

文章编号: 1672-8785(2012)11-0020-07

准光设计主动式毫米波人体扫描安全 检测系统的研制

时华峰^{1,2} 于文龙^{1,2} 余 菲^{1,2} 陈 毅^{1,2} 姜永涛^{1,2} 刘文权^{1,2} 金 雷^{1,2}

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院生物医学与健康工程研究所生物光子学研究中心, 广东
深圳 518055; 2. 中国科学院生物医学信息与健康工程学重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘 要: 设计并制造了一种实用型安全检测系统。该系统应用了最新的准光技术及毫米波人体扫描技术。实测结果表明, 在工作频率为 35 GHz (8.57 mm) 的模式下, 该系统的分辨率优于 10.2 mm; 可以检测微量粉末, 比如 0.5 g 金属与非金属混合物; 可以在 100 s 内完成对 600 mm×1800 mm 大小区域的检测, 基本达到了实用性要求。检测实验结果表明, 该系统可以应用于贵重金属探测等某些特殊应用场合。

关键词: 毫米波系统; 主动扫描; 准光路设计; 金属检测; 人体扫描

中图分类号: TP99 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.11.004

New Human Body Inspection System with Quasi-optical and Active Scanning MMW Technology

SHI Hua-feng^{1,2}, YU Wen-long^{1,2}, YU Fei^{1,2}, CHEN Yi^{1,2},
JIANG Yong-tao^{1,2}, LIU Wen-quan^{1,2}, JIN Lei^{1,2}

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen 518055, China; 2. Key Lab for Biomedical Informatics and Health
Engineering, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A practical security system for human body inspection was designed and manufactured. In this system, the newest quasi-optical technology and the active millimeter wave (MMW) scanning technology were used. The experimental result showed that the system had a resolution better than 10.2 mm in an operation mode at a frequency of 35 GHz (8.57 mm). It could inspect trace powder such as 0.5 g metal or nonmetal fixture and could complete the inspection over an area of 600 mm×1800 mm within 100 s, which had met the requirement for practical use. The inspection experiment showed that the system could be used in some special applications such as noble metal detection.

Key words: millimeter wave system; active scanning; quasi-optical design; metal detection; human body scanning

收稿日期: 2012-08-27

基金项目: 广东省中国科学院全面战略合作项目 (2009B091300011)

作者简介: 时华峰 (1981-), 男, 山东济宁人, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为太赫兹成像技术及其在生物医学领域的应用。E-mail: hf.shi@siat.ac.cn

0 引言

近年来的一系列恐怖主义袭击事件充分表明,反恐工作所面临的问题变得更加复杂,恐怖袭击的手段呈现多样化、技术化和智能化趋势,国际反恐局势日益严峻。现行的反恐安全检测系统已经严重滞后,不能满足严峻反恐形势下的新需求。毫米波人体扫描安全检测系统由于具有穿透性优异和分辨率良好等优点^[1-6],可以填补现有安全检测技术手段的不足,从而满足反恐新形势的需求。

主动式毫米波人体扫描技术是用信号发射机向目标人体所在区域发射一定频率的毫米波的。由于毫米波传播到目标所在区域后会发生反射或散射现象,于是信号接收机便可接收到反射或散射回的毫米波信号。根据接收到的毫米波信号的不同,便可反演出目标所在区域物体的毫米波频率响应特性。不同材质的物体具有不同的毫米波频率响应特性。据此可以区分不同材质的物体或者同一物体的不同材质部分。主动式毫米波人体扫描安全检测系统具有成本适中、成像效果良好和成像时间较快等特点,尤其适合人们推广应用^[7-9]。

1 人体扫描的基本原理

主动式毫米波人体扫描技术是由发射器发射毫米波,并由接收器接收人体反射回的毫米波的(其基本模型见图1)。在直角坐标系O-XYZ中,当毫米波收发器(发射器与接收器同为一体)在YOZ坐标平面内沿YO方向移动时,待测人体上任一点 $f(x, y, z_0)$ 的回波信息可以表示为

$$s(x', y') = \iint f(x, y, z_0) \times e^{-j2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(0-z_0)^2}} dx dy \quad (1)$$

式中,波数 $k = \omega/c$, ω 为毫米波的角频率, c 为光速。式(1)表明,人体上任一点的回波信息都包含该点的坐标信息。同时该点的回波信号可以在多个位置上接收到,如图1坐标中的三角形点标记位置;人体可以被看作是很多点目标的

集合,因此实际(坐标系中的固定一点位置)接收到的回波信号是发射波束所覆盖区域的所有点目标的回波信号的叠加。采用傅里叶光谱分析方法,可以将不同点目标的不同空间频率成分分离。然后采用相应的重建算法,便可得到人体的毫米波电磁响应分布图^[10]。

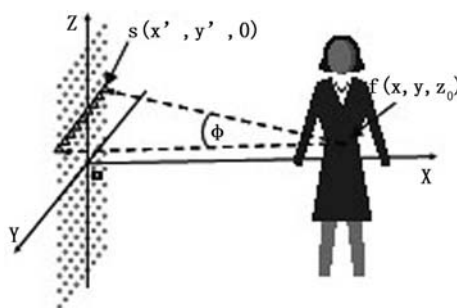


图1 毫米波人体扫描基本模型

2 毫米波人体扫描安全检测系统设计

主动式毫米波人体扫描技术可以分为单通道扫描、阵列扫描和光栅扫描等几种机械扫描方式以及焦平面、相控阵和合成孔径等几种非机械扫描方式。其中,非机械扫描方式在使用过程中不需要机械扫描,其积分时间不受天线扫描速度的限制,可以实现实时工作;然而该方式采用的较多信号通道数,直接导致其整体复杂度及成本急剧增加,既降低了采用该技术的系统的稳定性,又严重制约了其走向商用化、实用化的进程。

为了降低毫米波人体扫描安全检测技术的高昂成本,权衡最终积分时间和分辨率,并使该技术更切合实际应用场合和趋于实用化、商用化,本文设计了一种毫米波人体扫描安全检测系统。该系统主要包括毫米波信号收发部件、扫描平台、数据采集与处理模块、图像重建处理软件、图像显示及操作计算机和设备外壳等六大部分,如图2所示。

2.1 准光设计毫米波天线

毫米波信号收发部件中所用的天线的类型会直接影响系统的成像分辨率。在综合比较各

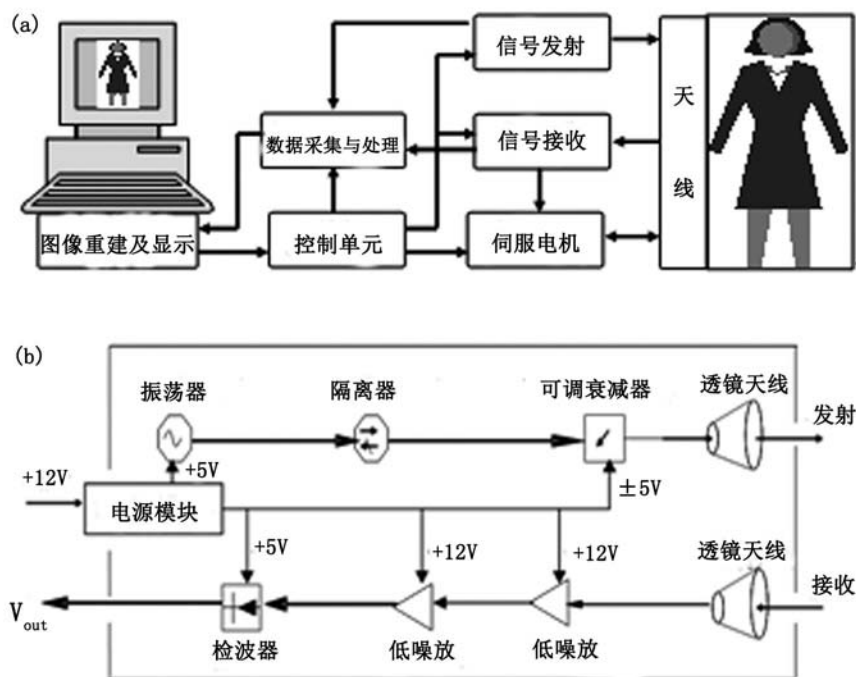


图 2 (a) 系统框图; (b) 毫米波信号收发部件

类型天线后发现,点聚焦透镜天线是一种较为理想的选择。点聚焦透镜天线由毫米波辐射器和透镜两部分组成。其中,毫米波辐射器为方向性较好的圆锥喇叭天线;透镜采用对毫米波信号具有较好透射性的聚乙烯(也可以采用金属网栅等)。准光技术是通过采用类似光学的原理、方法和结构来解决微波领域各类问题的^[11-12]。在点聚焦透镜天线的设计中,采用波动光学理论可以得到点聚焦透镜的空间分辨率^[13]:

$$\Delta = 0.61 \frac{\lambda L}{D} \quad (2)$$

式中, λ 为毫米波的波长, L 为物体到透镜的距离, D 为透镜尺寸(圆形透镜的直径)。当毫米波的频率为 35 GHz, 对应波长为 8.57 mm, 设计的透镜的直径为 100 mm 时, 通过计算可以得到在 100 mm 焦距处的空间分辨率为 4.29 mm。采用刀口法测得其焦距为 100 mm, 焦斑大小为 10 mm。将其与理论值 4.29 mm 比较后可知, 通过对点聚焦透镜天线进行优化设计, 可以得到更好的焦斑质量。

点聚焦透镜天线的能量传输特性可以用回波损耗部分来表示。使用网络分析仪测试天线回波损耗特性。将频率设置为起始频率 26.5 GHz, 频率步进为 100 MHz, 终止频率为 40 GHz。为提高测量结果的准确性, 可以进行多次测量, 然后取平均值。测量结果见图 3。从图 3 中可以看出, 在 35 GHz 频率处, 天线的回波损耗 (Return Loss, RL) 为 20.7 dB, 对应的驻波比约为 1.2, 对应的反射率约为 0.83%; 回波损耗的最优值为 29.7 dB。这些都表明设计的点聚焦透镜天线的能量传输特性良好。

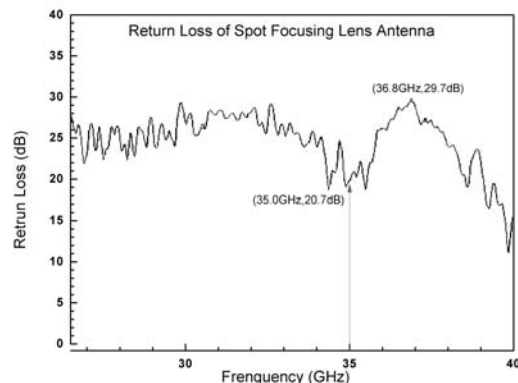


图 3 点聚焦透镜天线的回波损耗

2.2 毫米波低噪声放大器设计

低噪声放大器是信号接收部分的核心部件。图 4(a) 为本系统使用的低噪声放大器的实物图。用德国 R&S 公司生产的 ZVA40 型矢量网络分

析仪测得低噪声放大器的噪声系数为 4.0 dB, 其 S 曲线见图 4(b)。可以看出, 低噪声放大器的 S_{21} 参数 (功率增益) 约为 50 dB, S_{11} 参数约为 -18 dB, 说明低噪声放大器工作在理想状态下。

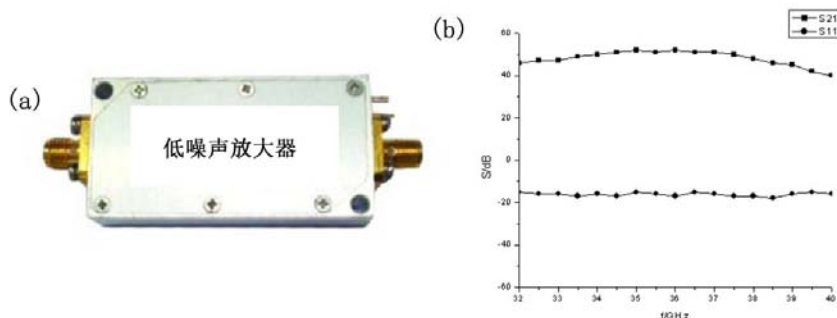


图 4 低噪声放大器的实物图及其 S 参数

2.3 系统集成及应用

图 5 为扫描平台及设备外壳的实物照片。可以看出, 该毫米波人体扫描安全检测系统是完全按照实用型号设计的。设备外壳的整体高度为 2.5 m, 内部人体站立位置的高度为 2 m, 满足国内绝大部分场合的使用需求。为了缩短工作时间, 提高扫描平台的扫描速度是我们需要注意的一个方面, 另外扫描方式的选取也非常重要。



图 5 扫描平台及设备外壳的实物照片

3 毫米波人体扫描实验及结果

空间分辨率和探测灵敏度是所有安全检测系统都关注的两个最重要的指标。在所有已知的检测对象中, 金属物品对毫米波等电磁波产生的反射信号最好。因此, 为了检测毫米波扫描

系统的空间分辨率和探测灵敏度, 我们分别测量了金属条和混有金属的粉末在该系统中的响应。

3.1 毫米波扫描系统的空间分辨率测量

在毫米波扫描系统中, 影响空间分辨率的关键部件是用于发射和接收毫米波信号的点聚焦透镜天线。采用准光路思想进行设计时, 工作在 35 GHz 的点聚焦透镜天线的焦斑为 10 mm。经过点聚焦透镜天线后的毫米波可以表示为高斯型函数 h_0 。具有一定宽度的金属条在毫米波照射下的响应可以看成是一个矩形脉冲响应 f 。在扩散函数的影响下, 金属条在毫米波扫描系统下的响应函数 f' 可以表示为

$$f' = f \otimes h_0 \quad (3)$$

对于不同宽度的金属条, 毫米波扫描系统的空间分辨率分析情况见图 6。其中, A0 ~ A2 所对应的金属条宽度为 1 mm, B0 ~ B2 所对应的金属条宽度为 5 mm, C0 ~ C2 所对应的金属条宽度为 10 mm。A0、B0 和 C0 表示的是高斯型函数 h_0 , 半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 为 10 mm; A1、B1 和 C1 表示的是宽度分别为 1 mm、5 mm 和 10 mm 的金属条在毫米波照射下响应的矩形脉冲 f ; A2、B2 和 C2 分别是高斯函数 h_0 与矩形函数 f 卷积后的结果

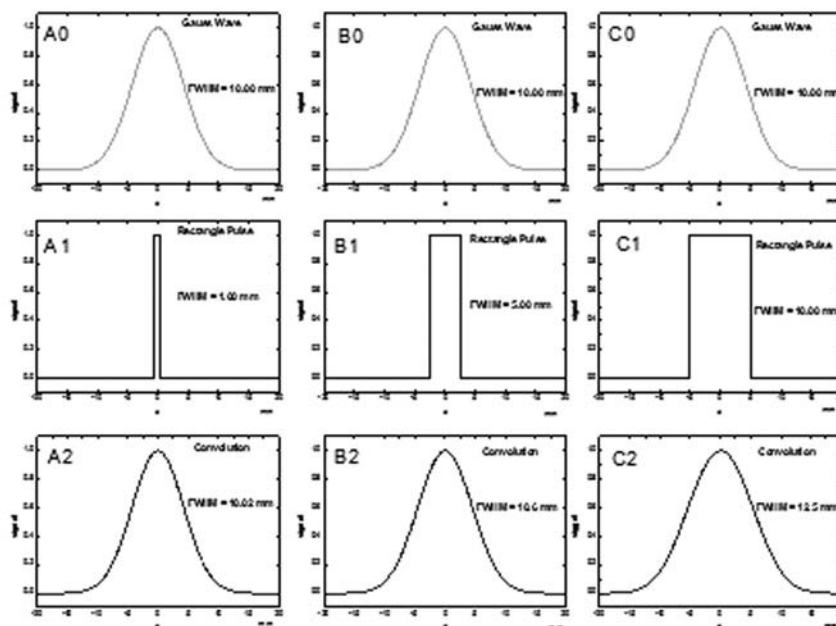


图 6 毫米波扫描系统的空间分辨率的理论分析。A0、B0 和 C0 表示的是半高宽为 10 mm 的 Gauss 型函数 h_0 ；A1、B1 和 C1 表示的是宽度分别为 1 mm、5 mm 和 10 mm 的金属条响应的矩形脉冲 f ；A2、B2 和 C2 分别是 Gauss 函数与矩形函数卷积后的结果 f'

f' ，FWHM 分别为 10.02 mm、10.60 mm 和 12.50 mm。可以看出，宽度为 10 mm 的金属条在该系统中的响应与其他两者相差较大，卷积后波形的 FWHM 为 12.50 mm；而宽度为 1 mm 和 5 mm 的金属条在毫米波扫描系统中的响应结果相差不大，卷积后波形的 FWHM 分别为 10.02 mm 和 10.60 mm。在实际的实验过程中，宽度为 5 mm 的金属条反射回的电磁波信号比 1 mm 金属条强。因此，在本系统中，实验选用宽度为 5 mm 的金属条来进行该系统的空间分辨率测量。这样既不会明显影响其测量结果，又能得到较好的信号强度。

图 7 所示为毫米波扫描系统的空间分辨率测量结果。在工作频率为 35 GHz 的情况下，宽度为 5 mm 的金属条的响应波形的 FWHM 为 10.8 mm。图 7 右上角的小图表示对金属条逐点进行连续扫描积分重建后得到的结果。采用卷积算法计算得到，宽度为 5 mm 的金属条在该系统下的响应分辨率为 10.6 mm。实验结果表明，在扩散函数的作用下，该值被展宽为 10.8 mm。因此，

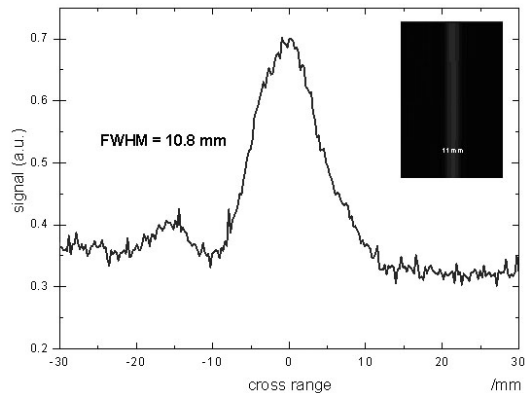


图 7 毫米波扫描系统的空间分辨率实测结果

对于宽度为 1 mm 的金属条，用反卷积算法推演出其分辨率为 10.2 mm，即为该系统的空间分辨率。

3.2 毫米波扫描系统的探测灵敏度测量

探测灵敏度是毫米波扫描系统的另一个重要参数。金属固体在毫米波扫描系统中的响应是最优的，而粉末状样品的探测则要困难得多。在对毫米波扫描系统的探测灵敏度进行测量的实验中，粉末状样品由颗粒尺寸小于 0.01 mm 的金

属粉末、非金属粉末以及少量绒布线头混合而成。我们分别制备了 5 g、4 g、2 g 和 0.5 g 粉末状样品。实验结果表明, 5 g、4 g 和 2 g 样品的探测结果优于 0.5 g 样品的探测结果。图 8 所示为 0.5 g 样品的实验结果。0.5 g 混合物粉末分布在 25 mm×40 mm 大小的区域内, 其光学照片见图 8 右上角的小图。实验结果表明, 毫米波扫描系统可以很好地将 0.5 g 混合物粉末检测出来。

3.3 人体扫描

毫米波扫描系统的空间分辨率和探测灵敏度实验结果表明, 该毫米波扫描系统可以很好地胜任对人体扫描的安全检测任务。图 9 右半部分所示为人体扫描实验中选用的人体模型。我们分别在人体模型的右手、背部以及臀部放置金属锉刀及刀片等常见金属物品, 并用实验服覆盖人体模型。为了减少扫描背景的干扰和提高信噪比, 本文选用吸波材料作为扫描背景。毫

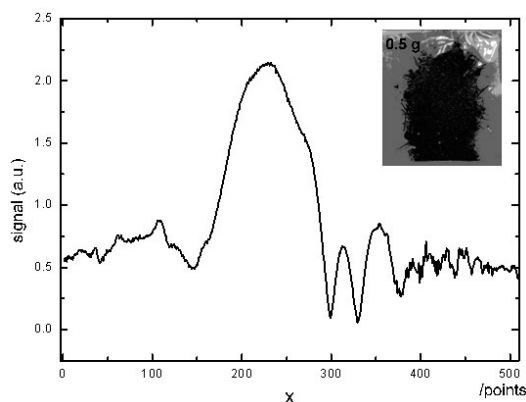


图 8 毫米波扫描系统的探测灵敏度实验结果

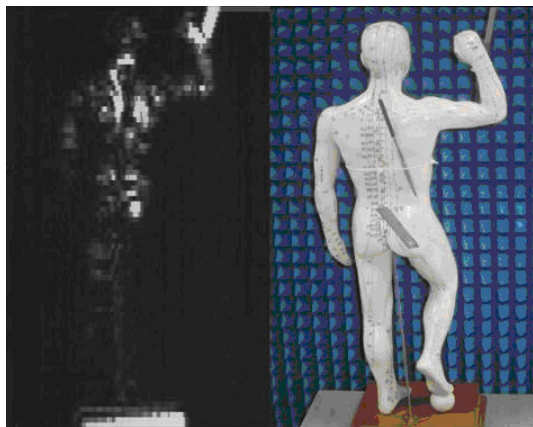


图 9 毫米波扫描安全检测系统的人体扫描实验结果

米波扫描系统采用逐点逐行扫描方式扫描人体模型所在区域 (600 mm×1800 mm), 扫描时间为 100 s。图 9 左半部分所示为毫米波扫描系统对人体模型的扫描实验结果。从中可以较为清晰地看到人体模型的毫米波频率响应分布。在人体模型的右手、后背以及臀部等放有金属物品的位置上也均可看到明显的亮斑。实验结果表明, 该毫米波扫描系统在对人体模型的扫描实验中, 可以将人体模型从吸波材料的背景中显示出来, 并能够将锉刀、刀片等常见金属物品与人体模型区分开来。

4 结论

准光设计主动式毫米波人体扫描安全检测系统在实验室中的调整测试结果充分表明, 该系统可以满足造币、珠宝首饰、贵金属加工、电子以及精密 IC 等某些特定场合对人体安全检测的需求; 此外, 该系统还可以应用于包装物的安全检测, 并且不会对包装物里面的物品产生电离损伤, 也不会损坏包装物里面的物品, 比如邮件、快递和包裹等。毫米波与当前的 THz 技术在电磁频谱上有部分重叠, 因此对毫米波扫描系统的研究也将会有助于 THz 领域的相关研究。

准光设计主动式毫米波人体扫描安全检测系统由于在正常工作状态下会发射毫米波, 并将其直接作用于人体, 因此毫米波辐射对于人体是否安全显得非常重要。这个问题可以从两个方面来考虑: 首先, 与现行的 X 射线成像技术相比, 毫米波的单波长能量比 X 射线 ($10^{15} \sim 10^{18}$ Hz) 的低很多 (低于百万分之一); 其次, 毫米波辐射的功率密度小于《GB12638-1990》标准规定的数值 14.4 mW/cm^2 ($400/(100/3600)=14.4$)。因此, 本系统的毫米波辐射对于待检测人员和检测人员都是非常安全可靠的。

然而就像对于手机的微波辐射是否安全同样有国际标准的严格规定, 但是人们总是喜欢热议手机的微波辐射是否能够致病。究其根源在于现有的标准和检测手段都是基于热效应 (即电磁波作用于目标后产生的热效应), 然后再来讨论其热效应是否安全; 但是电磁波作用于生物体 (包括人) 时除了有热效应, 还有非热效应。电

磁波作用于生物体的非热效应涉及一个全新的学科即电磁生物学, 该部分不在本文的讨论范畴之内。

参考文献

- [1] Mitteleman D M, Jacobsen R H, Nuss M C. T-ray Imaging [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 1996, **2**: 679.
- [2] Siegel P H. Terahertz Technology [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2002, **50**: 910–928.
- [3] Woodwar R M, Cole B E, Wallace V P, et al. Terahertz Pulse Imaging in Reflection Geometry of Human Skin Cancer and Skin Tissue [J]. *Phys Med Biol*, 2002, **47**: 3853–3863.
- [4] Fitzgerald A J, Wallace V P, Linan M J, et al. Terahertz Pulsed Imaging of Human Breast Tumors [J]. *Radiology*, 2006, **239**: 533–540.
- [5] Appleby R. Passive Millimetre-wave Imaging and How It Differs from Terahertz Imaging [J]. *Phil Trans R Soc Lond A*, 2004, **362**: 379–394.
- [6] Yujiri L, Shoucri, Moffa M P. Passive Millimeter Wave Imaging [J]. *Microwave Magazine*, 2003, **4**: 39–50.
- [7] Grossman E N, Luukanen A, Miller A J. Terahertz Active Direct Detection Imagers [C]. *SPIE*, 2004, **5411**: 68–77.
- [8] David M S, Douglas L M, Thomas E H. Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**: 1581–1592.
- [9] Koers Gaetan, Ocket Ilja, Feng Qi, et al. Study of Active Millimeter-wave Image Speckle Reduction by Hadamard Phase Pattern Illumination[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, **25**: 312–317.
- [10] Joseph W G. Introduction to Fourier Optics [M]. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, 2005.
- [11] 王楠楠, 邱景辉, 张鹏宇, 等. 被动毫米波焦面阵成像技术 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(5): 419–424.
- [12] 任冬梅, 刘述章, 王国庆, 等. 8 mm 点聚焦透镜天线的工程设计 [J]. *电子科技大学学报*, 2006, **35**(3): 328–330.
- [13] 马平, 何昌伟, 刘述章. 点聚焦透镜天线分辨率的分析与测量 [J]. *微波学报*, 2004, **20**(3): 74–76.
- (上接第 7 页)
- [34] 代兵, 王家智, 朱嘉琦. 提高蓝宝石高温强度与透过率的研究进展 [C]. 哈尔滨: 第十五届全国复合材料学术会议论文集 (上册), 2008: 106–112.
- [35] Wang G G, Zuo H B, Zhang H Y, et al. Preparation, Quality Characterization, Service Performance Evaluation and Its Modification of Sapphire Crystal for Optical Window and Dome Application [J]. *Materials and Design*, 2010, **31**: 706–711.
- [36] Feng L P, Liu Z T, Li Q. Strengthening Sapphire at Elevated Temperatures by SiO₂ Films [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**: 5363–5367.
- [37] Khattak C P, Guggenheim P J, Schmid F. Growth of 15-Inch Diameter Sapphire Boules [C]. *SPIE*, 2003, **5078**: 47–53.
- [38] 黄存新, 雷牧云, 彭载学, 等. 透明多晶尖晶石的光学和物理性能 [J]. *人工晶体学报*, 2001, **30**(1): 67–71.
- [39] Krell A, Hutzler T, Klimke J. Transmission Physics and Consequences for Materials Selection, Manufacturing, and Applications [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, **29**: 207–221.
- [40] Adrian G. Correlation between MgAl₂O₄-spinel Structure, Processing Factors and Functional Properties of Transparent Parts (Progress Review) [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, **32**: 2869–2886.
- [41] 雷牧云, 李祯, 洪冬梅, 等. 宽波段窗口材料透明尖晶石的透过性能 [J]. *红外激光工程*, 2012, **41**(3): 549–553.
- [42] 雷牧云, 黄存新, 闻芳, 等. 透明尖晶石陶瓷的研究进展 [J]. *人工晶体学报*, 2007, **36**(2): 319–333.
- [43] Krell A, Baur G, Dhne C. Transparent Sintered Sub- μ m Al₂O₃ with IR Transmissivity Equal to Sapphire [C]. *SPIE*, 2003, **5078**: 195–204.
- [44] Parish M V, Pascucci M R, Rhodes W H. Aerodynamic IR Domes of Polycrystalline Alumina [C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 199–206.