

文章编号: 0258-7025(2009)09-2352-06

# 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计

杨一粟 黄永清 黄辉 王琦 任晓敏

(信息光子学与光通信教育部重点实验室(北京邮电大学), 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876)

**摘要** 高速智能光纤通信系统和网络的飞速发展对光电探测器提出了更高要求。利用严格耦合波(RCWA)理论, 给出了在亚波长光栅(SWG)下方具有分布布拉格反射镜(DBR)结构的理论分析模型, 将这种结构作为反射镜应用于谐振腔增强型光探测器(RCE PD)的设计中。仿真表明由于 SWG 的引入, 只需要 4 对  $\lambda/4$  厚度的 InGaAsP/InP 系 DBR, 可使整体膜系结构实现在中心波长  $1.55 \mu\text{m}$  处反射率达到 99.7%, 在  $1.40 \mu\text{m}$  至  $1.62 \mu\text{m}$  范围内反射率高于 99%。引入 SWG 后的 RCE PD 在  $1.55 \mu\text{m}$  附近的量子效率接近 90%, 串扰衰减系数与量子效率的乘积超过 15 dB。有效地解决了 InGaAsP/InP 介质膜系 DBR 作为谐振腔反射镜反射率低、反射带宽窄的问题。

**关键词** 光电子学; 亚波长光栅; 严格耦合波方法; 光探测器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2352

## Design of Photodetector with Subwavelength Grating Structure

Yang Yisu Huang Yongqing Huang Hui Wang Qi Ren Xiaomin

(Key Laboratory of Information of Photonics and Optical Communications

(Beijing University of Posts and Telecommunications),

Ministry of Education, Institute of Information of Photonics and Optical Communications,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** The model of subwavelength grating (SWG) with several dielectric layers under it is established based on the rigorous coupled-wave approach (RCWA). SWG is introduced as reflectors to the InP based long wavelength resonant cavity enhanced photodetector (RCE PD) design. Simulation demonstrates InP based SWG's reflectivity is larger than 99.7% in the center wavelength  $1.55 \mu\text{m}$  and wide reflection bandwidth (the reflectivity is higher than 99% from  $1.40 \mu\text{m}$  to  $1.62 \mu\text{m}$ ) is achieved at the same time. Compared with pure DBR, the total number of reflector's layers is no more than 9 (4 pairs of DBR and one SWG). Thus it is an innovation of designing long wavelength RCE PD by SWG reflector (SWG-RCE PD) instead of DBR. And the results of simulation show that SWG-RCE PD's quantum efficiency is about 90% at  $1.55 \mu\text{m}$  and the product of crosstalk attenuation and quantum efficiency is more than 15 dB.

**Key words** optoelectronics; subwavelength grating; rigorous coupled-wave approach; photodetectors

## 1 引 言

亚波长光栅(SWG)得益于优异的光学特性,在传感器、集成光学、全息处理等众多领域中有着广阔的应用前景<sup>[1~8]</sup>,比如 Michael 等<sup>[2]</sup>近期研制出的具有 SWG 结构的垂直腔面发射激光器(VCSEL),在性能上获得了突破性进展,进一步推动了人们对 SWG 的深入研究。本文提出将 SWG 应用于谐振

腔增强型光探测器(RCE PD)中的反射镜设计, RCE PD 借助于光波在谐振腔中的多次反射以实现充分吸收,使得在吸收层很薄的情况下仍能获得很高的量子效率,在一定程度上解决了器件量子效率和高速响应性能之间的矛盾<sup>[9]</sup>。RCE PD 是自动交换光网络以及 WDM 的无源光网络(WDM-PON)宽带接入系统中的光接收机的核心器件<sup>[10]</sup>。利用

收稿日期: 2008-10-11; 收到修改稿日期: 2008-11-26

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314900)、国家 863 计划(2006AA03Z416)、国家自然科学基金(60576018)、国际科技合作重点项目计划(2006DFB11110)、教育部“新世纪人才支持计划”(NCET-05-0111)、北京市教育委员会共建项目(XK100130637)和高等学校创新引智计划(111 计划)资助课题。

作者简介: 杨一粟(1984—),男,硕士研究生,主要从事光电子器件设计方面的研究。E-mail: yangyisu@bupt.edu.cn

导师简介: 任晓敏(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事半导体光电子学方面的研究。E-mail: xmren@bupt.edu.cn

严格耦合波方法,根据 RCE PD 器件谐振腔所需分布布拉格反射镜(DBR)的特点,本文提出了在 SWG 下方具有 DBR 结构的多层介质薄膜分析模型,理论与仿真结果表明由于 SWG 反射镜的引入可以使 RCE PD 的综合性能如量子效率、抗串扰性得到提升,而且 SWG 实现反射镜所需的电介质层数远小于达到同样条件下的 DBR 的层数,有效地解决了 InGaAsP/InP 介质膜系 DBR 反射率低、反射带宽窄以及制备困难的问题。

## 2 理论分析

### 2.1 单层亚波长光栅的结构与反射特性

根据 M. G. Moharam 等<sup>[5]</sup>提出的理论,设线性极化电磁波入射由同一种材料构成的光栅表面,入射角  $\theta$ ,方位角  $\varphi$ ,光栅层由两种材料构成,折射率分别为  $n_1, n_{II}$ 。坐标系如图 1 所示。

在实际应用中,近似为平面衍射情况,电磁波中的电场矢量垂直于入射平面,可以表示为:

$$E_{inc,y} = \exp[-jk_0 n_1 (\sin \theta x + \cos \theta z)], \quad (1)$$

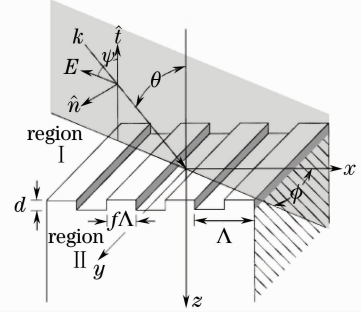


图 1 SWG 结构示意图及相应坐标系  
Fig. 1 Structure of SWG and coordinates

式中  $k_0, \lambda_0$  为入射电磁波的波数和波长,  $z < 0$  和  $z > d$  区域中的解可表示为

$$E_{1,y} = E_{inc,y} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi}x + k_{1,zi}z)], \quad (2)$$

$$E_{II,y} = \sum_i T_i \exp\{-j[k_{xi}x + k_{II,zi}(z-d)]\}, \quad (3)$$

$$k_{xi} = k_0 [n_1 \sin \theta - i(\lambda_0/\Lambda)], \quad (4)$$

$$k_{L,zi} = \begin{cases} k_0 \sqrt{n_L^2 - (k_{xi}/k_0)^2}, & k_0 n_L > k_{xi} \\ -jk_0 \sqrt{-n_L^2 + (k_{xi}/k_0)^2}. & k_0 n_L \leq k_{xi} \end{cases} \quad L = \text{I, II} \quad (5)$$

在光栅层中( $0 < z < d$ ),  $y$  方向的切向电场分量和  $x$  方向的磁场分量用傅里叶级数展开,即

$$E_{g,y} = \sum_i S_{yi}(z) \exp(-jk_{xi}x), \quad (6)$$

$$H_{g,x} = -j \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sum_i U_{xi}(z) \exp(-jk_{xi}x), \quad (7)$$

式中  $\epsilon_0$  为入射区的介电常数,  $S_{yi}, U_{xi}$  是第  $i$  级衍射波的归一化幅度。由 Maxwell 方程组变换得矩阵形式的耦合波方程组

$$\begin{bmatrix} \partial S_y / \partial z' \\ \partial U_x / \partial z' \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ A & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_y \\ U_x \end{pmatrix} \Leftrightarrow \left[ \frac{\partial^2 S_y}{\partial (z')^2} \right] = [A][S_y], \quad (8)$$

式中  $z' = k_0 z, A = \mathbf{K}_x^2 - \mathbf{E}$ 。

其中  $\mathbf{E}$  是介电常数矩阵,第  $i$  行,第  $p$  列元素等于  $\epsilon_{i-p}$ ,即光栅层中周期性变化的介电常数的傅里叶级数的系数  $\mathbf{K}_x$  是一个对角矩阵,对角线上元素等于  $k_{xi}/k_0$ ;  $\mathbf{I}$  是单位矩阵。在光栅入光边界处( $z=0$ )和出光边界处( $z=d$ )有

$$\delta_{i0} + R_i = \sum_{m=1}^n \omega_{i,m} [c_m^+ + c_m^- \exp(-k_0 q_m d)], \quad (9)$$

$$j[n_1 \cos \theta \delta_{i0} - (k_{1,zi}/k_0)R_i] = \sum_{m=1}^n \nu_{i,m} [c_m^+ - c_m^- \exp(-k_0 q_m d)], \quad (10)$$

$$T_i = \sum_{m=1}^n \omega_{i,m} [c_m^+ \exp(-k_0 q_m d) + c_m^-], \quad (11)$$

$$j(k_{II,zi}/k_0)T_i = \sum_{m=1}^n \nu_{i,m} [c_m^+ \exp(-k_0 q_m d) - c_m^-], \quad (12)$$

$$\delta_{i0} = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ 0, & i \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$w_{i,m}$  是矩阵  $\mathbf{A}$  的本征矢量构成的矩阵中的第  $i$  行, 第  $m$  列元素,  $q_m$  是矩阵  $\mathbf{A}$  本征值的正的均方根,  $v_{i,m} = q_m w_{i,m}$ ,  $c_m^+$ ,  $c_m^-$  是将由边界条件确定的常数, 利用切向电磁场分量的边界条件, 得光栅中第  $i$  级反射波衍射效率

$$DE_{ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right). \quad (14)$$

## 2.2 引入 DBR 后的亚波长光栅的结构与反射特性

上节的结论适用于图 1 所示的单一材料构成的光栅结构, 针对实际应用需要, 借鉴 DBR 设计方法, 将 SWG 结构与 DBR 结构结合, 其剖面结构如图 2 所示, 光栅层位于介质膜系顶层, 即第  $N$  层, 下方是  $\lambda/4$  堆栈。第  $n$  层介质处于  $z_{n-1} < z < z_n$  处, 相对介电常量为  $\epsilon_n$ , 光栅的相对介电常数满足周期性条件  $\epsilon(x) = \epsilon(x + \Lambda)$ , 设平面电磁波入射角为  $\theta$ , 从第一

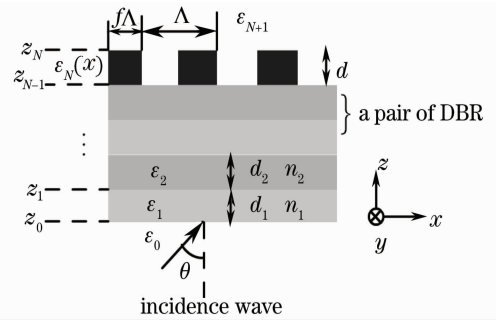


图 2 多层介质材料膜系光栅几何结构剖面示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of subwavelength grating with several dielectric layers under it

层底部入射, 从第  $N$  层顶部出射。以 TE 模为例, 根据第一节分析可知, 设谐波级次用  $m$  表示, 共有  $M$  级, 则幅度已归一化的入射电磁波可以表示为

$$E_0(x, z) = \sum_m \{ \delta_{m,0} \exp[-ik_{0,m}(z - z_0)] + B_{0,m} \exp[ik_{0,m}(z - z_0)] \} \exp(-ik_{x,m}x), \quad (15)$$

出射电磁波可以表示为

$$E_{N+1}(x, z) = \sum_m \{ A_{N+1,m} \exp[-ik_{N+1,m}(z - z_N)] \} \exp(-ik_{x,m}x), \quad (16)$$

非光栅层中的电磁场可以表示为

$$E_l(x, z) = \sum_m \{ A_{n,m} \exp[-ik_{n,m}(z - z_n)] + B_{n,m} \exp[ik_{n,m}(z - z_n)] \} \exp(-ik_{x,m}x), \quad (17)$$

$k_{x,m}$ ,  $k_{n,m}$  已由(4)式和(5)式定义;  $A_{n,m}$ ,  $B_{n,m}$  分别代表第  $n$  层薄膜中, 沿正  $z$  和负  $z$  方向传播的第  $m$  阶衍射波的幅度,  $m = 1, 2, 3, \dots, M$ 。为了简化分析, 不计谐波因子, 在光栅中的电磁波分布可以表示为

$$E_0(x, z) = \sum_m \sum_j w_{N,mj} \{ A_{N,j} \exp[-ik_{N,j}(z - z_N)] + B_{N,j} \exp[ik_{N,j}(z - z_N)] \} \exp(-ik_{x,m}x), \quad (18)$$

$w_{N,mj}$  即为前一节所求的  $w_{i,m}$ , 只不过现在光栅层位于  $[z_{N-1}, z_N]$ , 利用每一层的上下边界条件, 得到第  $n$  层介质对应的  $2M \times 2M$  维的传输矩阵  $\mathbf{P}_n$

$$\mathbf{P}_n = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_n^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{X}_n \end{pmatrix}, \quad (19)$$

以及第  $n$  层介质对应的动态矩阵  $\mathbf{D}_n$

$$\mathbf{D}_n = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_n & \mathbf{W}_n \\ \mathbf{W}_l \mathbf{Q}_n & -\mathbf{W}_n \mathbf{Q}_n \end{pmatrix}, \quad (20)$$

其中子阵  $\mathbf{X}_n$  是对角矩阵, 对角线上的元素为  $\exp(-ik_{n,m}d_n)$ ,  $d_n$  为第  $n$  层介质的厚度,  $\mathbf{W}_n$  矩阵是  $M \times M$  维, 其中第  $i$  行, 第  $m$  列元素为  $w_{n,im}$ ,  $\mathbf{Q}_n$  为对角阵, 对角线上元素为  $k_{n,m}/k_0$ 。计算多层介质膜系光栅的反射与传输同性, 需要借助多层介质膜系的特征矩阵分析方法, 将入射电磁波与出射电磁波建立联系, 即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B}_0 \end{bmatrix} = D_0^{-1} \left( \prod_{n=1}^N \mathbf{D}_n \mathbf{P}_n \mathbf{D}_n^{-1} \right) \mathbf{D}_{N+1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{N+1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}_0$ ,  $\mathbf{A}_{N+1}$  是  $M \times 1$  的列向量, 其中元素为  $\delta_{m,0}$ ,  $B_{0,m}$ ,  $A_{N+1,m}$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ), 求解该方程得第  $m$  级反射波和透射波的衍射效率

$$DE_R(m) = |B_{0,m}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{0,m}}{k_{0,0}} \right). \quad (22)$$

## 2.3 应用亚波长光栅反射镜的 RCE PD 器件结构

应用 SWG 的 InP 基长波长 RCE PD 器件 (SWG-RCE PD) 的剖面结构如图 3 所示。相比传统 RCE PD<sup>[9]</sup>, 谐振腔两端的反射镜由  $\lambda/4$  堆栈以及亚波长光栅构成, 解决了 InGaAsP/InP DBR 反射率低、反射带宽窄的问题。吸收层的两侧是隔离层,  $P^+$  区和  $N^+$  区的材料与隔离层相同。

根据 Ünlü 等<sup>[9]</sup>的理论, 量子效率  $\eta$  定义为被有源区吸收的光功率与入射光功率之比, 认为吸收层吸收系数远大于腔内其他区域, 可得

$$\eta = \frac{P_l}{P_i} = \left\{ \frac{1 + R_2 \exp(-\alpha x_a)}{1 - 2 \sqrt{R_1 R_2} \exp(-\alpha x_a) \cos[2\beta x_a (L_f + \beta x_a) + \varphi_1 + \varphi_2] + R_1 R_2 \exp(-2\alpha x_a)} \right\} \times [1 - \exp(-\alpha x_a)](1 - R_1), \quad (23)$$

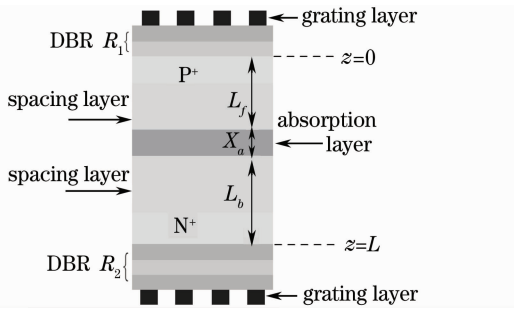


图3 具有亚波长光栅结构的 RCE 光探测器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SWG-RCE PD

式中  $P_l$  为有源区(厚度为  $x_a$ , 吸收系数为  $\alpha$ , 电磁波传输常数  $\beta$ ) 吸收的光功率,  $P_i$  为入射光功率,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  为顶镜和底镜功率反射系数和相位常数, 对于非常薄的吸收层, 由于驻波效应, 吸收层的位置对光波的吸收效果产生较大影响。为了设计具有高量子效率的光电探测器, 底镜和顶镜的反射系数需要仔细设计, 由于 RCE PD 内部功率增益与吸收区对光波的吸收能力之间互相制约, 因此当  $\alpha x_a$  高于某一值后, 谐振时的量子效率出现下降, 设  $\alpha x_a$ ,  $R_2$  为常量, 量子效率达到最大时有

$$R_1 = R_2 \exp(-2\alpha x_a). \quad (24)$$

SWG-RCE PD 作为波长解复用器需要克服串

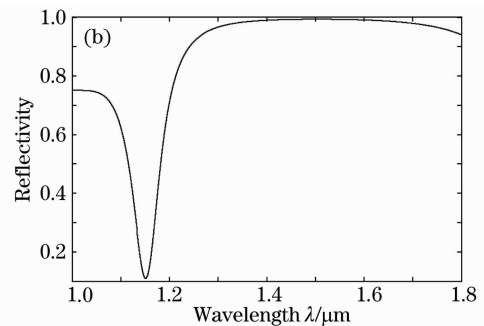
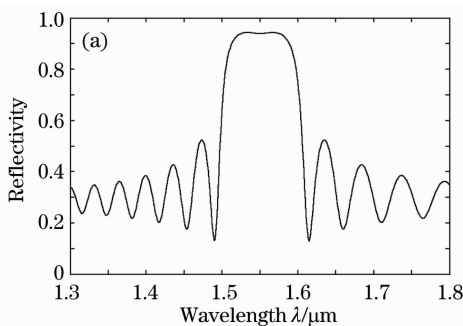


图4 反射谱仿真结果 (a)30对DBR; (b)引入SWG的4对DBR

Fig. 4 The simulation of reflection spectrum (a)30 pairs of DBR; (b)4 pairs of DBR with SWG

### 3.2 亚波长光栅对光电探测器性能的优化

为了提高量子效率, 根据上一节的仿真结论, 优化谐振腔的底镜反射特性, 使其在工作波长  $1.55 \mu\text{m}$  上的反射率尽可能提高而且具有宽谱特征, 根据理论分析和仿真结果得到当 TE 模电磁波从光栅下方垂直入射, 入射介质为 InP, 出射介质为真空, InGaAsP/InP 介质膜系构成的 DBR 为一对, 光栅材料为 InGaAsP( $n=3.42$ ), 周期为  $0.2 \mu\text{m}$ , 占空比为  $0.7$

扰问题, 用信道间串扰衰减系数  $C^{[9]}$  描述

$$C \approx 20 \lg \left[ 1 + \left( \frac{2F}{N} \right)^2 \right], \quad (N > 3), \quad (25)$$

$F$  为谱线精细度, 反映了谐振腔对于波长的选择能力,  $N$  代表复用信道总数, 可见  $F$  值越高, 串扰噪声越低, 但  $C$  与量子效率  $\eta$  存在此消彼长的关系, 因为谐振时  $\eta$  达到最大的条件是  $R_1 = R_2 \exp(-2\alpha x_a)$ , 所以底镜和顶镜的反射率不能任意高, 引入  $\eta C$  来表达解复用器中光电探测器性能的综合效果。

## 3 仿真结果与性能分析

### 3.1 多层介质膜系中光栅的反射特性

设空气中 TE 模电磁波从光栅下表面垂直入射, 在 InP 衬底上生长的 InP/InGaAsP 系  $\lambda/4$  DBR 堆栈中引入由 InGaAsP( $n=3.42$ ) 材料构成的亚波长光栅, 光栅周期为  $1 \mu\text{m}$ , 占空比  $70\%$ , 厚度为  $0.387 \mu\text{m}$ , 仅需要 4 对 DBR, 即可令反射镜在中心波长 ( $1.55 \mu\text{m}$ ) 处的反射率超过  $99\%$ 。作为对比, 30 对同样材料和结构的 DBR 在同一中心波长处反射率只有  $90\%$ , 另外引入 SWG 的 DBR 反射谱呈现出宽带特性, 在  $1.40 \sim 1.62 \mu\text{m}$  范围内反射率高于  $99\%$ , 如图 4 所示, 与文献[11]的结论相符。

时, 各层相位厚度皆为工作波长的  $1/4$ , 在工作波长附近底镜反射特性满足预期需要; 通过优化光电探测器性能顶镜的反射特性和吸收层厚度的组合方式, 搜索到量子效率与串扰衰减系数之积 ( $\eta C$ ) 的极大值, 即当吸收层厚度为  $x_a = 0.168 \mu\text{m}$ , 顶镜反射率在工作波长附近为  $0.72$  左右时搜索到的极大值为  $15.7 \text{ dB}$ , 如图 5 所示。同时还表明归一化吸收系数过高或过低则分别使  $F$  降低或  $\eta$  降低, 都造成解复用

器件综合性能下降。

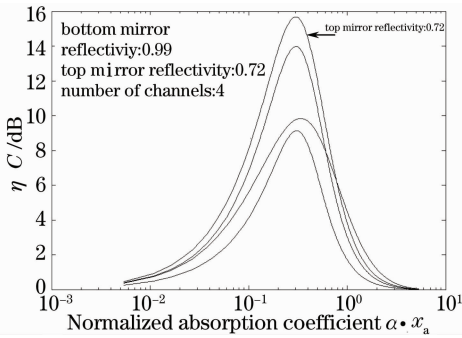


图 5 底镜反射率不变,顶镜反射率变化时,RCE PD 的抗串扰性与量子效率的乘积随归一化吸收系数 ( $\alpha x_a$ ) 的变化

Fig.5 When the bottom reflectivity is fixed while using different top mirror reflectivity, RCE PD's product of crosstalk attenuation and quantum efficiency as a function of normalized absorption coefficient ( $\alpha x_a$ )

设计顶镜的结构如下:光栅材料为 InGaAsP,周期为  $0.5 \mu\text{m}$ , 占空比 0.7, 折射率为 3.42, 相位厚度为工作波长的  $1/4$ , 另外还需一对相位厚度皆为

工作波长的  $1/4$  的 InGaAsP/InP 介质膜。将 SWG 和采用同样层数、材料及相位厚度的 DBR 的反射率进行比较,如图 6(a) 所示,进一步比较采用这两种不同特征的反射镜的 SWG-RCE PD 与 DBR-RCE PD 的性能,如图 6(b),(c) 所示,SWG-RCE PD 在工作波长处的量子效率高达 90%,而 DBR-RCE PD 仅为 34%,同时  $\eta C$  仅为 1.2 dB,也远小于 SWG-RCE PD 的 15.7 dB。

对于非常薄的吸收层,它的位置也会影响量子效率,因为谐振腔中光场的分布具有驻波场的特点,故量子效率是吸收层位置  $z$  的函数,称为驻波效应。可以获得不同波长的光波的电场在谐振腔中的分布,设 RCE PD 的腔长为  $3 \mu\text{m}$ , 底镜和顶镜的反射特性如图 7 所示,对比 SWG-RCE PD 与 DBR-RCE PD 谐振腔中的驻波效应,发现前者可以在工作波长 ( $1.55 \mu\text{m}$ ) 附近获得更高的谐振增益,如图 7 所示,同时根据该仿真结果可以指导 SWG-RCE PD 中吸收层位置的选取,在工作波长附近,当  $z=1.4 \mu\text{m}$  时,满足谐振增益达到极大值为 7.6,而后者仅为 0.98。

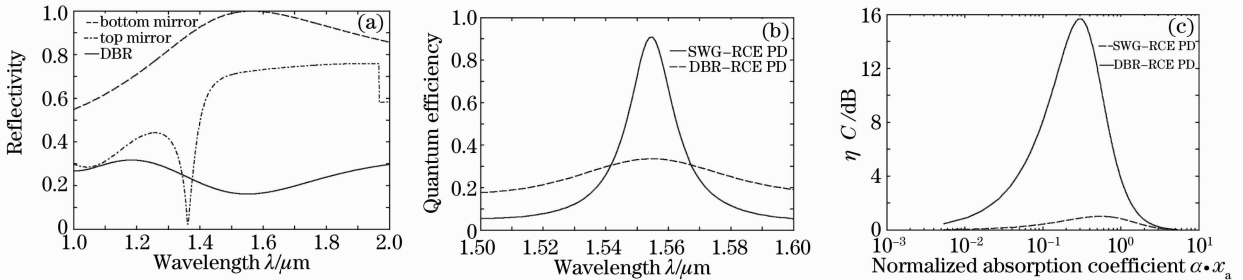


图 6 SWG-RCE PD 与 DBR-RCE PD 的性能指标仿真结果与比较。(a)反射谱比较;(b)量子效率比较;(c)串扰衰减系数与量子效率的乘积的比较

Fig.6 Comparisons of SWG-RCE PD and DBR-RCE PD's characteristics. (a) Reflection spectrum of resonant cavity's mirrors are made between SWG-RCE PD and DBR-RCE PD; (b) quantum efficiency; (c) the product of crosstalk attenuation coefficient and quantum efficiency

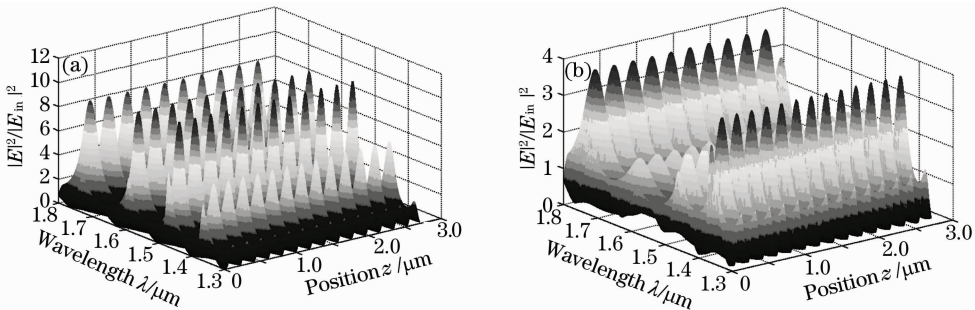


图 7 模拟谐振腔中驻波效应。(a)SWG-RCE PD 谐振腔中的驻波效应;(b)DBR-RCE PD 谐振腔中的驻波效应

Fig.7 Simulation of stand-wave-effect(SWE):(a)SWE in SWG-RCE PD's resonant cavity;(b)SWE in DBR-RCE PD's resonant cavity

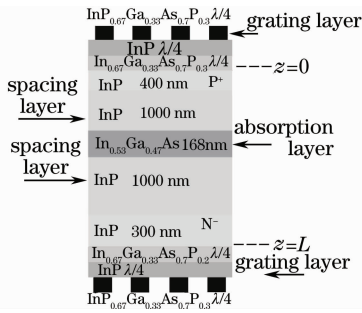


图 8 优化后的 SWG-RCE PD 最终设计方案示意图

Fig. 8 Final design scheme of SWG-RCE PD after optimization

综上所述根据理论分析与仿真,得到 InP 基长波长 SWG-RCE PD 的结构尺寸及材料,如图 8 所示,首先在 InP 衬底上外延生长 500 nm 的 InP 缓冲层;接着加工出器件的底镜;在底镜上继续生长 400 nm 厚的 p 掺杂 InP 底电极接触层;其上为 1000 nm 厚的本征型 InP 隔离层;接着生长 168 nm 厚的本征型  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  吸收层、1000 nm 厚的本征型 InP 隔离层、300 nm 厚的 n 掺杂 InP 顶电极接触层;最后加工出光栅层,作为器件的顶镜,入射光由器件顶部正入射。

## 4 结 论

基于 RCWA 方法,结合 RCE PD 的具体应用要求,建立了在顶端引入 SWG 的 DBR 的整体反射结构的分析模型,与 DBR 对比表明顶端具有 SWG 的  $\lambda/4$  DBR 堆栈仅需 4 对 DBR 就可实现宽带高反射率特性(在  $1.55 \mu\text{m}$  处反射率高于 99.7%,在  $1.40\sim 1.62 \mu\text{m}$  的范围内,反射率高于 99%)。如果能将 SWG 作为反射镜的一部分引入 RCE PD,仿真表明 SWG-RCE PD 在  $1.55 \mu\text{m}$  附近的量子效率高达 90%,谐振增益超过 7,串扰衰减系数与量子效率为 15.7 dB,相比同样结构的 DBR-RCE PD 相应指标为 34%,0.98,1.2 dB,表明采用 SWG 有望大幅提升 RCE PD 的性能。

## 参 考 文 献

- 1 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 811~818
- 2 Michael C. Y. Huang, Y. Zhou, Chang Hsain *et al.*. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 119~122
- 3 Wook Lee, F. Levent Degertekin. Rigorous coupled-wave analysis of multilayered grating structures [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(10): 2359~2363
- 4 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Dayue *et al.*. A vector analytical method of phase diffraction grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1651~1659  
傅克祥, 王植恒, 张大跃等. 位相光栅衍射的矢量解法[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1651~1659
- 5 M. G. Moharam, Eric B. Grann, Drew A. Pommet *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- 6 Wang Chunhua, Liu Liren, Yan Aimin *et al.*. Diffraction properties of local volume holographic grating read by an ultrashort pulsed laser beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1558~1564  
王春花, 刘立人, 闫爱民等. 超短脉冲激光光束被局域体全息光栅衍射的性质分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1558~1564
- 7 Wang Jingquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou *et al.*. Implementation of coherent array beam combination using two-dimensional sine phase grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 39~43  
王景全, 方亮, 张志友等. 用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 39~43
- 8 Zhang Fan, Wang Chuncan, Tong Zhi *et al.*. Design of a dielectric-metal-dielectric sandwich structure for efficient side-coupling of high power double-clad fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 470~474  
张帆, 王春灿, 童治等. 用于高功率双包层光纤激光器侧面耦合的对称夹层结构 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 470~474
- 9 M. S. Ünlü, S. Strite. Resonant cavity enhanced photonic devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2): 607~639
- 10 Huang Yongqing, Huang Hui, Ren Xiaomin. Characteristic analysis of the high frequency response for high speed long wavelength resonant cavity enhanced photodetectors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1385~1390  
黄永清, 黄辉, 任晓敏. 谐振腔增强型光探测器的高速响应性能研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1385~1390
- 11 Carlos F. R. Mateus, Michael C. Y. Huang, Yunfei Deng *et al.*. Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 518~520