



Terahertz Imaging

太赫兹成像技术

◆ 杨玉平 张振伟/著



中央民族大学出版社

PRESS OF THE CENTRAL UNIVERSITY FOR NATIONALITIES

太赫兹成像技术

杨玉平 张振伟 著

中央民族大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

太赫兹成像技术/ 杨玉平, 张振伟著. —北京: 中央民族大学出版社, 2008. 8

ISBN 978—7—81108—526—6

I. 太… II. ①杨…②张… III. 电磁波—成像—技术
IV. 0441. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 138651 号

太赫兹成像技术

作 者 杨玉平 张振伟

责任编辑 宁 玉

封面设计 布拉格工作室

出 版 者 中央民族大学出版社

北京市海淀区中关村南大街 27 号 邮编: 100081

电话: 68472815 (发行部) 传真: 68932751 (发行部)

68932218 (总编室) 68932447 (办公室)

发 行 者 全国各地新华书店

印 刷 者 北京宏伟双华印刷有限公司

开 本 880×1230 (毫米) 1/32 印张: 7

字 数 180 千字

版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978—7—81108—526—6

定 价 18.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

电磁波谱中频率介于 $0.1 \sim 10$ 太赫兹 (THz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 的频谱范围是目前物理、化学、生物、材料和医学等诸多学科的前沿研究领域。这一频段内长期缺乏高质量辐射源的问题随着最近一些新技术的出现而得以解决, 现在已经有连续式和脉冲式的太赫兹辐射源。新的辐射源能在许多领域引发新的科学, 使越来越多的研究人员投入到这一神奇的“空白科学技术领域”。

太赫兹辐射作为一种光源和其他辐射 (可见光、X 射线、中近红外、超声波等) 一样, 可以作为物体成像的信号源。由于 THz 辐射能够很容易地穿透不导电的非透明物体, 并且可以方便地测量它透过物体后的相位变化信息, 因此太赫兹波作为 X 光的非电离的和相干的互补辐射源, 探测隐藏物体已经成为人们关注的热点。利用太赫兹成像进行遥感探测已经在安全检查、航空航天等领域中展现了巨大的潜在应用价值, 比如探查隐蔽的走私物品包括武器、爆炸物或者毒品以及航天飞机隔热层泡沫材料中的缺陷等。另外在工业和工程的很多方面还可以用于封装检测或质量监控等。

本书综述了太赫兹成像技术的相关技术、发展趋势及其应用状况, 分析了各类太赫兹成像技术的相关原理和实验装置。全书共五章: 第一章简单介绍了太赫兹辐射的基本概况, 其中包括太赫兹的发射和探测技术; 第二章介绍了太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术, 包括反射式和透射式 THz-TDS 技术, THz-TDS 技术的数据处理方法等内容; 然后讨论基于 THz-TDS 技术发展起来的太赫兹成像技术 (第三章), 重点介绍 THz 成像的分辨率、显示模式和各种成像技术; 针对 THz 辐射波长较长、分辨率较低的缺点, 第四章就基于近场光学理论的超分辨 THz 成像作了简单

综述，包括近场成像的基本原理、孔径型近场成像、辐射源型近场成像和探针型近场成像等；最后，介绍了太赫兹成像技术在实际中的各种应用。其中第 1、2、4 章及附录 A、C 内容由杨玉平编写，第 3、5 章内容由张振伟编写，附录 B 由徐新龙编写。

本书是借鉴、吸收和总结国内外多个领域的相关专家学者和科研人员的一些有价值的研究成果的基础上完成的，力求本书成为一部系统介绍太赫兹成像的、通俗易懂且能为读者所能比较容易接受的有价值的参考书籍。同时，为了满足本专业研究生的需求，对一些较重要、较复杂的现象和结论在附录中给出详细的推导；为了保证内容的前沿性和全面性，书中给出了大量的参考文献。

作者感谢所有曾经一起工作过的和现在正在一起工作的合作者们，在本书中大量地引用了他们的工作，他们包括汪力、徐新龙、施宇蕾、严伟、孙毅民等。另外，由于作者水平有限，加之时间有限，不妥或错误之处在所难免，恳望读者批评指正。

作 者

2008 年 5 月 15 日

目 录

前言.....	(1)
目录.....	(1)
第一章 太赫兹辐射理论概要.....	(1)
1.1 太赫兹辐射.....	(1)
1.1.1 THz 空隙.....	(1)
1.1.2 THz 电磁波的性质.....	(3)
1.2 THz 电磁波的产生.....	(5)
1.2.1 宽频带的THz辐射源.....	(5)
1.2.2 窄频带的THz辐射源.....	(15)
1.2.3 连续太赫兹辐射源.....	(20)
1.3 THz 电磁波的探测.....	(22)
1.3.1 光电导取样.....	(23)
1.3.2 电光取样.....	(24)
1.3.3 热辐射测量仪.....	(29)
1.4 THz 波段的元器件.....	(30)
1.4.1 THz 准直聚焦元件.....	(30)
1.4.2 偏振分光元件.....	(33)
1.4.3 光子晶体功能器件.....	(35)
参考文献.....	(37)
第二章 太赫兹时域光谱技术.....	(43)
2.1 太赫兹时域光谱技术的特点.....	(43)
2.2 THz 时域光谱系统.....	(44)
2.2.1 透射式 THz-TDS 技术.....	(44)
2.2.2 反射式 THz-TDS 技术.....	(46)

2.2.3 差异 THz-TDS 技术.....	(47)
2.2.4 激发光泵浦—THz 探测技术.....	(49)
2.3 THz-TDS 提取材料光学常数的原理.....	(50)
2.3.1 透射式 THz-TDS 提取材料光学常数的原理...	(50)
2.3.2 反射式 THz-TDS 提取材料光学常数的原理...	(52)
2.3.3 有基底时 THz-TDS 提取材料光学常数的原理	(54)
2.3.4 差分型 THz-TDS 提取材料光学常数的原理...	(56)
2.3.5 材料其他参数的提取方法.....	(57)
2.4 透射型 THz-TDS 的数据处理.....	(61)
2.4.1 洛伦兹色散理论.....	(61)
2.4.2 PbS 纳米颗粒的 THz-TDS 测量及分析.....	(63)
2.5 THz-TDS 技术在材料分析与测试中的应用.....	(66)
2.5.1 THz-TDS 在生物学中的应用.....	(67)
2.5.2 THz-TDS 在化学及相关领域中的应用.....	(69)
2.5.3 THz-TDS 在半导体材料中的应用.....	(71)
参考文献.....	(75)
第三章 衍射受限太赫兹成像.....	(80)
3.1 逐点扫描成像法.....	(80)
3.1.1 实验装置介绍.....	(80)
3.1.2 成像分辨率.....	(81)
3.1.3 成像显示模式.....	(86)
3.1.4 数据获取时间.....	(90)
3.2 反射式逐点扫描成像法.....	(95)
3.2.1 实验装置介绍.....	(96)
3.2.2 数据处理	(97)
3.2.3 深度分辨率.....	(100)
3.3 太赫兹层析成像技术	(104)
3.3.1 THz-CT 技术的基本原理.....	(105)

3.3.2	THz-CT 成像的理论模型.....	(106)
3.3.3	THz-CT 系统研究.....	(110)
3.3.4	THz-CT 技术的数据处理.....	(113)
3.3.5	THz-CT 的应用.....	(114)
3.4	太赫兹实时成像.....	(115)
3.4.1	利用电光晶体和 CCD 实现实时成像.....	(115)
3.4.2	利用啁啾脉冲技术进行的 THz 实时成像	(116)
3.5	连续太赫兹成像.....	(117)
3.5.1	连续 THz 波成像系统装置.....	(118)
3.5.2	连续 THz 波成像的数据处理.....	(121)
3.5.3	应用.....	(123)
	参考文献.....	(124)
第四章	超衍射受限太赫兹成像.....	(127)
4.1	近场光学的基本原理.....	(127)
4.1.1	近场光学突破衍射极限的原理.....	(128)
4.1.2	近场探测提高通光量的原理.....	(129)
4.2	亚波长小孔型 THz 近场成像.....	(130)
4.2.1	金属锥形小孔.....	(130)
4.2.2	集成金属小孔.....	(132)
4.2.3	存在问题.....	(133)
4.3	动态小孔 THz 近场成像.....	(136)
4.3.1	实验装置.....	(136)
4.3.2	成像结果.....	(138)
4.3.3	存在问题.....	(139)
4.4	亚波长辐射源型近场 THz 成像.....	(140)
4.4.1	ZnTe 晶体作为发射源限制的近场显微镜	(140)
4.4.2	GaAs 晶体作为发射源限制的近场显微镜.....	(142)
4.4.3	集成电路板作为发射源限制的近场显微镜....	(150)

4.4.4 探测器限制的太赫兹波近场显微镜.....	(150)
4.5 亚波长探针型近场 THz 成像.....	(152)
4.5.1 针尖散射式 THz 近场成像.....	(152)
4.5.2 针尖吸收式 THz 近场成像.....	(153)
4.5.3 探针与电光晶体型 THz 近场成像.....	(155)
4.5.4 太赫兹发射显微技术.....	(156)
4.6 近场 THz 成像技术存在的问题.....	(157)
参考文献.....	(157)
第五章 THz 成像技术的应用.....	(161)
5.1 在生物学中的应用.....	(161)
5.1.1 在牙科中的应用.....	(161)
5.1.2 在皮肤科中的应用.....	(162)
5.1.3 查找其他癌变.....	(163)
5.1.4 在生物领域中的应用.....	(164)
5.2 在安全领域中的应用.....	(166)
5.2.1 在探测隐蔽武器方面的应用.....	(166)
5.2.2 毒品、炸药等危险药品的检测与区分.....	(167)
5.3 在工业工程方面的应用.....	(169)
5.3.1 在封装检测方面的应用.....	(169)
5.3.2 在生命科学方面的应用.....	(170)
5.4 挑战与展望	(172)
参考文献.....	(173)
附录 A 闪锌矿晶体作为辐射源和探测晶体.....	(175)
A.1 (110) 晶向闪锌矿晶体.....	(175)
A.1.1 (110) 晶向闪锌矿晶体作为 THz 辐射源.....	(175)
A.1.2 (110) 晶向闪锌矿晶体作为电光晶体.....	(178)
A.2 (111) 晶向闪锌矿晶体.....	(181)

A.2.1	(111) 晶向闪锌矿晶体作为 THz 辐射源.....	(181)
A.2.2	(111) 晶向闪锌矿晶体作为电光晶体.....	(183)
A.3	(100) 晶向闪锌矿晶体.....	(186)
A.3.1	(100) 晶向闪锌矿晶体作为 THz 辐射源.....	(186)
A.3.2	(100) 晶向闪锌矿晶体作为电光晶体.....	(187)
附录 B	材料参数提取的原理及方法.....	(189)
B.1	透射型 THz-TDS 提取材料光学常数的原理.....	(189)
B.2	反射型 THz-TDS 提取材料光学常数的原理.....	(197)
B.3	有基底时 THz-TDS 提取材料光学常数的原理.....	(201)
B.4	差分型 THz-TDS 提取材料光学常数的原理.....	(206)
附录 C	Gouy 相移.....	(210)
C.1	Gouy 相移.....	(210)
C.2	Gouy 相移引起的表观超光速现象.....	(212)

第一章 太赫兹辐射理论概要

太赫兹 (Terahertz) 辐射通常指的是波长在 $30\ \mu\text{m} \sim 3\ \text{mm}$ ($0.1\ \text{THz} \sim 10\ \text{THz}$) 区间的电磁波, 其波段位于电磁波谱中的微波和红外光之间。自 20 世纪 80 年代以来, 伴随着一系列新技术、新材料的发展和应用, 尤其是超快激光技术的发展, 极大地促进了 THz 辐射的产生机理、检测技术和应用技术的研究。

太赫兹辐射作为一种光源和其他辐射一样, 可以作为物体成像的信号源。由于太赫兹电磁波具有能量低、相干测量和超宽带光谱等独特特征, 使得 THz 成像技术在多个领域中展现了巨大的潜在应用价值。本章首先从太赫兹辐射的基本原理讲起, 分别介绍 THz 辐射的性质、THz 辐射源和探测机制等。

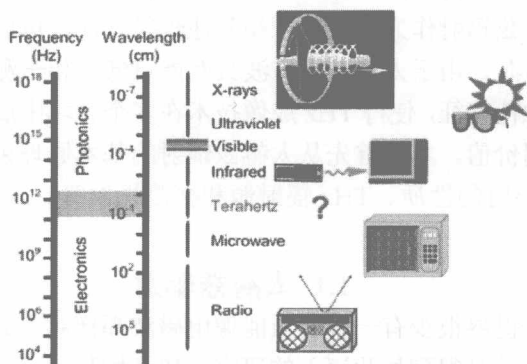
1.1 太赫兹辐射

当今世界很少有一种物质能像电磁波那样对人类有着这么大的影响, 并且得到如此深入的研究。19 世纪 60 年代, Maxwell 建立了著名的电动力学理论, 成功地预言了电磁波的存在, 并且指出光就是一种最为常见的电磁波。从 1888 年 Hertz 发现无线电波开始, 人们深入地研究了短到 γ 射线长到千米波的电磁波的性质, 而且它们已经在广泛的领域中得到了充分的应用。然而到了 20 世纪 80 年代, 研究人员吃惊地发现在熟悉的电磁波谱中仍然存在一个波段从来没有被研究过。这一波段就是太赫兹波段。

1.1.1 THz 空隙

THz 辐射通常指的是波长在 $30\ \mu\text{m} \sim 3\ \text{mm}$ ($0.1\ \text{THz} \sim 10\ \text{THz}$) 区间的电磁波, 其波段位于电磁波谱中的微波和红外光之

间,如图 1-1 所示:其中 1 THz (10^{12} Hz) 对应的波数为 33.3 cm^{-1} , 能量为 4.1 meV, 波长为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 。这一波段是传统电子学和光子学研究的边缘频谱区,在 20 世纪 80 年代中期以前,由于缺乏有效的产生方法和检测手段,人们对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限,可以说是电磁波谱中有待进行全面研究的最后一个窗口,以至于该波段被称为电磁波谱中的“THz 空隙”。



$$1\text{ THz} \sim 1\text{ ps} \sim 300\text{ }\mu\text{m} \sim 33\text{ cm}^{-1} \sim 4.1\text{ meV} \sim 48\text{ K}$$

图 1-1 THz 波段在电磁波谱中的位置示意图

近 20 年,伴随着一系列新技术、新材料的发展和应用,尤其是超快激光技术的发展,如掺钛蓝宝石飞秒激光器的问世和迅速的商品化,为宽带相干脉冲 THz 辐射的产生提供了稳定、可靠的激发光源,并使之成为一种容易实现的准常规技术。这些发展极大地促进了 THz 辐射的产生机理、检测技术和应用技术的研究。曾经被称为“THz 空隙”的这一波段已经迅速形成一门新的极具活力的研究领域,以至于在 2004 年被美国《技术评论》杂志评为

科学技术研究和发展的九个开拓性新兴领域之一。

1.1.2 THz 电磁波的性质

THz 技术之所以引起人们广泛的关注,首先是因为物质的 THz 光谱包含有丰富的物理和化学信息,研究物质在这一波段的光谱对于物质结构的探索具有重要意义;其次是由于太赫兹电磁波与其他波段的电磁波相比有其独特的特点。我们先来看看 THz 脉冲信号的一些基本特征:

(一) 电介质、半导体材料、超导材料、薄膜材料等不同物质的声子响应,气体分子的振动和转动光谱,特别是许多生物大分子的振动能级均落在 THz 波段范围^[1]。因此利用不同物质对 THz 频带的吸收谱线可以分析物质成分,进行定性鉴别的工作或者进行产品质量控制,如采用“无标记”的方法鉴别微量 DNA 分子等^[2]。

(二) THz 脉冲源通常只包含若干个周期的电磁振荡,单个脉冲的频带可以覆盖从 GHz 到几十 THz 的范围,便于在大的范围里分析物质的光谱性质。图 1-2 (a) 是一个典型的 THz 时域波形;图 1-2 (b) 是它的傅里叶变换振幅谱。利用 THz 辐射不但可以进行超宽带时域光谱测量,研究各种材料在这一波段的介电性质,如折射率、吸收系数和复电导率等信息^[3];而且可以进行飞秒时间分辨的激光泵浦-THz 脉冲探测,直接观察和研究受激半导体或有机材料的非平衡过程^[4]。

(三) THz 脉冲具有很高的时间和空间相干性。THz 辐射是由相干电流驱动的偶极子振荡产生、或是由激光脉冲通过非线性光学差频产生的,具有很高的时间和空间相干性。THz 脉冲的相干测量技术能够直接测量 THz 电场的振幅和相位,可以方便地提取样品的折射率、吸收系数,与利用

Kramers - Kronig 关系的方法相比,大大降低了计算量 and 不确定性。

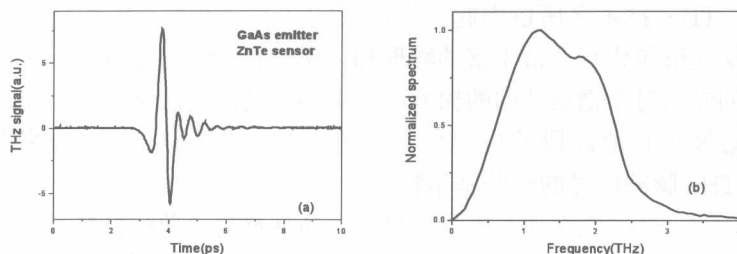


图 1-2 典型的 THz 辐射电场脉冲波形 (a) 及其所对应的傅里叶振幅谱 (b)

(四) THz 波的光子能量低。频率为 1 THz 的电磁波的光子能量很低,只有大约 4 meV。与 X 射线相比,不会因为电离而破坏被检测的物质,可以对生物组织进行活体检查等。

(五) 太赫兹辐射对于很多非极性物质,如电介质材料及塑料、纸箱、布料等包装材料有很强的穿透力,并且可以方便地测量它透过物体后的相位变化信息。因此 THz 波作为 X 光的非电离和相干的互补辐射源,可以探查隐蔽的走私物品包括武器、爆炸物和毒品,封装器件内部的集成电路,检测包扎后的伤口的愈合情况,以及用于牙齿的检测和胸腔肿瘤的检查等。

太赫兹的独特性能给通信、雷达、天文学、医学成像、安全检测等领域带来深远的影响。此外,太赫兹在半导体材料、高温超导材料、生物化学材料的性质研究等领域也有广泛的应用。

1.2 THz 电磁波的产生

太赫兹成像技术和太赫兹时域光谱技术是太赫兹应用的两个关键技术，它们的共同主要组成部分是太赫兹发射源、太赫兹探测器及其时间延迟系统。其中大功率、高效率、低造价、便携式的 THz 发射源则是 THz 时域光谱技术、THz 诊断、成像技术、THz 雷达和通信能否成为投入实际应用的决定性因素，也是 21 世纪太赫兹领域的科技工作者迫切需要解决的实际问题。

就目前已经发展的太赫兹辐射源来说，可以被粗略地分为以下几类：（1）根据应用范围可分为针对 THz 波谱学和成像应用的宽带 THz 辐射源，针对 THz 波谱学和成像应用的连续窄带 THz 辐射源，针对物质非线性和非热平衡状态研究应用的高能量窄带 THz 辐射源；（2）根据产生机理可分为基于电子学的 THz 辐射源，例如反向波振荡器、自由电子激光器、浅掺杂的 P 型锗半导体激光器、量子级联激光器；基于光学、光子学及非线性光学的 THz 辐射源，例如利用超短激光脉冲产生 THz 辐射，利用非线性频率变换过程产生 THz 波，基于远红外光泵浦产生的 THz 辐射源。

本节将简单介绍在 THz 成像技术中常常用到的宽带 THz 辐射源（光电导天线和非线性晶体）、窄频带的 THz 辐射源（太赫兹参量振荡器、量子级联激光器）和连续的 THz 辐射源（自由电子激光器和热辐射源）。

1.2.1 宽频带的 THz 辐射源

脉冲 THz 辐射大多数是由超短激光脉冲对不同材料的激发引起的。几种不同的机制引起了 THz 的发射，包括在光电导天线中光生载流子的加速、电光晶体中的二阶非线性效应、等离子体

振荡^[5]和电子非线性传输线等^[6]。目前,这些方法的转换效率都很低,平均功率只有 nW 到 μW 数量级。但是,这类 THz 辐射有较宽的频谱宽度,便于在大的范围内分析物质的光谱性质,并实现功能性成像。光电导和光整流是最常见的两种产生宽频带脉冲 THz 辐射的方法。

1.2.1.1 光电导方法

基于天线机制,利用光电导的方法产生 THz 辐射脉冲是在 20 世纪 80 年代末 90 年代初由 D.H.Auston 和 D.Grischkowsky 等人发展起来^[7-10]。其基本原理是:利用具有飞秒脉宽的超短激光脉冲泵浦半导体材料(光子的能量大于该种材料的能隙宽度 $h\nu \geq E_g$),在半导体材料的表面瞬间激发载流子(电子-空穴对)。如果半导体表面存在电场(偏压电场、半导体表面场或者结电场等),被激发的自由载流子就会被电场加速,产生瞬变的光电流。这种快速的、随时间变化的电流会辐射出具有亚皮秒脉宽的 THz 电磁辐射脉冲。

光电导 THz 电磁辐射发射系统的性能与光电导芯片、天线的几何结构和触发激光脉冲宽度有关。其中,光电导芯片是产生 THz 电磁波的关键部件,性能良好的光电导芯片应该具有载流子寿命短,迁移率高和能够承受高电压,大电流的能力^[11]。目前常用的光电导材料有:高电阻率的砷化镓(GaAs)、砷化铟(InAs)、磷化铟(InP)以及用放射法制作的有缺陷的硅(Si)晶片。而天线结构通常有赫兹偶极子天线、共振偶极子天线、蝴蝶结型天线、传输线以及大孔径光导天线等。其中大孔径光导天线和蝴蝶结型天线的结构相对简单,并能产生高功率、超宽带的 THz 脉冲,所以在大多数实验当中都是采用这两种结构的天线,如图 1-3 所示。

但是光电导天线制作过程中往往涉及化学过程和微加工技术,这些都限制了由它们产生的 THz 波的应用。近年来利用半导体表面场(包括耗尽层电场和丹倍尔电场)获得 THz 辐射,由

于其简便和高辐射效率的特点而获得了广泛的应用。下面我们将对利用天线和半导体表面场产生 THz 波的辐射源及其机理进行详细的介绍。

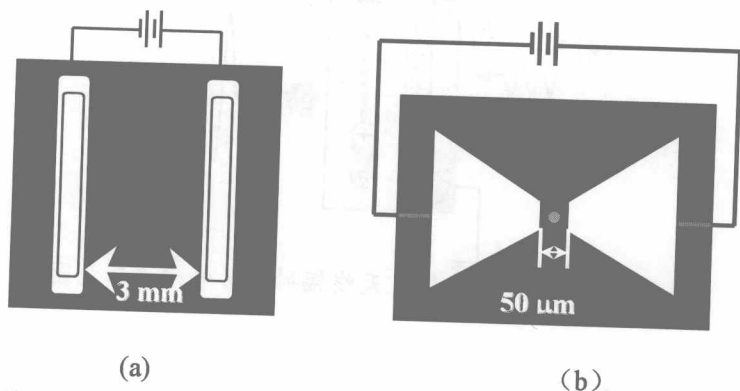


图 1-3 大孔径光导天线 (a) 和蝴蝶结型天线 (b) 的结构图

一、光电导天线

基于光电导激发机制的偶极天线也是利用超短激光脉冲在光电导材料（以 GaAs 为例）中产生电子—空穴来实现对材料电导率的调制。如果光电导偶极芯片两电极之间的直流偏置电场为 E_b ，无光照时芯片处于高阻截止状态。当用超快激光脉冲照射芯片时，GaAs 芯片内的光激发载流子在偏置电场作用下做加速运动，形成瞬态电流 J_s 。载流子的加速运动将以偶极辐射方式发射 THz 电磁波 E_{THz} ，光脉冲照射芯片一次，GaAs 光电导偶极天线便辐射一个 THz 脉冲电磁波，其示意图如图 1-4 所示。

采用电流涌流模型^[12]，考虑激光脉冲宽度、载流子的迁移率、寿命等因素，可以得到偏压电场 E_b ，芯片表面的瞬态电流 J_s 以及在近场和远场条件下所辐射的 THz 电磁场 E_r 和 E_{rad} 可以分别表示为^[13]：