



L波段宽调谐范围的取样光栅分布布拉格反射激光器设计

徐长达, 陈伟, 班德超, 孙文惠

引用本文:

徐长达, 陈伟, 班德超, 等. L波段宽调谐范围的取样光栅分布布拉格反射激光器设计[J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1279–1286.

XU Chang-da, CHEN Wei, BAN De-chao, et al. Design of Sampled Grating Distributed Bragg Reflector Laser with Wide Tuning Range in L-band[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1279–1286.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宽范围可调谐内腔液晶垂直腔面发射激光器设计与研究

Design and Research of Wide Range Tunable Intracavity Liquid Crystal Vertical Cavity Surface Emitting Laser
发光学报. 2018, 39(11): 1621–1626 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183911.1621>

级联光栅结合Sagnac环的可调谐光纤激光器

Tunable Fiber Laser Based on Cascaded Grating Combining with Sagnac Loop
发光学报. 2019, 40(3): 357–365 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194003.0357>

2 μm GaSb基低垂直发散角布拉格反射波导激光器优化设计

Modeling of 2 μm GaSb Based Bragg Reflection Waveguide Lasers with Ultra-low Vertical Divergence
发光学报. 2015(12): 1434–1439 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153612.1434>

体布拉格光栅外腔红光半导体激光器实验研究

Experimental Research on Volume-Bragg-grating External Cavity Red-light Semiconductor Lasers
发光学报. 2019, 40(11): 1401–1408 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194011.1401>

布拉格反射波导激光器的光谱特性

Optical Spectral Characteristics of Bragg Reflection Waveguide Lasers
发光学报. 2013, 34(9): 1227–1232 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133409.1227>

文章编号: 1000-7032(2020)10-1279-08

L波段宽调谐范围的取样光栅分布布拉格反射激光器设计

徐长达^{1,2}, 陈 伟^{1*}, 班德超^{1,2}, 孙文惠¹

(1. 中国科学院半导体研究所 固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: L波段取样光栅分布布拉格反射(SG-DBR)激光器在高速光通信与无源光网络中具有广泛的应用前景。本文以 InGaAsP 作为无源波导区材料,从理论上分析了实现 L波段宽调谐 SG-DBR 激光器所需的关键参数,包括前后取样光栅的反射峰间隔、取样周期、占空比等。同时采用传输矩阵模型,讨论了取样对数与前、后取样光栅反射特性的关系。最后得到了一组优化的 SG-DBR 激光器参数,其对应的调谐范围达到 47.6 nm。

关键词: L波段; 传输矩阵法; SG-DBR 激光器; 宽调谐范围

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200201

Design of Sampled Grating Distributed Bragg Reflector Laser with Wide Tuning Range in L-band

XU Chang-da^{1,2}, CHEN Wei^{1*}, BAN De-chao^{1,2}, SUN Wen-hui¹

(1. Laboratory of Solid State Optoelectronic Information Technology, Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: wchen@semi.ac.cn

Abstract: L-band SG-DBR lasers have wide application prospects in high-speed optical communication and passive optical networks. In this paper, using InGaAsP as the passive waveguide region material, the key parameters which are necessary to realize the wide-tuned SG-DBR laser in L-band are theoretically analyzed, including the reflection peak interval, number of sample period and duty ratio of the sampled grating. At the same time, the relationship between the sampling logarithm and the reflection characteristics of the front sampling grating(FSG) and rear sampling grating(RSG) is discussed by using the transmission matrix model. Finally, a set of optimized SG-DBR laser parameters were obtained, and the corresponding tuning range reached 47.6 nm.

Key words: L-band; transmission matrix method; SG-DBR laser; wide tuning range

1 引 言

为了进一步提高通信容量,波分复用技术不断从 C 波段延伸到 L 波段,随着信道数的增加,

固定波长激光器的备份压力也不断增大,而可调谐激光器通过覆盖相邻的信道波长,可以减少固定波长激光器的备份数量,被认为是波分复用光系统中的理想光源。有多种结构可以被用来实现

收稿日期: 2020-07-11; 修订日期: 2020-08-10

基金项目: 国家重点研发计划; 中国科学院青年创新促进会资助项目

Supported by National Key R&D Program of China; Youth Innovation Promotion Association of The Chinese Academy of Sciences

激光器的可调谐性,包括分布布拉格反馈(DFB)阵列式激光器、DBR 类激光器、干涉仪结构激光器、外腔激光器,其中,SG-DBR 激光器就是 DBR 类激光器的一种。SG-DBR 激光器由四部分组成,分别为前取样光栅区、有源区、相位区、后取样光栅区。由于取样光栅形成梳状的反射峰,因此 SG-DBR 激光器可以利用游标卡尺效应来选择不同的激射模式,从而扩大调谐范围^[1]。鉴于 SG-DBR 激光器不仅具有体积小、调谐速度快、波长调节范围广等优点,还易于与光放大器、调制器和其他半导体器件集成,自从被 Colder 教授提出后^[2],就受到研究人员的广泛青睐。在 C 波段,基于 SG-DBR 激光器,Raring 实现了 25 nm 的调谐范围^[3];董雷实现了 35 nm 的调节范围^[4];Veerasubramanian 在硅基上制作 SG-DBR 激光器并实现了 30 nm 的调谐范围^[5];Oh 将 SG-DBR 激光器与环形结构集成在一起,实现了 35 nm 的调谐范围^[6];集成调制器、SOA、MMI、相干探测器的 SG-DBR 激光器也被提出^[7-10]。在 L 波段,虽然有关于可调谐激光器的研究,但都是一些其他类型的激光器,关于 SG-DBR 激光器的研究相对较少。比如,Tran 基于多微环结构制作了调谐范围覆盖 S + C + L 波段 110 nm 的可调谐激光器^[11];Caro 利用 MMI 结构与激光器耦合的方式实现了 47 nm 的调谐范围^[12]。但相比于 SG-DBR 激光器,上述两种可调谐激光器制作方式较为复杂,工艺精度要求较高。

L 波段激光器多采用 InP 基材料^[11-12],因此本文 SG-DBR 激光器选用 InGaAsP 材料。我们以 SG-DBR 激光器在 L 波段实现 40 nm 的宽调谐范围为例,阐述整个设计流程。本文首先理论分析了 SG-DBR 激光器的激射波长,论证了传输矩阵法在 SG-DBR 激光器设计中的可行性。简要讨论了 SG-DBR 激光器的关键参数对激光器设计的影响,包括取样光栅的取样周期、占空比、均匀光栅周期。同时用传输矩阵模型模拟取样光栅的反射谱,最后得到一组满足需求的 SG-DBR 激光器参数,其对应的调谐范围为 47.6 nm。

2 SG-DBR 激光器激射波长分析模型

SG-DBR 激光器有源区在电注入之后,首先

通过自发辐射产生宽波长范围的光。由于前后光栅对于不同波长的光进行选择反射,所以会导致某个波长附近的光能够在 SG-DBR 激光器中不断进行谐振增强,经过受激辐射放大,最终激射。换言之,SG-DBR 的激射波长是由前后光栅的反射谱来决定的。因此,SG-DBR 激光器想要在 L 波段进行调谐,必须对前后光栅反射谱进行调整,使得前后光栅能够在 L 波段满足反射率要求。

现阶段光栅理论把光栅中任意处的光分为前向波和后向波来处理,通过分析它们的自耦合和相互耦合作用来推断光栅的传输性能。传输矩阵法是一种基于数值计算的光栅简化分析方法,可以用来计算光栅的反射谱。它将激光器分为足够小的小段,每段中的光栅参数都是不变的,由此把任意结构的光栅分解为多段光栅来讨论。对于每一小段的光栅,利用一个 2×2 的矩阵把前后界面的光波联系起来,这个矩阵被称为传输矩阵,又称为 T 矩阵。整个光栅结构前后界面的光波可以用每一小段的 T 矩阵依次相乘得到的一个总的 T 矩阵来联系,整个光栅的反射谱线也可以用这个矩阵来描述,如图 1。

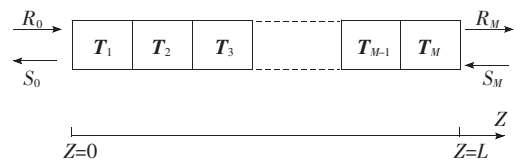


图 1 传输矩阵法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission matrix method

对任意光栅,定义 Z 方向为光波传输的正方向,在第 i 段光栅前后界面, R_{i-1} 与 R_i 即为前向波, S_{i-1} 与 S_i 为后向波。其满足

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix} = T_i \times \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 T_{11} 、 T_{12} 、 T_{21} 、 T_{22} 为 T 矩阵中的矩阵元素,那么

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = T_M \times T_{M-1} \times \cdots \times T_2 \times T_1 \times \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = T_{\text{total}} \times \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

对于取样光栅中的均匀光栅区, T 矩阵中的传输参数分别为

$$T_{11} = \cosh(\gamma \times \Delta z) + \frac{\alpha - i \times \delta}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times \Delta z), \quad (3)$$

$$T_{12} = \frac{-i \times \kappa}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times \Delta z), \quad (4)$$

$$T_{21} = \frac{i \times \kappa}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times \Delta z), \quad (5)$$

$$T_{22} = \cosh(\gamma \times \Delta z) - \frac{\alpha - i \times \delta}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times \Delta z), \quad (6)$$

其中, Δz 为该段光栅的长度, α 为光栅的增益系数, δ 为布拉格波长偏移量, κ 为光栅的耦合系数, γ 是满足色散关系的传输常数。

$$\delta = \beta - \beta_0 = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right), \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_0}, \quad (8)$$

$$\gamma^2 = \kappa^2 + [\alpha - i\delta]^2, \quad (9)$$

$$\lambda_0 = 2n_{\text{eff}} \times \Lambda_0, \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{g_m - \alpha_{\text{loss}}}{2}, \quad (11)$$

其中, β, β_0 为光波的传播常数, Δn 为光栅中有效折射率的变化量, λ_0 为布拉格波长, Λ_0 为均匀光栅周期, g_m 为材料的增益系数, α_{loss} 为材料的固有损耗。

对于光栅中的均匀波导区, 不存在光栅的相互耦合作用, 耦合系数 $\kappa = 0$, 带入公式(3)~(6)中, 得

$$T_{11} = e^{(\alpha - i\delta) \times \Delta z}, \quad (12)$$

$$T_{12} = 0, \quad (13)$$

$$T_{21} = 0, \quad (14)$$

$$T_{22} = e^{(-\alpha + i\delta) \times \Delta z}, \quad (15)$$

对于光栅中的相移区, 当该相移区使光波移相 θ 时, 对应的传输矩阵为^[4,13]:

$$T = \begin{bmatrix} e^{-i\theta} & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

这里要说明的是, 一些文献把有关激光器相移区的传输矩阵写为^[14-15]:

$$T = \begin{bmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

此时, 公式(17)中的相移量 θ 并非光波相位的相移量, 而是其折射率调制函数的相移量。因为 $\lambda_0 = 2n_{\text{eff}} \times \Lambda_0$, 所以折射率调制函数的相移量与光波的相移量有着 2 倍的对应关系, 因此公式

(17)与公式(16)是同一个光栅结构的两种不同表现形式。

综上, 对于任意光栅, 只需要将各段的传输矩阵按照次序依次相乘, 就可以得到光栅两端光波的对对应关系, 如公式(2)。

在图 1 中, 若令 $R_0 = 1, S_M = 0$, 则 S_0/R_0 可表示光波从光栅 1 段到光栅 M 段的整个振幅反射率, 光栅反射率为

$$R_\lambda = |S_0/R_0|^2, \quad (18)$$

其中,

$$S_0/R_0 = T_{21}/T_{22}, \quad (19)$$

R_λ 为光栅对波长为 λ 的光的反射率。公式(18)、(19)将传输矩阵法中的参量与实际的光栅传输特性联系到了一起。结合前面对于 SG-DBR 激光器激射波长的论述, 该模型不仅可以实现对光栅传输特性的描述, 还可以确定 SG-DBR 激光器激射波长, 即只有前后光栅对某一波长的光都具有较高的反射率时, 该波长的光才会激射。

3 SG-DBR 激光器参数设计与优化

3.1 取样光栅的参数化表征

SG-DBR 激光器的前光栅区、相位区、后光栅区为无源波导结构, 如图 2 所示。因此, 制备 SG-DBR 的过程中需要有源无源的集成^[16]。为了减小端面反射, 应尽可能地减小有源区与无源区两者折射率差, 同时为了减小无源波导区的吸收损耗, 无源波导区的带隙波长应小于工作波长。因此, 本文选择带隙波长 $1.42 \mu\text{m}$ 的 InGaAsP 材料作为无源波导区, 以其有效折射率 $n_{\text{eff}} = 3.275$ 、 $\kappa = 200 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha = -1 \text{ cm}^{-1}$ 为例阐述设计方案。

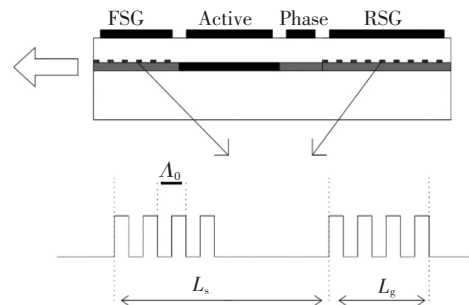


图 2 SG-DBR 激光器与取样光栅示意图

Fig. 2 SG-DBR lasers and schematic diagram of sampling grating

SG-DBR 激光器前后光栅为取样光栅, 它是在均匀光栅的基础上选择性地去除掉一部分光栅

而形成的。取样光栅分为两种,一种是周期性取样光栅,即选择性的去除是周期性的;另一种是非周期性取样光栅,即在周期性取样光栅的基础上引入特定的相移量,类似于相移光栅。在本文的 SG-DBR 激光器设计中,我们选用周期性取样光栅作为 SG-DBR 激光器的前后光栅。

在图 2 所示的周期性取样光栅结构图中, Λ_0 为均匀光栅的周期,又称为子光栅的周期, L_g 为取样周期内有光栅的长度, L_s 为取样周期, N 为取样对数,占空比 $S = L_g/L_s$ 。

周期性取样光栅可以近似看作多级均匀子光栅叠加而成,其中每一级均匀子光栅的周期用 Λ_m 表示, $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 。每一级均匀子光栅的有效折射率随位置的变化用 $\Delta n_m(z)$ 表示,有效折射率的变化量为 $|\Delta n_m(z)|$ 。每一级均匀子光栅对应的反射波长用 λ_m 表示,其中^[14]

$$\Lambda_m = L_s \times \Lambda_0 / (L_s + m\Lambda_0), \quad (20)$$

$$\lambda_m = 2n_{\text{eff}} \times L_s \times \Lambda_0 / (L_s + m\Lambda_0), \quad (21)$$

$$\Delta n_m(z) =$$

$$\begin{cases} \Delta n \times S \times \exp(i2\pi z/\Lambda_0) & m = 0 \\ \Delta n \frac{\sin(Sm\pi)}{m\pi} \exp(i2\pi z/\Lambda_m) & m = \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases}, \quad (22)$$

由公式(21),取样光栅相邻反射峰的间隔 $\Delta\lambda$ 为:

$$\Delta\lambda = \lambda_{m-1} - \lambda_m \cong \lambda_0 \times \Lambda_0/L_s, \quad (23)$$

除此之外,由耦合模理论可得^[2]

$$R(m) = \tanh^2(\kappa_m NL_s), \quad (24)$$

其中, $R(m)$ 为反射峰的大小,由公式(8)得

$$\kappa_m = \frac{\pi}{\lambda} \times |\Delta n_m(z)|, \quad (25)$$

由公式(21)可以看出,随着级次 m 的增大, m 级反射峰 λ_m 离 0 级反射峰 λ_0 越来越远。由公式(23)可以看出,取样光栅相邻反射峰间隔基本不变。由公式(22)、(24)、(25)可知,当占空比 $S \leq 1/m$ 时, $0 \sim m$ 级子光栅的有效折射率变化量逐渐减小、反射峰的反射强度不断降低,形成以 0 级反射峰为中心、反射强度逐渐减弱的典型梳状谱^[17]。

3.2 调谐范围对于 SG-DBR 激光器参数的限定

为了使前后取样光栅在整个调谐范围内都有较高的反射率,不妨取 1 590 nm 作为调谐起点。因此,在 $n_{\text{eff}} = 3.275$ 时,前后取样光栅的 0 级反射峰 $\lambda_0 = 1 590$ nm。由公式(21)得

$$\Lambda_0 = \lambda_0 / (2 \times n_{\text{eff}}) = 242.7 \text{ nm}, \quad (26)$$

取样光栅的典型特征是反射峰波长不仅仅依赖于均匀光栅的周期 Λ_0 。 Λ_0 只能决定零级反射峰的波长,其他级次反射峰是由 Λ_0 与取样周期 L_s 共同决定。所以在同一均匀光栅的基础上,即同一 Λ_0 ,改变取样周期 L_s 的大小,就可以改变多级反射峰的位置^[18]。通过合理地设计 SG-DBR 激光器的前后两个取样光栅的取样周期,就可以在同一均匀光栅的基础上产生反射峰位置不同的梳状反射谱。通过前后光栅两个反射谱的叠加来选择激射波长,当其中一个反射谱有着很小的移动时,两个反射谱的重合位置就会改变,因此可以使用很小折射率的变化来实现大的输出波长的改变,这就是游标卡尺效应^[1,4],如图 3 所示。

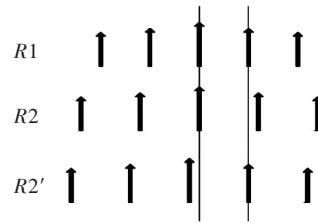


图 3 游标卡尺效应

Fig. 3 Vernier caliper effect

由图 3 可以看出,利用游标卡尺效应实现连续调节的关键是反射峰的移动范围必须大于反射峰之间的间隔,否则在调谐范围内就会出现有一段区域的波长无法激射,造成非连续调谐现象。对于我们采用的 InGaAsP 材料,基于电注入的等离子体效应最多可以实现 6 ~ 12 nm 的调节范围^[4]。考虑到热效应带来的影响,本文以 6 nm 作为反射峰的最大调节范围。定义前后取样光栅的反射峰间隔为 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$,则 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2 \leq 6$ nm。

理论上,SG-DBR 激光器的调谐范围为

$$\lambda_{\text{tune}} = \frac{\Delta\lambda_1 \times \Delta\lambda_2}{|\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2|}, \quad (27)$$

$$\Delta\lambda_1 \neq \Delta\lambda_2,$$

但实际上,想要达到理论的调谐范围会涉及到较高级次的反射峰,而高级次反射峰的反射率比较低,会带来阈值电流和输出功率的变化。因此,从实际应用的角度,在可以达到调谐需求 40 nm 的情况下,涉及到的反射峰越少越好。因为 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2 \leq 6$ nm,所以想要反射峰覆盖范围达到 40 nm,至少涉及 $0 \sim \pm 4$ 级反射峰。而只有 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2 \geq 5$ nm 时, $0 \sim \pm 4$ 级反射峰覆盖范围才能达到 40 nm。因此, $5 \text{ nm} \leq \Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2 \leq 6$

nm。本文以 0.1 nm 为步长,使 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 的取值遍布 5 ~ 6 nm,得到调谐范围与反射峰间隔示意图,如图 4 所示。

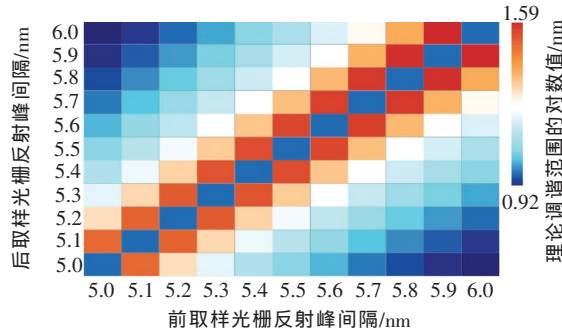


图 4 调谐范围与反射峰间隔示意图

Fig. 4 Schematic diagram of tuning range and reflection peak interval

在图 4 中,其横坐标为前取样光栅反射峰的间隔值,纵坐标为后取样光栅反射峰的间隔,对应的值为公式(27)所得理论调谐范围关于 40 的对数,大于 1 则证明其理论调谐范围满足需求。为方便比较,取 $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2$ 时, $\log_{40} \lambda_{\text{tune}} = 1$ 。考虑到反射峰具有一定的峰宽, $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 的差值不宜过小,本文取 $\Delta\lambda_1 = 5.6$ nm, $\Delta\lambda_2 = 5.2$ nm。前、后取样光栅 -4 级到 +4 级反射峰之间间隔分别为 44.8 nm 和 41.6 nm。在调谐过程中,电流注入带来的等离子体效应能够使反射峰覆盖范围向短波长方向移动 6 nm。因此在仅考虑 0 ~ ±4 反射峰的情况下,其实际调谐范围达到 $\lambda_T = \min(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) \times 8 + 6 = 47.6$ nm,满足文中预想的 40 nm 的调谐需求。由公式(23)、(26)得到前后取样光栅的取样周期 $L_{s1} = 68.91$ μm 、 $L_{s2} = 74.21$ μm 。

由公式(21)可知,当均匀光栅周期 Λ_0 与取样周期 L_s 被确定,SG-DBR 激光器前后光栅反射峰的相对位置与间隔也被随之确定。而反射峰的大小 $R(m)$ 则与取样光栅的占空比 S 强烈相关,由公式(22)、(24)、(25)得图 5,式中取 $NL_s = 500$ μm 。

在图 5 中曲线 1 ~ 5 分别代表了 0、±1、±2、±3、±4 级反射峰的大小随占空比的变化。从图中可以看出随着占空比 S 的不断增大,0 级和 ±1 级反射峰的反射率不断增强,±2、±3、±4 级反射峰的反射率出现了先增大后减小的现象。在占空比 S 为 12% 附近,四级反射峰出现了极大值。综合考虑,占空比取值为 12% ~ 14% 是比较容易

接受的。考虑到前取样光栅对应着出光面,总的反射率要小一些,因此取前、后取样光栅占空比 S_1 和 S_2 为 12% 和 14%,取样周期内有光栅的长度 L_{g1} 和 L_{g2} 为 8.27 μm 和 10.39 μm 。

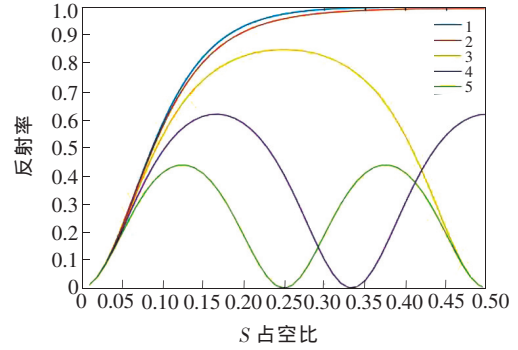


图 5 占空比对于各级反射峰的影响

Fig. 5 Influence of duty ratio on reflection peaks at all levels

综上所述,以本文选取的 InGaAsP 为无源区材料,对于调谐范围为 L 波段 40 nm 的 SG-DBR 激光器,我们已经确定的参数为 $n_{\text{eff}} = 3.275$ 、 $\kappa = 200$ cm^{-1} 、 $\alpha = -1$ cm^{-1} 、 $L_{s1} = 68.91$ μm 、 $L_{s2} = 74.21$ μm 、 $S_1 = 12\%$ 、 $S_2 = 14\%$ 、 $L_{g1} = 8.27$ μm 、 $L_{g2} = 10.39$ μm 、 $\Lambda_0 = 242.7$ nm。其取样周期 L_s 及取样周期内有光栅的长度 L_g 均在微米量级,制备比较容易。

3.3 基于传输矩阵模型的参数优化

根据传输矩阵法,把取样光栅分解为多个均匀光栅和波导光栅。定义 T_{g1} 、 T_{b1} 、 T_{g2} 、 T_{b2} 分别为前后取样光栅的光栅区传输矩阵与波导区传输矩阵, N_1 、 N_2 为前、后取样光栅的取样对数,由公式(3) ~ (6), T_{g1} 中的参数分别为,

$$T_{11} = \cosh(\gamma \times L_{g1}) + \frac{\alpha - i \times \delta}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times L_{g1}), \quad (28)$$

$$T_{12} = \frac{-i \times \kappa}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times L_{g1}), \quad (29)$$

$$T_{21} = \frac{i \times \kappa}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times L_{g1}), \quad (30)$$

$$T_{22} = \cosh(\gamma \times L_{g1}) - \frac{\alpha - i \times \delta}{\gamma} \times \sinh(\gamma \times L_{g1}), \quad (31)$$

由公式(12) ~ (15), T_{b1} 中的参数为:

$$T_{11} = e^{(\alpha - i\delta) \times (L_{s1} - L_{g1})}, \quad (32)$$

$$T_{12} = 0, \quad (33)$$

$$T_{21} = 0, \quad (34)$$

$$\mathbf{T}_{22} = e^{(-\alpha+i\delta) \times (L_{s1}-L_{g1})}, \quad (35)$$

按照光波传输方向,对传输矩阵依次相乘,得

$$\mathbf{T}_{\text{total1}} = (\mathbf{T}_{g1} \times \mathbf{T}_{b1})^{N_1}, \quad (36)$$

同理,将公式(28)~(31)中的 L_{g1} 替换成 L_{g2} ,即可得到传输矩阵 \mathbf{T}_{g2} 中的参数;将公式(32)~(35)中的 L_{s1} 、 L_{g1} 替换为 L_{s2} 、 L_{g2} 即可得到传输矩阵 \mathbf{T}_{b2} 中的参数:

$$\mathbf{T}_{\text{total2}} = (\mathbf{T}_{g2} \times \mathbf{T}_{b2})^{N_2}, \quad (37)$$

以 0.01 nm 为步长,使 λ 遍历 1 565 ~ 1 615 nm,重复利用公式(28)~(37)可以得到不同波长不同取样对数下的 $\mathbf{T}_{\text{total1}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{total2}}$ 。再利用公式(18)、(19)计算不同取样对数下的前后取样光栅在 1 565 ~ 1 615 nm 的反射率。并由此得出各级反射峰的峰高 R_m ,零级反射峰的半峰宽 λ_e ,即零级反射峰的反射率达到其峰值一半时的波长间隔,如表 1 与表 2 所示。

表 1 不同对数的前取样光栅反射特性(FSG)

Tab. 1 Reflection characteristics of front sampled grating with different logarithms

N_1	λ_e/nm	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4
5	1.11	0.434 7	0.421 3	0.380 3	0.318 3	0.230 9
6	0.98	0.539 7	0.525 2	0.480 5	0.410 1	0.312 8
7	0.90	0.628 2	0.612 4	0.568 5	0.496 3	0.388 4
8	0.84	0.699 9	0.687 2	0.646 6	0.572 4	0.460 2
9	0.80	0.754 7	0.744 6	0.707 2	0.638 0	0.526 1
10	0.77	0.798 5	0.789 2	0.751 1	0.693 4	0.583 1
11	0.74	0.830 8	0.823 1	0.793 5	0.738 5	0.636 8
12	0.72	0.855 2	0.848 3	0.824 8	0.775 1	0.681 3
13	0.70	0.871 9	0.867 2	0.847 1	0.803 8	0.719 1

表 2 不同对数的后取样光栅反射特性(RSG)

Tab. 2 Reflection characteristics of rear sampled grating with different logarithms

N_2	λ_e/nm	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4
5	1.12	0.571 2	0.552 2	0.490 0	0.384 8	0.258 4
6	1.02	0.674 6	0.656 7	0.594 9	0.492 2	0.341 8
7	0.95	0.753 4	0.737 4	0.685 2	0.582 8	0.421 8
8	0.90	0.809 5	0.792 9	0.751 4	0.657 6	0.491 9
9	0.86	0.848 5	0.838 2	0.799 6	0.718 3	0.562 1
10	0.83	0.875 7	0.867 2	0.837 1	0.765 2	0.620 3
11	0.81	0.893 2	0.887 4	0.863 4	0.803 6	0.670 4
12	0.79	0.906 1	0.901 2	0.882 0	0.832 0	0.712 6
13	0.76	0.914 0	0.910 4	0.895 1	0.853 8	0.747 8
14	0.75	0.919 5	0.916 3	0.904 2	0.870 0	0.776 9

由表 1、表 2 可以看出,随着取样对数的增大,前后光栅的各级反射峰的反射率都是增大的,零级反射峰的半峰宽都是减小的。并且在同一取样对数下,后取样光栅的各级反射峰的反射率均要大于前取样光栅的各级反射峰的反射率,满足前取样光栅侧为出光侧的要求。另外还可以看出,随着取样对数的不断增大,各级反射峰的反射率虽然是不断增大的,但是增大幅度越来越小;而零级反射峰的半峰宽则是不断减小的,同样变化幅度越来越小。因此为了实现 SG-DBR 激光器小阈值电流和大输出功率的目的,前取样光栅的周期数可以取 10,后取样光栅的周期数可以取 12,得到如图 6 所示的前后取样光栅反射谱。

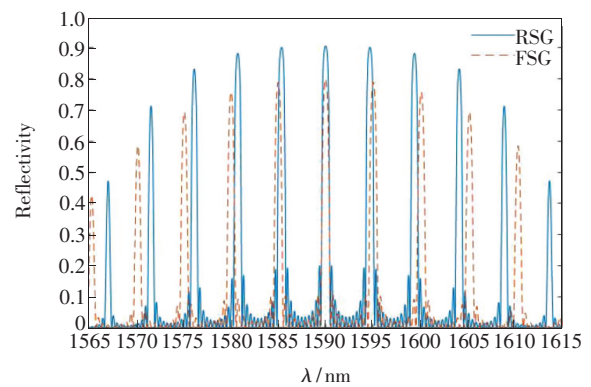


图 6 前后取样光栅的反射谱

Fig. 6 Reflection spectra of the front and rear sampled grating

由图 6 可以看出,SG-DBR 激光器光栅区在不进行电注入调制时,前后取样光栅的反射峰在 1 590 nm 处重叠,对波长 1 590 nm 及其附近的光波具有较强的反射能力,经过谐振腔谐振输出激光。当激光波长需要改变时,对光栅区进行电注入,以此改变有效折射率,使得前后光栅的反射谱相互独立地进行蓝移,进而使得前后光栅的反射峰能够重叠在所需波长处,实现波长调谐。

综合上面的讨论,我们以在 L 波段实现 40 nm 的调谐范围为例,完整地阐述了整个设计过程。最终得到了一组 SG-DBR 激光器的优化参数,见表 3,其对应的实际调谐范围达到 47.6 nm;并得到采用优化参数后的前后取样光栅的梳状反射谱,见图 6。

表 3 SG-DBR 激光器优化参数
Tab. 3 SG-DBR laser optimization parameters

	取样对数	取样周期/ μm	占空比	有效折射率	耦合系数/ cm^{-1}	增益系数/ cm^{-1}
FSG	10	68.91	0.12	3.275	200	-1
RSG	12	74.21	0.14			

4 总 结

本文针对现阶段关于 L 波段 SG-DBR 激光器研究较少的现状, 以在 L 波段实现 40 nm 的调谐范围为例, 从理论上分析了设计 SG-DBR 激光器所需的关键参数。文中采用 InP 基的 InGaAsP 作为无源区材料, 根据 40 nm 的调谐需求确定了前、后取样光栅的取样周期及均匀光栅周期, 其中

$A_0 = 242.7 \text{ nm}$ 、 $L_{s1} = 68.91 \mu\text{m}$ 、 $L_{s2} = 74.21 \mu\text{m}$ 。客观地讨论了占空比 S 对于多级反射峰的影响机制, 并选择 $S_1 = 12\%$ 、 $S_2 = 14\%$ 作为前、后取样光栅的占空比。同时基于传输矩阵模型, 对取样光栅进行了全面的仿真, 分析了取样对数与前、后取样光栅的关系。最终, 得到了一组优化 SG-DBR 激光器参数, 其对应的调谐范围达到 47.6 nm。

参 考 文 献:

- [1] JAYARAMAN V, MATHUR A, COLDREN L A, *et al.*. Extended tuning range in sampled grating DBR lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, 5(5):489-491.
- [2] JAYARAMAN V, CHUANG Z M, COLDREN L A. Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, 29(6):1824-1834.
- [3] RARING J W, SKOGEN E J, JOHANSSON L A, *et al.*. Widely tunable negative-chirp SG-DBR laser/EA-modulated transmitter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, 23(1):80-86.
- [4] 董雷. 宽可调谐 SGDBR 半导体激光器理论和实验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
DONG L. *Theoretical and Analysis and Experimental Research on Widely Tunable SGDBR Laser Diode* [D]. Jinan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
- [5] VEERASUBRAMANIAN V, BEAUDIN G, GIGUÈRE A, *et al.*. A vertical SG-DBR based tunable hybrid silicon evanescent laser [C]. *Proceedings of 2011 Laser Science to Photonic Applications, Baltimore, MD, USA*, 2011:1-2.
- [6] OH S H, YOON K, KWON O K, *et al.*. Monolithically Integrated SG-DBR tunable lasers for optical communications [C]. *Proceedings of 2018 Opto-Electronics and Communications Conference, Jeju Island*, 2018:1-2.
- [7] RARING J W, SKOGEN E J, DENBAARS S P, *et al.*. Demonstration of negative chirp characteristics over wide wavelength range using monolithically integrated SG-DBR laser/electroabsorption modulator [J]. *Electron. Lett.*, 2004, 40(25):1599-1600.
- [8] OH S H, LEE J M, KIM K S, *et al.*. Fabrication of tunable sampled grating DBR laser integrated monolithically with optical semiconductor amplifier using planar buried heterostructure [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, 43(10B):L1343-L1345.
- [9] LU M Z, PARK H C, SIVANANTHAN A, *et al.*. Monolithic integration of a high-speed widely tunable optical coherent receiver [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2013, 25(11):1077-1080.
- [10] NGUYEN K N, GARCIA J M, LIVELY E, *et al.*. Monolithically integrated dual-quadrature coherent receiver on InP with 30 nm tunable SG-DBR local oscillator [C]. *Proceedings of 2011 European Conference and Exhibition on Optical Communication, Geneva, Switzerland*, 2011:1-3.
- [11] TRAN M A, HUANG D N, GUO J, *et al.*. Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2020, 26(2):1500514-1-16.
- [12] CARO L, DERNAIKA M, KELLY N P, *et al.*. An integration-friendly regrowth-free tunable laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2018, 30(3):270-272.
- [13] 鲁韶华, 许鸥, 冯素春, 等. 基于啁啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用 [J]. *光学学报*, 2008, 29(9):1675-1680.

- LU S H, XU O, FENG S C, *et al.*. Design and application of optical filters based on chirped phase-shifted fiber gratings [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2008, 29(9):1675-1680. (in Chinese)
- [14] 李思敏. 基于重构等效啁啾技术的 DFB 半导体激光器与光子集成器件研究 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
LI S M. *Study on DFB Semiconductor Laser Based on Reconstruction-equivalent-chirp Technique and Photonic Integrated Device* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. (in Chinese)
- [15] 蔡晓锋, 赵岩. DFB 光纤激光器中相移光栅优化分析 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(1):53-56.
CAI X F, ZHAO Y. Optimization analysis on the phase shift grating of DFB fiber laser [J]. *J. CAEIT*, 2010, 5(1):53-56. (in Chinese)
- [16] DENG Q F, ZHU H L, XIE X, *et al.*. Low chirp EMLs fabricated by combining SAG and double stack active layer techniques [J]. *IEEE Photonics J.*, 2018, 10(2):7902007-1-7.
- [17] TAWFIQ M, WENZEL H, BROX O, *et al.*. Widely tunable high power sampled-grating MOPA system emitting around 970 nm [C]. *Proceedings of 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Hong Kong, China*, 2018:1-2.
- [18] 陈向飞, 肖如磊, 陆骏. 基于 REC 技术的可调谐半导体激光器 [J/OL]. 中兴通讯技术, 2020-04-16. <https://www.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.tn.20200415.1902.002.html>.
CHEN X F, XIAO R L, LU J. Tunable semiconductor laser based on REC technology [J/OL]. *ZTE Technol. J.*, 2020-04-16. <https://www.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.tn.20200415.1902.002.html>. (in Chinese)



徐长达(1997 -), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 2018 年于华北电力大学获得学士学位, 主要从事半导体激光器和光通信系统方面的研究。
E-mail: xuchangda18@semi.ac.cn



陈伟(1982 -), 男, 湖南益阳人, 博士, 副研究员, 2009 年于中国科学院半导体研究所获得博士学位, 主要从事光电子器件及模块的研究。
E-mail: wchen@semi.ac.cn