

马赫-曾德复合腔激光器泄漏功率的输出特性

刘丰年^{1,2}, 孔令芳¹, 果鑫¹

(1. 湖南工业大学计算机与通信学院, 湖南 株洲 412008; 2. 光电教育部重点实验室, 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要:基于自组织相干合成原理, 在马赫-曾德复合腔中引入 3dB 光纤环镜为共用腔镜, 低反(4.5%)布拉格光栅作为输出腔镜, 获得了 93.5% 的相干合成效率; 通过对泄漏端功率输出特性的研究, 在理论和实验上研究了复合腔自组织相干的物理机制。为相干合成技术研究提供新的分析思路和更便捷的方法, 并能在简单的实验设施下实现。

关键词:马赫-曾德复合腔光纤激光器; 自组织; 相干合成

中图分类号: TN253

文献标识码: A

Charateristics of leak power in Mach-Zehnder erbium-doped fiber laser

LIU Feng-nian^{1,2}, KONG Ling-fang¹, GUO Xin¹

(1. Institute of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China;

2. Key laboratory of Opto-electronic Information and Technology Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Based on the principle of self-organization in Mach-Zehnder erbium-doped fiber laser cavity, characteristics of leak power are theoretically and experimentally demonstrated. One 3dB fiber loop mirror and a fiber Bragg grating with 4.5% reflectivity are used as cavity mirrors. A high coherent combining efficiency of 93.5% was obtained. Research on characteristics of leak power opens out self-organization mechanism in Mach-Zehnder compound cavity. Many applications to coherent combining high power lasers are expected.

Key words: Mach-Zehnder composite erbium-doped fiber laser; self-organization; coherent combining

1 引言

相干合成技术是将具有一定偏振和相位关系的若干激光束组束输出并同时保持良好光束质量的技术, 它为高功率激光输出提供了一条重要途径。在实现激光束相干合成中, 若按控制相干合成条件(偏振、相位等)的方法分类, 目前所采用的相干合成技术主要有两种; 其一是对各路激光的相位、偏振等严格控制的主动控制方案。该技术环节多, 系统复杂。最典型的方案是基于 MOPA 方式的相干组束技术^[1-7]; 其二是被动控制方案: 采取合理措施, 通过激光器自身的组织调整达到相干输出。该技术结构相对简单, 技术环节少, 易获得多路激光的相干合成^[8-17]。在已有相干合成报道中, 侧重于通过分

析相干输出的激光束模场^[18]以及监测复合激光腔的拍频^[11]两种措施来研究相干合成效果。这两种措施只有在相应的实验条件下才能顺利实现。然而对复合腔激光器相干合成时的泄露功率输出特性报道较少。

本文基于被动控制方案原理, 实验得到的泄露功率输出特性与已有的理论模拟结果吻合较好。并通过分析泄露功率的输出特性深入研究了复合腔内

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60773110, No. 10774077, No. 50802044) 资助。

作者简介: 刘丰年(1974-), 女, 副教授, 博士学位, 主要研究方向为光纤激光器/放大器关键技术和激光相干合成技术。E-mail: lfnjx@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-03-26; **修订日期:** 2009-05-31

自组织相干合成机制。为相干合成技术研究提供新的分析思路和更便捷的方法,并能在简单的实验设施下实现。因此本研究对相干组合高功率光纤激光器具有一定的指导意义。

2 马赫-曾德复合腔掺铒光纤激光器 (Mach-Zehnder composite erbium-doped fiber laser, MZEDFL)

图 1 所示为我们最近提出的马赫-曾德复合腔掺铒光纤激光器实验装置。该复合腔结构由两个独立的增益臂和谐振腔共用部分组成。两个增益臂由两个工作在 980 nm 的 LD 单独泵浦,分别通过波分复用耦合器 (WDM × 2, 980 nm/1550 nm) 耦合进光路。两段增益高掺铒光纤长度均为 4.6 m。在上面支路(称支路 1)引入了偏振控制器(PC)。两支路左端共用一个 3 dB 光纤环境(3 dB FLM)作前腔镜,通过 50:50 单模光纤耦合器耦合光路。右端与另一 50:50 单模光纤耦合器相连,该耦合器的一个输出端与布拉格光栅相连,此输出端构成了谐振腔选频和相干输出的双重功能。在已有研究中^[9-12]相干输出从光纤端面输出,对光纤端面的处理要求严格。对两个 50:50 耦合器两个闲置输出端的处理是斜切,但没有做精确的角度控制。同时在输出位置绕小环达到泄漏非耦合模式的目的。如图 1 所示的“leak port”。实验中根据增益光纤的 ASE 选定了中心波长在 1560 nm 左右反射率为 4.5% (透射深度为 0.2 dB)的布拉格光栅进行选频。本文中采用宽带高反的 3dB 光纤环境作为高反腔镜,只用一个低反射率 (~4.5%)的布拉格光栅作为选频器件和输出镜,因此能直接选频。而在文献[9]~[11]中采用两个高反布拉格光栅选频时,需调谐两光栅的中心波长差在每一个光栅中心波长的 3 dB 带宽范围之内,才能达到相干耦合输出。本文的复合腔设计避免了对光栅中心波长的调谐,实用性和操作性较强。

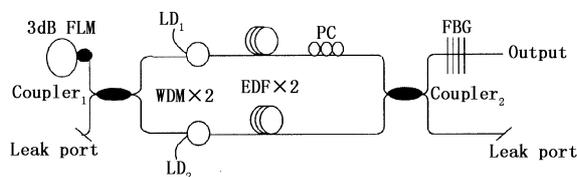


图 1 马赫-曾德复合腔掺铒光纤激光器实验装置示意图

Fig. 1 experimental setup of the Mach-Zehnder erbium-doped fiber laser

3 基于马赫-曾德 (Mach-Zehnder) 干涉谐振腔的模式选择理论

对多个光纤激光器进行自组织相干合成的思想是基于多臂振荡器和耦合/分束器 (Beam splitter) 之

上的。典型的多臂振荡器有迈克尔逊 (Michelson) 振荡器和马赫-曾德 (Mach-Zehnder) 振荡器。这里以 Mach-Zehnder 振荡器为例来分析腔内模式选择理论。在如图 1 所示的马赫-曾德复合腔激光器中设每一支臂与共用臂构成的单个激光器(称为子腔)的有效腔长分别为 L_1 和 L_2 , $\Delta\nu_1$ 和 $\Delta\nu_2$ 分别表示两子腔的纵模间隔,它们单独工作时纵模间隔分别为:

$$\Delta\nu_1 = \frac{c}{2L_1}; \Delta\nu_2 = \frac{c}{2L_2} \quad (1)$$

当复合腔工作时,选出的各组超模中心频率遵从以下间隔^[11-12,18]:

$$\Delta\nu = \frac{c}{\Delta L} \quad (2)$$

式中, $\Delta\nu$ 表示各组超模中心频率间隔; ΔL 表示两干涉臂的有效光程差; c 为真空中的光速。若不考虑增益,以上干涉仪归一化输出光强为:

$$I(\omega) = \sin^2(\omega \times \Delta L/2c) \quad (3)$$

如果在干涉仪的两臂引进增益介质,并将这一原理应用于有增益的相干谐振腔中,满足相干条件的各组超模在腔内空间相遇,则会出现干涉相长;不满足相干条件的模式则会因损耗过大而不能起振。这就是自组织的优势效应——通过自调节达到相位锁定的目的^[7,11,13]。同时也说明干涉仪适当的臂长差能有效抑制超模噪声^[17,19-21],使复合腔内振荡的系列超模满足相干条件。复合腔选出的模式是式(1)两子腔所确定的众纵模重叠后被式(3)调制过的梳状干涉频谱。如图 2(a) 表示了两子腔单独工作时的纵模间隔与复合腔工作时输出模式的关系。图 2(b) 为实验测得马赫-曾德谐振腔(在图 1 中未接入光栅时从右边耦合器的输出端口监测)的梳状干涉谱。

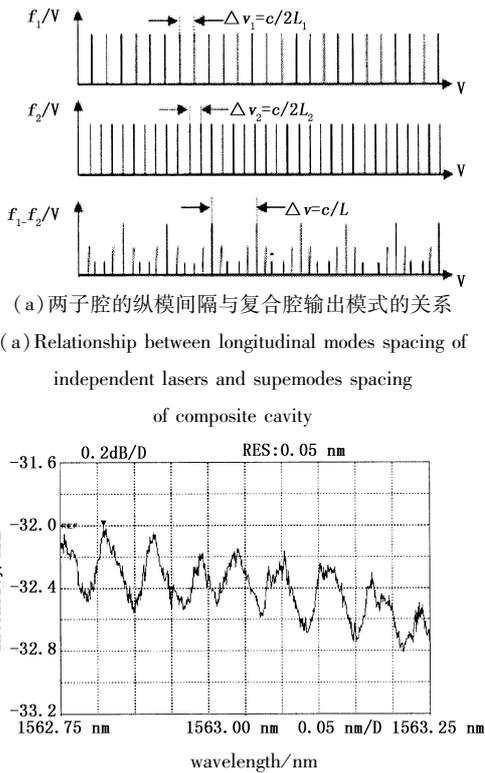
基于图 1 所示的复合腔激光输出端和泄漏端输出光强分别为:

$$I_{\text{输出端}} = (1 - R^2) \sum_m [t^2 (b_1^m)^2 + r^2 (b_2^m)^2 + 2rtb_1^m b_2^m \cos(2\psi\delta l)] \quad (4)$$

$$I_{\text{泄露}} = \sum_m [r^2 (b_1^m)^2 + t^2 (b_2^m)^2 - 2rtb_1^m b_2^m \cos(2\psi\delta l)] \quad (5)$$

式中, R 为输出镜的反射率;对应于本文中光栅反射率 4.5%; t 和 r 分别为耦合器的耦合分束比,在本文中它们都为 1/2; b_1 和 b_2 分别表示支路 1 和支路 2 前向光场的归一化光强; $\psi = k(L_1 + L_2)$, 为光场经过复合腔引起的相移; $\delta l = \Delta L / (L_1 + L_2)$ 。因采用的输出镜反射率与文献[10]端面输出情况相似,在此暂且借用该文献中的理论模拟结果:如图 3 所示给

出了基于式(4)和式(5)理论模拟得到的激光输出端输出光强和泄漏端输出光强随复合腔增益值变化的关系曲线^[10]。基于本文实验数据上的理论模拟将在后续的工作中进一步进行。



(a) Relationship between longitudinal modes spacing of independent lasers and supemodes spacing of composite cavity
(b) Measured comb-like spectrum of Mach-Zehnder resonator

图2 两子腔纵横间隔的理论分析与实验研究

Fig. 2 the oretical and experimental study on longitudinal modes spacing of independent lasers

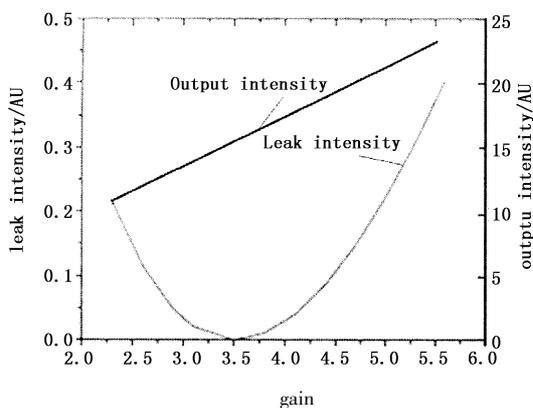


图3 激光输出端输出光强和泄漏端输出光强的理论模拟结果

Fig. 3 simulated output curves for the composite cavity

4 实验结果与讨论

实验中测得各子腔在泵浦功率为 90 mW 时的输出功率分别为 20.0 mW 和 23.3 mW。子腔结构如图 4 所示。

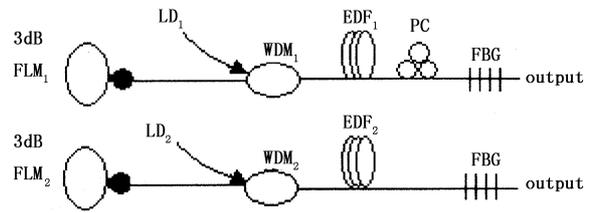
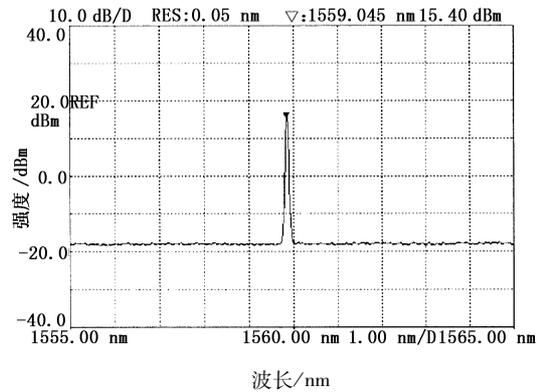


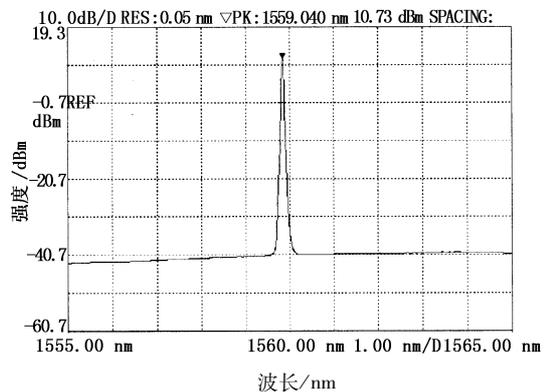
图4 独立子腔示意图

Fig. 4 independent erbium-doped fiber laser

我们在图 1 所示的复合腔结构中,研究了自组织相干输出特性。图 5(a)所示为双泵都在 90 mW 的情况下通过调节偏振控制器使得光栅端得到最大相干输出时的光谱图;图 5(b)所示为独立子腔在泵浦为 90 mW 时的光谱图。它们的 3 dB 带宽分别为 0.04 nm,0.045 nm。3 dB 带宽的差异一定程度上反映了相干合成对超模噪声的抑制。光谱显示峰值光强度分别为 15.40 dBm,10.73 dBm。功率计测得功率值分别为 40.5 mW,23.3 mW。边模抑制比分别为 33.4 dB,51.0 dB。边模抑制比出现较大的差异,与腔结构的选频机制有关。



(a) 复合腔光栅端相干输出光谱



(b) 独立子腔的输出光谱

图5 激光器输出光谱分析

Fig. 5 Optical spectrum of (a) coherent combination; (b) independent erbium-doped fiber laser

根据光栅反射(透射)率值,腔内反馈振荡的能

量可用如下公式计算:

$$\text{反馈能量} = (\text{光栅输出能量}/95.5\%) \times 4.5\% \quad (6)$$

复合腔工作时,光栅端相干输出最大为 40.5 mW,利用式(6)计算反馈能量,该能量经耦合器耦合分束,反馈到每一支路的能量约为 0.95 mW。在图 3 所示的独立子腔工作时,单一线型腔反馈回腔内的能量约为 1.10 mW,此时腔内振荡较强,因此边模抑制比较大。

根据相干合成效率公式: $\eta = \text{相干合成功率}/(\text{子腔 1 输出功率} + \text{子腔 2 输出功率})$,把子腔输出功率之和代入相干合成效率公式,计算得到 $\eta = 93.5\%$,图 6 给出了复合腔光栅端相干输出光强和隔离端泄漏光强随泵浦光强度变化的特性曲线。与图 3 理论模拟得到的结果进行比较,两个输出光强在变化趋势上吻合,但变化的细节有差异,主要原因在于文献中固定一路激光器的增益在阈值的 1.5 倍处,通过改变另外一路激光器的增益得到。而本文的实验是在同时增大两路的泵浦光强度下完成,即在复合腔的阈值以下开始记录输出光的强度。因此,图 6 中曲线在开始部分与模拟结果存在较大差异,接下来的变化趋势与模拟结果相似。这充分说明从光栅端输出的光场是相干合成的结果。如果实验条件允许,可以通过比较子腔和复合腔分别输出的激光模场面积对相干合成效果进行深入研究。

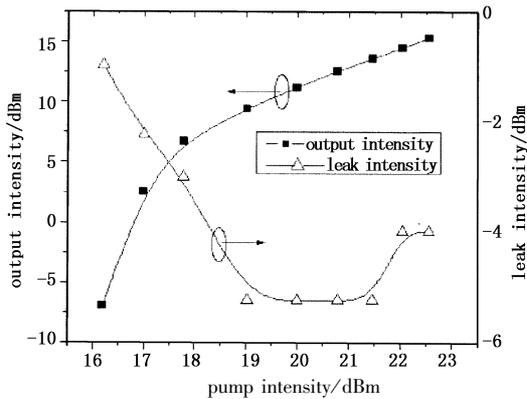


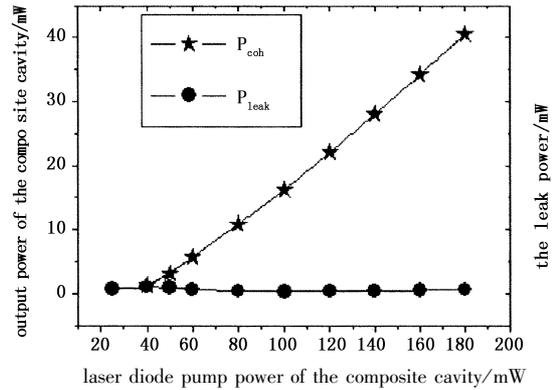
图 6 复合腔光栅端(相干输出端)与隔离端(泄露端)输出特性的实验结果

Fig. 6 experimental results of the output powers versus the pump power for the composite cavity

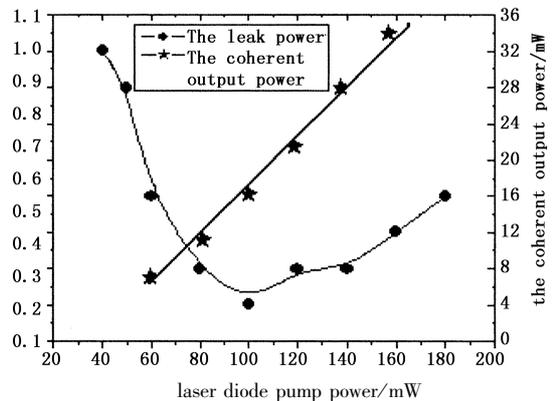
实验操作的基本过程是首先调节 PC 使光栅端输出达到最大,PC 所处该位置称为相干输出最优化位置,在研究复合腔输出特性时,改变泵浦功率,但 PC 的位置保持不变。

为了研究复合腔的泵浦阈值和功率输出特性,将两个输出端的输出功率和泵浦功率关系在图 7 给

出。图 7(a)是同一坐标下的输出特性曲线。图中相干输出的斜率效率为 29%。从图 7(a)还可看出:复合腔的泵浦阈值功率为 40 mW 左右。图 7(b)是在不同坐标下的输出特性曲线。从图 7(b)得到:泄漏功率值在复合腔的阈值附近出现最大值,约为 1 mW。随着泵浦功率从阈值升高,泄漏功率先减小,然后小幅度增加,最终保持在 (0.5 ± 0.2) mW 范围内。



(a) 同一坐标下的相干输出功率和泄漏功率随泵浦功率变化的关系



(b) 不同坐标下的相干输出功率和泄漏功率随泵浦功率变化的关系

图 7 复合腔激光器输出特性曲线

Fig. 7 the coherent output power and the leak power versus the pump power at the same (a) or different (b) coordinate scale

我们对泄露输出功率所表现出来的特性进行如下分析:泵浦功率从零开始变化到复合腔阈值附近时,腔内振荡还不稳定,没有形成一系列稳定相干的超模输出。所以对泵浦在阈值及以下的复合腔来说,光场通过功率耦合从两个端口输出。此时两个端口的输出基本平衡(如图 7(a)所示),并随着泵浦值的增加而增加。当泵浦功率从阈值升高时,腔内振荡趋于稳定,光栅端逐渐形成了稳定相干的超模输出。根据多镜开腔理论^[20-21],此时泄露端为干涉相消,损耗最大,因此泄露功率减少。在泵浦功率为 100 mW 时出现最小值(如图 7(b)所示)。但是当泵浦功率进一步增大时,由于腔内荧光功

率会增加,泄漏功率又会稍有增加。因此泄露端输出的功率特性突出反映了复合腔内自组织相干的物理机制。

5 结论

基于自组织相干合成原理,在马赫-曾德复合腔中引入3 dB 光纤环境为高反共用腔镜,通过低反(4.5%)布拉格光栅相干输出,优化了复合腔激光器的选频机制,相干组合效率达到了93.5%。实验研究了复合腔在阈值附近的泄露功率输出特性,并通过分析泄露功率的输出特性深入研究了复合腔内自组织相干合成机制;为相干合成技术研究提供新的分析思路和更便捷的方法,并能在简单的实验设施下实现。因此对相干组合高功率光纤激光器具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] X D Yang, Y Bo, Q J Peng, et al. High-beam-quality, 5.1 J, 108 Hz diode-pumped Nd:YAG rod oscillator amplifier laser system[J]. Optics Communications, 2006, 266(1): 39-43.
- [2] A Minassian, B A Thompson, G Smith, et al. High-power scaling (>100 W) of a diode-pumped TEM00 Nd:GdVO₄ laser system[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2005, 11(Q1): 621-625.
- [3] 周涛,陈军,等. LD 抽运高重复频率四通放大 MOPA 系统中的光纤相位共轭研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 441-444.
- [4] 赵岭,张春林,等. 基于固体激光器的光纤型 MOPA 的研究[J]. 半导体光电, 2005, 26(5): 406-409.
- [5] 冯国英,吕百达. 多段阵列式钕玻璃放大器泵浦腔的光线追迹分析[J]. 光学学报, 1997, 17(12): 671-676.
- [6] 肖瑞,侯静,等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6464-6469.
- [7] 肖瑞,侯静,等. 光纤激光器阵列相干合成中的位相探测与校正方法研究[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 0184-0187.
- [8] Hans Bruesselbach, et al. 200 W Self-Organized Coherent Fiber Arrays [C]. CLEO Optical Society of America, 2005.
- [9] V A Kozlov, et al. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers [J]. Opt. Lett., 1999, 24(24): 1814-1816.
- [10] T B Simpson, et al. Extraction characteristics of a dual fiber compound cavity [J]. Opt. Exp., 2002, 10(20): 1060-1073.
- [11] Akira Shirakawa, Tomoharu Saitou, et al. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. Opt. Exp., 2002, 10(21): 1167-1172.
- [12] David Sabourdy, et al. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers [J]. Opt. Exp., 2003, 11(2): 87-97.
- [13] Chen S P, et al. Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers [J]. Opt. Exp., 2005, 13(20): 7878-7883.
- [14] E J Bochove, P K Cheo, G G King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. Opt. Lett., 2003, 28(14): 1200-1202.
- [15] Jacques Morel, et al. Coherent coupling of an array of Nd³⁺-doped single-mode fiber lasers by use of an intracavity phase grating [J]. Opt. Lett., 1993, 18(18): 1520-1522.
- [16] Christopher J Corcoran, Frederic Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 201118-1-201118-3.
- [17] B He, Q Lou, J Zhou, et al. High power coherent beam combination from two fiber laser [J]. Opt. Exp., 2006, 14(7): 2721-2726.
- [18] 邱怡申,林海峰,李登峰. 利用 M-Z 干涉仪和复合腔共同选频的多波长光纤激光器[J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1421-1424.
- [19] D sabourdy, V Kermene, et al. Coherent combining of two Nd:YAG lasers in a Vernier-Michelson-type cavity [J]. Appl. Phys., 2002, B75: 503-507.
- [20] M Didomenico JR. Characteristics of a single-frequency Michelson-type He-Ne gas laser [J]. Quant. Electron., 1966 QE-2(8): 311-322.
- [21] William W Rigrod. Selectivity of open-ended interferometric resonators [J]. Quant. Electron., 1970, QE-6(1): 9-14.