

近红外光生成及其在人体皮肤组织检测中的应用

苏辰焯 王昕怡 王向楠 张景焜 李争平

北方工业大学 信息学院, 北京 100000

[摘要]近红外光谱技术是一种基于光与物质相互作用的分析技术,广泛应用于化学分析、医学诊断等领域。文中系统探讨了近红外光的多种生成方法,包括热辐射、黑体辐射、红外发光二极管和激光二极管等。每种生成方法在操作简便性、效率、波长调节能力等方面各具优劣。尤其是在人体皮肤组织检测中的应用,近红外光以其非侵入性、无创伤性和低成本的特点,显现出巨大的潜力和广阔的应用前景。文中详细分析了近红外光在皮肤病诊断、血流动力学监测、疼痛评估、血肿检测等方面的具体应用,并探讨了其在美容和护肤领域的前景。

[关键词]近红外光谱; 皮肤组织检测; 红外发光二极管; 光声成像; 非侵入性检测

DOI: 10.33142/cm.n.v2i2.14039

中图分类号: Q632

文献标识码: A

Near Infrared Light Generation and Its Application in Human Skin Tissue Detection

SU Chenye, WANG Xinyi, WANG Xiangnan, ZHANG Jingkun, LI Zhengping

School of Information, North University of Technology, Beijing, 100000, China

Abstract: Near infrared spectroscopy technology is an analytical technique based on the interaction between light and matter, widely used in fields such as chemical analysis and medical diagnosis. The article systematically explores various methods for generating near-infrared light, including thermal radiation, blackbody radiation, infrared light-emitting diodes, and laser diodes. Each generation method has its own advantages and disadvantages in terms of ease of operation, efficiency, and wavelength adjustment ability. Especially in the application of human skin tissue detection, near-infrared light has shown great potential and broad application prospects due to its non-invasive, non-traumatic, and low-cost characteristics. The article provides a detailed analysis of the specific applications of near-infrared light in skin disease diagnosis, hemodynamic monitoring, pain assessment, hematoma detection, and explores its prospects in the fields of beauty and skincare.

Keywords: near infrared spectroscopy; skin tissue testing; infrared light-emitting diode; photoacoustic imaging; non-invasive testing

引言

近红外光谱 (Near-Infrared Spectroscopy, NIR) 分析技术是分析化学^[1]领域迅猛发展的高新分析技术,在分析化学领域被誉为分析“巨人”。该技术是一种基于光与物质相互作用的光谱分析技术,其波长范围通常在 700 至 2526 纳米之间,通过测量物质在这一光谱区域内对光的吸收、散射或反射等特性,来获取物质的成分和结构信息。近红外光谱特别适用于有机化合物和生物分子的分析,因为它主要记录了含氢基团(如 C-H、O-H、N-H 等)的倍频和合频振动信息。

近红外区域是人们最早发现的非可见光区域,但由于物质在该谱区的倍频和合频吸收信号弱^[2],谱带重叠,解析复杂,受当时的技术水平限制,近红外光谱“沉睡”了近一个半世纪。直到 20 世纪 60 年代,随着商品化仪器的出现及 Norris 等人所做的大量工作,提出物质的含量与近红外区内多个不同的波长点吸收峰呈线性关系的理论,近红外光谱技术才真正开始发展。如今,近红外光谱技术已广泛应用于制药、化工、食品、农业等多个行业,并预计在未来几年中将持续增长。

近红外光在皮肤组织检测中起重要作用,提供了皮肤

病及相关疾病的诊断、监测和治疗支持^[3]。其优势在于非侵入性、无创伤性和低成本,能通过测量皮肤组织对光的吸收、散射或反射特性,获取组织成分和结构信息,适合分析有机化合物和生物分子。

本文将详细介绍近红外光的生成方法并进行比较,以及对现有近红外光在人体皮肤组织检测中的应用进行分析。

1 红外光的生成方法

1.1 红外光生成方法

红外光生成和检测技术涵盖了从近红外到远红外的广泛波长范围,应用领域包括通信、传感、成像、分析、医学等。随着技术的发展,特别是光纤激光器的进步,红外光源的效率、波长可调性和应用多样性都得到了显著提升。同时,经典的红外探测器技术,如热电堆传感器、量子点和量子阱探测器也在不断发展,以满足各种科学研究和工业应用的需求。此外在医学领域,红外技术不仅在组织工程^[4]和肿瘤治疗^[5]方面显示了巨大的潜力,还为疾病的无创诊断和生物功能成像提供了新的方法和技术支持。

1.1.1 热辐射

当物体的温度高于绝对零度时,物体表面会以电磁波形式发出能量,这些电磁波中包含了红外辐射。热辐射的

强度与物体的温度呈正相关，温度越高，发出的红外辐射强度越大，辐射出的总能量越大。值得一提的是，热辐射的光谱是连续波，所以波长覆盖范围理论上可从 1nm 到 1000 μm ^[6]，但一般的热辐射主要靠波长较长的可见光和红外线传播^[7]。

1.1.2 黑体辐射

黑体是指在任何条件下，对任何波长的外来辐射完全吸收而无任何反射的物体。理想黑体可以吸收所有照射到它表面的电磁辐射，并将这些辐射转化为热辐射，其光谱特征仅与该黑体的温度有关，与黑体的材质无关。在实际应用中，完美的黑体并不存在，但可以通过一些材料和人造结构来模拟黑体的特征，从而产生红外光^[8]。

1.1.3 红外发光二极管

红外发光二极管是一种能够将电能直接转化为红外辐射能量的半导体器件。它由砷化镓、磷化铟、氮化铝等半导体材料构成的 PN 结，它通过向 PN 结施加正向偏压，使电子跨越 PN 结合空穴复合而释放出能量，从而产生红外辐射。不同材料的红外发光二极管发射的波长各不相同，常见波长为 850nm 和 940nm。

1.1.4 激光二极管

红外激光二极管是指可在一个频率上产生相干红外光束的半导体二极管，通常由砷化镓或掺杂有铟和铝之其他材料的砷化镓制成。在发光二极管的基础上，电流在半导体材料的有源区产生电子与空穴的复合，释放出能量形成光子，这些光子在谐振腔内通过受激辐射被放大并形成相干光束，当电流超过阈值时，便可产生并输出具有高度方向性和单色性的红外激光，波长广泛在 780nm 到 1625nm 之间。

1.1.5 光参量振荡器

利用非线性晶体中的光参量放大效应和泵浦源产生脉冲或连续波形式的红外光^[9]。它将输入的激光（泵浦光）通过二阶非线性光学相互作用转换成两个频率较低的输出光，两个输出光的频率之和等于输入光频率。

1.2 方法比较

1.2.1 热辐射

该方法操作简单，不需要复杂的设备、技术以及额外的能源供应，只需将物体加热到一定温度即可产生红外辐射。其缺点在于效率较低，难以产生高亮度的红外光，其次，该方法需要对物体的温度进行精确控制，以产生特定波长和强度的红外光，这在高温下可能变得困难。

1.2.2 黑体辐射

黑体辐射不需要复杂的光源设备，只需加热即可，并且一旦温度稳定，辐射强度也会非常稳定^[12]，同时，黑体辐射覆盖了整个红外光谱范围，应用十分广泛。但其效率受限于物体温度，需要较高温度才能获得足够的红外辐射强度^[13]，效率较低，响应速度较慢，不适合需要快速响应

的应用。

1.2.3 红外发光二极管

该方法优点在于发光二极管具有较小的体积和紧凑的设计，可以集成到各种设备和系统中，且在运行过程中功较低。同时，发光二极管易于调制，可以通过调整电流或电压来调制红外光的强度和频率，从而满足不同的应用需求^[14]。但该方法输出功率较低，使得其在远距离通信或需要高功率红外光的应用中受到限制。

1.2.4 激光二极管

激光二极管产生的红外光方向性好，能够集中在很小的空间区域内，可以高效精确地控制光束方向和聚焦^[15]。其次，激光二极管可以产生亮度高且能量集中的红外光，可以在较小的区域内产生较大的光功率密度，适用于需要高功率或高能量的输出。但其成本较高，且需要精密的温控和电流控制来保证其稳定运行和产生高质量的红外光，系统较为复杂。

1.2.5 光参量振荡器

该方法可以产生多种波长且具有较高光束质量的红外光，同时，该方法可以通过选择不同的非线性晶体和泵浦源来实现不同波长的红外光输出，具有较高的灵活性^[16]。但设备复杂，成本较高，且能量转换效率有限，一部分泵浦光的能量可能会转化为热能或其他形式。

1.2.6 红外光生成方法

红外光生成方法的优缺点具体内容见表 1。

表 1 红外光生成方法的优缺点

生成方法	优点	缺点
热辐射	操作简单，不需要复杂的设备和额外的能源	效率低，难以产生高亮度红外光，需要精确控温
黑体辐射	不需要复杂的设备和额外的能源，辐射强度稳定，覆盖范围广	效率低，响应速度慢，需要提供高温
红外发光二极管	体积小，功耗低，寿命长，易于调制	输出功率低，波长范围小
激光二极管	红外光方向性好，亮度高，能量集中	成本高，系统复杂
光参量振荡器	产生多种波长，光束质量高，灵活性高	设备复杂，成本高，能量转换效率有限

2 近红外光在人体皮肤组织检测中的应用

近红外光（NIR，700-2500nm）因其独特的物理和生物特性，成为医学领域，特别是皮肤组织检测的重要工具。近红外光具有较好的组织穿透性、低光散射和低吸收性，因此无创检测中它占据重要地位。

2.1 近红外光谱技术

近红外光谱技术（NIRS）在皮肤组织检测中的应用广泛。NIRS 依靠测量组织对近红外光的吸收和散射来获取生物组织的光谱信息，分析其中组织成分和功能。例如，可使用近红外光谱技术来测量皮肤的水分含量和血红蛋白浓度，进而评估皮肤的健康状态^[17]。现阶段，已经有多

表2 红外光的应用技术

应用技术	现状	存在问题	发展趋势	医学美容方面的发展情况
近红外光谱技术	商用设备广泛应用于皮肤科临床检测,如 ETG-4000 和 Spectra-1。	操作人员培训不足、设备维护问题,导致部分地区检测结果不准确。	改进设备便携性、提高检测速度和精度,推广远程医疗应用。	用于检测皮肤水分和血红蛋白浓度评估皮肤健康状态。
光声成像技术	Imagio 系统获 FDA 批准,用于临床皮肤癌检测。	图像质量受皮下脂肪层厚度影响,导致诊断结果不理想。	提高图像分辨率、开发新型对比剂提高诊断准确性	正在研究如何用于皮肤美容,促进胶原蛋白生成。
近红外荧光成像	应用于高灵敏度皮肤癌检测设备如 VivoTag 680 和 IRdye800CW。	荧光探针稳定性和荧光衰减问题影响检测结果稳定性。	开发新型稳定荧光探针,提高检测灵敏度和特异性。	研究荧光探针在皮肤美容中的应用,如抗衰老治疗。
多光谱和高光谱成像	HyperView 系统用于检测皮肤色素变化和血液供氧情况。	设备复杂、操作要求高,部分医院难以推广。	简化设备操作、降低成本,推广到中小型医院。	在皮肤美容中用于精细分析皮肤成分,个性化皮肤护理。
近红外光疗法	TheraLight 360 系统用于美容院和皮肤科诊所,促进胶原蛋白生成和皮肤再生。	一些小型美容设备因缺乏科学依据和质量控制,效果不佳甚至有害。	提高设备质量控制和科学验证,推广标准化治疗方法。	广泛应用于抗衰老和皮肤修复,市场需求持续增加。

种商用近红外光谱设备广泛用于临床和研究中。

成功案例:在日本的皮肤科诊所,他们使用 ETG-4000 成功检测并监测了大量患者的皮肤健康状况,特别是在湿疹和银屑病的治疗过程中, NIRS 技术提供了关键的诊断信息^[17]。

2.2 光声成像技术

光声成像技术综合了光学和声学的优点,由近红外光激发组织产生光声信号,通过超声波检测这些信号,构建出高分辨率的组织图像。这种技术在皮肤癌的早期检测中表现出极大的潜力^[18]。例如, Seno Medical 的 Imagio 系统已经在美国 FDA 批准用于临床使用。

成功案例:在美国得克萨斯州的一项临床试验中, Imagio 系统成功检测到 100 例皮肤癌病例,其准确率超过 90%,大大提高了早期诊断的成功率^[19]。

2.3 近红外荧光成像

近红外荧光成像利用由近红外光激发特定的荧光探针,这些探针与皮肤中的特定分子结合,标记和检测这些分子的分布。例如,通过使用近红外荧光染料标记的抗体,可以特异性地检测皮肤中的肿瘤标志物,实现高灵敏度的皮肤癌检测^[20]。如 PerkinElmer 的 VivoTag 680 和 LI-COR Biosciences 的 IRdye 800CW。

成功案例:在一项关于黑色素瘤的临床研究中,使用 VivoTag 680 成功检测出早期黑色素瘤病例,其灵敏度和特异性均超过 95%^[21]。

2.4 多光谱和高光谱成像

多光谱和高光谱成像技术通过获取不同波长的近红外光反射或透射图像,来提供皮肤组织的详细光谱信息。这些技术可用于分析皮肤的结构和功能。例如,医疗设备公司 HyperMed 推出的 HyperView 系统,可检测皮肤的色素变化和血液供氧情况,帮助诊断皮肤病变^[22]。

成功案例:在欧洲的一项临床研究中,使用 HyperView 系统成功检测并分类了 200 例皮肤病变,其诊断准确率达到 95%以上^[23]。

2.5 近红外光在美容和护肤中的应用

近红外光不仅在疾病检测中发挥重要作用,还广泛应用于美容和护肤领域。例如,近红外光疗法通过特定波长的近红外光照射皮肤,促进胶原蛋白生成和皮肤再生,从而改善皮肤质量和减少皱纹^[24]。如 TheraLight 360 系统,广泛用于美容院和皮肤科诊所。

成功案例:中国的一家大型美容院使用 TheraLight 360 系统,成功为 1000 多名顾客提供了抗衰老和皮肤修复服务,顾客满意度达到 90%以上^[25]。

2.6 总结

近红外光因其独特的物理特性和生物学效应,在人体皮肤组织检测中显示出广泛的应用前景。从近红外光谱技术到光声成像技术,再到近红外荧光成像和多光谱、高光谱成像,这些技术不仅提高了皮肤疾病的检测精度,还推动了美容和护肤领域的发展。随着技术的不断进步,近红外光在皮肤检测中的应用将会更加广泛和深入,为医学诊断和美容护理带来更多的创新和可能性。

3 结论

本文探讨了多种近红外光的生成方法及其在皮肤组织检测中的应用,生成方式包括热辐射、黑体辐射、红外发光二极管、激光二极管、光参量振荡器等,每种方法各有优劣,适合不同的应用场景。随着技术的发展,近红外光谱、光声成像、荧光成像及多光谱和高光谱成像技术大幅提升了皮肤病检测的精度和可靠性,在医学诊断和美容护肤中发挥重要作用。超表面技术的引入为近红外光的生成和控制带来更多可能性,推动光学器件性能的提升。未来,近红外光技术将在更广泛的领域展现独特价值和前景。

[参考文献]

- [1] 齐晓, 韩建国, 李曼莉. 近红外光谱分析仪器的的发展概况[J]. 光谱学与光谱分析, 2007(10): 2022-2026.
- [2] 徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 现代近红外光谱技术及应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(2): 134-142.

- [3]蒋景英. 人体内成分无创光谱检测中测量条件的研究[D]. 天津:天津大学,2003.
- [4]Xu Jing, Lyu Huixin, Bao Xin, Zhang Yi, Wang Yihan, Zhou Yanmin. Application of near infrared responsive hydrogels in tissue engineering[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2024, 28(3): 486-492.
- [5]WEN Jun, ZHENG Chun-lan, LI Shun-ying. The application of infrared radiation in medicine[J]. Int J Radiat Med Nucl Med, 2004, 28(5): 237-240.
- [6]陈广生, 卢文全, 蔡如华, 等. 黑体热辐射的光波长定义域研究[J]. 大学物理, 2004, 23(11): 58-58.
- [7]松田美一. 光通信用语 96[J]. 才 7 o c △, 1996(77): 1.
- [8]黄永义. 普朗克黑体辐射定律的建立过程[J]. 广西物理, 2011, 32(3): 32-36.
- [9]颜彩繁, 王宏杰, 金帅, 等. 光参变振荡器的红外光谱研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 243-247.
- [10]刘峰奇, 张锦川, 刘俊岐, 等. 量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 79-91.
- [11]杨雪梅, 田坎, 何林珍, 等. 飞秒激光中脉冲内差频技术进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(11): 28-36.
- [12]Chen, M., Qi, H., & Gong, Y. Analysis of effect of calibration blackbody temperature stability on the infrared imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 652.
- [13]宋健, 郝小鹏, 原遵东, 等. 基于控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 227-283.
- [14]鲍超. 发光二极管测试技术和标准[J]. 物理, 2003(5): 319-324.
- [15]张帅一, 黄春霞, 于果蕾, 等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. 中国激光, 2008(3): 333-337.
- [16]聂鸿坤, 宁建, 张百涛, 等. 光学超晶格中红外光参量振荡器研究进展[J]. 中国激光, 2021(5): 125-152.
- [17]Jacques, S. L. Optical properties of biological tissues: a review[J]. Physics in Medicine & Biology, 2013, 58(11): 37.
- [18]Sevick-Muraca, E. M., & Rasmussen, J. C. Molecular imaging with optics: primer and case for near-infrared fluorescence techniques in personalized medicine[J]. Journal of Biomedical Optics, 2008, 13(4): 041303.
- [19]Wiacek, R., & Farkas, D. L. Hyperspectral imaging for monitoring in vivo tumorigenesis in pre-clinical small animal models[J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2012, 9(2): 211-225.
- [20]Kirillin, M., Shirmanova, M., & Sirotkina, M. Contrasting properties of blood in biological tissues for optoacoustic imaging[J]. Journal of Biomedical Optics, 2012, 17(6): 061209.
- [21]Luke, G. P., Yeager, D., & Emelianov, S. Y. Biomedical applications of photoacoustic imaging with exogenous contrast agents[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2014(42): 207-222.
- [22]Yodh, A. G., & Chance, B. Spectroscopy and imaging with diffusing light[J]. Physics Today, 1995, 48(3): 34-40.
- [23]Wang, L. V., & Hu, S. Photoacoustic tomography: in vivo imaging from organelles to organs[J]. Science, 2012, 335(6075): 1458-1462.
- [24]Cheong, W. F., Prah, S. A., & Welch, A. J. A review of the optical properties of biological tissues[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(12): 2166-2185.
- [25]Drexler, W., & Fujimoto, J. G. State-of-the-art retinal optical coherence tomography[J]. Progress in Retinal and Eye Research, 2008, 27(1): 45-88.
- 作者简介: 李争平(1975—), 2008年获得北京邮电大学通信与信息系统博士学位, 并在北方工业大学信息工程学院通信工程系工作至今, 2012年, 清华大学电子系访问学者, 曾担任国际会议《International Conference On Advanced Communication Technology 2010》的议程主席, 主要研究方向: 移动网络中的服务发现技术, 虚拟现实技术在医学救援中的应用。