【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

3 段式集成 DFB 激光器微波信号仿真

孟 洁^{1,2}, 乔丽君^{1,2}, 张明江^{1,2}, 张建忠^{1,2}, 王 涛^{1,2}

1) 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西太原 030024;

2) 太原理工大学物理与光电工程学院, 光电工程研究所, 山西太原 030024

摘 要: 为研究集成激光器生成微波信号特性, 基于光注入法设计面向微波信号生成的 3 段式单片集成分布反馈二极管激光器 (distributed feedback laser diode, DFB-LD). 基于麦克斯韦-布洛赫模型, 构建 DFB-LD 的行波速率方程组, 并搭建基于多段式单片集成激光器的仿真系统, 研究 3 段式生成微波的时序、光谱及频谱特性, 分析激光器偏置电流、波导偏置电流及波导失谐量对微波信号特性的影响. 仿真结果表明, 频谱在激光器偏置电流达到阈值电流的 6 倍时不再存在拍频分量, 微波频率随着波导偏置电流的增大基本保持不变, 通过调节波导失谐量可对微波信号实现 14.29 GHz 的调谐范围. 研究结果为集成半导体器件产生微波信号提供新思路和方法.

关键词: 非线性光学; 多段式半导体激光器; 单片集成; 麦克斯韦-布洛赫方程; 行波速率方程; 光互注入; 微波信号

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.05459

Simulation of microwave signal generation based on three-section monolithic integrated DFB laser

MENG Jie^{1,2}, QIAO Lijun^{1,2}, ZHANG Mingjiang^{1,2},
ZHANG Jianzhong^{1,2}, and WANG Tao^{1,2}

1) Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of

Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, P. R. China

2) College of Physics and Optoelectronics, Institute of Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, P. R. China

Abstract: In order to simulate the characteristics of microwave signal generated by integrated laser, we design the laser structure of three-section monolithic integrated distributed feedback semiconductor laser diode (DFB-LD) for microwave signal generation based on the optical injection method. On the basis of Maxwell-Bloch's mathematical model, we construct the traveling wave equations of DFB-LD and set up a multi-section monolithic integrated laser simulation system. Then we study the characteristics of the time series, optical spectra and frequency spectra for the generated microwave signal and analyze the effect of the bias current of the DFB laser on the right-hand, the bias current of the waveguide and the waveguide bandgap detuning on the characteristics of the microwave signals. The

Received: 2019-03-31; **Accepted:** 2019-05-16

Foundation: National Natural Science Foundation of China (61527819); Top Young and Middle-aged Innovative Talents of Higher Learning Institutions of Shanxi Province (163220114-S); Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Shanxi Province (2016-036, 2017-052)

Corresponding author: Professor ZHANG Mingjiang. E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

Citation: MENG Jie, QIAO Lijun, ZHANG Mingjiang, et al. Simulation of microwave signal generation based on three-section monolithic integrated DFB laser [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(5): 459-465. (in Chinese)

simulation results show that there is no beat component in the frequency spectrum when the bias current of the laser reaches 6 times of the threshold current, the microwave frequency remains unchanged with the increase of the waveguide bias current, and the tuning range of 14.29 GHz can be achieved by adjusting the waveguide detuning. This research provides a new idea and method for the generation of microwave signals by integrated semiconductor devices.

Key words: nonlinear optics; multi-section semiconductor laser; monolithic integration; Maxwell-Bloch's equations; traveling wave rate equations; optical mutual injection; microwave signal

微波因具有似光性、穿透性及非电离性等特点, 主要应用于雷达、卫星传输及移动通信等领域. 在光域中产生的微波信号具有操作带宽大、高频、功耗低及抗电磁干扰等优势^[1-6], 受到广泛研究关注. 产生微波信号的光学方法包括光学外差法^[7]、光注入锁相法^[8]、光学倍频法^[9]、光学非线性法^[10]及外调制法^[11]等. 沈颖等^[12]利用环形腔结构产生多级布里渊散射信号, 并利用马赫-曾德尔调制器产生 4 阶边带信号, 通过将多级布里渊散射信号对 4 阶边带信号进行放大后与载波信号拍频, 得到高频微波信号, 该方法拍频效率高, 但微波信号生成系统较复杂; 熊锦添等^[13]利用分布反馈 (distributed feedback, DFB) 激光器放大探测光 2 级边带, 产生基于二倍频本地振荡信号的微波信号; RASHIDINEJAD 等^[14]基于光电振荡器与相位调制器构成的环形腔结构产生微波信号, 但该方法的可调频带仅为 500 MHz; 张鹏等^[15]提出一种 8 字型结构光纤激光器, 利用布里渊多波长光纤激光器产生高频微波信号, 但该结构中光纤长度较长, 容易增加微波信号线宽; 李玲等^[16]基于双波长激光器件, 利用非线性偏振旋转产生光学微波信号; JAIN 等^[17]利用外调制法改变强度调制器的调制深度产生微波信号, 但该方法插入损耗较大、系统较复杂; 梁卿等^[18]基于垂直腔面发射激光器, 在平行偏振光注入条件下引入光电负反馈, 得到微波信号; 庞海越等^[19]基于光注入半导体激光器, 引入光电环路结构, 优化微波信号的性能, 得到可调谐微波信号; 尚海燕等^[20]则基于光学外差法利用掺铒光纤激光器, 使 3 束波长不同的光信号拍频得到微波信号, 该方法易出现信号功率被抑制的现象. 上述方法皆基于分立式器件搭建而成, 易受环境影响, 性能不稳定, 限制了微波信号的应用范围.

本研究基于光注入方法, 利用麦克斯韦方程, 结合 DFB 激光器载流子变化规律, 建立 3 段式单片集成 DFB 激光器的行波速率方程模型并搭建仿真结构, 成功生成微波信号, 通过研究集成激光器中各

段结构偏置电流及光波导失谐量对微波信号的影响, 对微波信号时序、光谱和频谱等特性进行模拟分析, 结果发现信号频谱随着右侧 DFB 激光器偏置电流的增加进入强注入锁定状态, 最终不再存在拍频分量; 由于右侧 DFB 激光器的注入锁定现象, 波导偏置电流对微波生成影响较小; 对波导失谐量进行调节, 可对微波信号实现 14.29 GHz 的调谐范围.

1 器件仿真结构

单片集成半导体激光器芯片具有尺寸小、成本低及稳定性好等特点, 适用于大批量生产. DFB 激光器内置了布拉格光栅, 其单色性好、线宽窄、边模抑制比高. 因此, 本研究从单片集成层面设计 3 段式 DFB 激光器芯片结构, 仿真分析微波信号的产生及特性.

图 1 为基于单片集成的 3 段式 DFB 激光器芯片结构, 沿光轴方向由左至右依次为半导体激光器 DFB₁、无源光波导 WG (waveguide)、半导体激光器 DFB₂, 3 段结构之间电学隔离理想. 仿真中 DFB 激光器利用布拉格光栅进行模式选择, 由于单片集成结构两端面 (DFB₁ 左端面与 DFB₂ 右端面) 采用理想无损耗端面, 且激光器与波导耦合端面 (DFB₁ 右端面、WG 两端端面与 DFB₂ 左端面) 无损耗传输光, 则 6 个端面的反射率均为 0. 设定单片集成 3 段式 DFB 激光器总长为 1 050 μm, 其中, 两段 DFB 半导体激光器长度与 WG 长度均为 350 μm.

图 1 3 段式单片集成 DFB 激光器器件结构示意图
Fig. 1 Device structure of three-sections monolithic integrated DFB laser

2 仿真原理及模型

单片集成DFB激光器的腔长较短,俄歇效应不可忽略,同时考虑DFB激光器腔内载流子密度等参数的影响,本研究基于行波速率方程对多段式单片集成DFB激光器进行数值模拟,分析其相关动态特性。

行波速率方程的基本数学模型是麦克斯韦-布洛赫方程,从光场、载流子密度和极化函数方面进行数值分析。由于仿真模拟的量变化相对缓慢,因此,忽略快速振动因素所产生的影响,添加外部泵浦激光项和阻尼振荡因素项,从而得到缓变包络近似下的麦克斯韦-布洛赫方程为

$$\frac{\partial E(z,t)}{\partial z} + \frac{\eta}{c} \frac{\partial E(z,t)}{\partial t} = i \frac{k}{2\varepsilon_0 \eta^2} P(z,t) - \frac{\eta}{2T_{ph}c} E(z,t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial P(z,t)}{\partial t} = -i(\omega_A - \omega_0)P(z,t) + \frac{i\mu^2}{2\hbar} E(z,t)W(z,t) - \frac{P(z,t)}{T_2} \quad (2)$$

$$\frac{dW(z,t)}{dt} = \frac{1}{i\hbar} \{E(z,t)P^*(z,t) - E^*(z,t)P(z,t)\} + \frac{W_0 - W(z,t)}{T_1} \quad (3)$$

其中, t 为时间; z 为光在光轴上的空间位置; E 、 P 及 W 分别为相应时间与空间位置处的光场函数、极化函数及粒子数反转函数; η 为激光器的介质折射率; c 为真空中光速; ω_0 为角频率; ω_A 为两能级间跃迁角频率; ε_0 为真空介电常数; μ 为介质磁导率; $\hbar$ 为约化普朗克常量; T_{ph} 为光子寿命; T_1 是粒子数反转(纵向弛豫)时间; T_2 为偏振(横向弛豫)时间; W_0 为泵浦在激光阈值处的粒子数反转值; $k = \frac{\eta\omega_0}{c}$ 为波数。

依据上述麦克斯韦-布洛赫方程,结合DFB激光器中载流子的变化规律,推导出缓变包络近似条件下的行波速率方程组为

$$-i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} E(z,t) \\ P(z,t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_0(\beta^+) + i v_{gr} \frac{\bar{g}}{2} & -i v_{gr} \frac{\bar{g}}{2} \\ -i \bar{\gamma} & \omega_p + i \bar{\gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(z,t) \\ P(z,t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} n(z,t) \big|_{z \in S_r} = I_r(z,t) - U_n - v_{gr} \operatorname{Im} \left(\sum_v E^{v*} (2\beta^v E^v - i \bar{g} (E^v - P^v)) \right)_r \quad (5)$$

其中, n 为载流子浓度; Im 表示对复数虚部取值, $H_0(\beta^+)$ 由传播因子 β 、光栅耦合因子 κ 、群速度 v_{gr} 及 E 之间的函数关系定义得来; 参数 $\bar{g}$ 、 $\bar{\gamma}$ 及 ω_p 分别为 Lorentzian 的高度、半高全宽和峰值频率; I_r 为相应位置处电流; S_r 表示缓变包络近似条件下的空间位置集,本文中, $r = 1, 2, 3$; U_n 为除受激辐射之外的载流子非辐射损耗,

$$U_n = A n + B n^2 + C n^3 \quad (6)$$

其中, A 为非辐射复合系数,表示由非辐射俘获(反射和吸收)所引起的内部光损耗; B 为双原子辐射复合系数; C 为俄歇复合系数。

3 实验结果分析

利用行波速率方程对上述3段式单片集成DFB激光器输出信号的时序、光谱及频谱特性进行数值模拟。模拟中DFB激光器的参数值如表1。

表1 仿真模拟的DFB激光器参数值
Table 1 Simulated parameters of DFB lasers

参 数	数 值
激光器波长 λ/nm	1 550
透明载流子密度 N_0/cm^{-3}	1×10^{18}
$v_{gr}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	8.4×10^7
内部强度损耗系数 α/cm^{-1}	14.4
最大饱和增益 χ/cm^{-1}	72
带内弛豫时间 τ_k/fs	125
双极扩散因子 $a/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	12
A/s^{-1}	1×10^8
$B/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	7×10^{-10}
$C/(\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^{-29}

3.1 DFB₂ 激光器偏置电流对微波信号产生的影响

3段式单片集成器件中DFB₁和DFB₂激光器区布拉格光栅参数相同,当DFB₂和DFB₁之间的失谐量为5 GHz时,DFB₁激光器偏置电流设为 $1.5I_{th}$ (I_{th} 为阈值电流),将DFB₂激光器的偏置电流分别设置为 $2I_{th}$ 、 $4I_{th}$ 及 $6I_{th}$,同时波导区偏置电流值设

为 0, 分析集成激光器的时序、光谱及频谱特性, 结果如图 2.

由图 2 可见, 当 DFB_2 激光器的偏置电流为 $2I_{\text{th}}$ 时, 互耦合激光器出现频率锁定, 光谱中有 2 个主要模式激励, 频率分别为 458 GHz 和 462 GHz, 频谱中能量最高的频率分量为 2 个模式的差频

(4.105 GHz). 时序为周期 0.24 ns 的脉冲输出, 与差频频率对应; 当 DFB_2 激光器偏置电流为 $4I_{\text{th}}$ 时, 由拍频导致的频率分量减少; 当 DFB_2 激光器偏置电流为 $6I_{\text{th}}$ 时, 形成强注入锁定状态, 其频谱中不再存在拍频分量.

图 2 不同 DFB_2 激光器偏置电流下的集成激光器时序、光谱及频谱特性

Fig. 2 Time series, optical spectra and frequency spectra characteristics of the integrated laser under different DFB_2 bias currents

3.2 波导区偏置电流对微波信号产生的影响

将 3 段式单片集成 DFB 激光器中的两段激光器内部布拉格光栅设置为周期相同的光栅, DFB_2 和 DFB_1 激光器之间的带隙失谐量设为 800 GHz, DFB_1 激光器偏置电流设为 $1.5I_{\text{th}}$, DFB_2 激光器偏置电流设为 $5I_{\text{th}}$. WG 段的失谐量为 0, 将 WG 段偏置电流分别设置为 $2I_{\text{th}}$ 、 $3I_{\text{th}}$ 、 $4I_{\text{th}}$ 及 $5I_{\text{th}}$ 时, 集成激光器的时序、光谱及频谱特性如图 3.

由图 3 可见, 当波导区偏置电流为 $2I_{\text{th}}$ 时, 得到频率为 11.76 GHz 的微波信号, 与光谱中主模式之间差频相吻合. DFB_2 和 DFB_1 激光器间的失谐量与所得到的差频不同, 认为是集成激光器腔模式与

光栅共同作用的结果. 逐渐增大波导的偏置电流, 集成激光器输出微波的频率基本保持不变, 表明在波导区无失谐时, 其偏置电流对微波产生的影响很小, 由 DFB_2 激光器的注入锁定所引起.

3.3 WG 带隙失谐量对微波信号产生的影响

将 3 段式单片集成 DFB 激光器中的两段激光器内部布拉格光栅设置为周期相同的光栅, DFB_1 和 DFB_2 激光器的带隙失谐量分别为 0 和 800 GHz, DFB_1 激光器偏置电流设为 $1.5I_{\text{th}}$, DFB_2 激光器偏置电流设为 $5I_{\text{th}}$, WG 段偏置电流设为 $4I_{\text{th}}$. 当 WG 段带隙失谐量分别设为 0、5 及 24 THz 时, 集成激光器的时序、光谱及频谱特性如图 4.

图3 不同 WG 偏置电流下的集成激光器时序、光谱及频谱特性

Fig. 3 Time series, optical spectra and frequency spectra characteristics of the integrated laser under different WG bias current

图4 WG 段不同带隙失谐量下的集成激光器时序、光谱及频谱特性

Fig. 4 Time series, optical spectra and frequency spectra characteristics of the integrated laser under different bandgap detuning values of WG

由图 4 可见,当波导区失谐量为 0 时,类似于之前的分析,研究得到 11.60 GHz 的微波信号;当波导区的失谐量为 5 THz 时,其对集成激光器的光场有较强的调制作用,DFB₁ 激光器的主模式被抑制,相应得到 25.02 GHz 的微波信号;当波导区的失谐量增大到 24 THz 时,波导区对光场基本没有调制作用,频谱中除了 2 个主模式差频 25.89 GHz 的频率分量,还可以看到激光器的弛豫振荡频率为 4.5 GHz. 因此,不同失谐量的波导区对该集成激光器的光场具有不同的调谐,通过调节失谐量,可以实现 14.29 GHz 的调谐范围,这一结果为实验研究提供必要的理论指导.

结 语

设计面向微波信号生成的 3 段式单片集成 DFB 半导体激光器,并对生成的微波信号特性进行研究分析. 基于光注入法,设计由激光器 DFB₁、WG 及 DFB₂ 依次排布的 3 段式单片集成激光器仿真结构,以此结构结合 DFB 激光器中载流子变化规律,在麦克斯韦-布洛赫方程的数学模型基础上,确定集成激光器的行波速率方程组. 利用该方程组仿真 3 段式单片集成 DFB 激光器,对其生成微波信号的时序、光谱及频谱进行数值分析. 结果表明,微波信号的时序周期与频谱差频频率对应,当 DFB₂ 的偏置电流增大到 $6I_{th}$ 时,集成激光器形成强注入锁定状态,频谱中不再存在拍频分量;在激光器形成注入锁定后,微波频率随 WG 偏置电流的增大基本保持不变;通过调节波导失谐量最终可实现对微波信号 14.29 GHz 的调谐范围. 所取得结论为集成器件生成可调谐微波信号提供了理论支持.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61527819); 山西省高等学校中青年拔尖创新人才基金资助项目 (163220114-S); 山西省回国留学人员科研基金资助项目 (2016-036, 2017-052)

作者简介: 孟 洁 (1993—), 太原理工大学硕士研究生. 研究方向: 光通信器件. E-mail: jxtx0616@126.com

引 文: 孟 洁, 乔丽君, 张明江, 等. 3 段式集成 DFB 激光器微波信号仿真[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(5): 459-465.

参考文献 / References:

- [1] LU Dan, PAN Biwei, CHEN Haibo, et al. Frequency-tunable optoelectronic oscillator using a dual-mode amplified feedback laser as an electrically controlled active microwave photonic filter [J]. Optics Letters, 2015, 40(18): 4340-4343.
- [2] LO K H, HWANG S K, DONATI S. Optical feedback stabilization of photonic microwave generation using period-one nonlinear dynamics of semiconductor lasers [J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18648-18661.
- [3] LI Ming, LI Ze, YAO Jianping. Photonic generation of precisely π phase-shifted binary phase-coded microwave signal [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(22): 2001-2004.
- [4] QUIRCE A, VALLE A. High-frequency microwave signal generation using multi-transverse mode VCSELs subject to dual-beam optical injection [J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13390-13401.
- [5] LI Ze, LI Wangzhe, CHI Hao, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signal with large frequency tunability [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 712-714.
- [6] LIU Weisheng, JIANG Meng, CHEN Daru, et al. Dual-wavelength single-longitudinal-mode polarization-maintaining fiber laser and its application in microwave generation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4455-4459.
- [7] 王沁泉, 陈福深. 光学外差法产生微波信号特性的研究[J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 955-957.
WANG Qinquan, CHEN Fushen. Research on characteristics of microwave signals generated by optical heterodyne [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 955-957. (in Chinese)
- [8] FAN Li, WU Zhengmao, DENG Tao, et al. Subharmonic microwave modulation stabilization of tunable photonic microwave generated by period-one nonlinear dynamics of an optically injected semiconductor laser [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4058-4064.
- [9] 陈东军, 袁 鑫, 王如刚. 基于布里渊散射的高频可调谐微波信号产生技术的研究[J]. 盐城工学院学报自然科学版, 2015, 28(3): 52-55.
CHEN Dongjun, YUAN Xin, WANG Rugang. Study on high frequency tunable microwave signal generation based on Brillouin scattering [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology Natural Science Edition, 2015, 28(3): 52-55. (in Chinese)
- [10] LIU Meng, LIU Hao, ZHENG Xuwu, et al. Demonstration of multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a microfiber knot resonator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(14): 1387-1390.
- [11] LIU Weilin, WANG Muguang, YAO Jianping. Tunable microwave and sub-terahertz generation based on frequency

- quadrupling using a single polarization modulator [J]. IEEE Journal Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1636-1644.
- [12] 沈颖,王荣,蒲涛. 基于高阶受激布里渊散射的高频微波信号产生技术[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1571-1575.
- SHEN Ying, WANG Rong, PU Tao. A novel technique to generate high-frequency microwave signal based on high-order stimulated Brillouin scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1571-1575. (in Chinese)
- [13] 熊锦添,王荣,蒲涛,等. 光注入条件下分布反馈半导体激光器的放大特性研究及其在微波信号产生中的应用[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 170-174.
- XIONG Jintian, WANG Rong, PU Tao, et al. Amplification properties of a distribution feedback semiconductor laser under optical injection and its application in generating microwave signals [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 170-174. (in Chinese)
- [14] RASHIDINEJAD A, WEINER A M. Photonic radio-frequency arbitrary waveform generation with maximal time-bandwidth product capability [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3383-3393.
- [15] 张鹏,王天枢,贾青松,等. 基于8字型结构布里渊多波长光纤激光器的可调谐高频微波产生[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 28-32.
- ZHANG Peng, WANG Tianshu, JIA Qingsong, et al. Tunable microwave signal generation based on a multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure of eight configuration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 28-32. (in Chinese)
- [16] 李玲,任伟. 基于双波长激光器的光学微波信号的产生[J]. 光通信技术, 2015, 39(9): 42-43.
- LI Ling, REN Wei. Optical microwave generation based on dual-wavelength fiber laser [J]. Optical Communication Technology, 2015, 29(9): 42-43. (in Chinese)
- [17] JAIN A, BAHL R K, BANIK A. Microwave frequency quadrupling based on optical intensity modulation [C]// International Conference on Microelectronics, Computing and Communications. Durgapur, India: IEEE, 2016: 1-5.
- [18] 梁卿,樊利,杨继云,等. 基于光电负反馈的光注入1550nm垂直腔面发射激光器产生窄线宽微波信号[J]. 光子学报, 2017, 46(3): 69-75.
- LIANG Qing, FAN Li, YANG Jiyun et al. Narrow-linewidth photonic microwave acquisition based on an optically injected 1550nm vertical-cavity surface-emitting laser under optoelectronic negative feedback [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(3): 69-75. (in Chinese)
- [19] 庞海越,林晓东,吴正茂,等. 结合光注入半导体激光器与光电环路产生频率大范围可调、窄线宽微波信号[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 126-132.
- PANG Haiyue, LIN Xiaodong, WU Zhengmao, et al. Widely tunable narrow-linewidth photonic microwave generation using optically injected semiconductor laser combined with optoelectronic loops [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 126-132. (in Chinese)
- [20] 尚海燕,冯德军. 基于线性腔光纤激光器产生可调谐微波信号的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(1): 114-118.
- SHANG Haiyan, FENG Dejun. Generation of tunable optical microwave signal based on linear cavity fiber laser [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018, 40(1): 114-118. (in Chinese)

【中文责编:方圆;英文责编:溯心】