

文章编号 1674-2915(2009)06-0482-07

带有增益的单微环谐振器的光速控制行为

郝影, 孔梅, 卢俊

(长春理工大学理学院物理系, 吉林 长春 130022)

摘要: 带有损耗的光波导微环谐振器在实现光速控制时存在输出脉冲能量损耗大、脉冲形状畸变严重等问题。基于带有增益和带有损耗的微环谐振器的传输特性之间的对称性, 计算分析了单微环谐振器的透射率、群折射率和群速度色散等特性, 分析了增益和损耗对微环谐振器输出特性影响的机制。计算了带有增益的微环谐振器的光速控制行为, 并与带有损耗的微环谐振器进行对比。结果显示, 带有增益的微环谐振器输出脉冲不分裂且有较大的输出强度。脉冲延迟量和超前量比损耗系统大, 可用于光速控制, 克服了微环带有损耗时产生的光强损耗和脉冲畸变。

关键词: 光波导; 微环谐振器; 快光; 慢光; 脉冲畸变

中图分类号: O436; TN256 文献标识码: A

Control of light speed in single-ring microresonators with gain

HAO Ying, KONG Mei, LU Jun

(*Department of Physics, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: Using single-ring microresonators with loss to realize the light speed control encounters difficulties of heavy light loss and serious pulse distortion. Based on the symmetry between the transfer characteristics of resonators with loss and with gain, the transmission, group index, and group velocity dispersion of a single-ring microresonator are calculated and analyzed. The action mechanism of the loss and gain on the transfer characteristics of the micro-ring resonator is demonstrated. The light speed control behavior of the resonator with gain is calculated and compared with that of the resonator with loss. Calculation results indicate that the resonator with gain can produce the nonsplitted pulses with higher intensities and their pulse delay and pulse advancement are greater than those of the resonator with loss. These results show that the resonator with gain can be used to control the speed of light and to overcome the pulse loss and distortion in dissipative resonators.

Key words: optical waveguide; micro-ring resonator; fast light; slow light; pulse distortion

1 引言

随着平面加工工艺水平的不断提高,以及对光波导微环谐振器研究的日益深入,光波导微环谐振器已发展成为导波光学一个新的重要研究方向。微环谐振器具有丰富的传输特性,不仅可以用作滤波器^[1]、色散补偿器^[2]、分插复用器^[3]等,也可以用来实现光速控制。

光速控制就是实现显著的慢光、快光,甚至负光速度。慢光效应可用于实现光延迟线、光缓存等,在雷达、光通信、光信息处理等领域有着广阔的应用前景^[4,5]。快光效应则引起人们对光速极限等物理基本理论的重新审视和思考^[6]。在微环谐振器中,由于光脉冲与微环谐振器的相互作用,可以导致光脉冲产生很大的正负延迟,产生慢光和快光现象^[7~10]。相对于其他光速控制方式,如电磁感应透明^[11]、光子晶体^[12]等,用光波导微环谐振器实现光速控制不需要苛刻的物理条件,可以通过改变器件参数方便地实现光速的正负快慢控制,该装置结构简单、集成度高、制作方便。

对于带有损耗的单微环谐振器的光速控制情况,已有理论分析和实验报道,表明用这种最简单的微环结构就可实现各种光速控制^[9,10]。带有损耗的微环谐振器结构的不足是在临界耦合点附近实现的快慢光伴随强烈的光强损耗和严重的脉冲形状畸变^[7,8]。

在原子铯气体中已实现了增益辅助的超光速,甚至是负光速传输,同时保持脉冲形状不变^[13]。以此为借鉴,在微环谐振器中引入增益,应该是克服光速控制时的脉冲畸变的重要手段。目前,实现有源微环谐振器的理论和实验工作都有开展,表明了微环谐振器中引入增益的可行性^[14,15],但讨论带有增益的微环谐振器的光速控制特性的工作还非常有限。H. Chang 等人分析了带有增益的多环耦合谐振器的超光速特性^[16],但在增益对慢光特性的影响效果,以及增益影响光速控制行为的机制上还缺少深入的工作。本文基于带有增益和带有损耗的微环谐振器的传输特性之间的对称性,分析了带有损耗和带有增益的单微环谐振器在传输特性上的区别和联系,计算分

析了带有增益的微环谐振器的光速控制行为,并与带有损耗的情况进行了对比,探讨了带有增益的单微环谐振器在光速控制上的应用潜力。

2 带有损耗和带有增益的单微环谐振器传输特性的对称性

单一微环谐振器耦合单一直波导结构是最简单的微环谐振器系统,如图1所示,研究光脉冲通过这种结构的群速度的变化情况具有典型性。

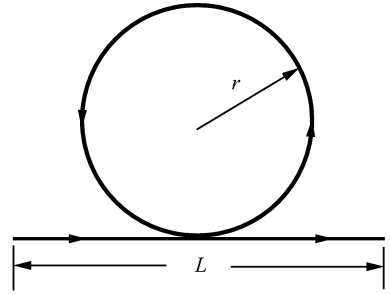


图1 单微环谐振器模型

Fig. 1 Circuit of single-ring microresonator

假设直波导以及微环和直波导之间的耦合是没有损耗的,同时,设微环谐振器和直波导都是单模波导,微环谐振器的传输函数可以写成:

$$T = \frac{\tau - \gamma \exp(-i\theta_R)}{1 - \tau \gamma \exp(-i\theta_R)} = |T| \exp(-i\phi_c), \quad (1)$$

其中 τ 是耦合器的直通系数, $\theta_R = 2\pi r \beta_{\text{res}}$ 为光波在微环中传输一周的相移, r 和 β_{res} 分别为微环的半径和传输常数。 γ 为光绕微环一周的振幅传递系数。 ϕ_c 为微环谐振器的有效相移。考虑到光在长度为 L 的直波导中的相移,系统的总相移为:

$$\phi = \beta_{\text{straight}} L + \phi_c = \frac{\omega}{c} n_{\text{eff, straight}} L + \phi_c, \quad (2)$$

其中 β_{straight} 和 $n_{\text{eff, straight}}$ 分别为直波导的传输常数和有效折射率,根据群折射率与总相移的关系可得到单微环谐振器系统的群折射率为:^[9]

$$n_g = n_{\text{eff, straight}} + \frac{c}{L} \frac{\partial \theta_R}{\partial \omega} \frac{\partial \phi_c}{\partial \theta_R}, \quad (3a)$$

其中:

$$\frac{\partial \theta_R}{\partial \omega} = \frac{2\pi n_{\text{eff, res}}}{c}, \quad (3b)$$

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial \theta_R} = \frac{(1 - \tau^2) \gamma [\gamma(1 + \tau^2) - (1 + \gamma^2) \tau \cos \theta_R]}{(\tau^2 \gamma^2 - 2\tau \gamma \cos \theta_R + 1)(\tau^2 - 2\tau \gamma \cos \theta_R + \gamma^2)}, \quad (3c)$$

当微环带有损耗时,其振幅传递系数 γ 可写作:

$$\gamma_L = \exp(-2\pi r \alpha_{\text{res_lin}}), \quad (4)$$

其中, $\alpha_{\text{res_lin}}$ 为微环的线性衰减系数。当微环带有增益时,振幅传递系数可写作:

$$\gamma_G = \exp(2\pi r g_{\text{res_lin}}), \quad (5)$$

其中 $g_{\text{res_lin}}$ 为线性增益系数。

对于分别带有损耗和增益,其它参数相同的两个微环谐振器,当它们的衰减系数和增益系数大小相等,即 $\alpha_{\text{res_lin}} = g_{\text{res_lin}}$ 时有:

$$\gamma_G = \frac{1}{\gamma_L}, \quad (6)$$

即绕微环谐振器 1 周的振幅传递系数互为倒数。推导分析表明以下关系成立^[17]:

$$|T(\gamma)| = \frac{1}{|T(\frac{1}{\gamma})|}, \quad (7a)$$

$$\phi_c(\gamma) = \phi_c(\frac{1}{\gamma}), \quad (7b)$$

$$\frac{\partial^n \phi_c}{\partial \theta_R^n}(\frac{1}{\gamma}) = \frac{\partial^n \phi_c}{\partial \theta_R^n}(\gamma), \quad (7c)$$

n 为 ≥ 1 的整数。按式(3),有效相移对频率的二阶微分对应群速度色散,三阶以上微分对应于三阶以上色散。所以,衰减和增益系数相同的微环谐振器的传输特性具有对称性,即它们的振幅透射率的模及强度透射率互为倒数,它们对入射光的相移、群折射率、群速度色散和高阶色散则完全相同。

3 单微环谐振器的透射率和群速度色散的计算分析

在本文的计算中,选择微环的半径为 300 μm ,直波导长度为 1 cm,直波导和微环的有效折射率均为 3。

取两个微环的强度衰减系数和增益系数为 $\alpha = g = 1 \text{ dB/cm}$,图 2 给出了在谐振波长处,微环谐振器透射率和群折射率随直波导和微环间耦合系数 κ 变化的曲线。由图 2 可见,带有损耗和带有增益的微环的透射率互为倒数。带有损耗的微

环谐振器,其透射率 < 1 ,而带有增益的微环谐振器,其透射率 > 1 。在临近耦合点处 ($\tau = \gamma_L = 0.9786, \kappa = \sqrt{1 - \tau^2} = 0.206$),带有损耗的微环的透射率为 0,带有增益的微环的透射率为 ∞ 。

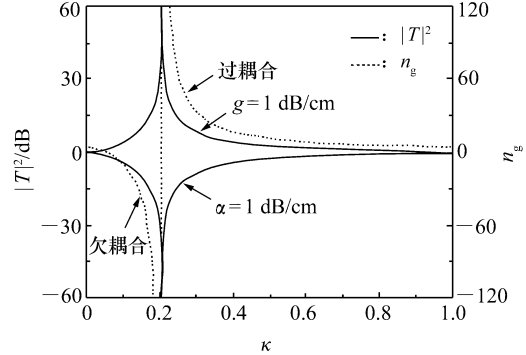


图 2 带有相等损耗和增益的微环谐振系统的透射率和群折射率

Fig. 2 Transmission and group refractive index at resonant wavelength of two resonators with $\alpha = g$

α 与 g 相等时,带有增益和带有损耗的微环谐振器的群折射率相同,故而可以统一分析两种微环的群速度。在临界耦合点左侧 ($\tau > \gamma_L$, 欠耦合区), κ 为 0 代表光脉冲直接通过直波导而不经微环传输的情形,此时的群折射率即为直波导的有效折射率。随着耦合系数 κ 的增加,群速度减小,系统依次产生群速度控制的 4 种情况:正的群速度的慢光;正的群速度的快光;负的群速度的快光;负的群速度的慢光。在临界耦合点右侧 ($\tau < \gamma_L$, 过耦合区),系统只产生正的群速度的慢光。当耦合系数从左侧趋近临界耦合点时,群折射率趋于负无穷,群速度实现负的最慢。当耦合系数从右侧趋近临界耦合点时,群折射率趋于正无穷,群速度实现正的最慢。

图 3 给出了单微环谐振器系统在不同耦合系数下群折射率随波长变化情况。群折射率峰顶位于微环谐振器的谐振波长处,即谐振波长处的群速度取极值,群速度色散为零。在临界耦合点处,群折射率的曲线最平滑,表明在临界耦合条件下,谐振器的群速度色散并不大。但临界耦合时的群

折射率曲线在谐振波长处存在一个间断点,因为当 τ 为 γ_L 时,在谐振波长处,式(3c)的分子分母都等于零。这个间断点的存在,使得微环谐振器在谐振波长附近的群折射率和群速度色散都呈现奇异性。实际上,由于临界耦合点处损耗或增益都趋于无穷,微环谐振器是无法工作在临界耦合点的。此外,由于制作误差的存在,真正的临界耦合也是无法实现的。

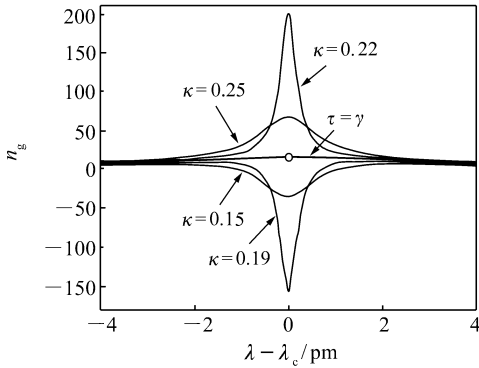


图3 不同耦合系数下群折射率随波长的变化

Fig. 3 Group refractive index versus wavelength at different coupling coefficients

一旦稍稍偏离临界耦合点,群折射率谱峰立刻变得非常尖锐,而且越靠近临界耦合点,群折射率峰越尖锐,表明群速度色散越大。

4 带有增益的单微环谐振器的光速控制行为

由前面的分析已知,越靠近临界耦合点,单微环谐振器系统的群折射率越大,所以为实现显著快慢光效应,需要让微环谐振器工作在临界耦合点附近。但对于通常的带有传输损耗的微环谐振器,临界耦合条件下微环对谐振波长的透射率非常小,同时群速度色散大,导致输出光脉冲不仅强度低,而且脉冲形状畸变严重。这些给微环谐振器光速控制的利用带来很大的障碍。

利用带有损耗与带有增益的单微环谐振器传输特性的对称性,如果在微环中引入增益,则微环的相移和色散特性不变,但强度透射率函数将反转,可望克服损耗情况下的脉冲畸变。

4.1 带有增益的单微环谐振器的时域脉冲行为

设输入脉冲为高斯型,其表达式为:

$$a(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{t_d^2}\right) \exp(i2\pi c t / \lambda_c), \quad (8)$$

其中, t_d 为2 ns, λ_c 是微环谐振波长,取为1 550.128 0 nm。对输入脉冲 $a(t)$ 进行傅里叶变换得到其频谱 $a(\omega)$, $a(\omega)$ 与微环谐振器的传输函数相乘,并结合直波导的相移作用,可得到输出脉冲频谱,再对其进行逆傅里叶变换,即可得到输出脉冲的时域波形。

对于带有增益的微环谐振器,根据图2可知,当 κ 为0.045、0.055、0.15时,系统处于欠耦合状态,分别产生带有正的群速度的快光、负的群速度的快光和负的群速度的慢光。当 κ 为0.3时,系统处于过耦合状态,产生正的群速度的慢光。取这几个具有代表性的耦合系数,计算得输出光脉冲见图4。

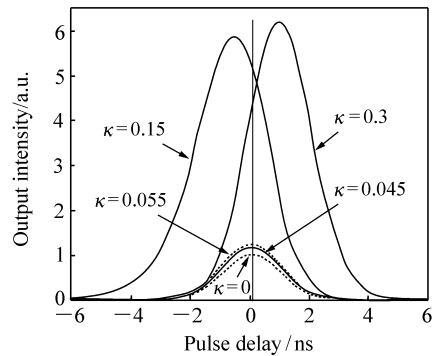


图4 带有增益的单微环谐振器的输出脉冲, $g = 1$ dB/cm

Fig. 4 Output pulses of single-ring microresonator with gain, $g = 1$ dB/cm

由图4可知,当耦合系数依次为0.045、0.055和0.15时,输出脉冲峰值超前量和脉冲强度依次增大,说明在欠耦合条件下,耦合系数越大,光脉冲越超前,系统获得的增益越多。值得注意的是:在上述几种情况中,负的群速度的快、慢光的输出脉冲都是超前的,其中负的群速度的慢光的超前量比正、负群速度的快光大得多,可见负群速度慢光实际上是快光,并且是4种光速控制中最快的光,这与其他光速控制结构和方案下的情形是一致的^[6]。

对于带有损耗的微环谐振器,输出的快光脉冲前沿不超过输入脉冲前沿^[9]。一般认为这时尽管输出脉冲峰值位置超前,也不违反因果关系。而在本文计算的带有增益的情况下,输出的快光脉冲前沿似乎超过了入射脉冲前沿,如图4所示。这是否违反了因果定律呢?作者分析,输入的高斯脉冲是非时间局域的,即在时间域内,尽管随远离脉冲时间中心的距离增大,脉冲强度迅速下降,但始终不为零,所以严格地说高斯脉冲是没有真正的前沿的。在系统的增益作用下,很弱的脉冲前部光进入系统后由于放大和快光效应产生强度很大的输出脉冲前部,从而产生图4中的现象。由于读取一个完整的信号不能只探测信号的一部分,而要探测到整个信号的波形,所以带有增益的微环谐振器中的快光脉冲行为也没有违背因果关系。

4.2 带有增益的单微环谐振器在临界耦合点附近的光速控制行为

为了在临界耦合点附近利用带有增益的单微环谐振器实现光速控制,图5给出了带有增益的单微环谐振器在临界耦合点附近的光速控制时域脉冲行为。该图显示,带有增益的单微环谐振器在临界耦合点处脉冲呈现无限的超前和延迟,反映了该点处的奇异性。

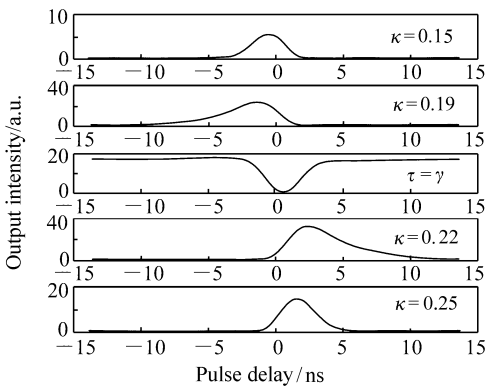


图5 带有增益的微环谐振系统在临界耦合点附近的时域脉冲行为

Fig. 5 Output pulses of micro-ring resonator with gain around critical coupling point

由式(8)得出,输入脉冲光强的半高全宽为2.355 ns,在图5中, κ 为0.19和0.22时输出脉

冲的半高全宽分别为4.233和4.486 ns,脉冲展宽较大。而当 κ 为0.15和0.25时,输出脉宽分别为2.860和2.953 ns,展宽较小。越靠近临界耦合点,输出脉冲强度越大,脉冲超前或延迟量越大,但同时输出脉冲宽度也越大,这是由于越靠近临界耦合点群速度色散越大造成的。在实际应用中,脉冲展宽将限制系统的工作带宽。此外,靠近临界耦合点,微环对输出光的增益急剧增加,维持这样的增益将需要非常高的泵浦能量,这也是不现实的。

所以,利用带有增益的微环谐振系统实现光速控制,工作点不宜太靠近临界耦合点,需要考虑到工作带宽-延迟量乘积的限制,也需要考虑到实际泵浦能力的限制。

4.3 带有增益与带有损耗的单微环谐振器光速控制行为对比

首先,由图4和图5可见,同带有损耗的情况比较,带有增益的系统中脉冲强度被放大,而不是被衰减,所以在相同的相移和色散作用下,增益系统在时域上的行为表现为没有脉冲的分裂。

此外,由图3可见,谐振波长光对应最大的正负群速度,即谐振波长光的延迟或超前量最大。在带有损耗的微环谐振器中,由于延迟或超前最大的谐振波长光被衰减得最严重,微环系统的光速控制作用在带有损耗时将不能完全发挥出来。而在带有增益的微环系统中,谐振波长光增益最大,所以微环系统的光速控制作用将得到最大程

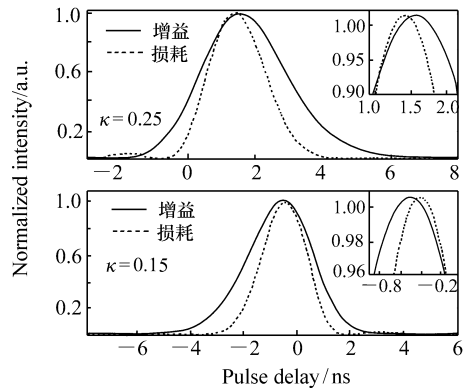


图6 带有增益和损耗系统的脉冲延迟和超前对比
Fig. 6 Comparison of pulse advancement and delay between resonators with loss and with gain

度的利用,其输出脉冲将比带有损耗时的延迟或超前量更大。图6给出了 κ 为0.15和0.25时的损耗和增益系统的时域脉冲对比。为了更加清晰地观察脉冲的延迟情况,将输出脉冲强度对各自的峰值归一化。小插图为峰值附近的放大图,用以清晰显示峰值位置的差别。相比于损耗系统,增益系统的脉冲延迟量增大了0.16 ns,超前量增大了0.11 ns。

5 结 论

由于增益和损耗系数相同的单微环谐振器系

统传输特性的对称性,决定了带有增益的微环谐振器系统与带有损耗的系统既有联系又有区别。带有增益的单微环谐振器,也可以实现正负快慢的不同光速控制,在临界耦合点附近工作时,输出脉冲不分裂且可实现较大的输出强度,其延迟和超前量大于同样的带有损耗的微环谐振器。可见,在微环谐振器中引入增益,应该是克服光速控制时脉冲畸变的重要手段。

参考文献:

- [1] YANAGASE Y, SUZUKI S, KOKUBUN Y, et al. . Box-like filter response and expansion of FSR by a vertically triple coupled microring resonator filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, 20(8):1525-1529.
- [2] MADSEN C K, LENZ G, BRUCE A J, et al. . Multistage dispersion compensator using ring resonators[J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(22):1555-1557.
- [3] CHU S T, LITTLE B E, PAN W, et al. . An eight-channel add-drop filter using vertically coupled microring resonators over a cross grid[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(6):691-693.
- [4] ZHANG Y, TIAN H, WANG H, et al. . Continuous adjustment of group delay by tuning the argument of coupling coefficient in microring coupled-resonator optical waveguides[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, 93(2-3):469-472.
- [5] KHURGIN J B. Optical buffers based on slow light in electromagnetically induced transparent media and coupled resonator structures: comparative analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, 22(5):1062-1074.
- [6] STENNER M D, GAUTHIER D J, NEIFELD M A. The speed of information in a "fast-light" optical medium[J]. *Nature*, 2003, 425(6959):695-698.
- [7] HEEBNER J E, BOYD R W. Slow' and fast' light in resonator-coupled waveguides[J]. *J. Mod. Opt.*, 2002, 49(14/15):2629-2636.
- [8] HEEBNER J E, BOYD R W, PARK Q H. Slow light, induced dispersion, enhanced nonlinearity, and optical solitons in a resonator-array waveguide[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, 65(3):036619-1-4.
- [9] URANUS H P, HOEKSTRA H J W. Modeling of loss-induced superluminal and negative group velocity in two-port ring-resonator circuits[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, 25(9):2376-2384.
- [10] URANUS H P, ZHUANG L, ROELOFFZEN C G H, et al. . Pulse advancement and delay in an integrated-optical two-port ring-resonator circuit: Direct experimental observations[J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(17):2620-2622.
- [11] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, et al. . Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397(6720):594-596.
- [12] HACHE A, POIRIER L. Anomalous dispersion and superluminal group velocity in a coaxial photonic crystal: theory and experiment[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, 65(3):036608-1-6.
- [13] WANG L J, KUZMICH A, DOGARIN A. Gain-assisted superluminal light propagation[J]. *Nature*, 2000, 406(6793):277-279.
- [14] POON J K S, YARIV A. Active coupled-resonator optical waveguides. I. Gain enhancement and noise[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, 24(9):2378-2388.
- [15] POON J K S, ZHU L, CHOI J M, et al. . Active coupled-resonator optical waveguides. II. Current injection InP InGaAsP Fabry Perot resonator arrays[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, 24(9):2389-2393.

- [16] CHANG H, SMITH D D. Gain-assisted superluminal propagation in coupled optical resonators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, 22(10): 2237-2241.
- [17] 郝影. 微环谐振器的快慢光效应分析[D]. 长春: 长春理工大学理学院, 2009.
HAO Y. Analysis on fast and slow light effect of microring resonators[D]. *Changchun: School of Science, Changchun University of Science and Technology*, 2009. (in Chinese)

作者简介: 郝影(1984—), 女, 辽宁沟帮子人, 硕士研究生, 主要从事光波导微环谐振器及光速控制方面的研究。

E-mail: woshihaoying1996@163.com

孔梅(1967—), 女, 吉林双辽人, 教授, 博士, 主要从事导波光学器件物理及应用方面的研究。

E-mail: kongmei03@yahoo.com.cn

卢俊(1968—), 男, 吉林永吉人, 教授, 博士, 主要从事微波及导波光学理论及器件方面的研究。

E-mail: junlucc@126.com

《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

邮编: 130033

电话: 0431-86176855

传真: 0431-84613409

电邮: gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价: 50.00 元/册