

太赫兹科学与技术展望

张希成^{1,2,†}

(1 华中科技大学武汉光电国家实验室 武汉 430074)

(2 The Institute of Optics, University of Rochester, Rochester, New York, USA)

2013-08-23 收到

† email: xi-cheng.zhang@rochester.edu

DOI: 10.7693/wl20131002

这篇文章以问答的形式表达了我个人对太赫兹科学与技术发展前景的看法。这些问答是我与“*Nature*”（《自然》杂志）、“*Nature Photonics*”（《自然光子学》杂志）、“*Science*”（《科学》杂志）和英国广播公司等这些国际期刊和媒体的近期访谈中选择出来的（下文中，Q代表国际期刊和媒体记者的提问，A代表本文作者的回答）。

Q: 您是如何对太赫兹研究产生兴趣的?

A: 我从1987年到1991年这4年一直在哥伦比亚大学David Auston教授的小组里工作，他是太赫兹超快光子学领域的先驱者，并引导我涉入这个领域的研究。太赫兹光谱学覆盖了从0.1到10 THz之间的电磁光谱，与其他辐射形式相比，太赫兹还具有光学频率以外的独特优点。一个单位的太赫兹光子能量为一个单位的X光的光子能量的一百万分之一，不会造成辐伤电离，因此被认为对身体是无害的。太赫兹也能穿透许多明显不透明的材料如硬纸板、纸、塑料和衣服，对于探查隐蔽的走私物品，如武器、爆炸物或者毒品，是非常理想的。

Q: 当您1990年开始研究太赫兹时，您最感兴趣的研究课题是什么?

A: 当我在Auston教授的小组工作时，有两种用脉冲激光器产生太赫兹波的方式，现在我们仍在使用这些方法。一是光电导天线(Auston开关)，二是光整流。后来我们发现，只要用脉冲激光器产生瞬变电流或电偶极子，就能得到一个可测的自由空间太赫兹信号。我对太赫兹波的穿透能力很感兴趣。这个辐射的不足之一是它在空气中不能远距离传输，因为空气中的水汽扮演着一个强的吸收体，这限制了该技术过去只能在数米范围内使用。

Q: 您那个时候如何获得太赫兹波？如何探测它?

A: 记得当我在Auston教授的实验室发现飞秒激光脉冲从一个无偏压的半导体硅片激励出脉冲太赫兹波时，我非常兴奋。我们当时尝试过许多我们身边能找到的材料，包括电介质、金属、纸巾、衣服、木材，以寻找新的产生太赫兹波的材料，并理解其中的物理现象。

Q: 20世纪90年代，太赫兹研究在技术上的瓶颈是什么?

A: 缺乏有效的太赫兹源是太赫兹在学术研究领域中的制约，后来缺少价格低的太赫兹源是工业应用的主要问题。飞秒激光器产生太赫兹的传统方法非常昂贵。半导体太赫兹源，尤其是量子级联激光器的发明奠定了太赫兹在工业上的应用基础。

Q: 您认为什么时候世界认识到太赫兹研究的重要性？在那时有什么里程碑式的工作被报道吗?

A: 我认为有两个里程碑：一个是在80年代末90年代初证实了通过使用超短激光脉冲产生脉冲太赫兹(Gerard Mourou, David Auston和Daniel R. Grischkowsky首创)。2002年，在欧洲的一个小组证明了半导体量子级联激光器产生4.4 THz的波，这一研究被发表在*Nature*上。我是这篇文章的审稿人之一，也是文章第一作者(Rüdeger Köhler)博士论文委员会成员。我认为这个研究打开了工业应用的大门。最近的许多研究和发展都是在这些里程碑之后。

Q: 太赫兹成像和光谱经常被认为是X射线成像和红外光谱的补充技术，太赫兹光谱或成像提供了什么类型的科学信息?

A: 是的，我喜欢把太赫兹技术作为X射线和红外技术的一个补充这个说法。对于某些材料，

太赫兹比X射线或红外表现得更好。对于低对比度的材料,如低密度类型,太赫兹波成像被证明比X射线图像有一个更好的对比度(幅度和相位);对一些光学上不透光的材料,如纸、塑料、布,太赫兹穿透能力更好。这就是为什么现在许多机场使用毫米波成像,并继续向亚太赫兹或太赫兹范围推进。某些材料(晶体或微晶)的分子或声子共振频率处于THz波段。

Q: 在您看来,当前太赫兹研究中的挑战性问题是什么?如,为太赫兹间隙建立桥梁,探索未开发的研究领域,发展太赫兹设备或其他问题?

A: 最近太赫兹源的研究已经取得了重要进展,我们想看到更多有效的太赫兹探测器,以及学术界和工业界能负担得起(性能和价格)的太赫兹系统。

Q: 由于介电常数的虚部的不同,导致材料的光学特征在太赫兹频段与在可见光或红外线频段不同,在您看来,对太赫兹而言,最令人感兴趣或重要的材料是什么?

A: 人工超常材料和等离子体元件可能会非常让人感兴趣。某种介电材料有更低的衰减和色散,除了硅以外,在超大频率范围,有接近常数同时有低的反射系数的材料特性对于基底和设备十分重要。

Q: 最近高强度太赫兹波或单周期太赫兹脉冲被证实。您认为是否还有空间提升太赫兹源?

A: 当前的高强度太赫兹波是通过激光放大器产生的,这种方式只有有限的团队能负担得起。我更希望看到利用一般激光振荡器来产生高强度和宽频的太赫兹波。

Q: 在太赫兹科学最早期,太赫兹遥感被认为是不可行的,但是您做到了。有什么测量技术在可见光频率范围被实现,而没有在太赫兹频率范围被证实,这存在什么挑战?

A: 在遥感研究中仍有许多挑战。并且在目前的探测技术中,可见光频率传感的敏感度比太赫兹频率范围好得多。

Q: 您能针对产生和探测太赫兹波这两个领域内的最新进展举一个或两个例子吗?

A: 运用空气光子学产生和探测太赫兹波。太赫兹空气光子学将空气作为太赫兹发射器和太赫兹传感器。通过非线性光学混合、等离子体荧光或声波,利用空气和激光引发空气等离子体来产生和探测太赫兹波。重点是在激光焦点附近形成的等离子体是被用作太赫兹探测器。最近我的研究小组发现,太赫兹波的振幅和相位信息能够影响激光产生的等离子体紫外荧光强度。环境空气的主要成分是氮气。在等离子体的产生过程中,这些分子被高强度的激光电离。等离子体中自由电子的分布和激发分子的数量都受到外电场的影响,经由等离子体荧光提供与之共存的太赫兹波信息。实际上,法国某研究小组在2008年飞秒激光丝状形成国际会议报道了利用高压电极产生的紫外荧光的应用。我的小组的实验结果显示,由等离子体射出的紫外线荧光强度实际上被太赫兹波调制。然而这个结果并不直观,证明也不容易。但是感谢我的学生和资深研究员不断地实验和仔细的分析,终于第一次从实验上展示在357 nm的紫外线荧光强度取决于太赫兹波电子领域的振幅和相位。这意味着通过收集和分析紫外荧光,得到太赫兹波信息,从而让其传输更远距离,因而不会被空气中的水汽吸收,太赫兹波遥感能够得以实现。

太赫兹声音增强技术是最近发现的探测太赫兹辐射的方法。当一个高能量的800 nm的光脉冲聚焦到空气中时,会产生等离子体。这个几乎瞬间产生的气体加热会发射一个冲击波,并快速地释放到声波中。声波包含了宽频率的光谱,超过人听力(20 Hz到20 kHz)的超声波范围。当一个宽带的太赫兹脉冲共线同时地聚焦在前面提到的等离子体区域,等离子体中的自由电子经过了太赫兹脉冲中的强电场,导致它们快速地加速。这些电子在气体中的加速,使它们和邻近的分子中产生了更多的频率碰撞。这个附加的转移能量导致等离子体的本地加热,因此,在声波出现处会有一个本地压力。这个太赫兹场诱导能量的增加会使声音增强。等离子体发出的声波是各向同性的,并以 $1/r$ 衰减,这使得远距离太赫兹光谱成为可能。太赫兹声

音增强技术还使得太赫兹的探测变得更加方便,因为大的光学收集器件、大的光谱仪和精确的方向控制不再是必须的。此外,声学是一个相对成熟的领域,成熟的经验和先进技术将有助于对关键的挑战提出解决方法,比如无损远距离探测。

Q: 哪些领域急需太赫兹的工业应用(药物分析,安全和成像等)?

A: 可能最需要的工业应用应该是无损探测、质量控制和缺陷检查。我曾经和300多家公司联系过,80%以上的公司表示他们最需要无损探测。

Q: 您对太赫兹的未来研究发展有什么看法?

A: 亚洲和欧洲已投入了大量资金重点支持太赫兹科学与技术的相关研究,美国军方也投入了大量的资金在太赫兹成像方面。几个主要的太赫兹科学与技术国家项目或国际中心将要形成。基金资助机构对近来大量的太赫兹仪器和系统技术发展起到了推动作用,多数进展已朝向太赫兹时域光谱系统的发展。太赫兹时域光谱系统已被证明在描述和识别许多有机化合物,尤其是在爆炸物和其相关化合物等方面是一个优秀的技术。半导体量子级联激光器的研究打开了工业应用的大门。

多学科研究可能会影响太赫兹科学,如X射线—太赫兹同步源,强太赫兹源的非线性太赫兹光谱科学,……举例如下:

- 太赫兹通信系统使安全的超高清晰度的无线视频达到史无前例的带宽;
- 环境研究和空间科学的太赫兹感应系统;

- 太赫兹工业系统在实现国土安全和质量控制方面的应用;

- 太赫兹医疗成像系统用于诊断和处理某种癌症和其他疾病;

- 太赫兹/远紫外线桌面系统用于分子水平的动态成像。

发展多尺度的太赫兹光子、电子和等离子体元件,使新的太赫兹系统成为可能,使得在降低系统价格的同时大幅提高性能。太赫兹的药物、安全和工业应用试验台,系统地证实了新的融合太赫兹光子、电子和等离子体技术。展望未来,我们预测技术发展的主要推动者将是成像应用。太赫兹成像已展示了它在无损检测和安全应用方面的潜能。太赫兹波的应用是因为它能渗透许多干燥的、非金属物质和非极性材料(如布、纸、硬纸板、陶瓷),这些应用特点引起人们的关注,使探测光学不透明目标成为可能。而且因为波长大约毫米或更短,成像的分辨率也只有几毫米,这能为可见目标的成像提供大量细节。太赫兹成像的应用也被安全应用所推动,如现在许多机场正在试验使用的全身扫描仪。

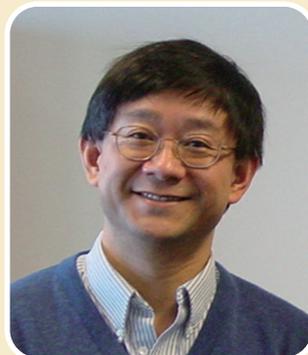
本期和下期《物理》发表的“太赫兹技术与应用”专题栏目中,安排了几篇由中国科学家分别撰写的特邀文章,这些文章介绍了太赫兹前沿领域的重大发展和成就,从中可以了解太赫兹技术应用发展的现状和前景。

张希成教授简介

张希成教授,罗彻斯特大学光学研究所所长和主任教授。1981年在北京大学物理系获得学士学位后赴美留学(CASPEA program),1986年获美国布朗大学物理学博士学位。1984—1991年先后在麻省理工学院、阿莫科研究中心和哥伦比亚大学从事研究工作。1992年进入伦斯勒理工学院任

教,曾担任主任教授、太赫兹研究中心主任和代理系主任等职务,同时也兼任中国科学院和中国多所大学的荣誉教授。2010—2014年受聘华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)教授。2012年任莫斯科国立大学荣誉教授。

张希成教授是美国物理学会(APS)、美国电气与电子工程师协会



(IEEE)和美国光学协会(OSA)会士(Fellow), 在各类国际会议中作大会发言、学术报告、学术研讨以及特邀报告 400 余次, 也是多家学术期刊杂志的编委, 累计在国内外期刊发表论文 300 余篇、参与了 20 多部书及相关章节的编写工作、拥有美国专利 28 项。张希成教授还创立了 Zomega Terahertz Corp 公司, 并担任主席和董事长等职务。Zomega Terahertz Corp 是世界三大脉冲太赫兹高科技公司之一, 专门生产脉冲太赫兹系统。他的公司得到美国 NSF, ARMY, AIR FORCE, NAVY 和 DTRA 等政府机构的支持和资助。

张希成教授从 1988 年开始从事 THz 成像和生物医学应用研究以及超快光子学、光电子学领域的研究。

张希成教授发表文章的 H-Index = 68; i10-Index = 276; 总引用次 > 22000.

近三年主要获奖情况:

- Kenneth J. Button Prize, International Society of Infrared, Milimeter, and Terahertz Waves 2014
- Honorary Professor, Lomonosov Moscow State University 2012
- OSA William F. Meggers Award 2012
- IEEE Photonic Society William Strieffer Scientific Achievement Award 2011
- William H. Wiley 1866 Distinguished Faculty Award, Rensselaer Polytechnic Institute' 2009

宇宙红外背景辐射

与本文标题相关的一个话题“宇宙微波背景辐射”, 大家已经比较熟悉了。它是大爆炸的余辉, 对其各向异性的观察和研究将帮助宇宙学家深入了解大爆炸之后延续 38 万年的期间内所发生的那些事。我们今天所看到的微波背景辐射图像, 其相应的红移 $z = 200$ 。

本文所关注的宇宙红外背景辐射, 其光源也是处于宇宙的早期, 不过比微波背景辐射的黑体辐射源要晚一些, 大致处于红移 $z = 1-10$ 的区间。近红外光的波长在 $1 \mu\text{m}$ 到数 μm 之间, 在星系光源发出时, 它们是紫外光或者可见光, 经历了宇宙中的漫漫长路来到地球, 被太空望远镜上的红外照相机接收。令科学家不解的是, 发光的星系, 我们都曾经一一为它们立了户口, 然而在减去这些已知星系光源的贡献之后, 仍有相当强度的红外光不知来源于何处; 而且, 这些超出的贡献, 在空间的各个方向上分布并不均匀, 即具有各向异性的涨落。

有一种猜测认为, 超出的红外光来自极其遥远的星系辐射, 由于强度过于微弱, 以致于发射源不能被一个个分辨。然而, 来自美国加利福尼亚大学的 Cooray 等, 基于新的观察(观察尺度从亚弧分到 1 度空间角)做出的研究表明, 超出的红外光很可能源于一种全新的机制: 两个星系对撞融合, 在此过程中有恒星被抛射出来。这些

物理新闻和动态

恒星落入了母星系所具有的大尺度球状的暗物质晕, 从而导致发光。上述解释, 比较令人信服, 因为这个假说可以说明宇宙红外背景辐射各向异性的角分布。

按照标准的大爆炸模型, 宇宙的结构起源于早期宇宙中暗物质不均匀的分布, 暗物质团块通过收集正常(重子)物质而长大, 最终形成恒星。一般认为, 第一批恒星的质量比我们的太阳要大 10—100 倍。这是因为其主要构成是氢气和氦气, 缺乏金属重元素, 结果只能靠更大的总质量来维持自身不破碎。

宇宙红外背景辐射的不均匀分布, 意味着除去已知的星系发射源以外, 剩余的暗淡的星系发光源是聚集成团的。通常用角功率谱(angular power spectrum)来描述上述聚集成团的程度。将特定波长红外光的强度分布以球谐函数 $Y_l(\theta, \phi)$ 展开为级数, 不同的角多极矩 l 对应的展开项系数将不同。研究者发现: 星系聚集成团的空间角距离可增至大约 1 度, 大于先前的模型预言值。究竟是什么原因引起上述大尺度的红外背景辐射的涨落? Cooray 等认为: 信号源是已知星系暗物质晕内的恒星。在星系碰撞的过程中, 从母星系的主体被抛出的恒星进入到星系暗物质晕, 进而发光。因此, 为了解释宇宙红外背景辐射各向异性的功率谱, 不再有必要引入新的信号源。

(戴闻 编译自 *Nature*, 2012, 490: 494, 514)