

# 深度分辨漫反射测量光纤探头设计及特性

李晨曦<sup>1,2</sup> 赵会娟<sup>2</sup> 郑家祥<sup>1</sup> 徐可欣<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072  
<sup>2</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院生物医学工程系, 天津 300072)

**摘要** 漫反射光谱人体成分检测研究中, 光纤探头接收漫反射光子穿透深度及传输路径对检测效率及灵敏度影响较大, 而传统的检测光纤探头无法实现对特定深度漫反射光子选择性接收。针对人体成分检测需要, 提出了采用一定入射-接收角度及半球透镜耦合的漫反射测量光纤探头结构。在三层皮肤模型基础上, 结合光纤探头形式改进 Monte Carlo 程序, 计算光纤探头接收漫反射光子穿透深度, 有效光子比例, 有效信息载荷以及真皮层检测灵敏度。结果表明, 设计的光纤探头可实现真皮层漫反射光子选择性接收, 检测效率以及测量光谱受非目标层组织结构及光学参数影响较小, 可有效提高人体成分无创检测灵敏度。

**关键词** 医用光学; 深度分辨光纤探头; 蒙特卡洛; 漫反射光谱; 无创检测

**中图分类号** R318.51      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS201232.0717001

## Design and Property of Depth-Selective Fiber-Optical Probes Applied in Diffuse Reflection Measurement

Li Chenxi<sup>1,2</sup> Zhao Huijuan<sup>2</sup> Zheng Jiexiang<sup>1</sup> Xu Kexin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Department of Biomedical Engineering Precision Instrument and Optic Electronic Engineering Department,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Diffuse reflectance spectroscopy is widely applied in non-invasive detection of human tissue. Depth and transmission path of detecting photons may influence the sensitivity and accuracy of spectral detection. The conventional fiber-optic probes with parallel illumination-collection fibers vertical to skin tissue cannot selectively collect scattered photons from specific penetration depth. For the purpose of human components sensing, the present work designs the specific fiber probes configuration with certain illumination-collection angle or half-ball lens coupled to improve the detection efficiency of dermis. Based on three layers tissue model, Monte Carlo simulation is modified and applied to evaluate the penetration depth of detected photons, percentage of effective photons, effective information loading and detection sensitivity of dermis with each fiber probes. The results indicate that probes proposed in this paper improve the detection efficiency and sensitivity of dermis and the effect of the changes of tissue structure of non-target layer and optical parameters on it is small.

**Key words** medical optics; depth resolved fiber-optic probe; Monte Carlo; diffuse-reflection spectroscopy; non-invasive sensing

**OCIS codes** 170.6510; 060.2310; 080.5692; 170.3890

## 1 引 言

漫反射光谱广泛应用于人体成分(血氧、血糖和

血脂等)以及组织病变无创检测研究, 测量光谱与人体组织光学参数密切相关, 反映了人体生理病理状

**收稿日期:** 2012-01-19; **收到修改稿日期:** 2012-03-07

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(60938002)资助课题。

**作者简介:** 李晨曦(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事无创血糖检测及组织光学等方面的研究。

E-mail: lichenxi@tju.edu.cn

**导师简介:** 徐可欣(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无创血糖检测及近红外光谱等方面的研究。

E-mail: kexin@tju.edu.cn(通信联系人)

况,为临床诊断提供依据<sup>[1-5]</sup>。由于人体组织结构以及光学参数差异较大<sup>[6,7]</sup>,在体漫反射光谱测量过程中,非目标层组织结构与光学参数对测量漫反射光谱信号以及光在目标组织层中传播路径影响较大,降低了光谱检测精度。临床中为提高目标层组织光学参数检测效率以及灵敏度,采用各种检测手段,选择性接收特定穿透深度漫反射光子,减小非目标层光学参数对漫反射测量影响<sup>[2,4,8]</sup>。

国内外一些研究小组采用偏振检测、单次散射光子检测和光程差分检测等方法选择性接收穿透深度较浅的漫反射光子,深度分辨精度较高<sup>[2-5]</sup>,浅层组织检测灵敏度高,检测效率以及光谱信号受深层组织结构以及光学参数影响较小,但测量深度动态范围小,系统组成比较复杂,临床应用受到限制。在体光谱测量研究中,广泛采用光纤探头传导光入射到待测组织并接收漫反射光,光纤探头检测到漫反射光子穿透深度、散射次数等与光纤探头几何参数密切相关<sup>[9-13]</sup>。一些研究小组在荧光以及拉曼光谱检测研究中,根据光子传输模拟结果优化光纤探头参数:如源光纤与检测光纤距离(SDS)、入射-接收角(ICA)、光纤数值孔径(NA)以及探头与组织间距离(PSD)等,实现特定穿透深度及目标组织层出射光子选择性检测,有效提高目标层组织检测效率

表 1 皮肤模型及光学参数(1300 nm)

Table 1 Thickness and optical parameters of tissue model at 1300 nm

Layer	Thickness /mm	Optical properties (1300 nm)			
		Absorption coefficient /mm <sup>-1</sup>	Scattering coefficient /mm <sup>-1</sup>	<i>g</i>	<i>n</i>
Epidermis	0.07	0.234	18.216	0.86	1.37
Dermis	1.0	0.820	10.754	0.86	1.37
Subcutaneous	∞	0.630	10.832	0.86	1.37

Monte Carlo 方法采用随机模型描述光在人体组织内随机行走、散射以及吸收过程,可方便准确地获取漫反射光子穿透深度,传输光程等信息<sup>[15-17]</sup>。本文在 Wang 等<sup>[15]</sup>媒体中心标记语言(MCML)程序基础上,结合所设计光纤探头结构改进算法程序,分析比较光纤探头对于不同穿透深度漫反射光子的分辨接收能力,以及对目标组织检测效率及灵敏度。

原版 MCML 程序中定义无限细光束垂直入射到待测组织表面,而采用光纤探头时,光子经过光纤入射到待测组织表面,其方向由入射光纤数值孔径,以及与组织表面法线夹角  $\beta$  共同决定。

假设光纤垂直于待测组织表面,根据 MCML 程序中方向余弦计算方法<sup>[14]</sup>,入射光子方向由相对于光纤方向的经纬角 $[\theta, \varphi]$ 决定:

和灵敏度。Zhu 等<sup>[10,12]</sup>研究了光纤探头参数(直径、数值孔径和 SDS 等)与接收光子穿透深度之间的关系。

本文针对人体成分无创检测需要,设计了可选择性接收真皮层漫反射光子的漫反射测量光纤探头。在三层皮肤模型基础上,采用 Monte Carlo 方法分析比较了三种光纤探头接收漫反射光子穿透深度以及真皮层传输路径,并根据人体皮肤组织结构以及光学参数变化,分析比较了不同条件下,光纤探头对真皮层检测性能变化。

## 2 实验方法

### 2.1 皮肤模型以及光子传输模拟

根据解剖结构,人体皮肤分为表皮、真皮以及皮下组织。真皮层含有丰富的血液以及组织液,其光学参数与人体成分密切相关<sup>[14]</sup>,漫反射光谱测量研究中常选择表皮层较薄、真皮层较厚的部位,增加光子在真皮组织中传输路径,提高检测灵敏度,减小表皮层以及皮下组织对漫反射光谱影响。根据 Lee 等<sup>[7]</sup>对亚洲人皮肤厚度以及 Bashkatov 等<sup>[6]</sup>对离体皮肤光学参数测量结果,在人体成分无创检测常用的波长为 1300 nm,文中应用的三层皮肤模型结构以及光学参数如表 1 所示。

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中经角  $\theta \in (-\theta_t, \theta_t)$  范围内随机数 $[\theta_t = \arcsin(NA/n), n$ 为光纤与组织间介质折射率],经角  $\varphi$  为 $(0, 2\pi)$ 范围内随机数。

入射光纤以  $y$  轴为对称轴旋转一定角度  $\beta$ ,根据空间坐标变换原理,光纤方向改变后入射光子初始方向余弦表示为

$$\begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \\ u'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

光纤探头接收漫反射光子方向余弦范围也可通过上述推导得到。

根据(1)式修改原 MCML 程序,得到光纤探头 Monte Carlo 模拟程序,结合光纤探头参数,以及模拟结果中漫反射光子在组织表面出射位置  $r$ , 方向  $\alpha$ , 穿透深度  $Z$ , 真皮层中传输光程  $l$  等, 分别计算探头接收漫反射光子的平均穿透深度, 有效光子比例, 有效信号载荷以及检测灵敏度, 作为衡量光纤探头检测性能依据。

光纤探头检测平均穿透深度定义为

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} f_j Z_j}{\sum_{j=1}^{N_p} f_j}, \quad (3)$$

式中  $f_j$  为穿透深度,  $Z_j$  光子占探头接收光子百分比,  $N_p$  为光子穿透深度矩阵  $z$  的元素个数。

根据光子穿透深度, 定义有效光子比例为光纤探头接收穿透深度在真皮层内光子占检测总反射光子百分比:

$$P_{\text{effective}} = \frac{N_{\text{dermis}}}{N_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (4)$$

漫反射光谱有效信息载荷定义为光纤探头接收漫反

射光子强度与光子在真皮层内传输光程乘积:

$$F = \sum_i p(i) l_{\text{der}}(i). \quad (5)$$

检测灵敏度定义为光纤探头接收漫反射光子在真皮层中传输光程与在组织中传输总光程之比:

$$S_{\text{der}} = \frac{l_{\text{der}}}{l_{\text{total}}}. \quad (6)$$

以上参数反映了光纤探头对真皮层信息检测效率以及灵敏度, 下文结合所设计光纤探头具体结构, 计算探头各项参数, 优化人体成分漫反射光纤探头设计。

## 2.2 深度分辨光纤探头设计

本文针对人体成分检测需要, 设计了三种光纤探头: 1) 源光纤与接收光纤垂直于皮肤表面,  $\beta=0^\circ$ ,  $d_{\text{SD}}=0.7 \text{ mm}$ ; 2) 源光纤与接收光纤与皮肤表面法线夹角  $\beta=15^\circ$ ,  $d_{\text{SD}}=0.7 \text{ mm}$ ; 3) 源光纤与接收光纤通过半球透镜耦合到待测组织(半球透镜参数:  $n=1.5$ ,  $R=1 \text{ mm}$ ;  $d_{\text{SD}}=0.7 \text{ mm}$ ), 具体结构如图 1 所示。

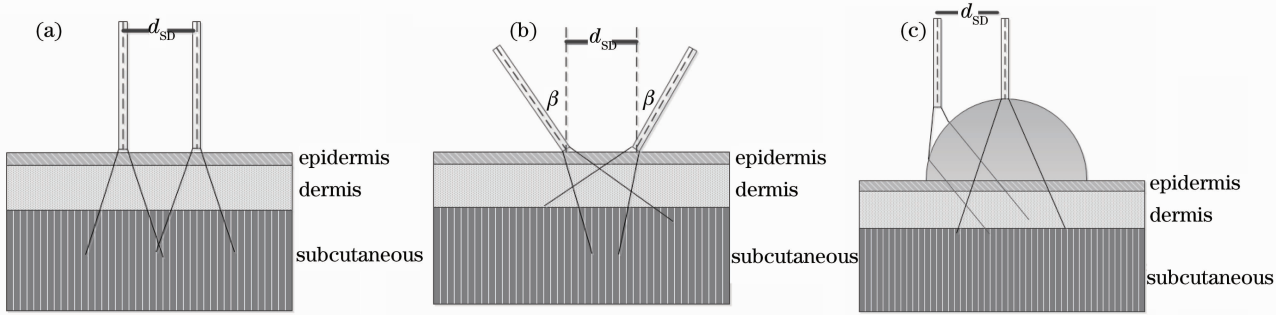


图 1 三种光纤探头结构示意图。(a) 探头 1; (b) 探头 2; (c) 探头 3

Fig. 1 Schematic of fiber optic probe. (a) Probe 1; (b) probe 2; (c) probe 3

三种光纤探头入射与接收光纤均为芯径  $100 \mu\text{m}$  多模光纤, 数值孔径 0.22, 探头 3 采用半球透镜耦合光纤与待测组织, 增加了光入射以及接收效率, 减小了组织表面镜面反射。

## 3 结果分析

### 3.1 光纤探头深度分辨比较

根据模拟结果, 入射光波长  $1300 \text{ nm}$ , 三种光纤探头检测漫反射光子穿透深度分布以及累加比例归一化图如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 探头 3 种采用半球透镜耦合方式, 在三种光纤探头中漫反射信号检测效率最高。探头 2 及 3 接收到漫反射光子穿透深度较浅, 大多集中在真皮层, 根据检测到光子穿透深度以及皮肤

各层厚度, 由(3)式计算得到探头 3 检测有效光子比例在 92% 以上, 而探头 1 接收到漫反射光子平均穿透深度较深, 有接近 15% 的漫反射光子来自皮下组织, 有效光子比例小于探头 2 及 3, 且漫反射信号检测效率较低。

### 3.2 皮肤参数变化对探头检测效率影响

在体光谱测量研究中, 不同个体皮肤几何结构以及光学参数差异较大, 影响目标层组织检测。表皮层厚度及散射系数变大, 或真皮层厚度减小, 均可导致光子在真皮层内传输路径变短, 检测漫反射信号中有效光子比例以及真皮层信息检测效率下降, 光纤探头设计中, 考虑到个体皮肤组织结构以及光学参数变化, 根据(2)~(4)式中定义的探头接收有效光子比例, 有效信息载荷以及真皮层检测灵敏度三个参数, 综合分析不同情况下, 三种光纤探头真皮

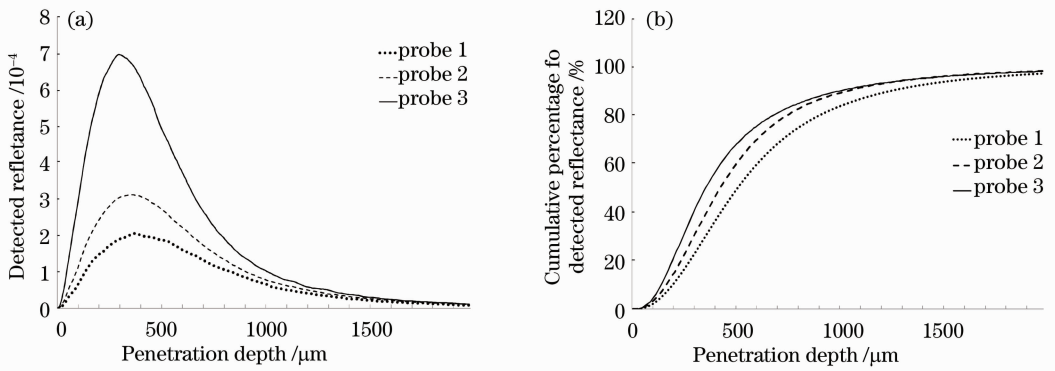


图 2 三种探头(a)检测光子穿透深度分布和(b)累加比例

Fig. 2 (a) Penetration depth of detected photons and (b) cumulative percentage distribution of three probes

层检测效率以及灵敏度,确保所设计光纤探头在不同应用条件下均具有较好检测性能。

根据模拟结果以及(3)~(5)式可知,表皮厚度增大,三种探头有效光子比例,有效信息载荷以及真皮层检测灵敏度均有所下降,但探头 2,3 对于真皮层信息检测效率始终优于探头 1。图 3(a)、(c)中,

探头 3 检测有效光子比例以及真皮层检测灵敏度随表皮层厚度增加下降较快,主要由于探头 3 检测漫反射光子穿透深度较浅,表皮层厚度增加,真皮层漫反射光子减少,检测效率降低,但综合三个参数,在人体表皮厚度变化范围内,探头 3 真皮层信息检测效率以及灵敏度优于探头 1 以及探头 2。

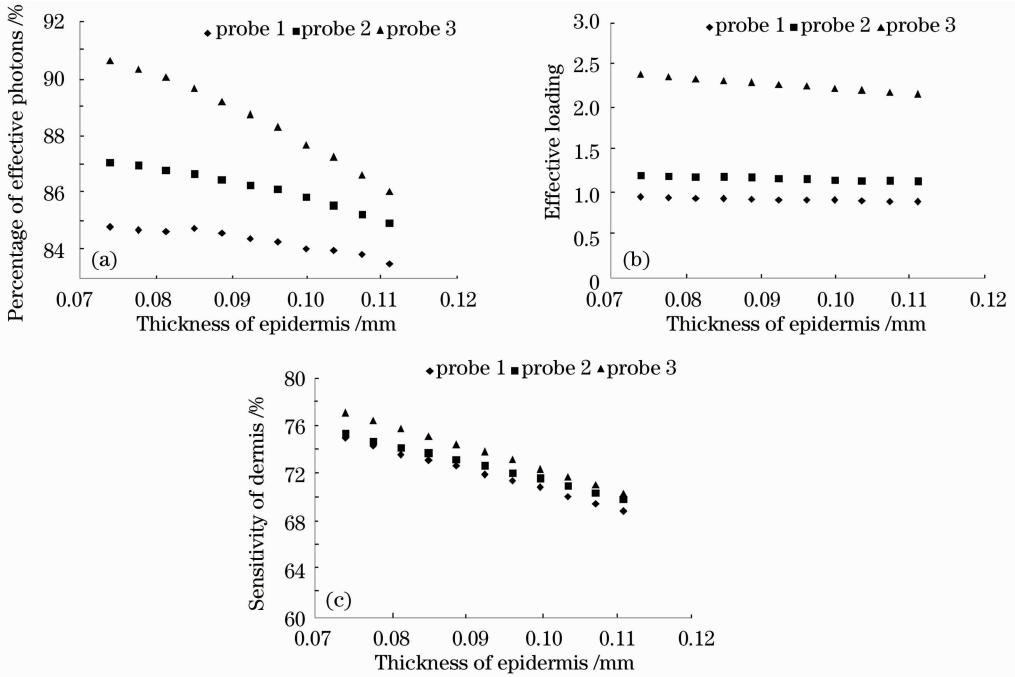


图 3 表皮厚度变化,三种探头对真皮信息检测效率比较。(a)有效光子比例;(b)有效信息载荷;(c)真皮层检测灵敏度  
Fig. 3 Effect of different epidermis thicknesses on the detection efficiency of dermis by three probes. (a) Percentage of effective photons; (b) effective information loading; (c) sensitivity of dermis

表皮散射系数变大,光子在表皮层散射几率以及传输路径变大,探头 1 以及探头 2 检测光子平均穿透深度变浅,有效光子比例增加较为明显,但光子在真皮层中传输路径变小,根据(5)式计算得到检测灵敏度降低。探头 3 对真皮层检测效率受表皮层散射系数变化影响不大,真皮层检测灵敏度远远大于探头 1 以及探头 2,如图 4 所示。

根据模拟结果以及(3)式和(5)式可知,真皮层厚度减小,探头 1 检测到漫反射光子中有效光子比例以及真皮层检测灵敏度下降较为明显。而探头 2 以及探头 3,采用一定入射-接收角度或半球透镜耦合,光纤入射以及接收孔径角重叠部分在真皮层以内,增加了真皮层漫反射光子接收几率,受真皮层厚度变化影响较小,特别是探头 3,在真皮层厚度变化

较大的情况下,真皮层检测效率远优于探头 1 以及探头 2,如图 5 所示。

以上结果表明,组织厚度以及光学参数变化影响光纤探头检测性能,而采用本文设计的光纤探头

2 及 3,有效提高了漫反射光接收效率以及真皮层检测灵敏度,减小非目标层结构以及光学参数变化影响。特别是光纤探头 3 检测到真皮层反射光子及有效信息载荷远远大于探头 1 以及探头 2,提高了检

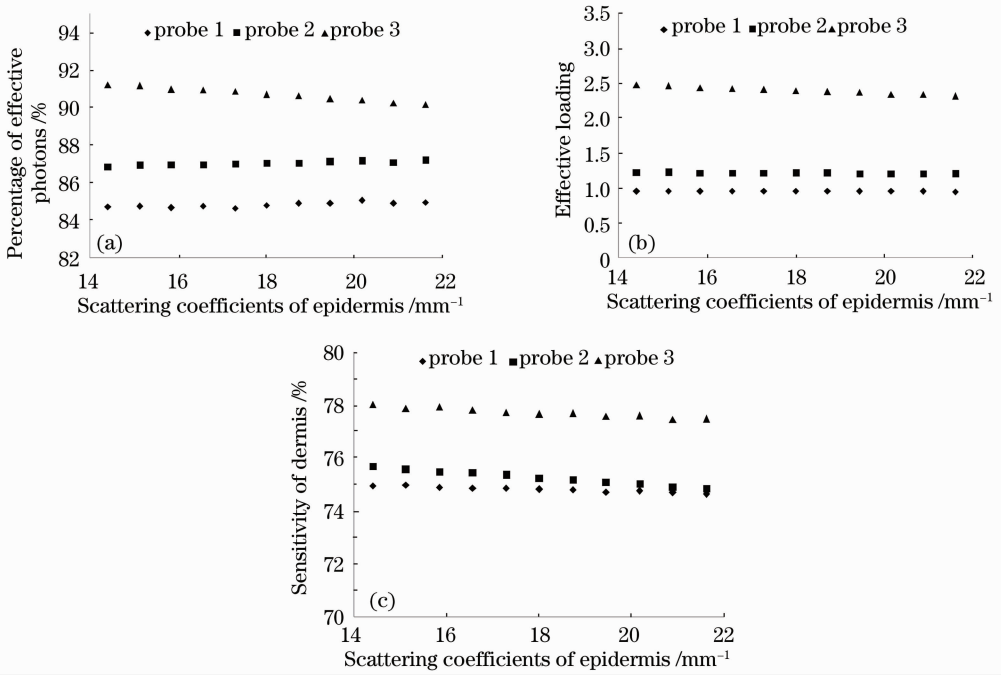


图 4 表皮散射系数变化,探头对真皮信息检测效率比较。(a)有效光子比例;(b)有效信息载荷;(c)真皮层检测灵敏度

Fig. 4 Effect of different scattering parameters of epidermis on the detection efficiency of dermis. (a) Percentage of effective photons;(b)effective information loading;(c) detection sensitivity of dermis

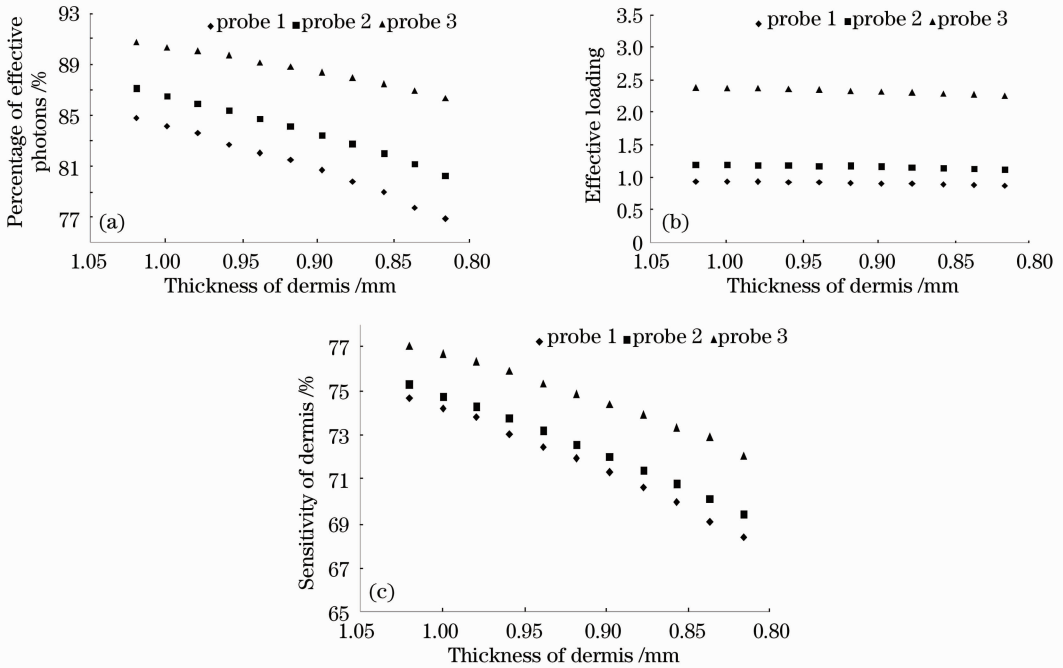


图 5 真皮厚度变化,探头对真皮信息检测效率比较。(a)有效光子比例;(b)有效信息载荷;(c)真皮层检测灵敏度

Fig. 5 Effect of different dermis thicknesses on the detection efficiency of dermis. (a) Percentage of effective photons;(b) effective information loading;(c) detection sensitivity of dermis

测信噪比以及检测极限。在表皮层厚度, 散射系数以及真皮层厚度改变的情况下, 探头 3 对真皮层信息检测效率以及灵敏度均优于探头 1 以及探头 2。

### 3.3 1200~1800 nm 检测灵敏度比较

人体主要成分如水、脂肪、蛋白质和葡萄糖等在 1200~1800 nm 范围内吸收特征较为明显, 应用中要求光纤探头在此波长范围内, 对真皮层均具有较高的检测效率。根据(5)式, 分别计算比较三种探头在 1200~1800 nm 范围内真皮层检测灵敏度如图 6 所示。

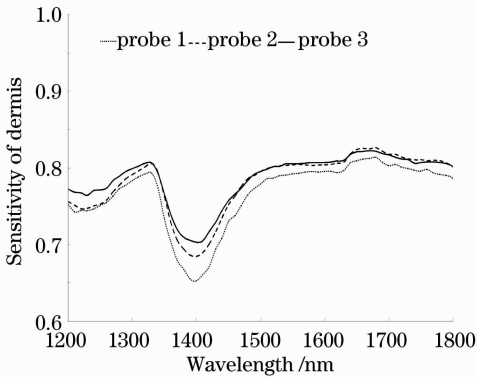


图 6 1200~1800 nm 内, 三种探头真皮层检测灵敏度比较

Fig. 6 Detection sensitivity of dermis within 1200~1800 nm of three fiber-optics probes

图 6 可以看出, 1200~1800 nm 范围内, 探头 2、3 对真皮层检测灵敏度均优于探头 1。特别在 1200~1300 nm 以及 1400 nm 附近, 探头 3 对真皮层检测灵敏度最高, 与探头 1 相比分别提高 5% 以及 8% 左右。在 1450~1850 nm 范围内, 随着各层组织散射系数变小, 探头 2 对真皮层检测灵敏度与探头 3 较为接近, 仍大于探头 1。综合比较, 在人体无创成分检测波长范围内, 光纤探头 3 对真皮层检测灵敏度较高, 适于临床应用。

### 3.4 探头检测各层组织光学参数灵敏度比较

人体成分无创检测研究中, 不仅要求光纤探头对目标组织具有较高的检测效率以及灵敏度, 且尽量减小接收光子在非目标组织中传输路径以及散射次数, 减小非目标组织层光学参数改变对测量的影响。

在三层皮肤模型基础上, 比较了以下三种情况漫反射光谱变化: 1) 真皮层光学参数变化 10%; 2) 表皮层以及皮下组织光学参数变化 10%; 3) 三层皮肤光学参数同时变化 10%。定义光谱曲线积分面积(AUC)为 1200~1800 nm 范围内光谱强度积分值, 定量分析检测漫反射光谱对于各层组织光学参数变化灵敏度。光学参数不变, 光纤探头检测漫反射光谱 AUC 定义为 1, 将各层皮肤光学参数变化后漫反射光谱 AUC 值进行归一化处理, 得到三种探头检测漫反射光谱随各层组织光学参数变化如表 2 所示。

表 2 不同层组织光学参数变化, 三种光纤探头 AUC 比较

Table 2 AUC of three fiber-optic probes in condition of optical-parameter change in different layers

Layer		AUC		
		Normal	Scattering coefficients decreased by 10%	Absorption coefficients decreased by 10%
Probe 1	(a) Dermis		1.088	0.976
	(b) Epidermis & subcutaneous	1	1.047	0.974
	(c) Three layers		1.127	0.955
Probe 2	(a) Dermis		1.084	0.958
	(b) Epidermis & subcutaneous	1	1.002	0.994
	(c) Three layers		1.085	0.953
Probe 3	(a) Dermis		1.106	0.962
	(b) Epidermis & subcutaneous	1	1.010	0.996
	(c) Three layers		1.116	0.958

根据不同情况下光纤探头 AUC 值计算结果, 与探头 1 以及探头 2 相比, 探头 3 对真皮层光学参数变化灵敏度较高, 受表皮层以及皮下组织光学参数改变影响较小。探头 1 检测到漫反射光子穿透深度较深, 对表皮以及皮下组织光学参数变化灵敏度大于探头 2 以及探头 3, 适于检测深层组织光学参

数变化。探头 2 检测到漫反射光谱对真皮层吸收系数变化比较灵敏, 而对散射系数检测灵敏度小于探头 3。

## 4 结 论

在体漫反射光谱测量研究中, 光纤探头检测漫

反射光子穿透深度及传输路径与探头结构密切相关。本文设计了三种光纤探头,在三层皮肤模型基础上,结合光纤探头入射接收方式,采用 Monte Carlo 方法得到光子在组织中传输平均深度、路径以及出射光子径向距离、角度分布,根据光纤探头检测漫反射光子穿透深度、真皮层有效光子比例、有效信息载荷和检测灵敏度等参数,分析比较所设计光纤探头对于真皮层信息检测效率以及灵敏度。结果表明,采用半球透镜耦合的光纤探头 3 对真皮层检测效率以及灵敏度高,受组织结构及光学参数变化影响小,检测漫反射光谱对目标层光学参数变化灵敏,检测性能优于探头 1 以及探头 2,适用于人体成分无创检测漫反射光谱测量。

### 参 考 文 献

- 1 G. Marquez, L. H. Wang. White light oblique incidence reflectometer for measuring absorption and reduced scattering spectra of tissue like turbid media [J]. *Opt. Express*, 1997, **1**(13): 454~460
- 2 K. Sokolov, R. Drezek, K. Gossage *et al.*. reflection spectroscopy with polarized light: is it sensitive to cellular and nuclear morphology [J]. *Opt. Express*, 1999, **5**(13): 302~317
- 3 Deng Yong, Luo Qingming, Lu Qiang. Analyses of single back scattering spectra of a two layer scattering medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 595~599  
邓 勇, 骆清铭, 鲁 强. 双层散射介质的单次后向散射光谱分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 595~599
- 4 J. R. Mourant, I. Bigio, J. Boyer *et al.*. Spectroscopic diagnosis of bladder cancer with elastic light scattering [J]. *Lasers Surgery and Medicine*, 1995, **17**(4): 350~357
- 5 A. Amelink, H. J. C. M. Sterenborg, M. P. L. Bard *et al.*. In vivo measurement of the local optical properties of tissue by use of differential path-length spectroscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1087~1089
- 6 A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. V. Tuchin. Optical properties of skin, subcutaneous and muscle tissues: a review [J]. *J. Innovative Optical Health Science*, 2011, **4**(1): 9~38
- 7 Y. Lee. Skin thickness of Korean adults [J]. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 2002, **24**(3-4): 183~189
- 8 J. R. Mourant, I. Bigio, D. Jack *et al.*. Measuring absorption coefficients in small volumes of highly scattering media: source-detector separations for which path lengths do not depend on scattering properties [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(22): 5655~5661
- 9 Myakov, L. Nieman, L. Wicky, U. Utzinger *et al.*. Fiber optic probe for polarized reflection spectroscopy in vivo: design and performance [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2002, **7**(3): 388~397
- 10 C. Zhu, Q. Liu, N. Ramanujam. Effect of fiber optic probe geometry on depth-resolved fluorescence measurements from epithelial tissues: a Monte Carlo simulation [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2003, **8**(2): 237~247
- 11 M. Skala, G. Palmer, C. Zhu *et al.*. Investigation of fiber optic probe designs for optical spectroscopic diagnosis of epithelial precancers [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2004, **34**(1): 25~38
- 12 T. J. Pfefer, L. Matchette, R. Drezek. Influence of illumination collection geometry on fluorescence spectroscopy in multi-layered tissue [J]. *Med. Biol. Engng. Comput.*, 2004, **42**(5): 669~673
- 13 A. M. J. Wang, J. E. Bender, J. Pfefer *et al.*. Depth-sensitive reflection measurements using obliquely oriented fiber probes [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2005, **10**(4): 044017
- 14 He Zhonghai, Luo Yunhan, Gu Xiaoyu *et al.*. A study of blood glucose concentration measurement by scattering coefficients [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 591~594  
贺忠海, 罗云翰, 谷筱玉等. 利用散射系数变化测量血糖浓度[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 591~594
- 15 L. H. Wang, S. L. Jacques, L. Q. Zhang. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. *Comput. Methods Programs Biomed.*, 1995, **47**(2): 131~146
- 16 Wang Jiangang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte-Carlo simulations for light propagation in striated scattering medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 346~350  
王建岗, 王桂英, 徐至展. 光在分层散射介质中传输行为的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 346~350
- 17 Wang Anle, Li Ting, Deng Yong *et al.*. Influence of real forearm structure on light transport based on MCVMW [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0317002  
王安乐, 李 婷, 邓 勇等. 基于 MCVM 研究真实前臂结构对光传输的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0317002

栏目编辑: 韩 峰