

多泵浦的碲基喇曼光纤放大器增益研究

巩稼民, 王杰, 张晨, 马豆豆, 刘爱萍, 杨红蕊, 郝倩文, 张丽红

(西安邮电大学 通信工程学院, 西安 710121)

摘要: 针对密集波分复用光纤通信系统中喇曼光纤放大器的增益平坦度较低、带宽较窄的问题, 从前向多泵浦喇曼放大器耦合方程入手, 采用龙格-库塔法, 使用碲基光纤作为多泵浦喇曼放大器的增益光纤, 通过 Matlab 分析了多波长泵浦中泵浦数量、泵浦功率和光纤长度对增益及增益平坦度的影响, 最终通过采用 6 个泵浦, 并合理设置泵浦功率, 实现了 100 nm 传输带宽的仿真。

关键词: 喇曼光纤放大器; 碲基光纤; 多泵浦; 增益; 增益平坦度

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)06-0041-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on gain of multi-pumped tellurium based Raman fiber amplifier

GONG Jiamin, WANG Jie, ZHANG Chen, MA Doudou,

LIU Aiping, YANG Hongrui, HAO Qianwen, ZHANG Lihong

(School of Electronics Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In the dense wavelength division multiplexing optical fiber communication system, the gain flatness of the Raman fiber amplifier is low and the bandwidth is narrow. Starting with the coupling equation of the front-end multi-pumped Raman amplifier, using the Runge Kutta method and the tellurium based fiber as the gain fiber of the multi-pumped Raman amplifier, the number of pumps, pump power and light in the multi wavelength pumping are analyzed by Matlab. Finally, the simulation of 100 nm transmission bandwidth is realized by using six pumps and setting pump power reasonably.

Key words: Raman fiber amplifier; tellurium based fiber; multi-pumped; gain; gain flatness

0 引言

随着数据传输业务以及计算机网络的飞速发展, 长距离、大容量和高速率的光纤通信已经成为现代通信发展的必然趋势。光放大器是长距离光纤通信系统中的重要元件之一。因此, 光纤通信对光放大器的要求也越来越高, 目前技术比较成熟的掺铒光纤放大

器^[1]已经逐渐达到其性能的上限, 不能满足大容量、高宽带和超长距离传输系统的要求^[2]。光纤喇曼放大器(RFA)因其噪声低、在线放大和全波段放大等优点受到了广泛关注, 但其本身的增益是不平坦的, 这使得波分复用系统只能在一个很窄的带宽内使用。为了使 RFA 有良好的平坦性, 人们提出了很多 RFA 增益平坦的方法。例如: 使用多个不同波长的泵浦激光器并进行合理安排从而获得很宽的增益带宽^[3]; RFA 与 EDFA 混合使用; 采用增益互补的级联方法^[4,5]等。但是, 由于上述几种方法成本过高, 且 RFA 与 EDFA 增益系数差异过大, 导致增益平坦度难以优化, 最终严重影响正常的信息传输。

本文以碲基光纤^[6,7]为介质, 从前向多泵浦喇曼放大器耦合方程入手, 采用龙格-库塔法, 使用碲基光纤作为多泵浦喇曼放大器的增益光纤^[8], 通过合理设置

收稿日期: 2019-09-25。

项目基金: 国家自然科学基金(61775180)资助。

作者简介: 巩稼民(1962—), 男, 河南西平人, 教授, 主要从事于光纤通信和非线性光纤。近年来在《Chinese J.Laser》、《物理学报》、《光学学报》和《中国激光》等刊物上公开发表相关论文 10 多篇, 被 SCI、EI 收录 6 篇, 参编的《光纤通信》教材已由西安电子科技大学出版社正式出版。目前, 主持陕西省自然科学基金课题 1 项, 参与多项国家级、省部级科研课题研究工作。



巩稼民,王杰,张晨,等:多泵浦的碲基喇曼光纤放大器增益研究

泵浦光与光纤,让多泵浦喇曼放大器的传输带宽达到 100 nm。

1 理论模型及基础

1.1 多泵浦 RFA 模型

考虑到模型的简化,本文只关注光纤色散损耗对信号光和泵浦光的作用,以及信号光和信号光、信号光和泵浦光之间的相互作用。由于自发喇曼散射和瑞利散射在光纤中影响很小可以忽略,因此得出 Raman 耦合模型方程为^[9]:

$$\pm \frac{dP_j}{dz} = -\alpha_j P_j + \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R (v_i - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_i - \sum_{v_i < v_j} \frac{g_R (v_j - v_i)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_i, j=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, α_j 表示第 j 路光的损耗(衰减)系数; g_R 是泵浦光与其它信道信号光的喇曼增益系数; K_{eff} 表示偏振因子,通常偏振值为 1 或者 2; A_{eff} 表示光纤的有效截面积; P_i, P_j, P_k 表示 i, j, k 路光的功率; v_i, v_j, v_k 表示第 i, j, k 路光的频率; N 代表光波的总路数。

1.2 龙格-库塔法

多泵浦 RFA 的耦合方程需要用数值方法^[10]求解。由于前向泵浦的计算方法相对简单,只需要求解一阶微分方程并积分该方程,方法如下:

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 = f(x_n, y_n) \\ k_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} k_1\right) \\ k_3 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} k_2\right) \\ k_4 = f(x_n + h, y_n + h k_3) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)对式(1)进行离散化处理。其中, y 代表每一个点的初始值, x 代表时间, n 代表不同的信道, h 代表 2 个相邻点之间的步长,系数 k_1, k_2, k_3, k_4 为四阶龙格库塔法中的变量, RFA 放大光纤长度用 $L = h \times (i-1)$ 表示, h 的具体数值只在仿真中一并给出。由式(1)我们可以将光纤分成 N 段,按照设定步长一段一段地进行积分,并依据步长积分出每一步的功率值,最终计算出光纤末端的泵浦功率(以 3 泵浦信道为例,当 $j=1, 2, 3$ 时, $P(i+1, j)$ 的值)和信号功率(当 $j>3$ 时, $P(i+1, j)$ 的值),并计算出相应的增益值 $P(i+1, j) - P(0, j)$ 的差值)。

$$\begin{cases} P(i+1, j) = P(i, j) + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 = f(z_i, P(i, j)) = \sum_{v_i > v_j} g(j, k) P(i, j) P(i, k) - \sum_{v_i < v_j} g(j, k) P(i, j) P(i, k) - \alpha_j P(i, j) \\ k_2 = f\left(z_i + \frac{h}{2}, P(i, j) + \frac{h}{2} k_1\right) \\ k_3 = f\left(z_i + \frac{h}{2}, P(i, j) + \frac{h}{2} k_2\right) \\ k_4 = f(z_i + h, P(i, j) + h k_3) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_j = P(i, j)$ 表示光纤每路光波迭代一次后的功率(与式(1)中的 P_j 一致)。

$$g(j, k) = \begin{cases} \frac{g_R (v_k - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}}, & v_k > v_j \\ 0, & v_k = v_j \\ -\frac{v_j}{v_k} \frac{g_R (v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}}, & v_k < v_j \end{cases} \quad (4)$$

经过以上推导可知,采用积分法可求解前向多泵浦 RFA 的耦合方程,用不变步长的四阶龙格-库塔法对积分式进行离散化处理后可用 Matlab 实现仿真。

1.3 碲基喇曼光纤分析及其增益谱

图 1 为碲基光纤喇曼增益谱。不难发现碲基光纤的喇曼增益很大,具有增益带宽大、增益系数高和双峰值等特点。

根据碲基光纤的相关研究,碲基光纤的最大增益系

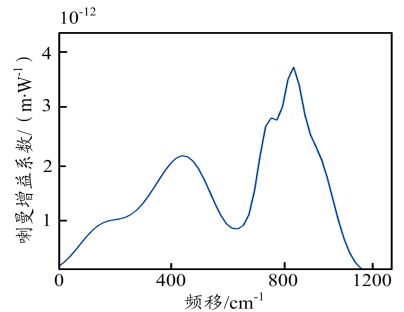


图 1 碲基光纤喇曼增益谱

数是硅光纤最大增益系数的 16 倍。碲基光纤的增益峰值(第二个峰值)为 743 cm^{-1} , 远大于增益带宽为 100 nm 的硅光纤。因此,尽管碲基光纤的损耗高达近 10 dB/m,但上述特性仍然使碲基光纤在增益系数和增益带宽方面比硅基光纤有一定的优势,这对高增益、宽带宽的离散型 RFA 的设计是非常有益的。本文使用碲基光纤作为主要的研究光纤,但实现多泵浦 RFA 需要碲基光纤的喇曼增益系数的拟合方程,通过前人的研究,碲基光纤的喇曼增益系数可被近似拟合。通过拟合可知,碲基光纤有 2 个比较大的峰值,第一个峰值约在 12.8 THz;第二个峰值约在 23 THz,碲基喇曼增益谱图中放大带宽近似有 30 THz,增益系数是 10^{-12} m/W 。

2 仿真结果与分析

单泵浦的喇曼放大尽管使其传输带宽很宽,但是不能够实现增益平坦。所以,本文要用多泵浦实现增益平坦,并且尽可能地拓宽信号光的传输带宽。由于多泵浦 RFA 放大的信号光随波长逐渐递增,信号光和泵浦光的波长差也会逐渐增大,这会使得每一路信号光都会在碲基增益光纤中获得不同的增益。而且,每路信号光所获得的总增益,并不是每个泵浦分别将喇曼放大该路信号后简单地将增益叠加在一起,而是相互影响后被叠加放大。多泵浦 RFA 中对增益平坦度的影响因素有:泵浦数量、泵浦功率和光纤长度等。仿真系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

参数	数值
信号光波长范围/nm	1500~1600
信号光功率/mW	0.1
信号光信道数	51
信号光信道间隔/nm	$0.8 \times n$ (n 是倍数)
泵浦光波长范围/nm	1390~1400
泵浦数量	3~6
喇曼光纤长度/m	215
光纤损耗/(dB·km ⁻¹)	20
迭代步长/m	5
总步数	430

2.1 泵浦数量对增益平坦度的影响

就碲基光纤而言,它的增益谱是不平坦的,所以在单泵浦仿真 51 路信号光的时候,整个带宽内增益平坦的地方很少,但喇曼增益带宽却非常大。为了验证泵浦数量对增益平坦的影响,本文用 3 个泵浦分别单独作用于信号光波长为 1530 nm 的 RFA 系统,3 个泵浦的功率均为 500 mW,波长分别为 1424.5 nm、1441.6 nm 和 1463.4 nm。3 个泵浦的喇曼增益仿真图如图 2 所示。

从图 2 可以看出,当泵浦波长单独放大起始波长为 1530 nm、带宽为 40 nm 的信号光时,3 条增益曲线中每一条曲线的增益都不平坦,而且最大增益值和最小增益值的差值均大于 6 dB。然而,当 3 个泵浦同时作用,被放大的增益

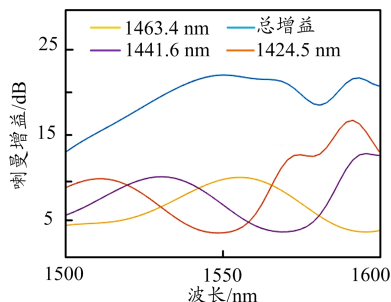


图 2 3 个泵浦的喇曼增益仿真图

曲线增益平坦性良好,在 1530~1570 nm 之间,3 个波长增益之和的最大增益为 21.7 dB,最小增益为 19.2 dB,增益差值为 2.5 dB。即增益平坦度为 2.5 dB,这说明 3 个泵浦可以改善增益的平坦性,使得带宽范围内的信号光增益更加平坦。

由于泵浦数量的不同会对增益平坦产生不同影响,因此本文又选择了 3 个泵浦和 6 个泵浦分别泵浦同一个喇曼放大系统。其中,3 个泵浦波长为 1424.5 nm、1441.6 nm 和 1463.4 nm;6 个泵浦波长为 1424.5 nm、1432.66 nm、1441.6 nm、1444.4 nm、1454.2 nm 和 1463.4 nm。为了使实验更具有说服力,我们需要控制其它变量对增益平坦的影响,首先控制泵浦总功率均为 1500 mW;然后使用 3 个泵浦时每个泵浦的功率设置为 500 mW,使用 6 个泵浦时每个泵浦功率设置为 250 mW,且使用 3 个泵浦和 6 个泵浦的光纤长度一致,信号光波长均为 1530 nm。泵浦个数不同的喇曼增益仿真如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在使用 3 个泵浦时,喇曼增益较平坦;当泵浦变成 6 个时,增益平坦度很差,且增益差大于 6 dB。对比图 2 和图 3 可知,在控制泵浦的入射功率

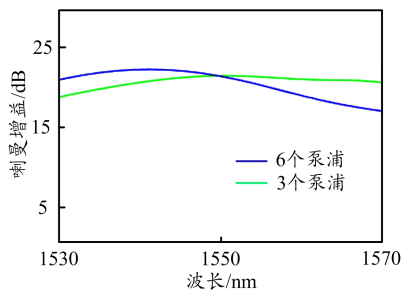


图 3 泵浦个数不同的喇曼增益仿真图

的条件下,且泵浦的数量从 1~3 时,信号光的增益平坦度逐渐变得良好,这是因为使用多泵浦后,不同泵浦对放大后的信号光的增益进行加权叠加。但是,随着泵浦的数量增加,信号增益平坦度逐渐变差,这是由于在 40 nm 的放大带宽内泵浦数量存在上限值,泵浦数量增多,超多上限值的泵浦放大的是噪声。

2.2 泵浦功率对增益平坦度的影响

多泵浦 RFA 中,短波长泵浦光不仅可以放大信号光,还可以放大长波长泵浦光。为了研究泵浦之间的相互作用,控制泵浦功率的大小,本文通过比较平均增益值和增益平坦性的变化了解泵浦之间的相互作用。为此,初始选定泵浦波长依次为 1424.5 nm、1441.6 nm 和 1463.4 nm 的泵浦光,分别设定 3 组实验,每组实验的起始阶段所有泵浦的初始功率设为一样的值,则 3 组泵浦功率依次按照 0.1 W、0.3 W 和 0.5 W 设定,喇曼增益谱如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在每一组放大系统中当泵浦光

的功率增加时,平均增益会逐渐变大。这是因为信号光的平均增益不仅和放大光纤的喇曼增益谱有关,还和泵浦光的功率有关;泵浦功率越大,平均增益就会越大。但是,随着泵

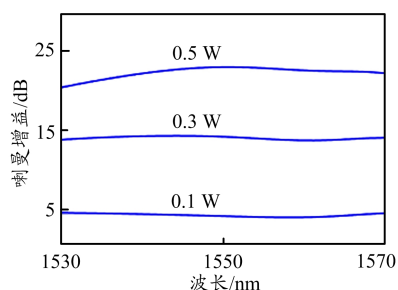


图4 泵浦功率不等的喇曼增益

浦功率的增加,信号光的平坦度逐渐变差,这是因为泵浦功率较小时,泵浦的能量主要用来放大信号光,使得信号光的增益变大,泵浦之间的能量转移程度比较微弱;当泵浦的能量逐渐增加后,泵浦间的能量转移程度比较微弱。但是,当泵浦的能量逐渐增加后,泵浦间的能量转移程度加剧,使得初始时刻具有相同大小的泵浦能量会向长波长泵浦移动。这时用来放大信号光的泵浦能量会发生巨大变化。

2.3 光纤长度对增益平坦度的影响

信号光增益的大小与增益平坦度不仅和泵浦有关,还和光纤的一些参数有关。光纤的不同参数对信号光具有不同的影响。所有的非线性作用中,受激喇曼散射对RFA的影响很大。另外,如四波混频、瑞利散射和自发喇曼散射等现象对信号光也有影响。虽然,短距离传输光信号时,瑞利散射和自发喇曼散射对信号光的影响非常小,几乎可以忽略不计。但是,在碲基光纤中,相较于石英光纤,碲基光纤的损耗比石英光纤大200倍左右。所以,在碲基光纤中发生非线性效应的有效作用距离会比石英光纤小很多。随着信号光在光纤中传输距离的增加,作用较小的瑞利散射噪声在光纤中不断被积累放大,从而影响信号光的质量与平均增益,因此噪声

和非线性效应都会对信号光的增益产生影响。随着光纤传输距离的增加,本文模拟光纤在不同传输距离情况下的喇曼增益情况,其中设置的传输距离分

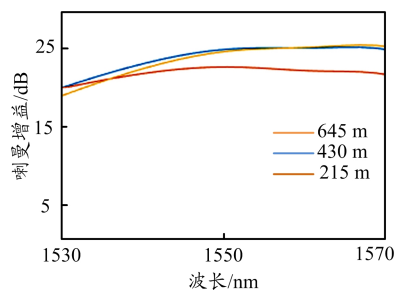


图5 光纤长度不同的喇曼增益谱

别为215 m、430 m和645 m,3个泵浦的功率均为0.5 W,泵浦的波长依次为1424.5 nm、1441.6 nm和1463.4 nm,光纤长度不同的喇曼增益谱仿真图如图5所示。

从图5可以看出,随着光纤传输距离的增加,平均增益在变大,这是因为信号光获得的增益不仅仅和泵浦功率有关,还和光纤长度有关。当光纤长度增加时,信号光的平均增益也会越大。但是,信号光的增益平坦度反而逐渐变差,增益平坦度从开始的2.5 dB逐渐增加到了7.5 dB,这对光纤通信来说,增益平坦度的差值太大会对光纤的通信质量有很大影响;增益平坦度变差是因为随着光纤的长度增加,泵浦光放大了噪声导致信号质量变差。另外,光纤越长,非线性作用越明显,导致的叠加增益会越来越大。

上述情况说明多泵浦RFA系统中,信号光的增益不仅和泵浦光的功率有关,还和光纤的长度有关。在确定光纤长度的问题上,要综合地从增益平坦度和平均增益等角度考虑问题,但是这样就会增加调整增益平坦的困难。综合各方面考虑,光纤长度定为215 m比较合适,这样既可以考虑信号光的平均增益,也可以兼顾增益平坦度的问题,同时还能使仿真实验顺利进行,节省光纤材料。

3 超大带宽的多泵浦RFA实现

通过对增益平坦度和平均增益的研究以及对碲基光纤的认识,本文设计的最终目标是实现100 nm的传输带宽。

本次实现6个泵浦增益平坦的思想是:为了实现增益平坦,在设置仿真实验参数的过程中,先设置第一组的3个泵浦,实现信号光增益由小到大变化,第一组泵浦预设置为:1396.9 nm、1405.4 nm和1428.6 nm;再设置第二组3个泵浦,实现信号光增益由大到小的变化,第二组泵浦预设置为1360.3 nm、1363.63 nm和1387 nm。具体实现100 nm传输带宽参数设置如下:信号波长为1500 nm,信号光数目为51路,信道间隔为2 nm,2组6个泵浦,功率依次为0.15 W、0.125 W、0.135 W、0.215 W、0.215 W和0.215 W,光纤长度为215 m。

6个(2组)泵浦光对信号光100 nm带宽内的增益如图6所示。可以看出,泵浦波长为1396.6~1428.6 nm的信号光的增益相对比较平坦且增益在6~11 dB,原因是该组泵浦的总功率比较小,泵浦间产生的能量转移较弱导致。泵浦波长为1360~1387 nm的信号光增益在信号光波长为1500~1545 nm时的增益相对比较平坦,随后增益平坦度直线下降。为了得到增益带宽大、增益平坦度更好的信号光增益,可同时利用2组泵浦波长为1500 nm的信号光。从图6

可知,信号光的总增益相对较为平坦,平均增益是 16.8863 dB,增益平坦度是 2.4 dB。在信号光波长大于 1550 nm 时,2 组泵浦分别放大信号光的增益和远小于总增益,但是叠加后的总增益却近似是平坦的。这是因为 6 个泵浦相互和信号光发生喇曼散射的同时,泵浦光之间也存在喇曼散射,短波长会向长波长传递能量,增加的泵浦能量最后也用来放大信号光,使得信号光的增益变得平坦。

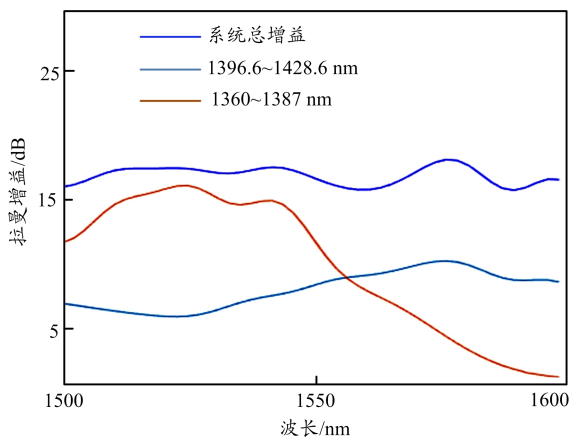


图 6 2 组泵浦对信号光 100 nm 带宽内的增益情况

4 结束语

本文采用龙格-库塔法对多泵浦耦合方程进行离散化处理后,使用碲基光纤做多泵浦 RFA 的增益光纤。通过对比泵浦数量、泵浦功率和光纤长度对平均增益的影响,发现光纤长度越长,泵浦功率越大,泵浦数量越多时平均增益会增大,但是增益增加到一定程度时就不会再增加,这是因为平均增益存在一个上限值;同时,影响平均增益的这 3 个因素的数值增加时,

信号光的增益平坦度却慢慢变差。为了寻找增益平坦度和平均增益的平衡点,也为了尽可能增加光信号的传输带宽,只能合理选择泵浦数量、泵浦功率和光纤长度。本文最终采用 6 个泵浦,并合理设置泵浦功率,实现了 100 nm 传输带宽的仿真。

参考文献:

- [1] LIAW S K, DOU L, XU A S, et al. Optimally gain-flattened and dispersion-managed C+L-band hybrid amplifier using a single-wavelength-pump laser[J]. Optics Communications, 2009, 282(20): 4087-4090.
- [2] BESHAR A H, ALY M H, ABOULSEUD A K. New trend for optical signal-to-noise ratio of disturbed Raman fiber amplifier [J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(11): 2572-2576.
- [3] 巩稼民,赵云,冷斌. 基于高非线性光纤的增益谱平坦喇曼光纤放大器研究[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 353-358.
- [4] 巩稼民,左旭,袁心易,等. 一种级联拉曼光纤放大器的增益谱平坦化研究[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1408-1413.
- [5] 颜盼盼,王葵如,余重秀,等. 增益平坦的多波长泵浦宽带喇曼光纤放大器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 155-158.
- [6] JOSE R, ARAI Y, OHISHI Y. Raman scattering characteristics of the TBSN-based tellurite glass system as a new Raman gain medium[J]. Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 2007, 24 (7): 1517-1526.
- [7] STEGEMAN R, JANKOVIC L, KIM H, et al. Tellurite glasses with peak absolute Raman gain coefficients up to 30 times that of fused silica[J]. Optics Letters, 2003, 28(13): 1126-1128.
- [8] GONG Jiamin, DING Zhe, LI Siping, et al. Multi-pumped tellurite based Raman fiber amplifier based on Gaussian fitting of gain spectrum[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(6): 245-248.
- [9] GONG Jiamin. Stimulated Raman and Brillouin scattering effect in single-mode silica fiber in density wavelength division multiplexed optical communication system[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1999.
- [10] FENG Jianqiang, SUN Shiyi. The Principle and Application of Fourth-order Runge-Kutta Method[J]. Mathematics Learning and Research, 2017, 2017(17): 4-5.

审稿专家邀请函

尊敬的各位专家学者:

您好!《光通信技术》是中国电子科技集团公司主管、中国电子科技集团公司第三十四研究所主办的学术刊物,1977 年创刊。为进一步提高办刊质量,完善和丰富现有审稿专家库,提高审稿质量和效率,现诚邀国内外光通信领域的优秀专家参与我刊的审稿工作,相信您的加入将极大地促进我刊的发展。

我刊的审稿专家遴选条件如下:①具有正高级职称。②精通或擅长光通信技术某一方面或多方面的发展前沿与动态,能对论文给出精准的审读意见。③热爱审稿工作,能按时完成审稿并对所审稿件严格保密。

本刊现采用两种审稿方式(在线审稿系统、邮件审稿),每月结算一次审稿报酬(通过银行转账方式)。如有意成为《光通信技术》审稿专家者,请登录本刊网站下载、填写“审稿专家登记表”,以电子邮件附件形式返回至 E-mail: OPTICAL263@163.com,经编辑部研究讨论通过后,将正式成为本刊的审稿专家。

衷心感谢各位专家学者长期以来对《光通信技术》工作的关心和支持。

《光通信技术》编辑部