

文章编号: 1001-3806(2006)06-0643-04

太赫兹自由电子激光器的成像原理及进展

王 骥, 迟 欣, 李 琦

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 主要介绍了几种自由电子激光器进行太赫兹成像的原理和方法, 并给出了俄罗斯和韩国等研究人员最近一两年的实验结果。指出现在太赫兹成像正向三维成像的方向发展。

关键词: 激光器; 成像系统; 太赫兹; 小型; 高能; 自由电子激光器

中图分类号: TN248.6 **文献标识码:** A

Imaging theory and development of THz free electron lasers

WANG Qi, CHI Xin, LI Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronic, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Several methods and theory of THz imaging as well as late results of the researchers in Russia and Korea are introduced. At present, THz is being developed towards 3-D imaging.

Key words: lasers; imaging systems; THz; compact; high-power; free electron laser

引 言

太赫兹波段是频率约在 0.1 THz ~ 10 THz 内的电磁波, 位于红外波段与微波波段的中间。由于大气对于太赫兹波段的强吸收, 早期的科学家利用太赫兹波段来研究一些简单分子的振动和转动光谱特性。而近 20 年来, 太赫兹技术已经发生了深刻的变革, 随着新材料提供了高功率的发射源^[1], 太赫兹被应用于越来越广的研究领域。

利用太赫兹波段进行成像是一门新兴的技术, 无论在生物^[2]、医学^[3]还是在工业中都有着广阔的应用前景。根据太赫兹产生的激光源看太赫兹成像技术的发展, 目前主要有飞秒激光器、半导体激光器和自由电子激光器等^[4], 其中研究较多的太赫兹飞秒激光器体积很大, 但却可以产生脉宽皮秒以内、毫瓦量级的超短脉冲^[5,6]。太赫兹半导体激光器体积小、结构紧凑, 一般可以产生微瓦量级的辐射, 量子级联半导体激光器的出现使功率达到毫瓦量级^[7,8]。自由电子激光器虽然体积大, 但是却可以产生平均功率数百瓦、峰值功率几千瓦的太赫兹辐射, 这为太赫兹成像带来很大好处, 如减轻探测系统复杂性、提高成像速率等。因此, 作者主要介绍一下利用小型和高功率自由电子激光器

作者简介: 王 骥 (1942-), 男, 教授、博导, 主要从事激光空间技术、X 激光等方向的研究。

Email: qiwang@hit.edu.cn

收稿日期: 2005-10-17; 收到修改稿日期: 2005-12-01

(free electron laser, FEL) 成像的原理和发展现状。

1 自由电子激光器一般原理

一般类型的激光器所发射的激光波长受到电子所处的原子能级限制, 而在自由电子激光器中电子被从原子中剥离出来, 如图 1 所示, 然后通过加速器将它们加速到高能。这些电子群聚, 以 GeV 的能量通过长的摆动器时产生自发辐射。

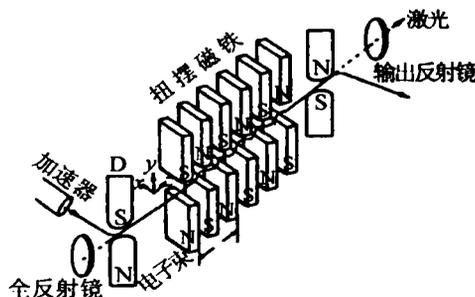


图 1 自由电子激光器原理图^[9]

如果电子束的相位空间与辐射场的相位空间匹配得非常好的话, 则辐射场与电子群聚相互作用会导致电子束以周期等于波长的密度调制, 由于电子密度调制增强了辐射的相干性将引起辐射功率的增长, 实现了放大。通过改变加速器中的电子能量或摇摆器中的磁场的强度, 可以调节激光器的波长。这种系统造价昂贵, 但却可以产生连续的脉冲形式的发射和极高的辐射功率。

2 自由电子激光器成像原理和技术

2 1 小型自由电子激光器二维扫描成像

韩国和俄罗斯在 2004 年发表了利用小型自由电子激光器进行太赫兹二维扫描成像的研究结果,成像对象为微芯片、金属和非金属环以及植物叶片。

小型自由电子激光器产生太赫兹光束具有较好的稳定性,图 2 是 JEONG 等人在冷却水温度 0.1 和环境温度 1 的条件下测量得到的,它显示了脉冲能量随时间的波动,测量中选取脉冲重复频率为 1Hz。从图中可以看到太赫兹光束的极好的稳定性,计算得到的脉冲能量的波动标准差小于 10%,并且能量的平均值得几乎不变。

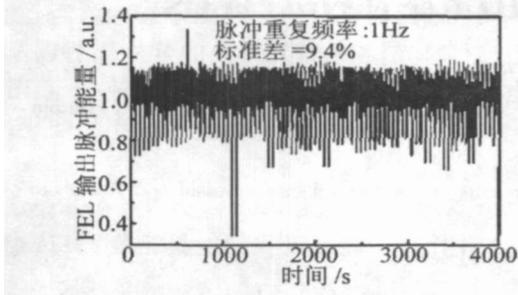


图 2 太赫兹脉冲能量随时间的漂移^[10]

所用小型自由电子激光器主要性能参数如表 1 所示。

表 1 小型自由电子激光器性能参数

波长 / μm	/	脉宽 /ps
100 ~ 1200	0.003	20

JEONG 等人对样品的二维扫描成像的系统的示意图如图 3 所示,太赫兹光束经过分束镜后分成两束,其中一束作为参考光,另一束经样品后作为信号光传入电脑。扫描系统和数据采集都是由电脑控制自动地进行,由于是对此类样品成像的首次实验,也没有进行样品的光谱分析,所以实验所用的波长可能没有调节到最佳值。

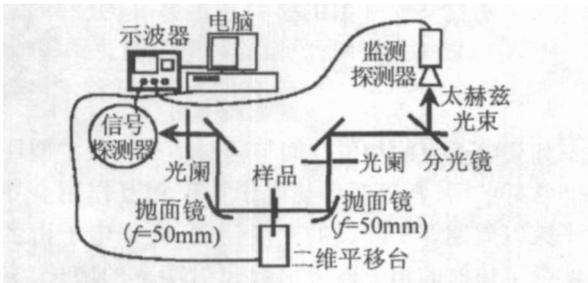


图 3 对样品进行二维扫描系统的示意图^[10]

JEONG 等人首先对如图 4 所示左侧的微芯片样品进行了成像。相对于肉眼的观察,太赫兹成像具有较大的动态量程,在所成像的黑暗区域经过放大也可以看到物体的像。右图是对黑盒子里的金属环和硅做成的环的成像,在图中可以清晰地看到两个环的轮廓,经过放大,从所成的像中还可以看到硅环内的密度

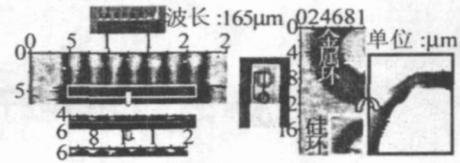


图 4 利用太赫兹辐射对微芯片以及黑盒子里的金属环和硅环的成像^[10]

的分布。利用太赫兹辐射的动态量程大的特点可以观察样品的内部情况,不用其它任何手段,太赫兹成像就能达到 10^5 的量程^[10]。

JEONG 等人还利用小型太赫兹自由电子激光对银杏叶片进行了成像,如图 5 所示,其中给出了可见光的透射成像的对比。从图中可以很容易分辨出两种成像的区别,这主要是由于水在两种频率的吸收系数不同所致^[10]。

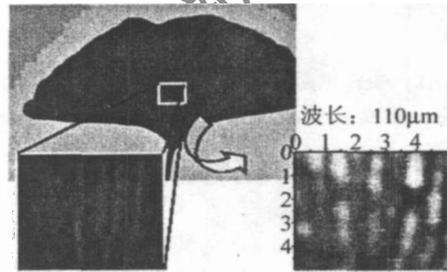


图 5 对银杏叶片的成像^[10]

2 2 高能量自由电子激光器成像

2004 年,俄罗斯研制了能够实现大功率太赫兹输出的自由电子激光器,并进行了成像研究,其激光器主要性能参数如表 2 所示。

表 2 高能量自由电子激光器性能参数

平均功率 /W	波长 / μm	/	脉宽 /ps
200	120 ~ 180	0.003	50

他们提出两种成像实验方案并进行了验证:利用远 近红外转换器 (FR-NR converter, FNC) 热成像方法和热光探测器干涉成像方法。

2 2 1 远 近红外转换器热成像 FNC 热成像技术关键在于有将远红外转换成近红外的远 近红外转换器。图 6 是 FNC 热成像原理示意图,太赫兹光束照射到能起到远 近红外转换作用的薄膜屏后,使其温度升高,

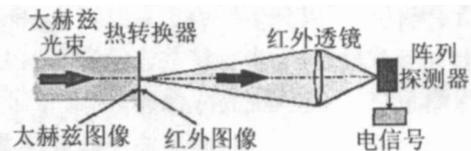


图 6 FNC 热成像方法示意图^[11]

再利用热像仪来记录薄膜屏上的二维温度分布。实验所用的热像仪在 $2.6\mu\text{m} \sim 3.1\mu\text{m}$ 光谱范围在聚焦平面上具有 128×128 的灵敏度。热像仪在室温的灵敏度是 0.03, 帧频 $30\text{Hz} \sim 40\text{Hz}$ 。

实验中采用碳纸作为远 近红外转换器,图 7a 是热像仪实物照片,图 7b 是在远 近红外转换器前放置一个漏有英文字母的铝板后所成的热像。由于热转换速度有限,仪器的重复频率只能选择大约 10Hz。由于吸收 $10^{-2} \text{W}/\text{mm}^2$ 能量就能使薄膜温度提高 0.1 ,而俄罗斯大功率 FEL 的平均功率是 200W,所以利用它进行实验已经足够了^[11]。

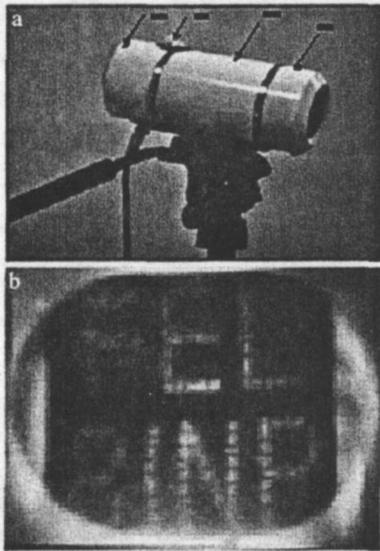


图 7 热像仪和漏有英文字母的铝板太赫兹图像^[11]
a—热像仪 b—铝板的成像

2.2.2 热光探测仪干涉成像 另一种用来成像的主要技术是热光探测技术^[12] (thermo-optical detector, TOD),这种技术利用一种特殊的介质(如玻璃板),这种介质对于可见的探测光是透明的,而对于太赫兹辐射来说却是不透明的,并利用干涉方法获得图像。

当太赫兹辐射脉冲照射到样品表面时被样品吸收,在作用时间 t 内样品光程的改变量发生如下变化:

$$S \frac{\partial S}{\partial t} = \int_0^L n(z, T(t)) dz \quad (1)$$

式中, z 是沿介质片厚度的坐标, T 为环境温度, n 为相应的折射率。

无论是热膨胀还是辐射部位折射率的变化都会使光程发生改变。相应的改变量可以写为:

$$(x, y) = -Q(x, y) \quad (2)$$

式中, $Q(x, y)$ 是由于材料吸收能量密度的二维分布函数, λ 是(可见)探测光(即探针光)的波长。

$$[\text{cm}^3/\text{J}] = 2 (\alpha + n) / c_p \quad (3)$$

式中, $\alpha = dn/dT$, α , c_p 分别是样品的热膨胀系数,特定 p 压强下的密度和比定压热容。对每种光学材料来说都是常数。记录下位相的变化就可以很容易的求出能量密度的分布。

成像实验中,利用从一个平面玻璃两表面反射光的干涉图样进行成像。CHERKASSKY 等人采用一个

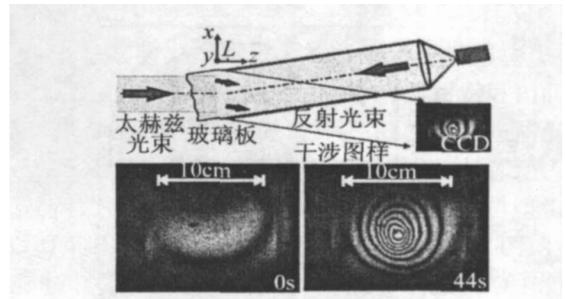


图 8 TOD 方法的示意图以及利用数码相机进行的快照^[12]

功率为 20mW 波长为 650nm 的半导体激光器作为系统的平面波光源。实验装置如图 8 所示,可见的探针光扩束成平行光,照射到玻璃板上,在太赫兹光束曝光前得到玻璃板前后表面反射的干涉图样作为参考,然后对玻璃板进行曝光(KrF 激光产生的紫外辐射以及太赫兹光束),由于能量吸收的热光效应会使干涉图样发生变化。从后表面反射的光会发生位相的变化,变化量遵循(2)式。

在每个点的位相改变 $2\pi \Delta(x, y) = 2\pi \Delta L(x, y) / \lambda$ (0) 应该正比与玻璃板吸收的能量密度,表达式可以写为:

$$E(x, y; t) = N(x, y; t) K \quad (4)$$

式中, N (一般为正数但不一定是整数) 是条纹的变化, K 是比例常数, $K = \lambda / (2(\alpha + n))$ 。是探测光的波长,其中分母中的 2 是因为光两次经过了介质板。如果光是倾斜的,还要考虑到倾斜角。

对于光学玻璃, $K \approx 4.0 \text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{条纹})$,如果选用高热光转换常数的材料会使灵敏度得到提高。另外,扫描技术的发展使直接测量能量的密度分布成为可能,这种实验的相应时间主要取决于曝光时间和冷却方法。在没有任何冷却装置的情况下,使用短脉冲辐射(40ns 的 KrF 激光)进行实验,在脉冲过后 1s 后图样恢复到了原来的图样。如果是长时间的曝光,当热量传入到玻璃板的深处,相应的弛豫时间显然会增加。如果有高热光系数的材料和足够好的冷却装置,并把探测装置加上快门,成像的频率可能达到 10 帧/s。

图 9 中展示了分别利用 FNC 和 TOD 技术得到的太赫兹光束横截面的成像。

从图中可以看到两种成像方法结果的相似,其轮廓和利用热电转换器得到的轮廓一致。

CHERKASSKY 等人还用 TOD 技术实现了精细的太赫兹成像,图 10 是用铝片做成的一个遮光板,它的外形是在环形轮廓中有一个“K”字,所有这些的宽度都约等于 3mm。把此遮光板正好放在玻璃板前,从而忽略衍射的影响。在位相差没有超过 2π 时,利用干涉的方法可以得到没有失真的太赫兹成像,如图 11 所示。相位差大于 2π 的话,得到的图像仍然很清楚,但其中会混有干涉条纹,由于热量流失使图像随着时间

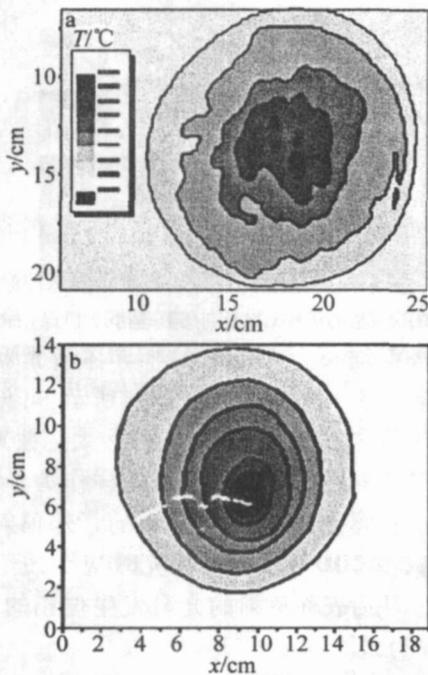


图9 利用远-近红外转换方法以及TOD方法对太赫兹光束横截面的成像^[12]



图10 铝制“K”型遮光板^[12]

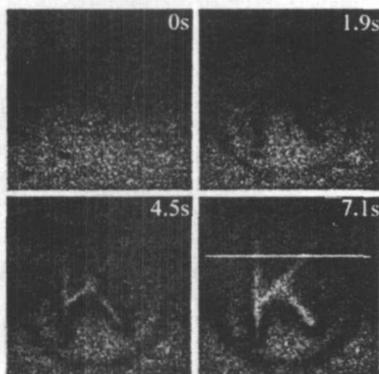


图11 利用TOD方法成像随时间的变化^[12]

的增长而模糊。由于激光能量符合高斯分布,作用到环上的能量显然小于作用到字母“K”上的能量。可以

看出在环上的能量的传输慢于在字母上能量的传输,图11证实了这个结果。

3 结论

主要介绍了韩国和俄罗斯在小型自由电子激光器和大功率自由电子激光器进行太赫兹成像的原理和进展。对于这一领域的研究,目前还不多,但由于自由电子激光技术的提高,特别是其太赫兹输出能量是目前所有太赫兹光源中最高的,因此,很有发展前景。对于其成像方法的研究还需进行深入细致的探索,现在正在向三维成像上发展。

参考文献

- [1] NEL G R. High power subpicosecond THz and IR production [A]. Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics [C]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004. 593 ~ 594.
- [2] DORIA A, GALLERANO G P, GDVENALE E *et al*. THz radiation studies on biological systems at the ENEA FEL facility [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2004, 45 (5 ~ 6): 339 ~ 347.
- [3] FITZGERALD A J, BERRY E, ZNOVEV N N *et al*. An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, 47 (7): 67 ~ 84.
- [4] FERGUSON B, ZHANG X Ch. Materials for terahertz science and technology [J]. *Physics*, 2003, 32 (5): 286 ~ 293 (in Chinese).
- [5] XU J Zh, ZHANG C L, ZHANG X Ch *et al*. Recent progress in terahertz science and technology [J]. *Progress in Natural Science*, 2002, 12 (10): 729 ~ 736.
- [6] ZHANG X C. Terahertz wave imaging: horizons and hurdles [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, 47 (21): 3667 ~ 3677.
- [7] TREDICUCCIA, KÖHLER R, BELTRAM F *et al*. Terahertz quantum cascade lasers [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2004, 21 (2 ~ 4): 846 ~ 851.
- [8] CIIR N D S. High-field electron-hole wavepacket dynamics and THz emission in semiconductor quantum wells [J]. *Opt Commun*, 1998, 148: 187 ~ 196.
- [9] LIW Sh. Free electron laser [J]. *Modern Physics*, 2005, 17 (4): 27 ~ 28 (in Chinese).
- [10] JEONG Y U, CHA H J, PARK S H *et al*. THz imaging by a wide-band compact FEL [A]. Proceedings of the 2004 FEL Conference [C]. Trieste: Comitato Conferenze Elettra, 2004. 667 ~ 670.
- [11] CHERKASSKY V S, KNYAZEV B A, KUBAREV V V *et al*. Imaging techniques for a high-power THz free electron laser [A]. Proceedings of International Conference RMMW 2004/THz 2004 [C]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004. 567 ~ 568.
- [12] CHERKASSKY V S, KNYAZEV B A, KUBAREV V V *et al*. Imaging techniques for a high-power THz free electron laser [J]. *Physics Research*, 2005, A543 (1): 102 ~ 109.