

# 锥形光纤中光波传输特性的蒙特卡罗模拟\*

孙爱娟<sup>1,2</sup> 田维坚<sup>1,2</sup> 屈有山<sup>1,\*\*</sup> 卜江萍<sup>1,2</sup> 王耀祥<sup>1</sup>

(1 中科院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 为了分析锥形光纤中光子流的传输特性和空间分布特性, 采用了蒙特卡罗算法对其进行了模拟仿真, 得到了大量光子经过锥形光纤后的光子分布图. 模拟实验结果表明, 通过锥形光纤的大量光子集中在探测器中心, 到达探测器某一位置的光子数随着该位置到探测器中心距离的增加而减少, 并且在锥形光纤锥度比一定的条件下, 改变锥形光纤长度, 光强度随着长度的增加而下降, 但通过锥形光纤的光子分布是一样的. 这些研究结果对锥形光纤的设计和实际应用提供了重要依据.

**关键词** 蒙特卡罗; 光子流; 锥形光纤; 光分布

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

锥形光纤不仅广泛应用于医学, 近场光学显微镜以及光孤子通信中<sup>[1]</sup>, 而且还可以融合成光锥做为传像器件<sup>[2]</sup>. 目前, 锥形光纤中光波传输和光能分布问题, 无论是理论, 还是实验都没有完全解决.

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 是一种统计模拟随机抽样的方法, 已广泛应用于模拟各种输运现象和各种非确定性物理问题<sup>[3~5]</sup>, 它不同于确定性数值方法, 运用该方法所获问题的解比经典数值计算更接近于物理实验结果.

本文用蒙特卡罗方法模拟大量光子在锥形光纤中的随机运动, 得到了大量光子经过锥形光纤后的光子分布图和光强度分布图. 通过模拟实验结果分析了锥度比、长度对锥形光纤透过的光子数以及传光特性的影响.

## 1 理论模型与模拟

### 1.1 锥形光纤模型和计算条件

锥形光纤模型和计算条件假设: 1) 假定锥形光纤为严格的锥形, 即不考虑表面缺陷和微小弧度的影响; 2) 锥形光纤对光子有散射和吸收作用; 3) 不考虑光的波动性和偏振性; 4) 光子的生存几率服从输运理论的负指数衰减规律; 5) 定义锥形光纤两端半径之比为锥形光纤的锥度比.

### 1.2 蒙特卡罗模拟算法

假设光子一个个地入射到锥形光纤端面, 首先跟踪一个光子, 设它的初始权重为 1, 当它经过一次散射后, 改变它的运动方向, 并被锥形光纤介质吸收

一次, 权重乘于一个小于 1 的数值, 当光子到达锥形光纤边界的时候, 要么逃逸出锥形光纤, 要么被边界反射而返回锥形光纤内. 经过多次的散射和吸收, 光子的权重如果小于预先设定的阈值权重或者逃逸出边界, 则停止对该光子的跟踪. 然后跟踪下一个光子, 通过对大量光子的跟踪可以得到光的分布.

#### 1.2.1 光子的入射

假定光源是无限细的光束垂直入射到锥形光纤端面, 等效于光子一个一个地射入锥形光纤中. 设入射光子的初始权重为 1, 并用  $(\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  表示光子的运动方向, 则初始值为  $(0, 0, 1)$ .

#### 1.2.2 光子路径

假定散射粒子服从随机分布, 一个光子产生多次碰撞之间的平均距离为  $(\rho\sigma_s)^{-1}$ , 则两次碰撞之间的距离可以由下式估计<sup>[6]</sup>

$$\tau = -\ln RAN / \rho\sigma_s \quad (1)$$

式中,  $RAN$  是  $(0, 1)$  区间平均分布产生的一个随机数,  $\rho$  是单位体积散射粒子数 ( $m^{-3}$ ),  $\sigma_s$  是单个粒子散射截面 ( $m^2$ ).

#### 1.2.3 光子的吸收

传输过程中, 光子的权重呈现指数形式衰减. 令光子的初始权重为  $w_0$ , 经过  $n+1$  次碰撞后权重为  $w_n$ , 则有

$$w_n = w_0 e^{-a(\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n)} \quad (2)$$

式中  $a$  为光子吸收系数,  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  由式(1)确定. 携带新权重的光子在锥形光纤中继续传输.

#### 1.2.4 光子的散射

通过式(1)确定了两次碰撞之间的距离, 这就获得了新的散射点位置. 如果光子没有被吸收, 则产生一个新的方向 (相对于前一方向), 新的方位角  $\varphi$  和散射角的余弦值  $\mu$  由下式计算得到<sup>[7]</sup>

\* 国家 863 计划 (2002AA716012) 资助项目

\*\* Tel: 029-88484872 Email: quyoushan@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-12-28

$$\begin{cases} \varphi = 2\pi \cdot \text{RAN} \\ \mu = [(1+g^2) - (1-g^2)^2(1-g+2g \cdot \text{RAN})^{-2}]^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $g$  是 Henyey-Grennstein 相函数近似公式中散射角的平均余弦值。

光子下一次散射的方向  $(\mu'_x, \mu'_y, \mu'_z)$  可以由下面的公式计算得到

$$\begin{cases} \mu'_x = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}}(\mu_x \mu_z \cos \varphi - \mu_y \sin \varphi) + \mu_x \cos \theta \\ \mu'_y = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}}(\mu_y \mu_z \cos \varphi - \mu_x \sin \varphi) + \mu_y \cos \theta \\ \mu'_z = -\sqrt{1-\mu_z^2} \sin \theta \cos \varphi + \mu_z \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

1.2.5 光子反射

假定光在锥形光纤边界处的传播服从菲涅尔反射定律<sup>[8]</sup>, 则

$$R(\theta_i) = \begin{cases} [(n-n_0)^2]/[(n+n_0)^2] & \text{if } (\theta_i=0^\circ) \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_i-\theta_t)}{\sin^2(\theta_i+\theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i-\theta_t)}{\tan^2(\theta_i+\theta_t)} \right] & \text{if } (0^\circ < \theta_i < \sin^{-1}(n_0/n)) \\ 1 & \text{if } (\sin^{-1}(n_0/n) < \theta_i < 90^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\theta_i, \theta_t$  分别是边界处的入射角和传输角;  $n, n_0$  分别是周围环境折射率和锥形光纤单丝折射率. 如果一个光子在边界处经过  $I$  次的反射, 则

$$W = W_0 R(\theta_1) R(\theta_2) \dots R(\theta_I) \quad (6)$$

1.2.6 光子的探测

在每一个新的散射点产生前, 将光子权重和一

个设定值比较, 如果低于设定值, 则舍弃该光子. 如果光子逃逸出锥形光纤边界也将被舍弃掉, 最后记录下通过锥形光纤到达探测器的光子权重及其到达端面的位置.

2 模拟实验

实验中取光源的离散量为  $10^4$ , 锥形光纤的大端直径为  $5.31 \mu\text{m}$ , 小端直径为  $3.09 \mu\text{m}$ ; 周围环境折射率  $n=1.52$  和锥形光纤单丝折射率  $n_0=1.75$ . 光子在锥形光纤中的运动轨迹分为四种类型, 如图 1. 其中 1 表示光子经过多次的散射和吸收逃逸出锥形光纤边界; 2 表示光子直接通过锥形光纤到达探测器; 3 表示光子在锥形光纤内部被吸收; 4 表示光子在边界被发射回锥形光纤最终到达探测器.

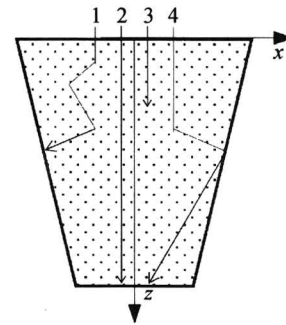


图 1 光子在锥形光纤中得可能路径  
Fig. 1 Possible photon path in the fiber optic taper

如图 2(a), (b), (c), (d) 对应的锥形光纤长度分别是 10 cm, 15 cm, 18 cm, 21 cm, 模拟得到它们

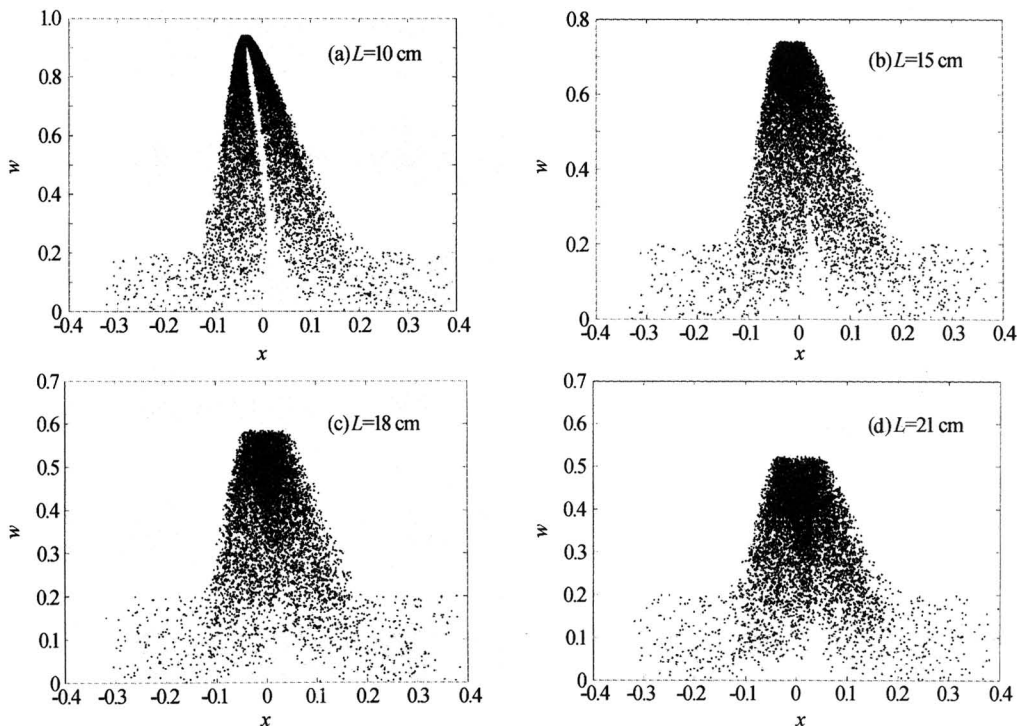


图 2 大量光子通过锥形光纤的蒙特卡罗仿真结果  
Fig. 2 Photons distribution simulated by Monte Carlo

的整体权重最大值分别是 0.9520, 0.7651, 0.5951, 0.5146, 详见表 1.

表 1 光子离散量为 10000 时光子透过数和权重值

锥形光纤长度	10	15	18	21
透过光子数	9761	8872	7617	7206
光子权重最大值	0.9520	0.7651	0.5951	0.5146

图 2 给出了探测到的光子空间分布图. 由图 2 可以看出大量的光子集中在探测中心处, 到达探测器某一位置的光子数随着该位置到探测器中心的距离  $x$  的增加而减少. 当到探测中心的距离  $x$  值达到一定程度后, 由于很少的光子可以到达离探测中心很远的地方, 因此这些位置的光子分布有较大波动. 在锥形光纤的端面直径一定的情况下, 即锥度比一定时, 在不同长度下光子分布是一样的, 但不同的是, 随着锥形光纤长度的增加, 光子强度整体有所下降, 这是受吸收以及全反射被破坏的影响. 图 2 (d) 的光子分布图存在着缺陷, 这是由于随着锥形光纤长度的增加而光源的离散量相对不足造成的.

### 3 结论

本文通过用蒙特卡罗法对锥形光纤中光子流的传输和光子分布的模拟, 得到了大量光子通过锥形光纤后的光子分布图. 仿真试验结果表明: 1) 大量光子集中在探测器中心; 2) 到达探测器某一位置的光子数随着该位置到探测器中心的距离  $x$  的增加而减少; 3) 距离探测器中心较远的位置, 很少有光子

到达; 4) 在锥形光纤锥度比一定、不同长度的情况下, 通过锥形光纤的光子分布是一样的, 但是强度随着长度的增加而下降. 这些研究结果对锥形光纤的设计和实际应用提供了可靠的理论依据.

### 参考文献

- 1 张国平. 扫描近场光学显微镜中两类光纤探针传输特性的研究. 光学学报, 1998, **18**(7): 886~887  
Zhang G P. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(7): 886~887
- 2 王耀祥, 田维坚, 黄琨, 等. 光锥与 CCD 耦合效率的理论分析. 光子学报, 2004, **33**(3): 318~321  
Wang Y X, Tian W J, Huang K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 318~321
- 3 Binder K, Springer-Verlag. Applications of the monte carlo method in statistical physics. *Rep Prog Phys*, 1997, **60**(5): 487~559
- 4 Giovanni Z. Monte carlo study of light propagation in optically thick media: point source case. *Applied Optics*, 1991, **30**(15): 2031~2041
- 5 Markus T, Ulf O, Brian P, et al. Sampling of time-and frequency-domain signals in Monte Carlo simulations of photon migration. *Applied Optics*, 1999, **38**(1): 236~245
- 6 Groenhuis R A J, Ferwerda H A, Ten Bosch J J. Scattering and absorption of turbid materials determined from reflection measurements. 1: theory. *Applied Optics*, 1983, **22**(16): 2456~2462
- 7 李鹏. 激光多普勒测量皮肤血流的 Monte Carlo 模拟. 中国激光, 1993, **A20**(2): 140~145  
Li P. *Chinese Journal of Lasers*, 1993, **A20**(2): 140~145
- 8 Churmakov D Y, Meglinski I V, Greenhalgh D A. Influence of refractive Index matching on the photon diffuse reflectance. *Phys Med Biol*, 2002, **47**(23): 4271~428

## Simulation of Light Propagation in Fiber Optic Taper by Mone Carlo Method

Sun Aijuan<sup>1,2</sup>, Tian Weijian<sup>1,2</sup>, Qu Youshan<sup>1</sup>, Bu Jiangping<sup>1,2</sup>, Wang Yaoxiang<sup>1</sup>

1 *Fiber and Integrated Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

2 *The Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Received date: 2004-12-28

**Abstract** Photon properties of transmission and spatial distribution in fiber optic tapers were modeled and stimulated by Monte Carlo modelling. Photons distribution and intensities distribution after photons transmit through tapered optic fiber were presented. According to the stimulation, most photons after propagation through the fiber optic taper distribute in the centre of detector, and the number of photons detected by detector was decreased as the distance between the detector point and the centre point of the detector increases. If the fiber optic tapers have certain taper ratio and different length, the distributions of photons propagating through them were similar and the intensity reduced with the growth of the length of fiber. The study results provide an important evidence of design and application of fiber optic tapers.

**Keywords** Monte carlo; Photon flow; Fiber optic taper; Light distribution



**Sun Aijuan** was born in 1978, Yicheng, Shanxi Province, China. She received her Bachelor's Degree from Institute of Application Physics, Tai'yuan University of Technology in 2002. Now she is a graduate student in Photons Information Laboratory of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. Her research work focuses on the light propagation in the Fiber Optic Taper.