

文章编号: 0258-7025(2009)10-2587-06

混浊介质后向散射 Mueller 矩阵的一种测量方法

幸 翀¹ 黄家寿¹ 罗 硕²

(¹ 赣南医学院信息工程学院, 江西 赣州 341000; ² 赣州市第四中学, 江西 赣州 341000)

摘要 设计了一种测量米勒(Mueller)矩阵的斜入射正接收的实验装置结合新的数据处理算法, 测量了仿生物组织和真实生物组织的后向散射 Mueller 矩阵。利用该法对生物组织等混浊介质后向散射 Mueller 矩阵进行研究, 在混浊介质检测和医疗诊断等方面有潜在的应用价值。

关键词 生物光学; Mueller 矩阵; 后向散射; 偏振; 混浊介质; 生物组织

中图分类号 Q631 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093610.2587

Measurement of Turbid Media's Backscattering Mueller Matrix

Xing Chong¹ Huang Jiashou¹ Luo Shuo²

(¹ Department of Information Engineering, Gannan Medical University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)
(² The Fourth Middle School of Ganzhou, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract A Mueller matrix measuring device of canted incidence and perpendicular detecting is designed. Combined with new data processing algorithm, the device measured the backscattering Mueller matrix of biomimetic and biological tissue. The research of biological tissue and other turbid medium through this way has potential value in turbid media testing and medical diagnosis.

Key words biological optics; Mueller matrix; backscattering; polarization; turbid media; biological tissues

1 引言

光散射技术是人们认识世界的一个重要手段, 已经广泛应用于各个领域^[1~5]。

在生物组织等混浊介质的光偏振特性研究中, 目前普遍采用米勒(Mueller)矩阵-Stocks 矢量的描述方式(用 Mueller 矩阵描述介质的偏振特性, 同时用 Stocks 矢量描述光波的强度和偏振态)。其独特的优点为: 能够描述部分偏振光及其与介质相互作用过程中的偏振转换, 其中散射介质的 Mueller 矩阵决定了任意入射偏振光在介质中的传输, 能够完全地描述介质的偏振光学特性, 从而用其识别介质特性。在单次散射中 Mueller 矩阵可以全面地描述偏振态的变化与波长、散射角度、介质中散射粒子大小、形状及浓度等各种参量间的关系^[3,6,7]。

A. H. Hielscher等^[8]较早地将 Stokes Mueller 表述引入到偏光散射的研究之中; B. Kaplan 等^[9]证明了 Mueller 矩阵可用于测量悬浮粒子的尺度分布; 对于手性介质如葡萄糖所引发的旋光效应, Mueller 矩阵也可以反映出来, 表明随着葡萄糖浓度的增加后向散射 Mueller 矩阵旋光性增强, 为血糖的无创伤检测提供了一条新的渠道^[10]; 徐兰青^[11]、王棱等^[12]在数值模拟和实验测量混浊介质后向散射 Mueller 矩阵方面做了有意义的研究。另外其他课题组在光散射应用生物医学等方面也做了很多工作^[13~17]。

本文设计了一种测量 Mueller 矩阵的斜入射正接收的实验装置结合新的处理算法, 测量了仿生物组织和真实生物组织的后向散射 Mueller 矩阵。

收稿日期: 2009-06-30; 收到修改稿日期: 2009-07-31

基金项目: 赣南医学院科研项目(2006057)资助课题。

作者简介: 幸 翀(1970—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事激光在生物医学上的应用方面的研究。

E-mail: xingchong4@126.com

2 实验测量 Mueller 矩阵的理论推导

测量 Mueller 矩阵的基本方法是调制入射光的偏振态来得到多种调制手段状态下的光强,再通过代数运算而得到 Mueller 矩阵。根据测量方案的不同可分为两大类:光学器件旋转法^[8]和相位调制法。

旋转法测量 Mueller 矩阵的元素,如果入射光是振动方向沿 x 轴的线偏振光,那么入射光 Stokes 矢量是 $\mathbf{S}_1 = [1, 1, 0, 0]$,这束光线经过介质的散射,

$$\mathbf{S}_3 = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \mathbf{S}_2 = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} + m_{12} - m_{21} - m_{22} \\ -m_{11} - m_{12} + m_{21} + m_{22} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在实验中探测器只能探测光强,其大小正比于 Stokes 矢量 \mathbf{S}_3 的第一个分量 S_0 。

为了直观,不同的实验调制状态的光强用 S 下标的两个数字来表示,第一个数字表示入射光起偏组合所产生的偏振光的偏振态,第二个数字表示检偏组合所产生的偏振光的偏振态。 S_0 用 S_{12} 来重新表示,即 $S_{12} = m_{11} + m_{12} - m_{21} - m_{22}$ 。表示偏振态的下标定义为:1 表示水平线偏;2 表示垂直线偏;3 表示 45° 线偏;4 表示 135° 线偏;5 表示左旋圆偏;6 表示右旋圆偏。这样的组合形式有 36 种,从而便可

在数学上就相当于这束光的 Stokes 矢量左乘表征这个散射介质特征的 Mueller 矩阵 \mathbf{M}_1 ,乘得的结果就是散射光的 Stokes 矢量 \mathbf{S}_2 。散射光如果再遇到透光轴方向沿 y 轴的检偏器,就相当于给散射光的 Stokes 矢量再左乘这个检偏器的 Mueller 矩阵 \mathbf{M}_2 。最后得到的光的 Stokes 矢量设为 \mathbf{S}_3 ,总的计算公式便为

解出 Mueller 矩阵中的 16 个矩阵元。

最后,到达 CCD 的光的 Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{P}_2 \times \mathbf{W}_2 \times \mathbf{M} \times \mathbf{W}_1 \times \mathbf{P}_1 \times \mathbf{S}_1, \quad (2)$$

式中 \mathbf{S}_1 表示入射光的 Stokes 矢量,在本实验中其矢量表达式为 $\mathbf{S}_1 = [1, 0, 0, 0]$ 。 $\mathbf{W}_1 \times \mathbf{P}_1$ 表示起偏矩阵, $\mathbf{W}_2 \times \mathbf{P}_2$ 表示检偏矩阵。通过查资料可以得到各种组合情况下的入射光的 Stokes 矢量和相应光学元件的 Mueller 矩阵。通过相类似的(1)式计算,可以得到各种不同组合情况下的一组方程

$$\begin{aligned} S_{11} &= m_{11} + m_{21} + m_{12} + m_{22}, & S_{12} &= m_{11} + m_{12} - m_{21} - m_{22}, & S_{13} &= m_{11} + m_{31} + m_{12} + m_{32} \\ S_{14} &= m_{11} - m_{31} + m_{12} - m_{32}, & S_{15} &= m_{11} + m_{12} + m_{41} + m_{42}, & S_{16} &= m_{11} - m_{41} + m_{12} - m_{42} \\ S_{21} &= m_{11} + m_{21} - m_{12} - m_{22}, & S_{22} &= m_{11} - m_{21} - m_{12} + m_{22}, & S_{23} &= m_{11} + m_{31} - m_{12} - m_{32} \\ S_{24} &= m_{11} - m_{31} - m_{12} + m_{32}, & S_{25} &= m_{11} - m_{12} + m_{41} - m_{42}, & S_{26} &= m_{11} - m_{41} - m_{12} + m_{42} \\ S_{31} &= m_{11} + m_{21} + m_{13} + m_{23}, & S_{32} &= m_{11} - m_{21} + m_{13} - m_{23}, & S_{33} &= m_{11} + m_{31} + m_{13} + m_{33} \\ S_{34} &= m_{11} - m_{31} + m_{13} - m_{33}, & S_{35} &= m_{11} + m_{13} + m_{41} + m_{43}, & S_{36} &= m_{11} - m_{41} + m_{13} - m_{43} \\ S_{41} &= m_{11} + m_{21} - m_{13} - m_{23}, & S_{42} &= m_{11} - m_{21} - m_{13} + m_{23}, & S_{43} &= m_{11} + m_{31} - m_{13} - m_{33} \\ S_{44} &= m_{11} - m_{31} - m_{13} + m_{33}, & S_{45} &= m_{11} + m_{41} - m_{13} - m_{43}, & S_{46} &= m_{11} - m_{41} - m_{13} + m_{43} \\ S_{51} &= m_{11} + m_{21} - m_{14} - m_{24}, & S_{52} &= m_{11} - m_{21} - m_{14} + m_{24}, & S_{53} &= m_{11} + m_{31} - m_{14} - m_{34} \\ S_{54} &= m_{11} - m_{31} - m_{14} + m_{34}, & S_{55} &= m_{11} + m_{41} - m_{14} - m_{44}, & S_{56} &= m_{11} - m_{41} - m_{14} + m_{44} \\ S_{61} &= m_{11} + m_{21} + m_{14} + m_{24}, & S_{62} &= m_{11} - m_{21} + m_{14} - m_{24}, & S_{63} &= m_{11} + m_{31} + m_{14} + m_{34} \\ S_{64} &= m_{11} - m_{31} + m_{14} - m_{34}, & S_{65} &= m_{11} + m_{41} + m_{14} + m_{44}, & S_{66} &= m_{11} - m_{41} + m_{14} - m_{44} \end{aligned} \quad (3)$$

反解(3)式就可得待测介质 Mueller 矩阵。利用 Matlab 软件解得矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22} & S_{11} + S_{12} - S_{21} - S_{22} & S_{31} + S_{32} - S_{43} - S_{44} & S_{61} + S_{62} - S_{51} - S_{52} \\ S_{11} + S_{21} - S_{12} - S_{22} & S_{11} + S_{22} - S_{12} - S_{21} & S_{31} + S_{42} - S_{32} - S_{41} & S_{61} + S_{52} - S_{62} - S_{51} \\ S_{13} + S_{23} - S_{14} - S_{24} & S_{13} + S_{24} - S_{14} - S_{23} & S_{33} + S_{44} - S_{34} - S_{43} & S_{63} + S_{54} - S_{64} - S_{53} \\ S_{25} + S_{15} - S_{56} - S_{66} & S_{15} + S_{26} - S_{25} - S_{16} & S_{35} + S_{46} - S_{45} - S_{36} & S_{56} + S_{65} - S_{66} - S_{55} \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用(4)式解 Mueller 矩阵需要 36 个状态的实验数据。其他文献则采用 16 个^[11]或 49 个组合^[12]状态的实验数据等,与其比较(4)式所示方法的优点为:1)形式上和谐一致,便于后期计算机图像处理程序的编排,且可提高处理速度;2)由于公式中除了 m_{11} 外,其余矩阵元的计算公式在符号上都是两加两减,正好可消去背景光的影响。

3 实验装置和 Mueller 矩阵图样的获得

实验装置由光源、起偏和检偏器组合和 CCD 探测器以及待测介质几部分组成。如图 1 所示,由波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器发出一束直径约为 0.2 mm 的准直激光束,经过一个起偏器和 $\lambda/4$ 波片之后入射到待测样品上,经样品散射的光经过一个 $\lambda/4$ 波片和检偏器之后由 CCD 相机进行成像探测。CCD 相机的光轴与混浊介质界面(液面)法线重合,通过仔细调焦,使 CCD 相机对液体表面成像,即保证液面与 CCD 探测芯片的物象共轭关系。

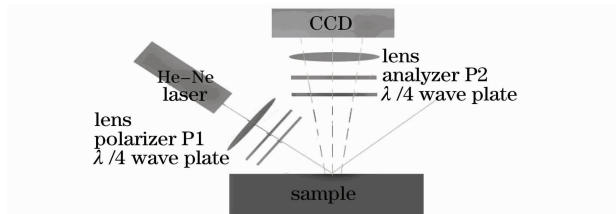


图 1 混浊介质后向散射 Mueller 矩阵测量的原理光路

Fig. 1 Turbid media backscattering Mueller matrix testing optical path

国外此类实验一般采用标准粒子聚苯乙烯球悬浊液作为仿生物组织样品,其优点在于能够很方便地获得不同颗粒大小和不同浓度的聚苯乙烯悬浮液来模拟生物组织样品。但鉴于其价格昂贵,选用成本较低的脂肪乳剂(Intralipid)悬浮液作为测量对象。Intralipid 的脂肪颗粒构造与人体内乳微粒相似,直径小于 $1 \mu\text{m}$,同时在可见光波段没有明显的电磁波吸收带,因而其悬浮液是一种良好的生物组

织液态模型,不同浓度的 Intralipid 悬浮液可以模仿不同散射系数的生物组织。

表 1 各光学元件调节角度表

Table 1 Angle of the optical devices (°)

Experimental combination	Polarizer	$\lambda/4$ wave plate 1	$\lambda/4$ wave plate 2	Analyzer
S_{11}	0	0	0	0
S_{12}	0	0	90	90
S_{13}	0	0	45	45
S_{14}	0	0	135	135
S_{15}	0	0	135	0
S_{16}	0	0	45	0
S_{21}	90	90	0	0
S_{22}	90	90	90	90
S_{23}	90	90	45	45
S_{24}	90	90	135	135
S_{25}	90	90	135	0
S_{26}	90	90	45	0
S_{31}	45	45	0	0
S_{32}	45	45	90	90
S_{33}	45	45	45	45
S_{34}	45	45	135	135
S_{35}	45	45	135	0
S_{36}	45	45	45	0
S_{41}	135	135	0	0
S_{42}	135	135	90	90
S_{43}	135	135	45	45
S_{44}	135	135	135	135
S_{45}	135	135	135	0
S_{46}	135	135	45	0
S_{51}	0	135	0	0
S_{52}	0	135	90	90
S_{53}	0	135	45	45
S_{54}	0	135	135	135
S_{55}	0	135	135	0
S_{56}	0	135	45	0
S_{61}	0	45	0	0
S_{62}	0	45	90	90
S_{63}	0	45	45	45
S_{64}	0	45	135	135
S_{65}	0	45	135	0
S_{66}	0	45	45	0

由(4)式,需要记录 36 个状态(或组合)下待测

样品背散射光的强度分布。实验中,起偏器和 $\lambda/4$ 波片 1, $\lambda/4$ 波片 2 和检偏器的方位角根据表 1 进行调整(规定以垂直入射面的方向为 0°),同时进行样品背散射光的强度分布测量。

调整好光路,然后用 CCD 拍下 36 种组合的实验图像。图 2 为激光的入射角为 15° 时,体积分数 0.08% 的 Intralipid 悬浮液的后向散射强度分布图。

就图 2 的任一单个图来看,由于光从上方斜入射到介质表面,散射图像都略呈上下不对称性。图像的

花样主要有苜蓿叶形、蝴蝶结形和圆形。其中很多图像是相同的(如 S_{12} 和 S_{21});有些图像有相同的花样,但是方位角不同,如 S_{12} 和 S_{33} 有 45° 的旋转关系。这说明 36 幅图像不是彼此独立的。若仔细观察,可发现只有 16 幅图是独立的,若选择出这 16 幅独立的图,通过一定算法可算得 Mueller 矩阵。观察到 S_{12} 和 S_{21} 图像相同,由(3)式有 $S_{12} = m_{11} + m_{12} - m_{21} - m_{22}$, $S_{21} = m_{11} + m_{21} - m_{12} - m_{22}$ 。解得 $m_{12} = m_{21}$,说明这两个矩阵元二维分布图相同。

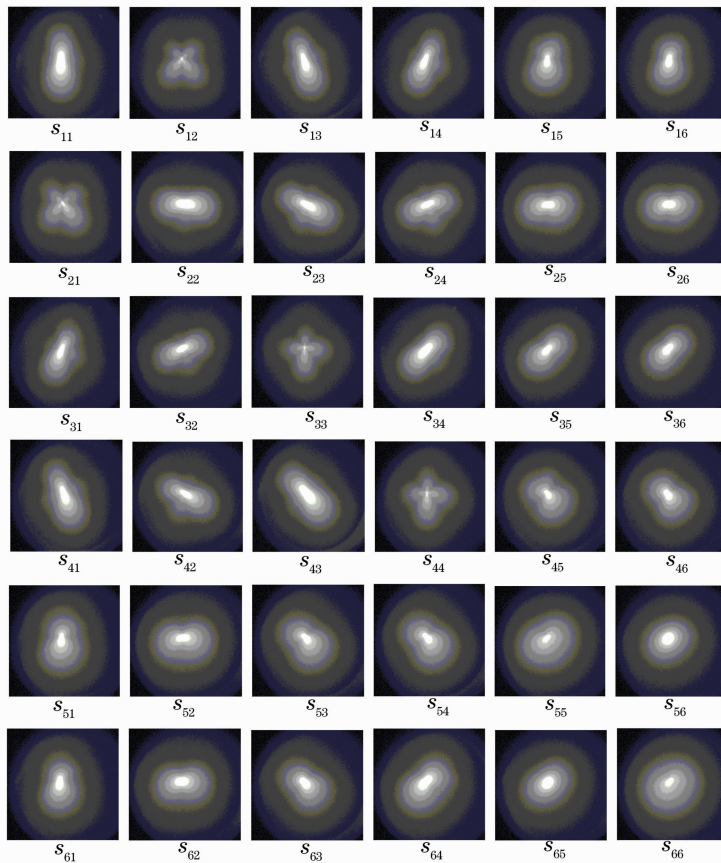


图 2 体积分数为 0.08% Intralipid 悬浮液的 36 个实验组合状态的后向散射原始图像

Fig. 2 Original backscattering from 0.08% volume fraction Intralipid suspension of the 36 experimental combinations

在 Matlab 6.5.1 环境下编制了 Mueller 矩阵各元素的计算程序,对体积分数为 0.08% 的 Intralipid 悬浮液的后向散射实验图像进行处理,得到了 Mueller 矩阵 16 个元素的二维分布,如图 3 所示。图中采用了色标法,用不同灰度表示不同的数值大小,在入射角度比较小的情况下(小于 15°),Mueller 矩阵各元素的空间分布图样的不对称性并不明显。所得结果与文献[8,11,12,18]给出的垂直入射情况下的 Mueller 矩阵基本吻合,且所获得的 Mueller 矩阵空间分布图的清晰度毫不逊色,装置结构更简单,测量更方便。

4 几种真实组织样品的后向散射 Mueller 矩阵

在测量了 Intralipid 悬浮液后向散射 Mueller 矩阵的基础上,对几种真实组织(肝、肌肉和皮下脂肪等样品)进行了实验测量。被测的肝脏为肝实质,肌肉为具有各向异性特性的平滑肌,被测脂肪由于存在大量脂滴,所以预计其散射应该很强^[19]。

由于真实生物组织散射特性较强,所以总体上图样较小。为便于分析,图 4 选取有代表性的矩阵元($m_{12}, m_{13}, m_{23}, m_{32}, m_{33}$)来比较。



图 3 入射角 15°时体积分数为 0.08% Intralipid 悬浮液的后向散射 Mueller 矩阵

Fig. 3 Backscattering patterns Mueller matrix for 0.08% volume fraction Intralipid suspension at 15° incidence

生物组织不同,其 Mueller 矩阵呈现出明显的差异性。肝的后向散射 Mueller 矩阵图样明显,花

瓣图样还隐约可见,说明肝的保偏性相对较好。然而皮下脂肪的后向散射 Mueller 矩阵图样几乎全一样,看不出花瓣形图样,说明皮下脂肪的散射系数很大,对偏振光的退偏能力很强。肌肉处于前两者之间,而且由于肌肉纤维的走向性,如果在探测表面使肌肉纤维走向摆放不同,那么会呈现出不同的后向散射 Mueller 矩阵图。

5 结 论

论述了一种混浊介质后向散射 Mueller 矩阵获得的实验方法,建立了斜入射方式测量混浊介质后向散射 Mueller 矩阵的实验装置,该装置具有结构简单、测量方便准确等优点。同时推导了一组反演 Mueller 矩阵的新算法,它与以往的算法相比,具有形式统一、易于计算机处理等优点。实验结果表明,在入射角度较小的情况下(小于 15°),Mueller 矩阵各元素的空间分布图样的对称性较好,与垂直入射情况下的 Mueller 矩阵基本吻合;系统能获得较好的混浊介质后向散射的 Mueller 矩阵二维分布图。

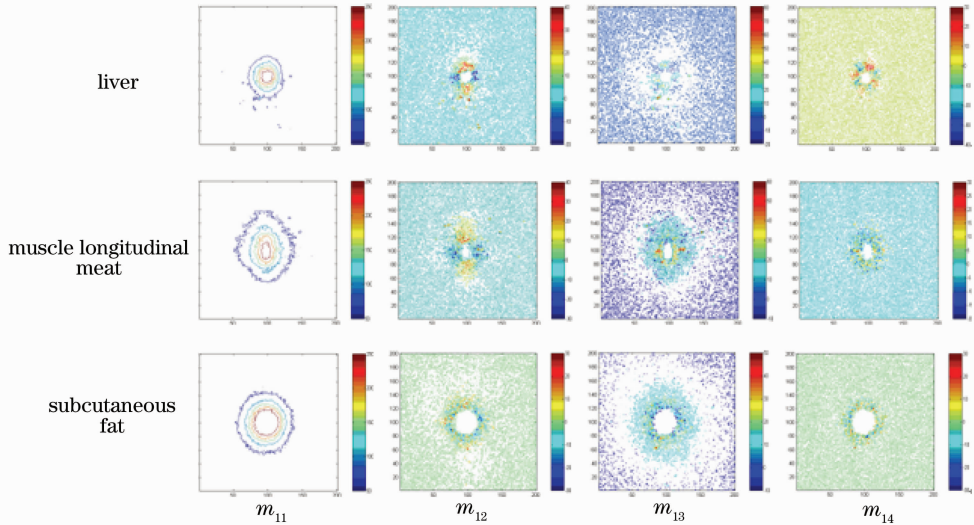


图 4 不同生物组织的 Muller 矩阵元比较图

Fig. 4 Different biological tissues' backscattering patterns of Mueller matrix

另外,对 3 种生物组织 Mueller 矩阵的测量,再次证实了介质特性可以通过 Mueller 矩阵反映出来。但同时,其 Mueller 矩阵元的二维分布图样远没有测量 0.08% Intrapilid 液的清晰,这意味着可用信息少。此点可通过改进实验装置和实验测量方法改善。总之, Mueller 矩阵能够完整地表征生物组织等混浊介质的偏振特性,在光学无创诊断方面有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Hang Lingxia. Optical thin films interfaces roughness cross-correlated properties and light scattering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 916~920
- 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 光学薄膜界面粗糙度互相关特性与光散射[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 916~920
- 2 Hou Haihong, Shen Jian, Shen Zicai *et al.*. Stratified-interface scattering model for multilayer optical coatings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1102~1106

- 侯海虹, 沈 健, 沈自才等. 光学薄膜的分层界面散射模型[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1102~1106
- 3 W. S. Bickel, W. M. Bailey. Stokes vectors, Mueller matrices, and polarized scattered light[J]. *Am. J. Phys.*, 1985, **53**(5): 468~478
- 4 S. Bartel, A. H. Hielscher. Monte Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(10): 1580~1588
- 5 J. C. Ramella-Roman, S. A. Prahl, S. L. Jacques. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media; part I[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4420~4438
- 6 A. H. Hielscher, J. R. Mourant, I. J. Bigio. Influence of particle size and concentration on the diffuse backscattering of polarized light from tissue phantoms and biological cell suspensions[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 125~135
- 7 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983
- 8 A. H. Hielscher, A. A. Eick, J. R. Mourant *et al.*. Diffuse backscattering Mueller matrices of highly scattering media[J]. *Opt. Express*, 1997, **1**(13): 441~453
- 9 B. Kaplan, G. Ledanios, B. Drevillon. Mueller matrix of dense polystyrene latex sphere suspensions; measurements and Monte Carlo simulation[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(16): 2769~2777
- 10 X. Wang, G. Yao, L. V. Wang. Monte Carlo model and single-scattering approximation of the propagation of polarized light in turbid media containing glucose[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(4): 792~801
- 11 Xu Lanqing. Simulation and Experimental Methods of Backscattered Mueller Matrix for Discrimination of Optical Property in Turbid Media [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2005
徐兰青. 后向散射 Mueller 矩阵数值模拟及实验方法在散射介质光学特性识别中的应用[D]. 福州: 福建师范大学, 2005
- 12 Wang Ling. Research on Diffuse Backscattering of Polarized Light from Highly Scattering Media [D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2005
- 王 凌. 高散射介质的偏振光后向扩散散射研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- 13 V. Backman, M. B. Wallace, L. T. Perelman. Diagnosing cancers using spectroscopy[J]. *Nature*, 2000, **406**: 35~36
- 14 S. L. Jacques, J. C. Ramella-Roman, K. Lee. Imaging skin pathology with polarized light [J]. *J. Biomedical Optics*, 2002, **7**(3): 329~340
- 15 Xia Hui, Huang Shengxiang, Li Hongjian. Measuring the quality of milk using low-coherence dynamic light scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 102~105
夏 辉, 黄生祥, 李宏建. 应用低相干动态光散射检测乳制品品质[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 102~105
- 16 Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai *et al.*. Spectral scattering property of phytoplankton calculated by absorption coefficient and size distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1429~1433
周 雯, 曹文熙, 李 彩等. 由吸收系数和粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1429~1433
- 17 Xu Lanqing, Li Hui, Xie Shusen. Backscattered Mueller matrix patterns of optically active media and its application in noninvasive glucose monitoring [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 6024~6029
徐兰青, 李 晖, 谢树森. 手性介质中后向散射米勒矩阵特性及其在血糖无创检测中的应用初探[J]. 物理学报, 2008, **57**(9): 6024~6029
- 18 B. D. Cameron, M. J. Rakovi, M. Mehrübeoglu *et al.*. Measurement and calculation of the two-dimensional backscattering Mueller matrix of a turbid medium [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 485~487
- 19 Nan Yuemin, Yao Xixian, Guo Ruijun *et al.*. Study of ultrasonic integrated backscatter on experimental hepatic steatosis model in rabbits [J]. *Chinese J. Ultrasonography*, 2005, **14**(12): 928~930
南月敏, 姚希贤, 郭瑞军等. 家兔脂肪肝超声背向散射积分研究[J]. 中华超声影像学杂志, 2005, **14**(12): 928~930