

低纹波超辐射发光二极管的增透膜研制

游道明^{1,2}, 谭满清^{1,2*}, 郭小峰¹, 郭文涛¹, 曹营春¹, 陈文彬^{1,3}¹中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 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;³中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要 纹波系数是超辐射发光二极管(SLD)的关键指标,增透薄膜被用于降低纹波系数。基于平面波方法的增透膜设计得到广泛应用,然而倾斜腔面SLD中增透膜的性能普遍不佳,使用时域有限差分方法进行分析,发现存在反射曲线偏离和反射率高等问题。优化了增透膜设计,优化后 $1^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 腔面倾角内的反射率降低,降幅最高达82%,其中双层增透膜反射率低于0.05%。采用反应磁控溅射工艺镀膜,并验证了优化设计效果。经过增透膜优化,光谱纹波得到有效抑制,SLD管芯纹波系数和调制系数分别仅为0.019 dB和 2.30×10^{-3} ,降幅超过50%,在100 mA的驱动电流下仍保持10 mW的光功率。所研制的增透膜能够有效减小腔面反射率,利用该增透膜制备了低纹波SLD。研究结果为SLD及其他半导体光电子器件的光学薄膜研制提供了参考。

关键词 薄膜; 超辐射发光二极管; 增透膜; 倾斜腔面; 优化设计; 纹波系数

中图分类号 TN364.2 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220983

1 引言

超辐射二极管(SLD)具有高功率、窄发散角、宽光谱等优势,是光纤陀螺的理想光源,被广泛应用于航空航天器的导航与控制领域^[1-2]。SLD的输出特性介于激光器和发光二极管之间,为了获得超荧光,需抑制光振荡和选模作用。而腔面反射将破坏自发辐射光的单程增益,引起腔内的谐振效应并影响相干性^[3],因此SLD对腔面反射尤为敏感。特别是大量剩余反射引起的纹波,严重影响光纤陀螺的精度^[4],因此SLD需尽可能降低腔面反射。

增透型(AR)光学薄膜被广泛用于抑制大尺寸平面的反射,其设计主要基于平面波方法(PWM)的非涅耳公式和传输矩阵,也被用在SLD腔面^[5-7]。然而在实践中发现,这种增透膜往往难以满足SLD的应用需求,这是由于SLD腔面尺寸微小,并且腔面尤其是有源区附近的材料和结构复杂,因此实际的反射特征与设计值不符。特别是目前广泛采用的倾斜腔面SLD,其增透膜的反射率与设计值之间存在显著偏差^[8-11],适用于SLD的光学薄膜亟待研究。

为研究微小尺寸及复杂结构上薄膜的反射特征,相继出现了平面波展开法、自由空间辐射模和时域有限差分(FDTD)等方法^[12-13],其中FDTD通过计算腔面与薄膜界面的电磁场分布,能够准确获得腔面薄膜

的反射特征。粒子群和遗传算法等优化方法也被应用在光学薄膜的设计和优化中^[14-16]。此外,薄膜工艺也是反射率的重要影响因素^[17],为达到设计目标,制作致密、低缺陷和高可靠的薄膜,薄膜工艺至关重要。

本文设计并制备了适用于低纹波SLD的增透膜。首先使用FDTD法分析倾斜腔面上PWM薄膜设计。为解决其中存在的反射率偏高和反射曲线偏移等问题,通过粒子群算法优化增透膜的设计,并使用反应磁控溅射工艺制作增透膜。最后通过反射率和光谱验证优化设计镀膜的效果,优化后增透膜反射率大幅降低,有效抑制了SLD的纹波。研究结果为SLD及其他半导体光电子器件的光学薄膜研制提供了参考。

2 理论基础

2.1 SLD腔面反射率的影响因素及设计要求

超辐射即放大的自发辐射(ASE),是增益介质在强激发下的定向辐射现象,该过程仅对自发辐射单程放大,需要降低腔面反射。此外,因光纤陀螺要求宽谱光源,SLD还应具有大透射带宽^[18]。假设前、后腔面的反射率分别为 R_1 和 R_2 ,光束在腔内往返一次后的光功率为

$$P = P_0 R_1 R_2 \cdot \exp(2GL), \quad (1)$$

式中: G 是单程增益系数; L 是腔长; P_0 是初始光功率。SLD需抑制光振荡,即 P 超过 P_0 ,因此 R_1 和 R_2 应满足

$$R_1 R_2 \cdot \exp(2GL) < 1. \quad (2)$$

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2022-07-30; 录用日期: 2022-08-26; 网络首发日期: 2022-09-05

基金项目: 国家电网公司科技项目(5700-202058482A-0-0-00)

通信作者: *mqtan@semi.ac.cn

为保持高效率, G 值不能过小, 因此仅考虑抑制光振荡, $R_1 \times R_2$ 应低于 10^{-4} , G 满足

$$G = \exp\left(\frac{\Gamma k I}{d_w} - \Gamma \alpha L\right), \quad (3)$$

式中: Γ 是光限制因子; k 是泵浦系数; d_w 是有源层厚度; α 是损耗; I 是电流。SLD 的另一个关键指标是纹波系数, 通常以调制系数 m 表征, 是光谱中相邻波峰和波谷强度即 I_{\max} 和 I_{\min} 的相对值。假设前、后腔面反射率相同, 均为 R , 其定义和关系式^[19]分别表示为

$$m = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4)$$

$$m = \frac{2RG}{1 + R^2 G^2}. \quad (5)$$

理想的 ASE 为非相干光, 其光谱纹波系数应低于 0.3 dB。压缩纹波应降低 m , 根据式(4), $R_1 \times R_2$ 需低于 10^{-7} ^[20]。

2.2 基于平面波方法的增透膜设计

平面波方法被广泛用于光学薄膜设计, 通过菲涅耳公式计算平面波在单一界面上的反射和折射, 假设线偏振光以角度 θ_0 入射在界面上, 将平面波划分为横电 (TE) 波 (s-偏振波) 和横磁 (TM) 波 (p-偏振波), 则菲涅耳反射系数^[6]为

$$r_p = \frac{N_0 \cos(\theta_1) - N_1 \cos(\theta_0)}{N_0 \cos(\theta_1) + N_1 \cos(\theta_0)}, \quad (6)$$

$$r_s = \frac{N_0 \cos(\theta_0) - N_1 \cos(\theta_1)}{N_0 \cos(\theta_0) + N_1 \cos(\theta_1)}, \quad (7)$$

式中: N_0 和 N_1 为光学导纳; θ_1 为对应的反射角。根据反射系数计算反射率:

$$R = \begin{cases} \left[\frac{N_0 \cos(\theta_1) - N_1 \cos(\theta_0)}{N_0 \cos(\theta_1) + N_1 \cos(\theta_0)} \right]^2, & \text{p-polarization} \\ \left[\frac{N_0 \cos(\theta_0) - N_1 \cos(\theta_1)}{N_0 \cos(\theta_0) + N_1 \cos(\theta_1)} \right]^2, & \text{s-polarization} \end{cases}. \quad (8)$$

利用菲涅耳公式计算各个界面的反射率, 并通过传输矩阵法进行叠加, 得到光在 K 层薄膜中的传输情况, 其中特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \sigma_j & i \sin \sigma_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \sigma_j & \cos \sigma_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: σ_j 和 η_j 分别为第 j 层的光学厚度和导纳; η_s 为衬底导纳。多层膜的反射率为

$$R = \left[(\eta_0 B - C) / (\eta_0 B + C) \right] \left[(\eta_0 B - C) / (\eta_0 B + C) \right]^*, \quad (10)$$

式中: η_0 为薄膜导纳; * 为矩阵的转置。式(5)~(9)表明平面波方法适用大尺寸、单介质平面的薄膜设计, 而 SLD 腔面尺寸仅为 μm 量级, 且结构和折射率分布复杂, 采用平面波方法近似处理 SLD 腔面, 显然难以达到预期设计目标, 因此需要引入精确的腔面薄膜计算和设计方法。

2.3 时域有限差分方法

FDTD 法适用于复杂电磁场的求解, 能够精确求解腔面薄膜的反射特征, 主要的仿真步骤如图 1 所示, 其中 N 为矩阵的网格点总数。FDTD 法通过时域求解麦克斯韦方程, 其原理是将变量空间的连续变量离散化, 仅计算网格节点上的物理量, 可以通过离散结构, 将带有时间变量的麦克斯韦方程拆分变换为一组等式进行差分计算, 并通过选取时间参数在横向时间轴上展开方程并求解。根据初始条件, 逐步计算出电磁场在仿真区域内不同时间空间中的电磁场分布。其关键包括求解腔面附近及薄膜中的电磁场分布, 以及通过该电磁场分布求解反射率, 其中薄膜的折射率和膜厚等物理参数影响电磁场分布, 特别是界面上的入射光和反射光分布。

FDTD 法将时域麦克斯韦方程转变为标量方程, 再求解空间域和时域的电磁场 $f(x, y, z, t)$ 的一阶偏微分方程, 得到中心差分方程的近似解, 并以此得到平均差值近似值^[21]:

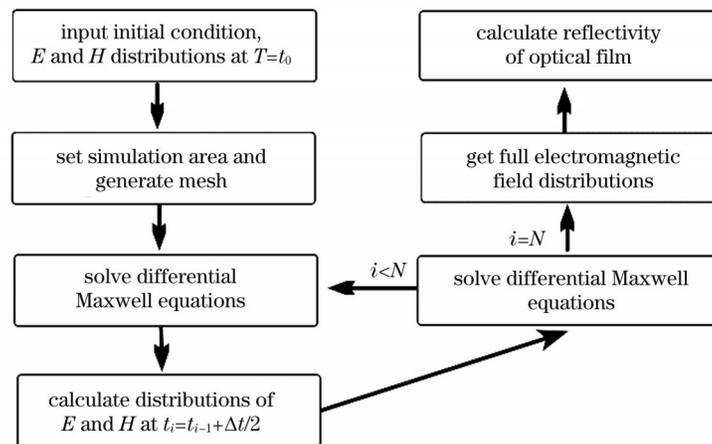


图 1 FDTD 仿真的主要步骤

Fig. 1 Main steps of FDTD simulation

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=i\Delta x} \approx \frac{1}{\Delta x} \left[f^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) - f^n \left(i - \frac{1}{2}, j, k \right) \right] \\ \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{y=i\Delta y} \approx \frac{1}{\Delta y} \left[f^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) - f^n \left(i, j - \frac{1}{2}, k \right) \right] \\ \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{z=i\Delta z} \approx \frac{1}{\Delta z} \left[f^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) - f^n \left(i, j, k - \frac{1}{2} \right) \right] \\ \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{t=n\Delta t} \approx \frac{1}{\Delta t} \left[f^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j, k \right) - f^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j, k \right) \right] \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} E_{x,i,j,k}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (E_{x,i,j,k}^{n+1} + E_{x,i,j,k}^n) \\ E_{y,i,j,k}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (E_{y,i,j,k}^{n+1} + E_{y,i,j,k}^n) \\ E_{z,i,j,k}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (E_{z,i,j,k}^{n+1} + E_{z,i,j,k}^n) \end{cases}, \quad (12)$$

式中： Δx 、 Δy 、 Δz 分别为 x 、 y 、 z 方向上的空间网格步长； Δt 为时间步长； n 为电磁场网格点编号； i 、 j 、 k 分别表示 x 、 y 、 z 方向上的网格编号； x 、 y 、 z 分别为空间点坐标； t 为时间。

最后对麦克斯韦方程中网格点 $m'(i, j, k)$ 上各方向的电磁场作差分离散处理,并用上述平均值公式进行化简,求解 E_x 、 H_y 、 H_z 的数值关系。采用相同方法处理,得到 y 和 z 方向的 E 和 H 的关系。通过上述计算,即可获得网格点上各方向的电磁场。在空间和时间域切片取样,以半个网格尺寸为步长,重复上述步骤依次计算各个网格点的电磁场,得到完整电磁场分布,特别是薄膜界面处的入射光和反射光的电磁场分布 (E_i 、 H_i 、 E_r 、 H_r),以此求解腔面上薄膜的反射率。对各方向的入射和反射光进行积分,得到总电磁场分布。通过腔面上入射和反射场的横向重叠积分即可求解腔面反

射率^[22]。

3 增透膜的模拟仿真

本文使用 FDTD 法仿真并研究腔面薄膜,所用的仿真模型如图 2 所示,其中 $ox'y'z'$ 为垂直腔面的坐标系, a 为腔面倾斜角。图 2(a) 为 SLD 腔面物理模型,插图 为腔内 xy 平面的光场分布,光束经倾斜腔面反射后偏离芯层。本文研究单模的情况,选取两种不同尺寸的腔面 (type-1 和 type-2),其芯层宽度 L_{core} 均为 $2 \mu\text{m}$,芯层厚度 H_{core} 分别为 $0.1 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$,腔面沿 y 轴方向倾斜,倾角范围为 $1^\circ \sim 10^\circ$ 。重点研究单层和双层增透膜,根据 PWM 设计的单层薄膜满足 $n' = \sqrt{n_{eff}}$, $l = \lambda / (4 \times n')$,其中 n_{eff} 为有效折射率, λ 为波长, n' 为折射率, l 为 $1/4$ 波长层厚度。双层膜采用相同方法设计,仿真模型结构及薄膜参数如表 1 所示。

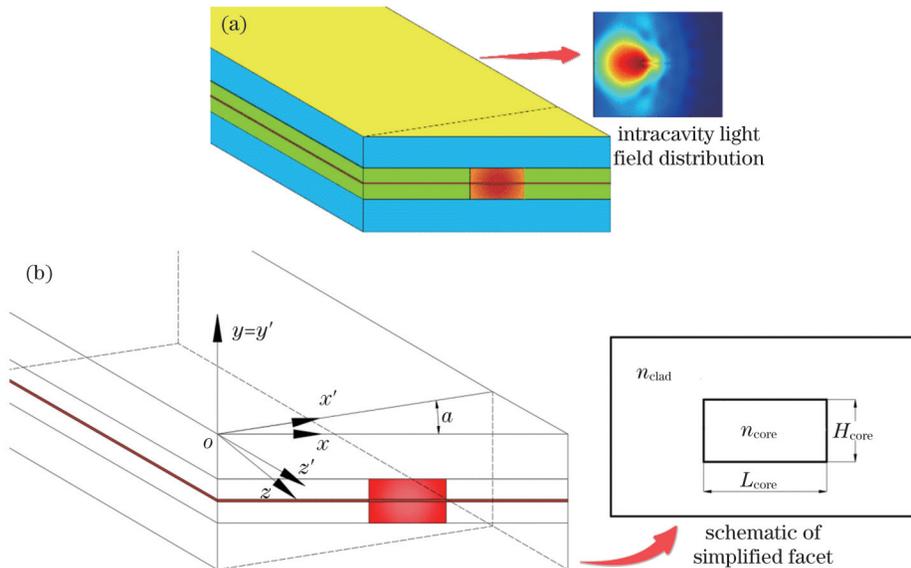


图 2 倾斜腔面 SLD 的仿真模型。(a)物理模型示意图;(b)三维结构图和简化的腔面示意图

Fig. 2 Simulation model of SLD with tilt facet. (a) Schematic of physical model; (b) 3D structure and simplified facet

表 1 仿真模型及薄膜的参数

Table 1 Structural parameters of simulation model and film

Parameter	Value
Core-layer thickness	0.1 μm for type-1 0.5 μm for type-2
Core layer refractive index (n_{core})	3.4902–3.6000
Cladding refractive index (n_{clad})	3.4902
Refractive index difference (Δn)	3%
Excitation wavelength	1310 nm
Tilt angle	1°–10°
Refractive index of single-layer film (n')	1.879
Thickness of single-layer film (l)	174.3 nm
Refractive index of double-layer film (n_1)	2.72
Thickness of first film (l_1)	120.4 nm
Refractive index of double-layer film (n_2)	1.45
Thickness of second film (l_2)	225.9 nm

由于 FDTD 仿真占用大量的计算资源,特别是微观、复杂结构的模拟,因此本文网格划分选用非均

匀网格,在尺寸小且复杂的芯层/有源区及附近添加加密网格,使用小网格确保精度,在简单结构的区域适当增加网格尺寸,提高仿真效率,整体网格精度选用 3。为确保数值稳定条件,采用小时间间隔,稳定因子为 0.99,并利用完美匹配层 (PML) 边界,避免边界反射对仿真结果的影响,相应的仿真参数如表 2 所示。

表 2 FDTD 仿真参数

Table 2 FDTD simulation parameters

Parameter	Content
Mesh type	Non-uniform
Mesh accuracy	3
Minimum mesh step / μm	0.00025
Boundary condition	PML in x , y , and z directions
Number of PMLs	8

首先分析单层膜反射率与倾斜角度的关系,PWM 设计的单层增透膜的反射曲线如图 3 所示。在图 3(a)所示的 type-1 腔面中,薄膜反射率均随倾角的增加而提高,这显然与通常认为的大倾角下反射率更低相悖。

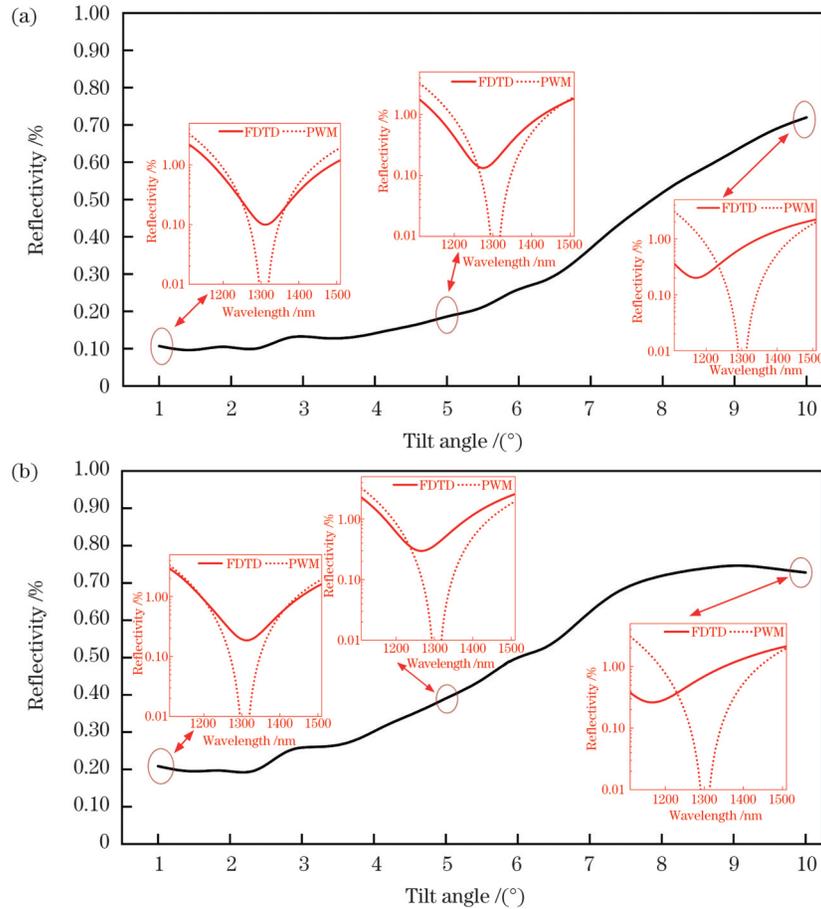


图 3 PWM 设计的单层增透膜的反射率值,插图为 1°、5° 和 10° 倾角下 FDTD 法计算值与 PWM 设计值的对比。(a) 腔面 type-1 的反射率曲线;(b) 腔面 type-2 的反射率曲线

Fig. 3 PWM designed single-layer AR film reflectivity values with comparison between calculated values by FDTD method and designed values by PWM at tilt angles of 1°, 5°, and 10° shown in inset. (a) Reflectance curve of cavity surface type-1; (b) reflectance curve of cavity surface type-2

而插图中 FDTD 法的计算结果与 PWM 设计值的比较解释了该问题, 可以看到与设计值相比, 反射曲线整体向短波方向偏移, 最小反射率对应的波长偏离 1310 nm, 并且这种偏移随倾角的增加而扩大, 大倾角情况下 (如腔面倾斜角 $a = 10^\circ$) 尤为显著, 造成 1310 nm 处的反射率不断提高。不仅如此, 薄膜反射率显著高于设计值, 对于图 3(b) 所示的 type-2 腔面也能得出类似结论。这是由于微小且复杂的腔面结构以及入射光在腔面与薄膜界面产生了各个方向的反射光, 因此实际的反射率偏离 PWM 设计值。PWM 设计的单层增透膜中存在反射曲线偏移和反射率高等问题, 显然无法满足 SLD 的要求。

接下来分析双层增透膜的情况, 模式反射率也被纳入计算, 由于各倾角下反射率的变化趋势相近, 因此仅研究 5° 倾角下腔面的情况。图 4 为 PWM 设计的双层增透膜的反射曲线, 与单层增透膜相比, 双层增透膜存在更强烈的反射曲线偏移现象。其中, TM 模式偏离 150 nm 左右, 中心波长偏移高达 11%; 1310 nm 处的反射率超过 0.1%, 同样高于设计值。此外, TE 和 TM 模式的反射曲线几乎贴合, 模式反射率差异较小, 最大差值仅为 0.01%, 且图 4 中腔面 type-1 和 type-2 的反射特征相近, 由此推断外延方向上腔面尺寸对薄膜反射率的影响较小, 因此接下来的仿真中不考虑腔面尺寸和模式的差异。PWM 设计的双层增透膜也存在反射率高和反射曲线偏移等问题, 不适用于倾斜腔面 SLD。

为优化增透膜设计, 图 5 分析了折射率和膜厚与反射率的关系, 需要指出的是, 其中膜厚采用归一化光学厚度表征。单层膜的折射率和膜厚的关系如图 5(a) 所示, 可以看到, 反射率与折射率、膜厚等参数密切相关, 其中弧线所包围区域内的反射率较低, 分别低于 0.2% 和 0.1%, 并且越接近区域中心, 薄膜反射率越低。显然, PWM 设计的薄膜参数偏离这些低反射区

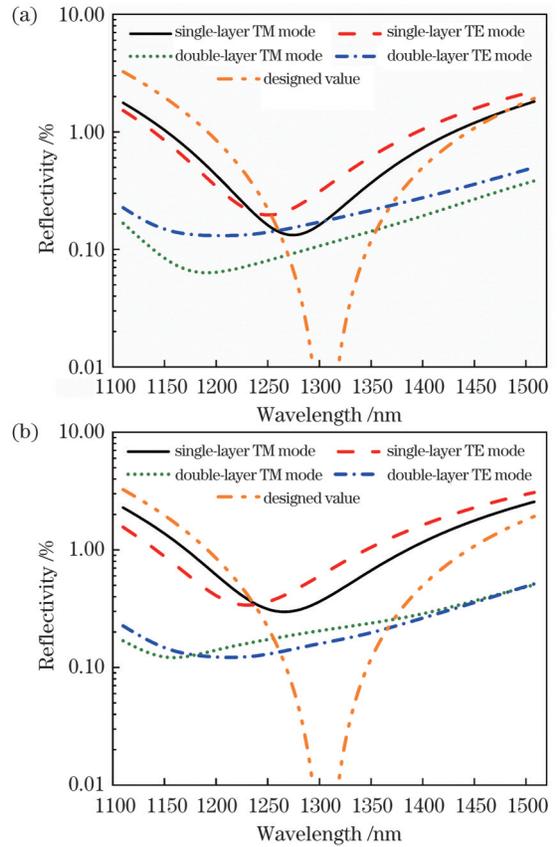


图 4 5° 倾角下单层和双层增透膜的 SLD 反射曲线。(a) 腔面 type-1; (b) 腔面 type-2
Fig. 4 SLD reflection curves of single-layer and double-layer AR films at tilt angle of 5° . (a) Cavity surface type-1; (b) cavity surface type-2

域, 特别是大倾角 ($a = 5^\circ$ 和 $a = 10^\circ$) 情况下, 偏差更为显著, 这与图 3 和图 4 的仿真结果相符。随着倾角的增加, 一方面低反射区域的位置不断变化, 对应的折射率和膜厚增加, 这意味着薄膜参数需要根据倾角来调整; 另一方面, 区域面积也增加, 表明可选择的薄膜参数范围扩大, 工艺容差能力获得提升。

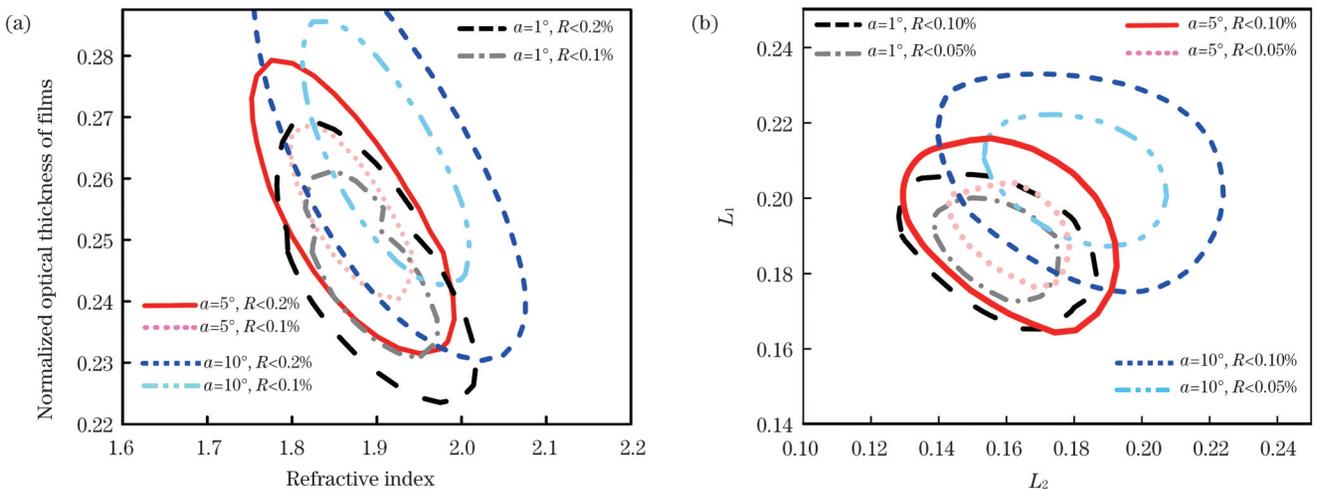


图 5 不同倾角下增透膜的反射率随薄膜参数的变化。(a) 单层膜; (b) 双层膜
Fig. 5 Reflectivity of AR films versus film parameters at different tilt angles. (a) Single-layer film; (b) double-layer film

在光学薄膜设计中,主要通过更易控制的膜厚来调整反射率,因此双层增透膜的扫描参数选择为第一层膜厚(L_1)和第二层膜厚(L_2),膜厚采用归一化光学厚度表征,由于材料和工艺的限制,完全符合 PWM 设计的理想膜系难以实现,因此考虑后序薄膜的制备,适当调整了双层膜系,第一层和第二层折射率分别为 2.25 和 1.45。图 5(b)展示了其反射率与膜厚的关系,实弧线和虚弧线内参数对应的薄膜反射率分别低于 0.1% 和 0.05%。与单层膜的结论类似,随着倾角的增加,低反射区域逐渐扩大,对应的膜厚也随之增加。由图 5 可知,薄膜参数直接影响反射率,通过调整折射率和膜厚能降低反射率,在一定取值范围内,单层膜和双层膜反射率低于 0.1% 和 0.05%,并且这些取值范围随倾角的变化而变化,PWM 设计的薄膜参数偏离该范围,尤其是在大倾角腔面中,这也解释了为什么 PWM 设计的薄膜反射率不理想。图 5 确定了低反射率对应的薄膜参数取值范围,为进一步优化提供了依据。

对于倾斜腔面 SLD,应当根据倾角适当调整薄膜设计。在上述薄膜参数范围内,采用粒子群算法在各倾角($1^\circ \sim 10^\circ$)下逐一优化薄膜设计,并与 PWM 设计的薄膜对比,如图 6 所示。图 6(a)为单层增透膜的反射率,优化后薄膜反射率降低,反射率最低仅

为 0.04%。特别是在大倾角($5^\circ \sim 10^\circ$)下,反射率大幅降低,最大降幅达到 82%,这将显著改善大倾角 SLD 的腔面光反射。双层增透膜的反射率如图 6(b)所示,相比于单层膜,双层膜的反射率进一步降低,优化后双层膜反射率均小于 0.05%, $2^\circ \sim 5^\circ$ 倾角内反射率更是接近 0.01%,满足 SLD 对反射率的要求。增透膜优化前、后的对比结果表明,优化设计有效降低了反射率,特别是优化的双层增透膜具有极低的反射率,相较 PWM 设计的增透膜具有明显优势。

4 实验结果与分析

实验所用的 1310 nm 倾斜腔面超辐射发光二极管是在 InP 衬底上外延生长形成的。光学薄膜采用反射率较低的双层膜结构,薄膜材料选用光学特性好、可靠性高的氧化硅和氧化铌。首先将晶圆解理成巴条,通过特殊的夹具支撑巴条并暴露腔面。镀膜前通过等离子体清洗和钝化技术,消除腔面的自然氧化物和残留杂质。为了制备致密且可靠性高的薄膜,采用反应磁控溅射工艺镀膜,在离子辅助下在 SLD 和陪片上同时制备光学薄膜,其中陪片为晶圆,与 SLD 衬底材料相同。由于优化设计对膜厚精度的要求较严苛,镀膜过程中采用晶振控制系统实时监控和控制膜厚,误差小于 10^{-9} m。镀膜后将巴条解理成管芯,在 8 只 SLD 管芯上制作了优化后的双层增透膜,另在相同数量的管芯上制作了 PWM 设计的增透膜,作为对比以验证优化设计。

陪片与 SLD 腔面的薄膜是相同的,首先测量了陪片上薄膜的反射率,如图 7 所示。图 7(a)为基于 PWM 传统薄膜的反射曲线,设计和测量结果接近,表明薄膜达到设计目标,曲线不完全拟合可能是因为镀膜过程中材料折射率发生了改变。图 7(b)为优化后薄膜的反射曲线,设计与测量曲线不拟合,这是因为陪片的尺寸和结构与 SLD 腔面存在差异,尽管如此,优化后双层增透膜在 1310 nm 处的反射率为 0.12%,低反射带宽($R < 1\%$)超过 200 nm,具有较佳的反射特征,该测量结果从侧面验证了镀膜效果与优化设计效果。

SLD 腔面尺寸较小,其中出光点位于有源层及附近,具有复杂的结构和材料掺杂,直接影响腔面反射率,而外延方向上有源层厚度仅为 μm 量级。除测量区域的尺寸外,巴条和管芯等处特殊的测量要求以及低反射率薄膜的测量误差都限制了 SLD 腔面反射率的直接测量,因此光谱纹波间接测量方法也是 SLD 等半导体光电子器件主流的反射率测量方法。腔面反射直接影响 SLD 光谱,光谱中纹波的强度和数目能够直观地反映反射光的强弱,结合式(3)~(5)即可计算腔面反射率。

SLD 的光谱如图 8 所示,测量设备为光谱仪,插图

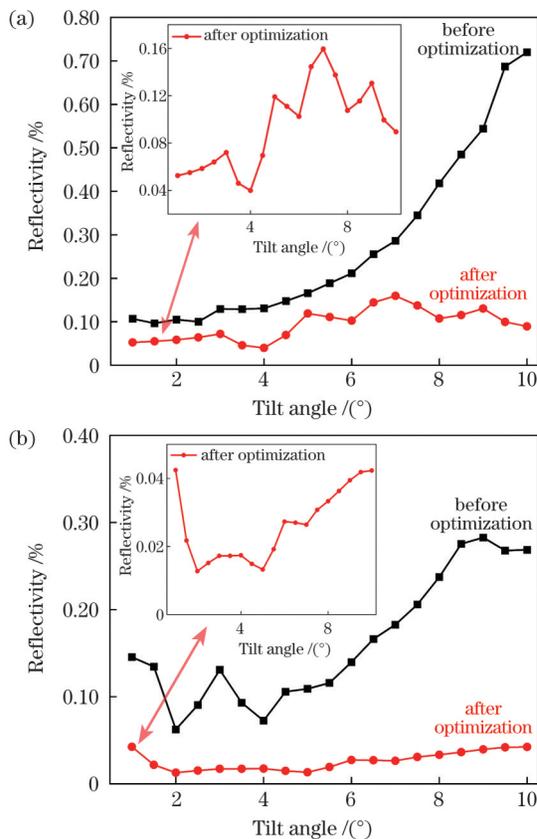


图 6 优化前、后增透膜的反射特征对比。(a)单层膜;(b)双层膜
Fig. 6 Comparison of reflection characteristics of AR films before and after optimization. (a) Single-layer films; (b) double-layer films

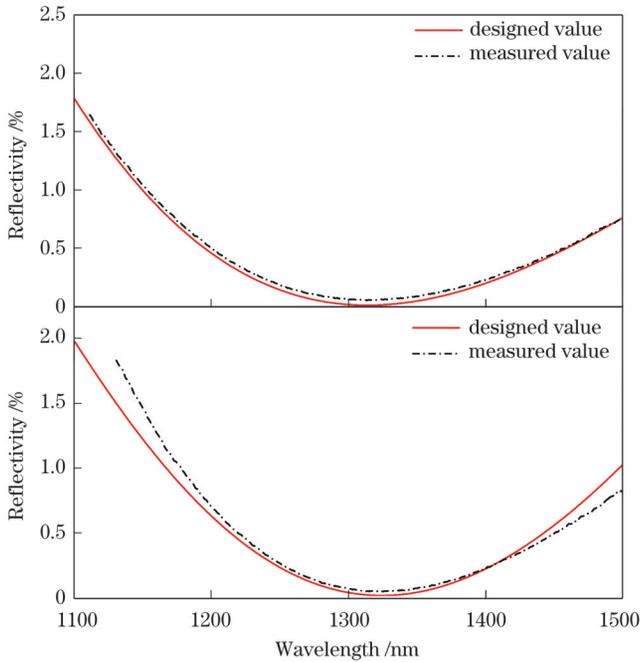


图7 陪片上双层膜的反射率曲线。(a)PWM设计的传统增透膜;(b)优化设计的增透膜
Fig. 7 Reflectivity curves of films on accompany wafer. (a) Traditional AR films designed by PWM; (b) optimal AR films

为 1310 nm 附近 5 nm 谱宽内的光谱。传统薄膜的 SLD 光谱中存在大量纹波,1310 nm 中心波长附近的纹波系数接近 0.051 dB。而薄膜优化后,纹波数量和强度明显减弱,纹波系数降至 0.020 dB,根据式(4)计算,光谱调制系数 m 由优化前的 5.78×10^{-3} 大幅降至 2.30×10^{-3} ,降幅均超过 50%,这表明优化后薄膜的反射率大幅降低,与第 3 节的仿真结果相吻合。在整个 20 nm 谱宽范围内,大部分纹波得到有效抑制,优化后 SLD 的纹波系数低于 0.02 dB,具有优异的低纹波特征。

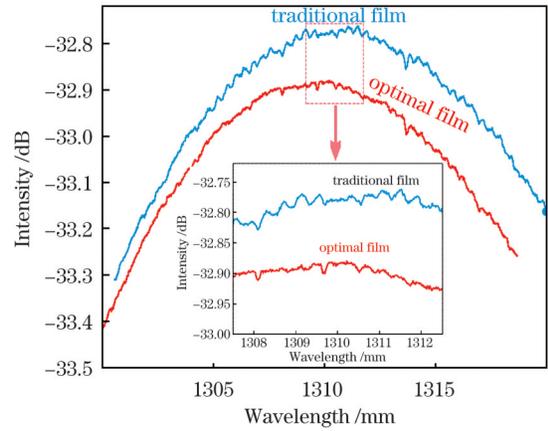


图8 双层增透膜优化前、后SLD管芯的光谱图,插图为1310 nm处放大的光谱图
Fig. 8 Spectra of SLD chips before and after double-layer AR film optimization with magnified spectra at 1310 nm shown in inset

接下来统计了各组 SLD 管芯的纹波系数,如图 9(a)所示。除缺陷引发的个别异常数据外,优化后管芯的纹波系数大幅降低,平均纹波系数仅为 0.019,仅为优化前的 44.5%。调制系数和腔面反射率如图 9(b)、(c)所示,优化后 SLD 的调制系数和腔面反射率均大幅降低,其中平均调制系数从优化前的 4.79×10^{-3} 降至 2.30×10^{-3} 。镀膜时气体流量、温度、压强等参数的波动使薄膜反射率偏离设计值,上述不可控因素产生的负面影响导致反射率略高于仿真结果。尽管如此,反射率较优化前的 0.2% 显著降低,优化后纹波得到有效抑制,也表明增透膜反射率降低,因此优化设计有效。图 9 对比了优化前、后 SLD 的纹波系数、光谱调制系数和反射率,优化后增透膜的反射率显著降低,SLD 的平均纹波系数和调制系数分别大幅降至 0.019 dB 和 2.30×10^{-3} ,所制作的 SLD 具有低纹波的特征。

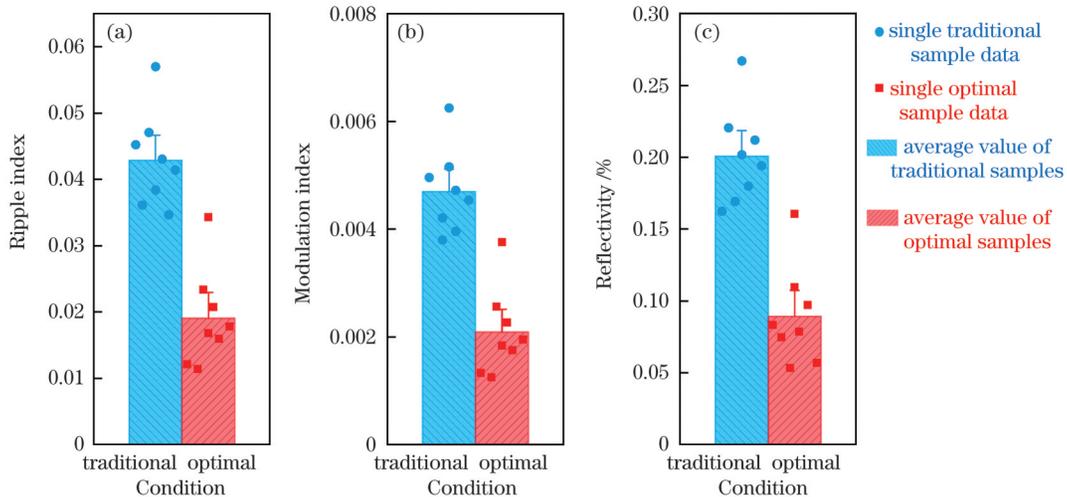


图9 薄膜优化前、后SLD管芯的参数统计图。(a)波纹系数;(b)调制系数;(c)反射率
Fig. 9 Parameter statistics of SLD chips before and after film optimization in which points represent SLD chip parameters and bar charts represent average values of parameters. (a) Ripple index; (b) modulation index; (c) reflectivity

输出特性也是 SLD 的重要指标,将腔面镀有优化增透膜的管芯封装在过渡热沉上,使用半导体光电子器件光功率测试系统,测量其功率-电流-电压(PIV)曲线,如图 10 所示。在阈值电流以上管芯的功率随着电流的增大呈近线性增加,在工作电流为 100 mA 的情况下,出光功率达到 10.13 mW。增透膜优化后,SLD 管芯保持高出光功率和高效,具有优异的输出特性。

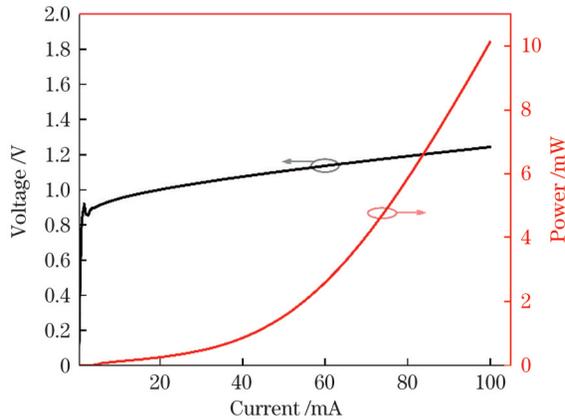


图 10 腔面镀有优化双层增透膜的 SLD 管芯的 PIV 特性曲线
Fig. 10 PIV characteristic curves of SLD chips coated with optimized double-layer AR films

5 结 论

研制了适用于低纹波超辐射发光二极管的增透膜。首先使用 FDTD 方法分析倾斜腔面上光学薄膜的反射特征,仿真结果显示,PWM 增透膜设计面临多方面的问题,对于单层和双层增透膜,反射曲线整体向短波方向偏移,反射率高于设计值。在大倾角下,FDTD 方法和 PWM 计算的反射率相差较大。为解决上述问题,重点研究了薄膜优化,通过扫描折射率和膜厚等参数,确定了低反射率对应的参数范围;采用粒子群算法在此范围内优化膜系,在 $1^\circ \sim 10^\circ$ 倾角下,降低了增透膜的反射率,特别是在大倾角下反射率降幅高达 82%。其中,双层增透膜优化设计的效果更佳,反射率低于 0.05%。

通过反应磁控溅射工艺制备了双层增透膜,经过优化,腔面上增透膜的反射率为 0.12%,该测试验证了镀膜效果。通过纹波间接测量 SLD 上增透膜的反射率,优化后平均反射率降幅达 50%。在腔面上制作了镀有优化薄膜的管芯,SLD 管芯光谱测试结果显示,其纹波的强度和数目明显减弱,纹波得到有效抑制。统计并对比了各组管芯的参数,经过薄膜优化,平均纹波系数和调制系数也大幅降至 0.019 dB 和 2.30×10^{-3} ,降幅均超过 50%。不仅如此,在 100 mA 的驱动电流下,SLD 管芯的出光功率仍保持在 10 mW 以上。所研制的增透膜能够有效抑制 SLD 的光谱纹波,并保持较高功率和效率,实验获得了具有低纹波系数的超辐射发光二极管。

参 考 文 献

- [1] 苑立波, 董维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0100001.
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001.
- [2] Nayak J. Fiber-optic gyroscopes: from design to production[J]. Applied Optics, 2011, 50(25): E152-E161.
- [3] Matuschek N, Duelk M. Highly efficient superluminescent light-emitting diodes (SLEDs) at 625 - 650 nm[C]//2017 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), July 24-28, 2017, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE Press, 2014: 111-112.
- [4] Ranjbaran M, Li X. Optimized dipole-surface plasmon waveguide coupling for enhancement of SLD performance[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(5): 848-857.
- [5] Xu H W, Li X J, Yan L H. Design of single anti-reflection film for high power semiconductor laser facet[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 772(1): 012050.
- [6] Piegari A, Flory F R, Piegari A. Optical thin films and coatings: from materials to applications[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2018: 26-52.
- [7] 付秀华, 檀承启, 张功, 等. 显示屏超硬减反射膜的研究[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0603002.
Fu X H, Tan C Q, Zhang G, et al. Research on super-hard anti-reflection coatings for screens[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0603002.
- [8] Matuschek N, Duelk M. Modeling and simulation of superluminescent light-emitting diodes (SLEDs)[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(5): 7800307.
- [9] Kafar A, Stańczyk S, Grzanka S, et al. Cavity suppression in nitride based superluminescent diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(8): 083106.
- [10] Liu S J, Zhou Y, Zhou S, et al. Structural design and fabrication of 830 nm GaAsP/AlGaAs low polarization superluminescent diode with tensile-strained wells[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(12): 10102-10108.
- [11] Reed M, Benson T M, Kendall P C, et al. Antireflection-coated angled facet design[J]. IEE Proceedings-Optoelectronics, 1996, 143(4): 214-220.
- [12] Nguyen T G, Mitchell A. Analysis of optical waveguides with multilayer dielectric coatings using plane wave expansion[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 635.
- [13] Torabi A, Shishegar A A, Faraji-Dana R. Analysis of modal reflectivity of optical waveguide end-facets by the characteristic Green's function technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(6): 1168-1176.
- [14] Patel S J, Toshniwal A, Kheraj V. A novel teaching-learning based optimization approach for design of broad-band anti-reflection coatings[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2017, 34: 68-74.
- [15] Patel S J, Kheraj V. Optimization of the genetic operators and algorithm parameters for the design of a multilayer anti-reflection coating using the genetic algorithm[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 70: 94-99.
- [16] Jiang A Q, Osamu Y, Chen L Y. Multilayer optical thin film design with deep Q learning[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 12780.
- [17] 刘冬梅, 罗云峰, 付秀华, 等. 低损耗 1064 nm 带通滤光片多层膜的散射特性研究[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0903004.
Liu D M, Luo Y F, Fu X H, et al. Scattering properties of low-loss 1064 nm bandpass filter multilayer films[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0903004.
- [18] 陈和宇, 郑月, 王夏霄, 等. 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0306002.
Chen H Y, Zheng Y, Wang X X, et al. Influence of Mean wavelength on scale factor of fiber optic gyroscope[J]. Chinese

- Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0306002.
- [19] Kaminow I P, Elsenstein G, Stulz L W. Measurement of the modal reflectivity of an antireflection coating on a superluminescent diode [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(4): 493-495.
- [20] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Michigan: Artech house, 2022: 85-162.
- [21] Sullivan D M. Electromagnetic simulation using the FDTD method [M]. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2013: 72-150.
- [22] Hao Y, Mittra R. FDTD modeling of metamaterials: theory and applications[M]. New York: Artech House, 2008.

Design and Fabrication of Antireflective Film for Weak Ripple Superluminescent Diode

You Daoming^{1,2}, Tan Manqing^{1,2*}, Guo Xiaofeng¹, Guo Wentao¹, Cao Yingchun¹, Chen Wenbin^{1,3}

¹State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

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

³School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective The ripple index is one of the most crucial parameters of superluminescent diodes (SLDs). A low ripple index is necessary for the application of SLDs in sensing areas such as fiber-optic gyroscopes. Therefore, reduced reflectivity of the facet is required, and the main strategy involves coating with antireflective (AR) films. The reflectivity of the AR films is generally less than 0.1%, which is a strict requirement. Although the AR film designed using the plane wave method (PWM) is widely used, its performance in SLDs is not ideal, and the actual reflectivity deviates from the design value. Therefore, the purpose of this study is to design and fabricate AR films for SLDs that can effectively reduce the ripple index.

Methods The first part is the simulation method. The finite difference time domain (FDTD) method is used to analyze the optical properties of the films, and a perfect matching layer (PML) is used as the boundary condition. In addition, to reduce the resource requirements of the FDTD method, a simplified simulation model is used, which highlights the main influencing factors. To optimize the films, parameters such as film thickness and refractive index are scanned by FDTD method to determine the parameter range of low reflectivity, and the particle swarm algorithm is used to obtain the optimal parameters within this range. For the coating process, the optical film is manufactured by reactive magnetron sputtering, and an AR ion beam assists the coating process. In addition, the film thickness is monitored and controlled online using a crystal oscillator control system. Reflectivity measurement of thin films is important, including direct measurement of the accompanying films and indirect measurement of the facet of the SLD. The SLD is indirectly measured by spectral ripple, which is also the mainstream reflectivity measurement method for other semiconductor optoelectronic devices.

Results and Discussions The simulation results show that the design of the PWM film faces many problems. For the single-layer and double-layer AR films, the reflection curve becomes blue-shifted, and the shift exceeds 150 nm. In addition, the reflectivity is more than one order of magnitude higher than the designed value, and the deviation is further enlarged at a large angle. Therefore, the AR film designed by PWM does not meet the requirements and cannot be used for SLD. To solve these issues, the optical film is optimized. For single-layer AR films, the average reflectivity is less than 0.11% and the lowest reflectivity is 0.04%. The optimized design of the double-layer film provides better results: the average reflectivity is less than 0.05% and the lowest reflectivity is only 0.01%. The optimized design effectively reduces the reflectivity, particularly for the optimized double-layer AR film, which has evident advantages over the film designed by PWM.

The double-layer AR films are prepared by reactive magnetron sputtering. After optimization, the reflectivity of the AR film on the companion substrate is 0.12%, and the low-reflectivity bandwidth is greater than 200 nm, which verifies the coating process. The design and measurement curves do not fit because the size and structure of the companion substrate are different from those of the SLD. The reflectivity of the AR film on the SLD is indirectly measured. After optimization, the average reflectivity of the AR film decreases by 50%, indicating that the optimized design effectively reduces the reflectivity. The spectrum of the SLD shows that the intensity and number of ripples are clearly reduced, and the average ripple index is only 0.019, which is 44.5% of that before optimization. The average modulation index decreases from 4.79×10^{-3} to 2.30×10^{-3} , a decrease of more than 50%. In addition, under a driving current of 100 mA, the output power of the SLD chips remains above 10 mW, maintaining a high output power and high efficiency.

Conclusions In this study, the AR film designed by the PWM is analyzed, particularly its poor performance in inclined-cavity SLD. The FDTD method is used to analyze and determine the deviation of the reflection curve and high reflectivity. Therefore, the AR film design is optimized and the film is coated by reactive magnetron sputtering; this is verified by reflectivity and spectrum

measurements. After optimization, the average reflectivity of the double-layer AR film is controlled within 0.1% and the lowest value is only 0.05%. The AR film effectively suppresses the ripple, and the ripple and modulation index are only 0.019 dB and 2.30×10^{-3} , respectively, with a decrease of more than 50% compared with those of the traditional PWM film. The prepared SLD chips still maintain a 10-mW output power under a current of 100 mA. The AR film developed in this study can effectively reduce the reflectivity of the facet, and the fabricated weak-ripple SLD is prepared by using the film. The research results provide a reference for the development of optical films of SLD and other semiconductor optoelectronic devices.

Key words films; superluminescent diode; antireflective film; tilt facet; optimal design; ripple index