

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0022-04

# 基于光学技术的太赫兹相干辐射源研究

高润梅

(桂林工学院数理系, 广西 桂林 541004)

**摘要** 由于太赫兹辐射的独特性质和潜在的应用价值, 国内外关于太赫兹波的产生和探测的研究正呈现日益繁荣的景象, 目前太赫兹相干辐射源的研究已成为太赫兹技术领域最重要的前沿课题之一。介绍了产生太赫兹相干辐射的三种主要途径: 一是光学技术, 它从高频向低频发展, 其代表为太赫兹激光器, 如气体激光器、半导体激光器和量子级联激光器等; 二是电子学技术, 它由低频向高频发展, 如微波管、固体微波源等; 三是光电子技术, 其频率由 1 THz 向两侧展宽, 采用超快激光脉冲触发产生太赫兹脉冲。设计了基于光学技术的太赫兹相干辐射系统, 该装置根据气体振转能级跃迁原理, 采用高压直流激励方式产生受激辐射, 波导管谐振腔体, 工作气体为  $N_2$ ,  $CD_4$  和  $D_2$ , 经过优化设计, 预计可以产生 1.54 THz 和 1.58 THz 的波连续输出。

**关键词** 太赫兹技术; 太赫兹激光器; 相干辐射; 波导

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL200835s2.0022

## Research into the Terahertz Coherent Radiation Source in View of Optical Technique

Gao Runmei

(Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** Because of the unique nature of terahertz radiation and its potential applied value, the research on the generation and detection of it is increasingly flourished. At present the study of the coherent radiation of terahertz has become one of the most important frontier research topics in the field. Three main ways of the generation of terahertz coherent radiation are demonstrated here. The first one is optical technique, which develops from low to high frequency. Terahertz laser is the representative, like gas laser, semiconductor laser and quantum cascade laser. The second is electronic technique, which develops from high to low frequency, like microwave tube and solid microwave source. The third is photo electronic technique, whose frequency spreads from 1 THz to both sides. The technique that the ultra fast laser triggers terahertz pulse is adopted. The terahertz coherent radiation system is designed in view of optical technique. The principle of the device is vibrational-rotational transitions of gas, by means of high pressure direct current driving excited radiation and waveguide resonating cavity. Its functional gases are  $N_2$ ,  $CD_4$  and  $D_2$ . It may generate 1.54 THz and 1.58 THz continuous output through optimization design.

**Key words** terahertz technique; terahertz laser; coherent radiation; waveguide

## 1 引 言

太赫兹波通常是指频率在 0.1~10 THz(波长在 3 mm~30  $\mu\text{m}$ )范围内的电磁辐射。从频率上看, 该波段位于毫米波和红外线之间, 属远红外波段; 从能量上看, 在电子和光子之间。一个频率为 1 THz 的光子能量为 4.1 MeV, 特征温度为 48 K, 自然界绝大多数物体的热辐射都在太赫兹波段。尽管如此,

在 20 世纪 80 年代之前, 由于缺乏太赫兹波段的高效率发射源和相应的灵敏探测器, 这一波段的电磁辐射并没有得到深入研究。与微波和红外辐射相比, 太赫兹波段形成了不为人熟悉的“空白”。近二十年来, 随着超快光电子技术和半导体技术的发展, 为太赫兹技术提供了合适的光源和探测技术, 太赫兹技术得以迅猛发展。

**基金项目:** 国家自然科学基金(60772105)和国家 973 计划(2007CB310403)资助项目。

**作者简介:** 高润梅(1966—), 女, 副教授, 主要从事激光物理和光电子技术方面的研究。

E-mail: gaorm2002@yahoo.com.cn

## 2 太赫兹辐射源研究进展

各种太赫兹波源的研究和发展沿着这样三条途径填补太赫兹波空隙,即光学技术、电子学技术和超快光电子技术。现在这三种技术提供的相干太赫兹辐射源已经可以覆盖整个的太赫兹波段了。以下对各种技术的太赫兹波源逐一介绍。

### 2.1 光电子技术

#### 2.1.1 光电导天线产生太赫兹脉冲波

1984年,Auston等利用光电导开关发射了具有皮秒脉冲宽度的电磁辐射并利用与发射源对称的装置检测了该脉冲正是处于太赫兹频段<sup>[1]</sup>。1989年,Exter等优化了光电导开关结构使得太赫兹辐射的产生模式和传播模式相匹配<sup>[2]</sup>。1990年Darrow使用大间距的光电导天线实现了高功率脉冲太赫兹发射<sup>[3]</sup>,如图1所示。

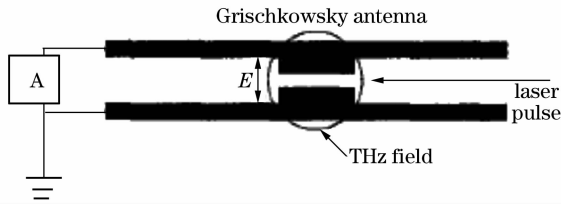


图1 激光脉冲激发光电导偶极天线产生 THz 辐射  
Fig.1 Laser pulse excite photoconductive dipole antenna to generate THz wave

#### 2.1.2 利用光生载流子产生太赫兹辐射

飞秒激光脉冲激发的光生载流子被半导体表面电场加速而产生太赫兹辐射<sup>[4]</sup>,利用这种方法可以在砷化铟表面产生较强的太赫兹辐射<sup>[5]</sup>,砷化铟具有高电子迁移率和浅的光穿透深度,使用钛宝石激光器为激发源,P型低参杂的砷化铟是效率最高的无偏压太赫兹发射源<sup>[6]</sup>,另外,其他许多种材料,如超导体、铁磁体、化学溶液和空气在超短脉冲激发下都会产生太赫兹辐射。

#### 2.1.3 利用光的非线性效应实现频率下转换产生太赫兹辐射

20世纪70年代,Yajima和Yang就分别报道了利用皮秒激光脉冲的光整流效应在非线性晶体中发射远红外辐射<sup>[7,8]</sup>。经过多种电光材料发射和探测太赫兹波的比较,发现碲化锌晶体最适用于被钛宝石激光激发而产生太赫兹脉冲<sup>[9]</sup>。Ito等利用光栅耦合的方式解决了差频产生太赫兹辐射的输出困难<sup>[10]</sup>,利用周期极化的铌酸锂晶体补偿光整流过程的相位失配问题,发展了垂直输出的窄带太赫兹光源<sup>[11]</sup>。T. Taniuchi科研小组实现了双波长 KTP-

OPO,其抽运源是调Q Nd:YAG/SHG激光器,脉冲宽度8 ns,重复频率为20 Hz<sup>[12]</sup>,同样利用产生的可调谐的双波长在DAST晶体中实现THz波的可调谐差频产生,如图2所示。

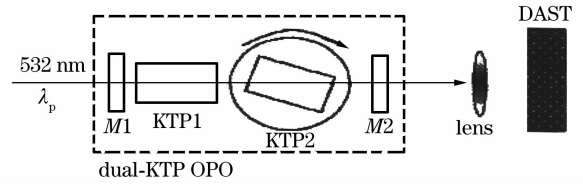


图2 用于差频产生 THz 波辐射的双 KTP 参量振荡器的实验装置

Fig.2 Experimental setup of DFG terahertz radiation using dual-KTP OPO

### 2.2 电子学技术

电子学技术向太赫兹波段的发展来自于微波技术向短波长方向的发展,经历了20世纪60年代的真空反波管到80年代基于半导体异质结构高迁移率的毫米波管。2004年,弹道场效应管中二维电子气发射太赫兹波的理论被实验证实<sup>[13]</sup>。

### 2.3 光学技术

早年的太赫兹光源是自然光源和白炽灯等非相干光源,激光器问世之后,就有了发射远红外辐射的激光源,它们分别是气体激光器,自由电子激光器和量子级联激光器。

#### 2.3.1 气体激光器

最早的远红外气体激光器是电激励发光模式<sup>[14]</sup>,70年代改用CO<sub>2</sub>激光抽运<sup>[15]</sup>,目的是更好的控制工作气体的激发态。通过更换激光介质,由CO<sub>2</sub>激光抽运的远红外激光器已发射1200条以上的激光谱线,几乎覆盖了整个太赫兹波段,目前多数脉冲光泵激光器抽运源采用TEA CO<sub>2</sub>激光器,W. Schatz等用TEA CO<sub>2</sub>激光器抽运多种分子气体得到1000多条宽带可调的脉冲激光谱线<sup>[16]</sup>,覆盖波长范围从1 mm~40 μm,抽运D<sub>2</sub>O分子时,输出激光脉冲宽度小于100,峰值功率大于200 kW,激光强度超过1.5 mW/cm<sup>2</sup>。2002年文献<sup>[17]</sup>又报道了连续和脉冲CO<sub>2</sub>激光抽运CHD<sub>2</sub>OH介质,发现5条激光新谱线。2004年A. D. Michele等报道了采用增益开关的脉冲CO<sub>2</sub>激光器抽运CH<sub>3</sub>OH介质<sup>[18]</sup>,发现了17条新激光谱线,脉冲重复频率在500~1000 Hz。在国内,中山大学以TEACO<sub>2</sub>激光器作为抽运源对分子气体THz激光器进行了较深入的理论与实验研究<sup>[19]</sup>,其研究的重点是光抽运NH<sub>3</sub>气体分子产生的THz激光,在激光的喷射机

制、频谱特性、激光器的工作参数进一步优化、小型化等方面进行了大量的系统的研究。

### 2.3.2 自由电子激光器和量子级联激光器

1971年 Madey 利用周期磁场产生了电子受激的轫制辐射,从此自由电子激光器得到迅速发展,它可以发射从 X 射线到远红外各个波段的电磁辐射,并能产生高功率输出,Jefferson 实验室利用近红外自由电子激光器中的自由电子同步辐射产生了平均功率 20 W 的太赫兹激光<sup>[20]</sup>,缺点是体积庞大功耗高,半导体量子级联激光器克服了这个缺陷,Kohler 在液氮工作温度下实现了 4.4 THz 的量子级联激光输出<sup>[21]</sup>,目前又获得了 1.19 THz 的低频输出,且可以输出连续的和脉冲的太赫兹波<sup>[22]</sup>,转换效率高,缺点是工作温度为低温环境,不利于普及。

## 3 直流激励太赫兹气体激光辐射源的设计

在分析研究了大量的太赫兹激光源基础上,设计了直流激励分子气体太赫兹激光辐射源。该辐射源具有转换效率高,造价低,输出连续波的特点。

### 3.1 实验设计

实验装置如图 3 所示,工作气体为  $N_2$ ,  $CD_4$ ,  $D_2$ , 气体配比:  $V(N_2) : V(CD_4) : V(D_2)$  为 4:5:20。电源为 10 kV 高压恒流源,在 0.4 ~ 1.5 A, 2 ~ 5.5 kV 之间连续可调,放电管材料为耐热玻璃,管长 1.5 m,外直径 40 mm,内径 36.4 mm,谐振腔为平凹腔,输出耦合镜为凹面镜,表面镀金,玻璃基底,用千分尺调节水平位移,用螺钉调节倾斜度,小孔镜输出,透过率大于 0.95,电极材料为紫铜,水循环系统降温,探测器采用 TGS 热释探测器。

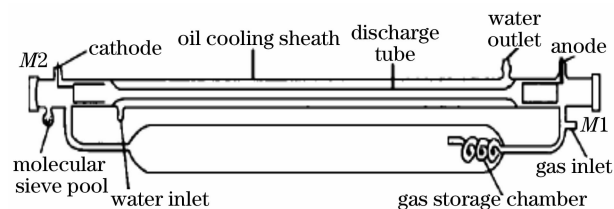


图 3 太赫兹气体激光器结构原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the gas THz laser

### 3.2 理论依据

$N_2$  与  $CD_4$  在高压作用下电离产生 DCN 分子,DCN 分子在电激励下,产生粒子数反转,在同电子态的两个转动能级之间产生受激辐射而发射太赫兹波段激光,DCN 分子为非对称线性分子,原子在空间呈直线 D—C—N 排列,具有两个拉伸和一个弯

曲振动态,共三种振动状态,图 4 为 DCN 分子能级跃迁图,从图中可以看出它在激发过程中所发出的两条谱线的波长<sup>[23]</sup>。

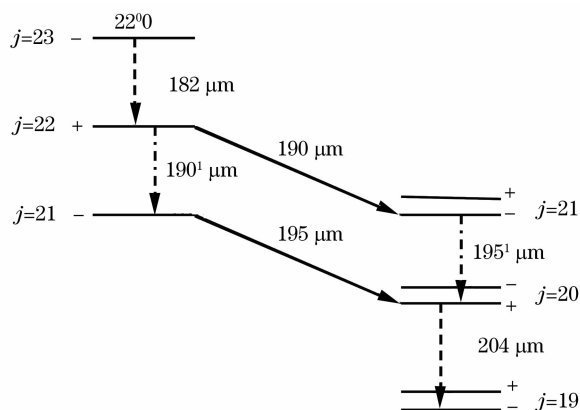


图 4 DCN 分子能级跃迁图

Fig. 4 Energy-level diagram for DCN molecule

DCN 分子连续跳跃:  $22^0_0(j=22) \rightarrow 09^1_0(j=21)$ ,  $22^0_0(j=22) \rightarrow 22^0_0(j=21)$ ,  $22^0_0(j=21) \rightarrow 09^1_0(j=20)$ ,  $09^1_0(j=21) \rightarrow 09^1_0(j=20)$ ,  $22^0_0(j=23) \rightarrow 22^0_0(j=22)$ ,  $09^1_0(j=20) \rightarrow 09^1_0(j=19)$ 。分别产生六条谱线,其中 190  $\mu\text{m}$  和 195  $\mu\text{m}$  两条谱线为激励跃迁,182  $\mu\text{m}$  和 204  $\mu\text{m}$  为自发辐射跃迁,190<sup>1</sup>  $\mu\text{m}$  和 195<sup>1</sup>  $\mu\text{m}$  为级间跃迁,只在振荡激烈时随 190  $\mu\text{m}$  和 195  $\mu\text{m}$  波产生,在实验中将使用 190  $\mu\text{m}$  和 195  $\mu\text{m}$  两种波长的激光,频率分别为 1.58 THz 和 1.54 THz,在恒流电源激励下实现连续太赫兹波激光输出。

## 4 结 论

根据气体激光器的原理设计了连续输出太赫兹波的 DCN 激光器,目前试验平台已建立,将要开始实验部分,该激光器采用直流激励方式,将实现 195  $\mu\text{m}$  和 190  $\mu\text{m}$  太赫兹波连续输出,预计输出功率可达百毫瓦,转化效率高,优点是结构简单、成本低廉、输出功率较高,不足之处是输出波长不可调<sup>[23]</sup>,且体积较大,在实验中优化该激光器结构,得到最佳输出功率和输出模式的太赫兹激光是我们正在进行的工作,未来将要着手解决的问题一是设计异型谐振腔,改变大的输出功率和小的激光器体积之间矛盾,二是寻找新的分子气体为激光介质,改变工作气体有毒的现状。

连续稳定的太赫兹激光源将为太赫兹波的研究和应用提供更加广泛的前景,也必将在太赫兹技术方兴未艾的发展中占有一席之地。

## 参 考 文 献

- 1 D. H. Auston, K. P. Cheung, P. R. Smith. Picosecond photoconducting Hertzian dipoles [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**:284~289
- 2 M. Exter, C. Fattering, D. Grischkowsky. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**:337~341
- 3 J. T. Darrow, B. B. Hu, X. C. Zhang *et al.*. Subpicosecond electromagnetic pulses from large-aperture photoconducting antennas [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**:323~328
- 4 X. C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow *et al.*. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**:1011~1016
- 5 N. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida *et al.*. High average-power THz radiation from femtosecond laser-irradiated InAs in a magnetic field and its elliptical polarization characteristics [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **84**:654~658
- 6 K. Liu, J. Xu, T. Yuan *et al.*. Terahertz radiation from InAs induced by carrier diffusion and drift [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**:155330~155338
- 7 T. Yajima, N. Takearuchi. Far-infrared difference-frequency generation by picosecond laser pulses [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1970, **9**:136~140
- 8 K. H. Yang, P. L. Richards, Y. R. Shen. Generation far-infrared radiation by picosecond light pulses in LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**:320~323
- 9 Q. Wu, X. C. Zhang. Ultrafast electro-optic field sensors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**:1604
- 10 K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi *et al.*. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO<sub>3</sub> with monolithic grating coupler [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**:753~758
- 11 Y. S. Lee, T. Meade, T. B. Norris *et al.*. Tunable narrow-band terahertz generation from periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**:3583~3587
- 12 T. Taniuchi, S. Okada, H. Nakanishi. Widely-tunable THz-wave generation in 2~20 THz range from DAST crystal by nonlinear difference frequency mixing [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(1):60~62
- 13 Y. Deng, R. Kersting, J. Xu *et al.*. Millimeter wave emission from GaN high electron mobility transistor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**:70~76
- 14 L. E. S. Msthis, J. T. Parker. Stimulated emission in band spectrum of nitrogen [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1963, **16**:16~21
- 15 T. Y. Chang, T. J. Bridges. Laser action at 452, 459, and 541 min optically pumped CH<sub>3</sub>F [J]. *Opt. Commun.*, 1970, **1**:423~427
- 16 W. Schatz. Generation of tunable far-infrared radiation by optical molecular gas laser [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 1995, **36**(1):387~393
- 17 R. C. Viscovini, F. C. Cruz, A. Scalabrin *et al.*. CHD<sub>2</sub>OH optically pumped by a waveguide CO<sub>2</sub> laser new far-infrared laser lines from the CD<sub>2</sub> wagging vibrational mode [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(8):1029~1030
- 18 A. D. Michele, K. Bousbahi, G. Carelli *et al.*. The CH<sub>3</sub>OH far-infrared laser new lines and assignments [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, **45**:243~248
- 19 Bao Yanxiang, Huang Xiao, Luo Xizhang *et al.*. Choice of three-energy-level groups on optically pumped sub-millimeter wave laser medium [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(11):1320~1323  
保延翔,黄晓,罗锡璋. 参与光泵亚毫米波激光过程的介质三能级组的选取[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(11):1320~1323
- 20 G. L. Carr, M. C. Martin, W. R. McKinney *et al.*. High-power terahertz radiation from relativistic electrons [J]. *Nature*, 2002, **420**(6912):153~156
- 21 R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram *et al.*. Terahertz semiconductor heterostructure laser [J]. *Nature*, 2002, **417**(6891):156~158
- 22 Q. Hu, B. S. Williams, S. Kumar *et al.*. Resonant-phonon-assisted THz quantum-cascade lasers with metal-metal waveguides [J]. *Semi. Sci. Tech.*, 2005, **20**:S228~S235
- 23 L. O. Hocker, A. Javan. Continuous 250 mW gas discharge DCN laser at 195  $\mu\text{m}$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **12**(4):124~129