍是这些方案的一个不足之处.第二类是基于强增益耦合光栅的多级DFB LDs.1999年,Hui等人^[54]以及2002年,Phelan等人^[55]分别利用强增益耦合双波长DFB LDs实现了可调谐连续THz波产生的目标.然而,其可调谐范围相当窄,不到100 GHz.第三类是利用同时输出两个波长的外腔二极管激光(ECDLs)实现宽范围频率调谐.1996年,Pajarola等人^[56]利用双偏振辐射的ECDLs获得了毫米波(即低端太赫兹波)输出.2005年,Hoffmann等人^[57]也利用双波长ECDLs实现了太赫兹辐射.但ECDLs方案中调节波长的机

械移动部分仍不尽人意,而且该装置也比较昂贵.

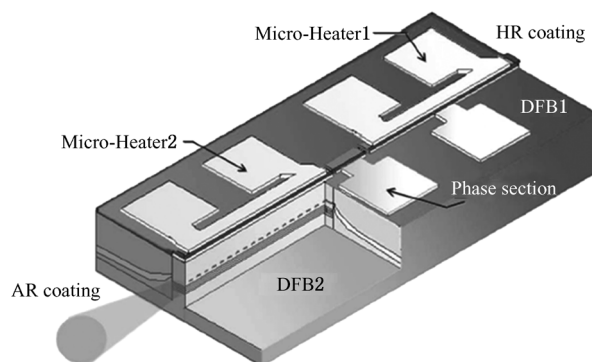


图1 基于DFB的双模可调谐LDs(该图片来自文献[58])

2009年,韩国的Kim等人^[58]采取了类似于上述第二类方法的设计方案,最终实现了紧凑的、可调谐连续的THz辐射输出.他们利用两个DFB和一个居于这两个DFB之间的相位节构造了单片双模半导体激光器,其工作波长位于通信波段1550 nm范围.其结构如图1所示.当各自独立地调节DFB模块上的微加热器的电流时,各DFB的工作波长可实现独立调节.然后再将这两个DFB产生的光作为抽运光与掺 Fe^+ 的InGaAs的PM相互作用,最终获得了从0.17—0.49 THz频率范围的连续THz辐射.然而这种方案的一个最大问题是两个DFB的微加热器注入的功率并不能平衡两个孤立模式的光功率输出,而且即便克服了相位节的光损耗问题,也会减小边带信噪比,另外由于热效应也会导致其他的模式移动.这个方案的另外一个问题是调谐频率范围仍然较窄,不到400 GHz,并且最大输出功率为1 nW,转换效率不超过 10^{-7} .

2. 1. 2. 基于双波长 EDFLs 的可调谐连续太赫兹波的产生

为了获得宽调谐范围的连续波太赫兹辐射,基于1550 nm通信波段双波长光纤激光器的OBSs是另一种可以实现结构紧凑、成本低廉的OBSs抽运源系统.在过去20年,人们相继对基于光纤双波长激光器的设计方案进行了研究.1997年,Li等人^[59]利用由两个反射光纤光栅,一根1 m长的掺铒光纤(EDF),一个50:50耦合器(1550 nm)和一个光纤偏振控制器组成的驻波激光腔在980 nm抽运光的驱动下实现了双波长激光输出,当调节陶瓷电致伸缩体上的电压时最终可以实现可调谐双波长激光输出,两激光谱线的间距可以从0.8 nm变化到1.8 nm.2008年前后,EDF的双波长可调谐性在微波领

域得到了较好的发展^[60-62],由于超出了太赫兹辐射范围,在此不做介绍.

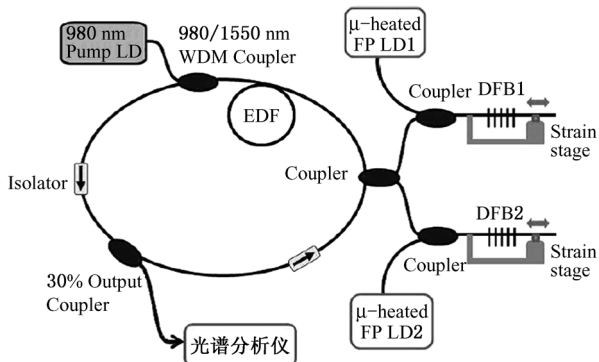


图2 双波长可调谐 EDF 激光器(该图片来自文献[63])

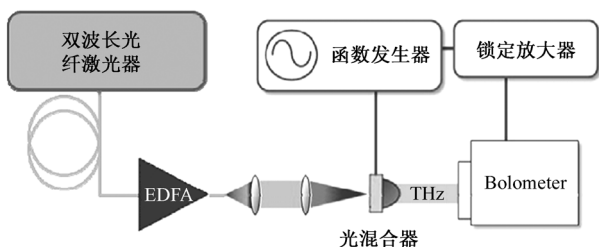


图3 基于双波长光纤激光的太赫兹波产生示意图(该图片来自文献[63])

不过,将 EDF 应用到太赫兹领域在 2010 年有了较大的进展,Jeon 等人^[63]为了将 1550 nm 波段的 DFB 激光的调谐范围提高到 500 GHz,他们利用分布反馈式光栅 (FBGs) 和法布里-珀罗 LDs (FP-LDs) 实现了掺 Er^{3+} 光纤双波长激光器的宽范围调谐,并且获得了 3.2—9.6 nm 的波长调谐范围,该装置原理图如图 2 所示.然后将这种抽运源的输出光在低温生长的 InGaAs PM 中混频,最终产生了调谐范围在 0.3 至 0.8 THz 的连续 THz 波输出,该装置示意图如图 3 所示.不过,对于 20 mW 的光输入功率,产生的太赫兹辐射(在 0.3 THz 频率处)的输出功率为 1 nW,其转换效率不超过 10^{-7} .

2.1.3. 基于双波长激光非线性差频的可调谐太赫兹波的产生

利用两束不同波长的激光与非线性晶体相互作用产生差频,最终获得太赫兹波的方式通常称为 DFG,这是获取太赫兹辐射的另外一种有效的方法.从 DFG 的产生方式来看,主要分为两种,一种就是利用系统庞大的 CO_2 激光器输出的中红外(MIR)波段(例如 10.6 μm 波段或 9.6 μm 波段)的两束激光与 GaSe, GaAs, GaP, ZnGeP₂ 等非线性介质相互作用

用差频,以获得太赫兹辐射.这方面的文献较多,其中 Ding 小组^[64]和 Tochitsky 小组^[65]在这方面做了大量的实验工作.由于该 DFG 系统体积庞大且昂贵,所以目前只停留在实验室研究阶段,在应用方面受到限制,在此我们不做展开.另外一种就是利用近红外(NIR)波段或通信波段(800—2000 nm)的两束不同频率的激光与 GaSe, GaAs, GaP, ZnGeP₂ 等非线性介质相互作用差频来获得太赫兹辐射. NIR 光源相对 MIR 光源而言价格便宜得多,这种光源在市场上极易获得,且体积小便于集成,近年来成为 DFG 的首选抽运光源.

2002 年,Shi 和 Ding^[66]利用重复频率为 10 Hz,脉冲能量为 6 mJ,脉冲展宽为 10 ns,波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光作为其中一束,由 Nd:YAG 的三次谐波源和光参量振荡器构成的 MOPO (Master Oscillator-Power Oscillator) 系统产生的另外一束作为可调谐激光(波长调谐范围 0.73—1.8 μm).然后让这两束激光在 GaSe 晶体中差频产生太赫兹辐射.其原理图如图 4 所示.该太赫兹辐射源的调谐范围可以达到 0.18—5.27 THz,且最大峰值功率(1.53 THz 处)达到 69.4 W,对应的最大光子转化效率为 3.3%.然而,由于重复频率较低,所以其平均功率不到 7 μW ,因此只能作为脉冲模式工作,并且激光器体积仍然庞大、价格昂贵.同年,日本的 Ito 等人^[67]设计了一种类似于 Shi 等人^[66]的基于 Nd:YAG 的 MOPA (Master Oscillator-Power Amplifier) 系统,产生了双波长抽运光.然后在斜条型周期性极化铌酸锂 (PPLN) 晶体中进行混频,最终产生调谐范围为 173 μm 至 202 μm 的太赫兹辐射.然而这种太赫兹激光器的可调谐性和准相位匹配 (QPM) 建立于手工调整 PPLN 晶体角度的基础上,显然其调谐效率极低.2003 年,Shi 和 Ding^[68]基于他们 2002 年的工作^[66]做了一些简单的变化,即仅用 ZnGeP₂ 代替 GaSe 非线性晶体,最终在两种共线相位匹配条件下获得了两种调谐范围即 66.5—300 μm 和 72.7—237 μm 的输出光,其最大峰值功率为 36W.2005 年,Shi 和 Ding^[69]利用与他们过去相同的装置^[66, 68]将产生的双波长激光注入到 GaP 非线性晶体中混频最终获得了 71.1—2830 μm 的太赫兹辐射,其中最大峰值功率为 15.6W(在 173 μm 处).2007 年 Ding^[70]的那篇重要文献很好地总结了他们小组过去做的关于 DFG 的工作,他们采用了与文献[66]相同的抽运源装置,只是增益介质作了变化,方案上做了优化.根

据他们的报道,当利用 GaSe 晶体时,THz 输出波长可以从 66.5 μm 调谐到 5664 μm ,最大峰值功率可以达到 389 W,对应的最大光子转换效率达到 19%.当使用 ZnGeP₂ 晶体时,基于两种相位匹配模式,THz 输出波长可以从 83.1 μm 调谐到 1642 μm 以及从 80.2 μm 调谐到 1416 μm ,最大输出功率达到 134 W.当使用 GaP 晶体时,THz 输出波长可以从 71.1 μm 调谐到 2830 μm ,然而最高峰值功率仅达到 15.6 W.

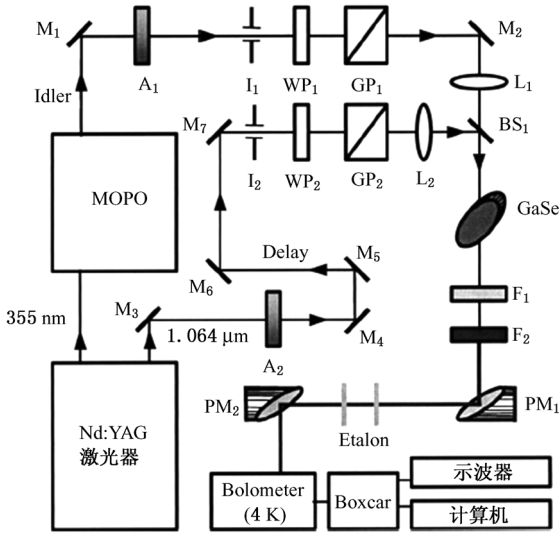


图4 基于 GaSe 的共线相位匹配 DFG (该图片来自文献[66])

2007 年,日本东北大学的 Ndiaye 等人^[71] 基于强度调制器研究了处于 1550 nm 波段的两个 CW ECLDs (调谐范围:从 1520 nm 至 1560 nm) 的双波长抽运光源特性.他们获得了 kW 级峰值功率、170 ps 脉冲宽度、1 MHz 重复频率的同步双波长光脉冲.当将该双波长激光注入到斜型 PPLN 时,最终差频得到 1.5 THz 的太赫兹辐射.该方案与 2004 年该小组的 Sasaki 报道的几乎相同^[72].这是一种紧凑、低廉、可调谐连续的太赫兹波源.

2008 年, Miyamoto 等人^[73] 首次利用 0.7—1 μm 波段的 两束抽运光与 N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline (BNA) 非线性晶体相互作用,最终差频产生了 0.1—15 THz 宽调谐范围的太赫兹辐射.2009 年, Miyamoto 等人^[74] 再次改进了该实验方案,并利用图 5 装置获得 0.1—20 THz 宽调谐范围的太赫兹辐射,且输出功率比以前提高了 10 倍.

2009 年, Burgess 等人^[75] 报道了基于光子晶体三振荡器系统的 DFG 过程,提出了通过改变 Q 因子最终可以实现 THz 输出功率提高的理论预言.同

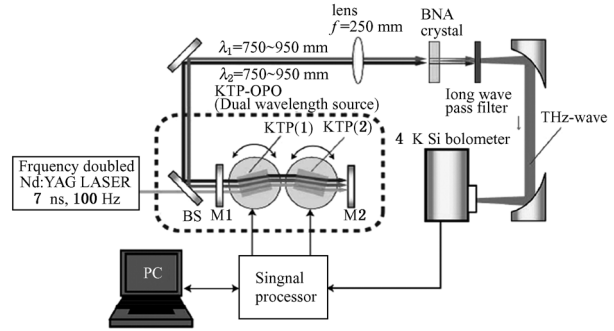


图5 宽调谐范围的单频 BNA DFG THz 波源 (该图片来自文献 [74])

年, Ruan 等人^[76] 提出了期望基于 DFG 提高 THz 光子转换效率的金属斜槽波导.并在完善全矢量耦合模理论的基础上提出了高转换效率的必要条件:大耦合系数、相位匹配和低传输损耗.数值模拟表明,当满足这些条件时,该结构的金属波导能够比介电波导的光子转换效率高一个数量级.并且他们给出了实现相位匹配的两步方案.

2010 年, Zhao 等人^[77] 设计了将两激光振荡器融为单一的调 Q Nd:YLF 激光器的样机方案,他们将该激光器产生的双波长在 GaSe 非线性晶体中混频,最终差频产生 1.64 THz、平均功率为 1 μW 的太赫兹输出.这是一款相当紧凑的便携式连续太赫兹波源,其总体积为 30.48 cm \times 15.24 cm \times 10.16 cm,如图 6 所示.唯一不足的是不可调谐.不过这为我们设计紧凑便携式可调谐连续太赫兹源提供了很好的思路.

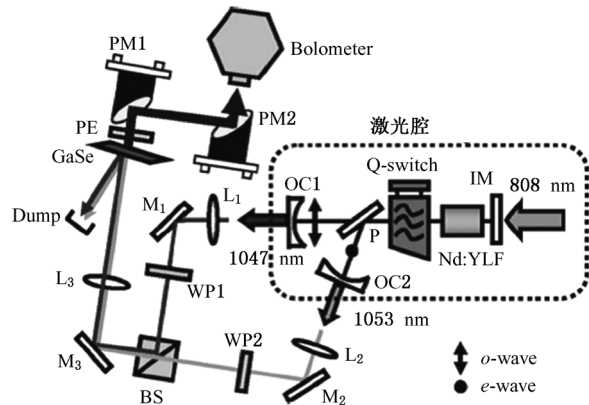


图6 基于 DFG 的紧凑便携式太赫兹波源 (该图片来自文献[77])

2.2. 第二类:抽运源注入波长固定,利用内腔光参量振荡器 (ICOPO) 实现可调谐连续太赫兹波输出

与第一类不同的是,ICOPO 重点不是首先设计

出可调谐的双波长抽运源,而是基于腔内某一晶体的二次非线性过程或两块晶体的非线性过程所遵循的准相位匹配条件来获得太赫兹辐射,并通过改变晶体的温度,以实现太赫兹辐射的调谐.

2006年,英国圣安德鲁斯大学的 Edwards 等人^[78]利用基于非共线相位匹配条件的交叉腔产生了 1.2—3.05 THz 调谐范围、光谱宽度小于 100 GHz 的可调谐准连续波(QCW)太赫兹辐射.这种太赫兹辐射源紧凑(光腔长度不超过 20cm)并且工作在室温下.工作原理图如图 7 所示.当调节闲置波腔镜 M_3, M_4 时,相位匹配角便得到调节,从而实现了可调谐的目的.

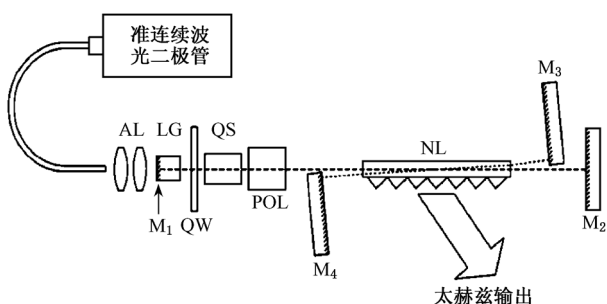


图 7 非共线相位匹配 OPO THz 辐射源示意图(该图片来自文献[78])

2007年,德国波恩大学的 Breunig 小组^[79]提出了基于双非线性晶体的 OPO 连续波太赫兹辐射源.他们通过改变两块非线性晶体的温度最终实现了 DFG 的可调谐性.当两块晶体的温度差从 24 K 减小到 13 K 时,波长差从 21 nm 减小到 11 nm,对应的太赫兹辐射调谐范围变化为 1.3—2.5 THz.该方案利用功率为 10 W、工作波长为 1030 nm 的连续波 Yb:YAG 作为抽运源;将曲率半径为 100 mm 的两凹面镜以及两平面镜构成参量振荡腔,整个长度为 45 cm.相隔 1 mm 的两块掺镁的 PPLN 晶体长度均为 2.5 cm,并且准相位匹配周期为 30.5 μm .晶体 1 的温度保持在 55 $^{\circ}\text{C}$ 左右,晶体 2 的温度则从 55 $^{\circ}\text{C}$ 变化到 79 $^{\circ}\text{C}$ 左右.这种类似蝴蝶结的实验示意图如图 8 所示.该方案的太赫兹转换效率为 5×10^{-6} .

2009年1月份,该小组^[80]利用与 2007年^[79]几乎完全相同的蝴蝶结 OPO 在基于非线性级联过程更加简单地实现了可调谐连续太赫兹波源.如图 9 所示.

该方案中的非线性晶体是掺 MgO 的 PPLN 晶体.这种非线性级联过程可以用下面的示意图 10 来进行描述.图中 k_p, k_s, k_i, k_A 分别表示抽运光、信号

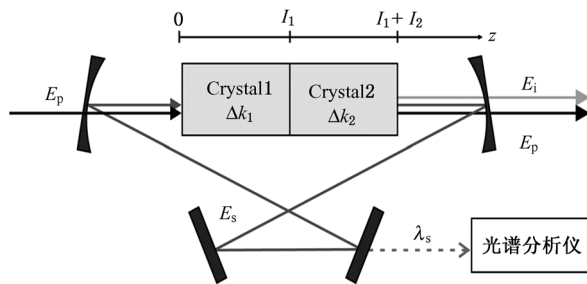


图 8 蝴蝶结 OPO THz 辐射源示意图(该图片来自文献[79])

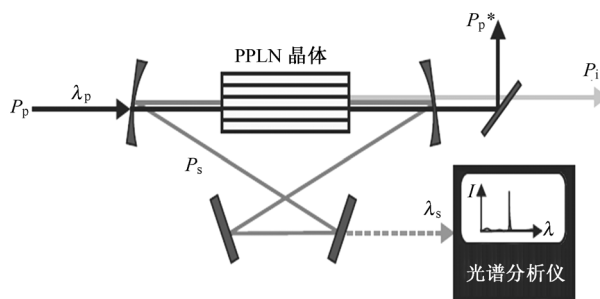


图 9 基于非线性级联的蝴蝶结 OPO THz 前向辐射源(该图片来自文献[80])

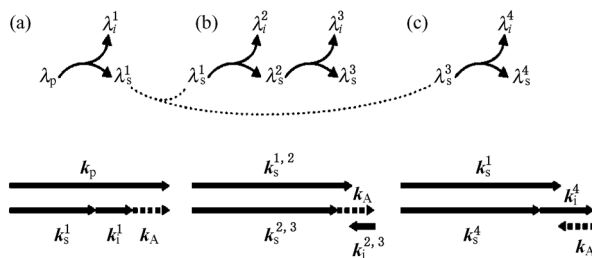


图 10 非线性级联过程

光、闲频光、周期波矢.对应图 10 中的初始相位匹配的参量振荡过程可以用图 10(a)表示:抽运波长 λ_p^1 分成闲频波 λ_i^1 和信号波 λ_s^1 .然后产生的信号波作为图 10(b)和(c)参量过程的抽运光进行进一步的前向和后向光参量过程.

2009年12月份,该小组^[81]采用与他们过去方案^[80]完全相同的装置通过非线性级联过程最终差频产生了 1.3—1.7 THz 调谐范围的太赫兹辐射,而且输出功率超过 1 μW ,最终转换效率不超过 10^{-6} .原理图如图 11 所示.

从 ICOPO 产生太赫兹辐射的过程可以看出这类激光器通常在处于高于室温的环境下工作,加热炉温度的稳定性对太赫兹波输出功率有较大影响;另外实现快速调谐也是个极具挑战的问题.

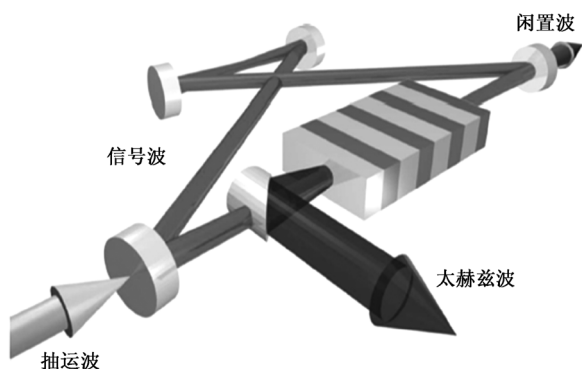


图 11 非线性级联的蝴蝶结 OPO THz 后向辐射源(该图片来自文献[81])

3. 结 论

总之,本文紧紧围绕紧凑性、便携式、调谐宽度和转换效率这几个特点对最近十年太赫兹辐射源的研究工作进行了比较详细的阐述. 针对产生可调谐太赫兹波的双波长抽运源,我们重点分析了 DFB LDs, EDFLs, DF 这三种类型. 分析表明,利用 DFB LDs 实现的太赫兹调谐范围较窄,一般不到 0.4 THz,并且转换效率不超过 10^{-7} ;利用 EDFLs 方式实现的太赫兹调谐范围一般可以达到 0.5 THz,但转

换效率也不超过 10^{-7} ;虽然利用 DF 方式实现的太赫兹调谐范围较宽,可以达到 20 THz,但转换效率也不超过 10^{-4} . 相对而言,DF 方式在获得宽调谐范围的太赫兹辐射方面具有较大的潜力,但距离紧凑型和便携式要求还有相当大的差距. 另外,针对非线性级联过程,我们重点分析了 ICOPO 产生可调谐连续太赫兹波这一类型. 分析表明,当准相位匹配条件满足情况下,通过连续调节 PPLN 晶体温度,可以实现连续调谐的目的,其调谐宽度可以达到 2THz 左右,同样这类太赫兹光源的转换效率也极低,一般不超过 10^{-6} .

从以上分析可以知道,DF 方式和 ICOPO 方式产生的太赫兹调谐宽度相对较宽,转换效率相对较高,如果在体积紧凑型方面做些努力,相信可以获得一定范围的应用.

不过,目前太赫兹光源仍存在几点不足:产生方式复杂而且转换效率极低;调谐宽度相对较窄. 这些都是太赫兹光源研究领域目前碰到的非常棘手的问题. 单从光学频率转换的角度来实现紧凑型、低廉、便携式、宽调谐太赫兹相干辐射恐怕是件非常难做到的事情. 看来,为了提高转换效率并实现宽调谐的太赫兹相干光源,必须借助其他方式另求新的研究思路.

- [1] Cibella S, Ortolani M, Leoni R, Torrioli G, Mahler L, Xu J H, Tredicucci A, Beere H E, Ritchie D A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 213501
- [2] Shi Y L, Zhou Q L, Zhang C L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4515
- [3] Ariyoshi S, Otani C, Dobroui A, Sato H, Kawase K, Shimizu H M, Taino T, Matsuo H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 203503
- [4] Chen Q, Tani M, Jiang Z, Zhang X C 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 823
- [5] Ma M R, Chen Y L, Wang L M, Wang C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1854
- [6] Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y, Inoue H 2003 *Opt. Express* **11** 2549
- [7] Kuroda R, Sei N, Yasumoto M 2008 *Infrared Phys. Technol.* **51** 390
- [8] Kuroda R, Sei N, Oka T, Yasumoto M, Toyokawa H, Ogawa H, Koike M, Yamada K 2008 *Radiat. Phys. Chem.* **77** 1131
- [9] Chen H, Wang L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2785
- [10] Shen Y C, Lo T, Taday P F, Cole B E, Tribe W R, Kemp M C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241116/1
- [11] Nagel M, Haring B P, Brucherseifer M, Kurz H, Bosscherhoff A, Büttner R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 154
- [12] Tian L, Zhou Q L, Zhao K, Shi Y L, Zhao D M, Zhao S Q, Zhao H, Bao R M, Zhu S M, Miao Q, Zhang C L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 010703
- [13] Liu H B, Chen Y Q, Zhang X C 2007 *J. Pharm. Sci.* **96** 927
- [14] Auston D H 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 101
- [15] Lee C 1977 *Appl. Phys. Lett.* **30** 8
- [16] Gu P, Tani M, Kono S, Sakai K, Zhang X C 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 5533
- [17] Huber R, Brodschelm A, Tauser F, Leitenstorfer A 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3191
- [18] Liu K, Xu J, Zhang X C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 863
- [19] Dai J M, Karpowicz, Zhang X C 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 023001
- [20] Esaki L 1958 *Phys. Rev.* **109** 603
- [21] Gunn J B 1963 *Sol. St. Comm.* **1** 88
- [22] Madey J M 1971 *J. Appl. Phys.* **42** 1906
- [23] Dyakonov M, Shur M S 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2465
- [24] Knap W, Deng Y, Romyantsev S, Shur M S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4637
- [25] Deng Y, Kersting R, Xu J, Ascazubi R, Zhang X C, Shur M S, Gaska R, Simin G S, Asif Khan M, Ryzhii V 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 70

- [26] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, Mckinney K, Neil G R, Williams G P 2002 *Nature* **420** 153
- [27] Korolev A, Zaitsev S, Golenitskij I, Zhary Y, Zakurdayev A, Lopin M, Meleshkevich P, Gelvich E, Negirev A, Pobedonostsev A, Poognin V, Homich V, Kargin A 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 2929
- [28] Ives R 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1277
- [29] Tucek J, Gallagher D, Kreisler K 2008 *Proc. IEEE IVEC* Apr. 16
- [30] Mineo M, Paoloni C 2010 *IEEE Trans. Electron Devices* **57** 1481
- [31] Mathis L E S, Parker J T 1963 *Appl. Phys. Lett.* **16** 16
- [32] Chang T Y, Bridges T J 1970 *Opt. Commun.* **1** 423
- [33] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie DA, Iotti R C, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
- [34] Hu Q, Williams B S, Kumar S, Callebaut H, Kohen S, Reno J L 2005 *Semi. Sci. Tech.* **20** S228
- [35] Zhang K C, Wu Z H, Liu S G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3402
- [36] Hu M, Zhang Y X, Yan Y, Zhong R B, Liu S G 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3877
- [37] Liu W X, Tang C X, Huang W H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 062902
- [38] Sun B, Liu J S, Li E B, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2846
- [39] Liu H, Xu D G, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1077
- [40] Qi C C, Zuo D L, Lu Y Z, Miao L, Yin J, Cheng Z H 2010 *Optics and Lasers in Engineering* **48** 888
- [41] Qi C C, Zuo D L, Meng F Q, Tang J, Cheng Z H 2010 *Opt. Commun.* **283** 574
- [42] Qi C C, Zuo D L, Lu Y Z, Tang J, Cheng Z H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 114202
- [43] Qi C C, Zuo D L, Meng F Q, Lu Y Z, Jiu Z X, Cheng Z H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4641 (in Chinese) [祁春超、左都罗、孟凡奇、卢彦兆、纠智先、程祖海 2009 物理学报 **58** 4641]
- [44] Li M, Mi X W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5534
- [45] Kono S, Tani M, G P, Sakai K 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 4104
- [46] Brown E R, Söderstrom J R, Parker C D, Mahoney L J, Molvar M K, McGill T C 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 2291
- [47] Belkin M A, Capasso F, Xie F F, Belyanin A, Fischer M, Wittmann A, Faist J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 201101
- [48] Gregory S, Baker C, Tribe W R, Bradley I V, Evans M J, Linfield E H, Davies A G, Missous M 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 717
- [49] Ito H, Nakajima F, Furuta T, Ishibashi T 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** S191
- [50] Demers J R, Logan R T, Jr, Brown E R 2007 *Microwave Photonics Tech. Digest* Victoria Canada 92
- [51] Gu P, Tani M, Hyodo M, Sakai K, Hidaka T 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** L976
- [52] Klehr A, Fricke J, Knauer A, Erbert G, Walther M, Wilk R, Mikulics M, Koch M 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 289
- [53] Osborne S, O'Brien S, O'Reilly E P, Huggard P G, Ellison B N 2008 *Electron. Lett.* **44** 296
- [54] Hui R, Zhu B, Demarest K, Allen C 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 518
- [55] Phelan R, Weldon V, Lynch V M, Donegan J F 2002 *Electron. Lett.* **38** 31
- [56] Pajarola S, Guekos G, Mork J 1996 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 157
- [57] Hoffmann S, Hofmann M, Kira M, Koch S W 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** S205
- [58] Kim N, Shin J, Sim E, Lee C W, Yee D S, Jeon M Y, Jang Y, Park K H 2009 *Opt. Express* **17** 13851
- [59] Li S P, Ding H, Chan K T 1997 *Electron. Lett.* **33** 52
- [60] Chen D, Fu H, Liu W 2008 *Electron. Lett.* **44**
- [61] Zhang H, Liu B, Luo J H, Sun J, Ma X R, Jia C L, Wang S X 2009 *Opt. Commun.* **282** 4114
- [62] Pan S L, Yao J P 2009 *Opt. Express* **17** 5414
- [63] Jeon M Y, Kim N, Shin J, Jeong J S, Han S P, Lee C W, Leem Y A, Yee D S, Chun H S, Park K H 2010 *Opt. Express* **18** 12291
- [64] Jiang Y, Ding Y J J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 091108
- [65] Tochitsky S Y, Sung C, Trubnick S E, Joshi C, Vodopyanov K L 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 2509
- [66] Shi W, Ding Y J, Fernelius N, Vodopyanov K 2002 *Opt. Lett.* **27** 1454
- [67] Sasaki Y, Avetsyan Y, Kawase K 2002 *Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications (NLO)* paper: MB5
- [68] Shi W, Ding Y J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 848
- [69] Shi W, Ding Y J 2005 *Opt. Lett.* **30** 1030
- [70] Ding Y J 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 705
- [71] Ndiaye C, Sugiyama T, Nagano S 2007 *Conference on Lasers and Electro - Optics (CLEO Pacific Rim)*
- [72] Sasaki Y, Yokoyama H, Ito H 2004 *Opt. Express* **12** 3066
- [73] Miyamoto K, Minamide H, Fujiwara M, Hashimoto H, Ito H 2008 *Opt. Lett.* **33** 252
- [74] Miyamoto K, Ohno S, Fujiwara M, Minamide H, Hashimoto H, Ito H 2009 *Opt. Express* **17** 14832
- [75] Burgess I B, Zhang Y N, McCutcheon M W, Rodriguez A W, Bravo-Abad J, Johnson S G, Loncar M 2009 *Opt. Express* **17** 20099
- [76] Ruan Z, Veronis G, Vodopyanov K L, Fejer M M, Fan S 2009 *Opt. Express* **17** 13502
- [77] Zhao P, Ragam S, Ding Y J, Zotova I B 2010 *Opt. Lett.* **35** 3979
- [78] Edwards T, Walsh D, Spurr M, Rae C, Dunn M, Browne P 2006 *Opt. Express* **14** 1582
- [79] Breunig I, Sowade R, Buse K 2007 *Opt. Lett.* **32** 1450
- [80] Kiessling J, Sowade R, Breunig I, Buse K, Dierolf V 2009 *Opt. Express* **17** 87
- [81] Sowade R, Breunig I, Cámara Mayorga I, Kiessling J, Tulea C, Dierolf V, Buse K 2009 *Opt. Express* **17** 22303

Comprehensive Survey for the Frontier Disciplines

Latest advances in THz coherent light source pumped by 600—2000 nm waveband pumped source^{*}

Qi Chun-Chao Ouyang Zheng-Biao[†]

(THz Technical Research Center of Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, Shenzhen 518060, China;
College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Received 18 January 2011; revised manuscript received 31 March 2011)

Abstract

Recently, due to the potential applications, the developing of compact, portable, low cost, and tunable THz wave became a research focus of THz technology. The light source with a wavelength range from 600—2000 nm frequently serves as a pumped source of THz wave due to its property of compact size, low cost, tunable frequency and stable operation. In this paper, tunable dual-wavelength continuous-wave pumping source and THz generator with an internal-cavity optical parameter oscillator are overviewed and analyzed in detail. It is shown that pumping source in the near-infrared wave band is more advantageous than those in the mid-infrared wave band for compactness in size. It is also shown that the difference frequency and nonlinear cascade processes have become an important way to generate THz radiation for wide tuning merit in such a system.

Keywords: THz radiation, near-infrared waveband, tunable width, nonlinear cascade processes

PACS: 07.57.Hm, 42.60.By, 42.60.Pk, 42.65.Yj

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60877034, 60471047), the Guangdong Natural Science Foundation (Grant No. 8251806001000004), and the Shenzhen Science Project (Grant Nos. 200720, 200805).

[†] Corresponding author. E-mail: zboyang@szu.edu.cn