

高掺铒硅基氧化钽脊形光波导

陈朝夕¹, 温浩康², 于浩², 李彬², 胡军², 郭天娥², 马小玲², 华平壤¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

2. 天津科技大学应用文理学院, 天津 300457)

摘要:首次提出了采用 Er-Ta 共溅、高温退火的方法,在硅基二氧化硅表面制备高掺铒氧化钽(Er:Ta₂O₅)薄膜。利用棱镜耦合仪分析了铒掺杂浓度对 Er:Ta₂O₅ 薄膜的折射率的影响,结果表明:Er:Ta₂O₅ 薄膜的折射率随着 Er 掺杂浓度的增加而略微降低,且所制备的薄膜没有明显的各向异性。在此基础上,成功制备出 Er 掺杂浓度分别为 0、2.5、5、7.5 mol% 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导,波导在 1 550 nm 波段可实现单模传输,通过截断法得到波导在 1 600 nm 波长处的传输损耗分别为 0.6、1.1、2.5、5.0 dB/cm。在所制备的 Er:Ta₂O₅ 薄膜中,尽管没有发现 Er₂O₃ 结晶析出,但薄膜中的 Er³⁺会影响 Ta₂O₅ 晶体的结晶程度,进而增加波导的传输损耗。最终文中制备的掺杂浓度为 2.5 mol% 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导通过 980 nm 激光泵浦,在 1 531 nm 信号波长下达到了 3.1 dB/cm 的净增益。

关键词:集成光学; 铒掺杂; 氧化钽薄膜; 脊形波导

中图分类号: TN252 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0821002

Silicon-based tantalum pentoxide ridge waveguide with high erbium concentration

Chen Zhaoxi¹, Wen Haokang², Yu Hao², Li Bin², Hu Jun²,
Guo Tian'e², Ma Xiaoling², Hua Pingrang¹

(1. School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Applied Liberal Arts College, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: High Erbium -doped tantalum pentoxide (Er:Ta₂O₅) films with different Er -doping concentrations was fabricated on silica -on -silicon substrate. The fabricating method of Er -Ta co -sputtering and following thermal oxidation was first proposed. The influence of high Er -doping concentration on refractive index of Er:Ta₂O₅ films was evaluated by prism coupler. The results indicate that the refractive index of Er:Ta₂O₅ films decreases slightly while Er -doping concentration increases and the films do not show anisotropy obviously. On this basis, 0, 2.5, 5, 7.5 mol% Er -doped Ta₂O₅ ridge waveguides were successfully fabricated on Si substrate. The waveguides were observed to be single -mode at 1 550 nm wavelength. Propagation loss of 0.6, 1.1, 2.5, 5.0 dB/cm at 1 600 nm wavelength was estimated using cut -off method, respectively. Although no crystallization of Er₂O₃ was found among

收稿日期:2016-12-10; 修订日期:2017-01-20

作者简介:陈朝夕(1992-),男,硕士生,主要从事集成光电子学方面的研究。Email: ZXChen@tju.edu.cn

导师简介:华平壤(1983-),男,副教授,博士,主要从事微波光子学方面的研究。Email: prhuan@tju.edu.cn

the fabricated Er:Ta₂O₅ films, Er³⁺ could affect the crystallinity of Ta₂O₅ and then increase the propagation loss of the waveguide. Finally net optical gain of 3.1 dB/cm at 1 531 nm was demonstrated in a 2.5 mol% Er:Ta₂O₅ ridge waveguide when pumped with 980 nm laser.

Key words: integrated optics; Erbium-doping; tantalum pentoxide film; ridge waveguide

0 引言

硅是微电子学领域最重要的半导体材料。近年来,与硅相关的工艺技术得到了飞速发展,将硅从微电子拓展到集成光学领域^[1-3],发展集电子学功能和光子学功能于一体的硅基光电子器件与回路已经成为一个重要的发展趋势^[4]。在用于制备硅基薄膜光波导及回路的材料中,氧化钽(Ta₂O₅)因其具有高介电常数、高折射率和很好的热稳定性及化学稳定性而受到广泛关注^[5-6]。Ta₂O₅的介电常数(25~35)远远高于硅(3.8),使其有望成为新一代存储器件的介质材料^[7];更有意义的是,在通信波段 Ta₂O₅的折射率与铌酸锂晶体(LiNbO₃,LN)的折射率都在 2.1~2.2 之间,由于两种材料的折射率相近,Ta₂O₅和 LN 晶体可以共同形成良好的波导结构^[8]。相比于传统的质子交换和钛扩散铌酸锂光波导,通过选择合适的包层,可以构造以 Ta₂O₅和 LN 晶体为芯层的脊形波导,利用 Ta₂O₅的高折射率,将波导的弯曲半径由毫米量级缩小到微米量级^[9]。因此,利用 Ta₂O₅制备的硅基光波导和硅基 LN 薄膜相匹配,既可以在很大程度上弥补硅半导体材料不具有非线性效应的缺点,又可以有效缩小光波导的尺寸,进一步提高光通信器件的集成度。

更重要的是,向硅基 Ta₂O₅薄膜中掺杂 Er³⁺离子,则可以使其具备掺铒波导放大器(EDWA)的功能^[10],并且有望将泵浦源、调制器、滤波器集成在一块芯片上^[11]。Subramanian^[12]等人采用掺铒约 1.2 mol%的氧化钽靶作为溅射源,通过磁控溅射法制备了 Er:Ta₂O₅薄膜,高温退火后再通过氩离子刻蚀得到 Er:Ta₂O₅脊形波导。在 977 nm 光泵浦下通过该波导的信号光饱和增益可达 2.1 dB/cm。如果提高 Er³⁺掺杂浓度,很有希望获得更高的增益系数。然而 Subramanian 等人并没有对更高的 Er³⁺掺杂浓度 Er:Ta₂O₅脊形波导进行研究。并且,直接利用溅射掺铒氧化钽制作 Er:Ta₂O₅薄膜方式成本高、灵活

性差,不便于改变掺杂物质和掺杂浓度。因此,文中提出了采用 Er-Ta 共溅,结合高温退火的方式制备 Er:Ta₂O₅薄膜,利用该方法,制备出一系列不同铒掺杂浓度的 Er:Ta₂O₅薄膜,并研究 Er³⁺掺杂浓度对 Er:Ta₂O₅薄膜折射率的影响。在此基础上制备了掺杂浓度为 0、2.5、5、7.5 mol%的 Er:Ta₂O₅脊形波导,对波导的损耗特性和放大特性进行了表征,并探讨了高浓度铒掺杂对 Er:Ta₂O₅波导传输损耗和放大特性的影响。

1 实验方法

实验过程中,采用 Ta 靶和 Er 靶作为溅射源,利用直流共溅技术在硅基二氧化硅表面沉积了一系列不同原子配比的 Er/Ta 合金薄膜。为了控制 Er 的掺杂浓度,同时保证稳定的溅射功率,实验时通过控制挡板的方位来控制 Er 的溅射速率,达到 Er-Ta 共溅的速率匹配。再通过高温氧化后可获得不同掺杂浓度的硅基 Er:Ta₂O₅薄膜。最终制备了 Er 离子掺杂浓度分别为 0、.5、5、7.5、10 mol%,厚度为 0.5 μm 的 Er:Ta₂O₅薄膜,用于薄膜折射率的表征。

结合光刻工艺,进一步制备了 Er 离子掺杂浓度为 0、2.5、5、7.5mol%的硅基 Er:Ta₂O₅脊形光波导,如图 1 所示。

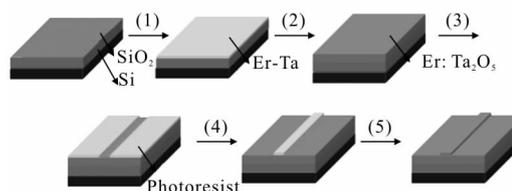


图 1 硅基 Er:Ta₂O₅脊形波导制备过程:(1) Er-Ta 共溅 (2) 950℃高温退火 (3) 在 Er:Ta₂O₅薄膜表面制作光刻胶掩模 (4) Er-Ta 共溅,剥离 (5) 950℃高温退火

Fig.1 Fabrication of Er:Ta₂O₅ ridge waveguide on Si substrate (1) Er-Ta co-sputtering (2) 950℃ annealing treatment (3) Photolithography on Er:Ta₂O₅ film (4) Er-Ta co-sputtering and lift off (5) 950℃ annealing treatment

以掺杂浓度为 2.5 mol% 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形光波导制备过程为例,首先在硅基二氧化硅表面进行 Er-Ta 共溅,Er 的溅射速率为 0.12 Å/s(1 Å/s=0.1 nm),Ta 的溅射速率为 2.4 Å/s;将溅射后的样品在 950 °C 湿氧条件下退火 4 h;重复数次溅射退火步骤后得到掺杂浓度为 2.5 mol%,厚度为 1.1 μm 的 Er:Ta₂O₅ 薄膜。然后使用 RZJ-304 正性光刻胶在薄膜表面制备光刻胶掩模,采用相同溅射速率再次进行 Er-Ta 共溅,溅射后将光刻胶剥离,得到宽 4 μm 的 Er-Ta 混合金属条,最后将样品在 950 °C 湿氧条件下再次退火 4 h,得到掺杂浓度为 2.5 mol% 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导。其截面图形如图 2 所示,脊形波导的高度 H 为 1.8 μm,宽 W 为 4 μm,平板波导的厚度 h 为 1.1 μm。

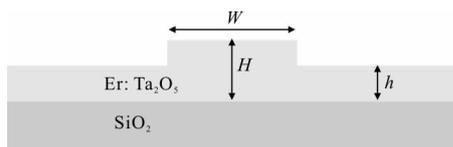


图 2 硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导截面图

Fig.2 Section of Er:Ta₂O₅ ridge waveguide on Si substrate

文中还使用 Er 单靶溅射、退火得到 Er₂O₃ 薄膜,作为参考。实验还包括:对不同掺杂浓度的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导进行损耗特性和放大特性的表征;利用 D/max-2500 X 射线衍射(XRD)分析仪对样品进行晶体结构分析。

2 结果及分析

图 3 是用 Metricon 2010 棱镜耦合仪在 632.8 nm 波长下得到的不同 Er 掺杂浓度 Ta₂O₅ 薄膜的折射率,仪器误差为 ±0.000 5。Er 掺杂浓度分别为 0、2.5、5、7.5、10mol% 的 Ta₂O₅ 薄膜在 632.8 nm 波长下 TE 模式的折射率分别为 2.198 7,2.196 3,2.193 7,2.190 2,2.186 2;TM 模式的折射率分别为 2.198 5、2.195 9、2.193 3、2.189 8、2.186 3。结果表明:Er:Ta₂O₅ 薄膜的折射率随着 Er³⁺掺杂浓度的增加而缓慢降低。降低幅度最大的 10 mol% Er:Ta₂O₅ 薄膜与未掺杂 Ta₂O₅ 薄膜相比,其折射率差为 0.012 (0.001),与同成分 LN 晶体在 632.8 nm 波长下的 e 光折射率 2.202 1 相差 0.015 8 (0.001)。可以看出,

高浓度铒掺杂只能引起 Ta₂O₅ 薄膜折射率的微小改变,因此 Er 掺杂后的 Ta₂O₅ 与 LN 晶体仍可以共同形成良好的波导结构。此外,所制备的 Ta₂O₅ 与 Er:Ta₂O₅ 薄膜,通过棱镜耦合仪得到的 TE 与 TM 模式折射率差异在仪器误差范围内,说明薄膜中不存在各向异性。

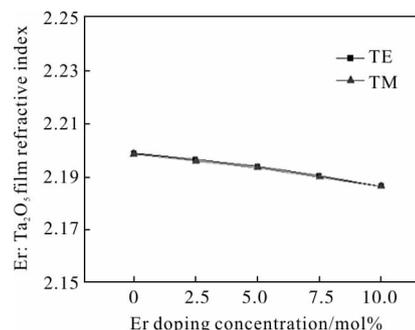


图 3 632.8 nm 波长 Ta₂O₅ 薄膜折射率随 Er 掺杂浓度变化

Fig.3 Dependence of Ta₂O₅ film refractive index on erbium doping concentration at wavelength of 632.8 nm

在显微镜下观察掺杂浓度为 2.5 mol% 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导,可以观察到光滑的薄膜表面和均匀的脊形波导结构,如图 4 所示。利用棱镜耦合仪测量掺杂浓度为 2.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 薄膜在 1 553 nm 波长的折射率为 2.189 5。使用 Rsoft 软件进行模拟,掺杂浓度为 2.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导在 1 550 nm 波长的近场模式为单模,在深度方向模场尺寸为 $W_y=2.1 \mu\text{m}$,在宽度方向模场尺寸为 $W_x=4.4 \mu\text{m}$,该 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的有效折射率为 2.118 7。

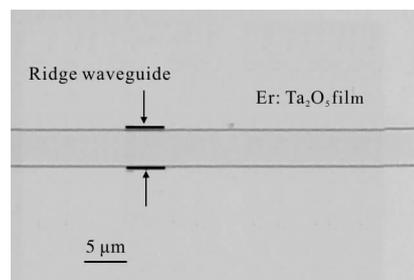


图 4 硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的显微图像

Fig.4 Micrograph of Er:Ta₂O₅ ridge waveguide on Si substrate

将掺杂浓度为 2.5 mol% 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导进行端面抛光,采用光纤透镜作为输入光纤,在 1 550 nm 波长进行近场模式耦合,得到的模式为单模,所制备硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的近场模式如图 5 所示,其深度方向和宽度方向都能很好地被高

斯函数 $A_x \exp(-(x/W_x)^2)$ 拟合, 其深度方向模场尺寸为 $W_y=2 \mu\text{m}$, 宽度方向模场尺寸为 $W_x=4.5 \mu\text{m}$, 与 Rsoft 模拟结果基本吻合。可以认为文中制备的掺杂浓度为 0、2.5、5、7.5 mol% 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形光波导在 1 550 nm 波段都可以单模传输。



图 5 波长 1 550 nm 下 Er:Ta₂O₅ 脊形波导近场模式
Fig.5 Near-field pattern of Er:Ta₂O₅ ridge waveguide on Si substrate at wavelength of 1 550 nm

采用截断法对掺杂浓度为 0、2.5、5、7.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导进行传输损耗测试, 测试波长为 1 600 nm, 在波导长度为 2.5 cm 时, 插入损耗分别为 5.5、7.0、10.5、16.9 dB, 将波导长度减为 2 cm 时, 插入损耗分别为 5.2、6.4、9.2、14.6 dB, 得到掺杂浓度为 0、2.5、5、7.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导在 1 600 nm 下的传输损耗分别为 0.6、1.1、2.5、5.0 dB/cm, 如图 6 所示。从结果中可以很明显地看出, Er:Ta₂O₅ 脊形波导中铒离子的掺杂浓度越高, 波导的传输损耗越大, 呈非线性增加。

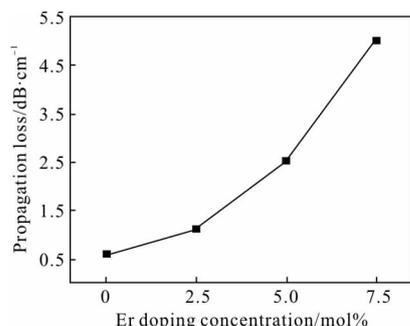


图 6 不同掺杂浓度 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的传输损耗
Fig.6 Dependence of propagation loss on erbium doping concentration in Er:Ta₂O₅ ridge waveguide

为探究高浓度铒掺杂后波导损耗增加的原因, 文中通过 X 射线衍射对 Er₂O₃ 薄膜、以及掺杂浓度为 0、2.5、5、7.5、10mol% 的 Er:Ta₂O₅ 薄膜样品的结晶程度进行定性分析。结果表明: 在 Er₂O₃ 薄膜衍射图样中的 30° 附近位置能找到对应 Er₂O₃(222) 的衍射特征峰, 说明薄膜中 Er 的氧化物主要以 Er₂O₃

(222) 的晶相存在; 而在 Er:Ta₂O₅ 薄膜衍射图样中找不到 Er₂O₃ 的明显衍射峰, 说明薄膜中没有 Er₂O₃ 结晶析出, 认为大部分 Er³⁺ 有可能以固溶的方式存在于 Ta₂O₅ 的晶相中, 实现了对 Ta₂O₅ 薄膜的高浓度铒掺杂。在 Ta₂O₅ 薄膜衍射图样中的 22° 和 29° 附近能找到 Ta₂O₅ 的明显衍射峰, 表明 Ta 的氧化物主要以 Ta₂O₅(001) 和 (200) 晶相存在; 在 Er:Ta₂O₅ 薄膜衍射图样中, 只能观测到 Ta₂O₅(200) 的衍射峰, 且强度低于 Ta₂O₅ 薄膜中 Ta₂O₅(200) 的衍射峰强度, 说明 Er 和 Ta 的共同退火影响了 Ta₂O₅ 的晶化过程, 但 Ta 的氧化物仍能形成以 Ta₂O₅(200) 为主的晶相。

结合 Ta₂O₅ 和 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的传输损耗, 该实验中制备的 Ta₂O₅ 脊形波导传输损耗为 0.6 dB/cm, 远远小于 Rabiei^[9] 等报道的 Ta₂O₅ 波导传输损耗 (8.5 dB/cm), 原因在于该实验中波导的退火温度较高, 退火时通入了湿氧, 有利于 Ta₂O₅ 的形成和结晶, 降低了波导的损耗; 而该实验中制备的掺杂浓度为 2.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导传输损耗为 1.1 dB/cm, 略高于 Subramanian^[12] 等报道的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导传输损耗 (0.65 dB/cm), 而掺杂浓度为 5 mol% 和 7.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导传输损耗分别为 2.5 dB/cm 和 5.0 dB/cm。根据以上实验结果可以推断: Er 和 Ta 共同退火过程中, 高浓度的铒掺杂影响了波导中 Ta₂O₅ 的结晶程度, 当铒掺杂浓度高于 2.5 mol% 时, Ta₂O₅ 的结晶程度变差, 导致波导的传输损耗急剧增加。

最后, 通过 980 nm 激光泵浦下波导中 1 531 nm 小信号光的增益来表征 Er:Ta₂O₅ 波导的放大特性。将一束从可调谐激光器 PH8168F 发出的 1 531 nm 小信号光通过偏振控制器, 再和一束从 980 nm 激光器 EM4-980 发出的泵浦光通过 1 550/980 nm WDM 经光纤透镜耦合入脊形波导中, 实验装置如图 7 所示。在波导的另一端用光纤把输出光导入光谱分析仪 AQ6370D 中进行光强检测。

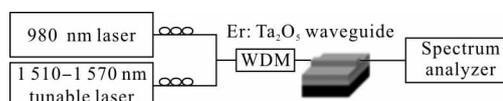


图 7 测试 Er:Ta₂O₅ 脊形波导放大特性的实验装置
Fig.7 Measurement apparatus diagram of the gain of Er:Ta₂O₅ ridge waveguide

输入信号光波长为 1 531 nm, 功率为 0.8 mW, 通过长度为 2 cm 的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导, 在不考虑耦合损耗的情况下, 得到不同掺杂浓度下 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的净增益随 980 nm 抽运功率的变化曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 对于指定掺杂浓度的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导, 随着 980 nm 抽运功率的增加, 增益逐渐趋于饱和, 这是由泵浦光引起的增益饱和。掺杂浓度为 2.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的最大净增益达到了 3.1±0.1 dB/cm, 而掺杂浓度 5 mol% 和 7.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的最大净增益分别为 0.6±0.1 dB/cm 和 -1.2±0.1 dB/cm。这是因为, 尽管在 Er:Ta₂O₅ 脊形波导中, 信号光获得的增益随着铒离子掺杂浓度的增加而提高, 但是这部分增益大部分都用于补偿过高浓度铒掺杂带来的波导损耗。相比之下, 掺杂浓度为 2.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导传输损耗较低, 在泵浦光功率为 2 mW 时开始产生净增益, 最终能够达到 3.1±0.1 dB/cm, 高于 Subramanian^[12] 等人的实验结果 (2.1 dB/cm)。因此, 通过文中所述制备方式得到的硅基 Er:Ta₂O₅ 脊形波导, 其放大特性在掺杂浓度为 2.5 mol% 附近达到最佳效果。

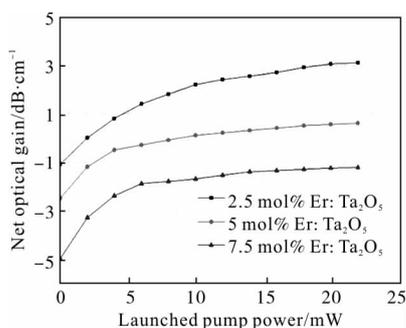


图 8 不同掺杂浓度 Er:Ta₂O₅ 脊形波导净增益与抽运功率的关系
Fig.8 Net gain versus launched pump power with different doping concentrations of Er:Ta₂O₅

3 结论

文中研究了 Er 掺杂浓度对 Er:Ta₂O₅ 薄膜折射率的影响, 结果表明, Er:Ta₂O₅ 薄膜的折射率随着 Er 掺杂浓度的增加有略微的降低, 但不影响与 LN 晶体的折射率匹配。制备了掺杂浓度分别为 0、2.5、5、7.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导, 该波导在 1 550 nm 波长近场模式为单模, 通过截断法得到波导在

1 600 nm 波长的传输损耗分别为 0.6、1.1、2.5、5.0 dB/cm。XRD 图谱表明, Er 和 Ta 的共同退火影响了 Ta₂O₅ 的晶化过程, 但在 Er:Ta₂O₅ 薄膜中仍能形成以 Ta₂O₅(200) 为主的晶相, 在所制备的 Er:Ta₂O₅ 薄膜中未发现 Er³⁺ 结晶析出。值得一提的是, 文中所制备的掺杂浓度为 2.5 mol% 的 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的最大净增益达到了 3.1±0.1 dB/cm。文中提出了一种新的制备 Er:Ta₂O₅ 脊形波导的方法, 这种方法可以在掺杂过程中更加灵活地控制对 Er³⁺ 的掺杂浓度, 为进一步确定 Er:Ta₂O₅ 中铒离子的最佳掺杂浓度, 制备高增益硅基 Er:Ta₂O₅ 波导放大器奠定了基础。

参考文献:

- [1] He Q, Ming M, Wei C, et al. Mesoporous carbon@silicon-silica nanotheranostics for synchronous delivery of insoluble drugs and luminescence imaging[J]. *Biomaterials*, 2012, 33(33): 4392-4402.
- [2] Selvaraja S K, Sleenckx E, Schaekers M, et al. Low-loss amorphous silicon-on-insulator technology for photonic integrated circuitry [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(9): 1767-1770.
- [3] Delheke D, Stihramanian A Z, Cardile P, et al. Silicon photonics for on-chip spectrophotometry [C]//IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2015: 191-192.
- [4] Wang Wei, Feng Qi, Wu Wei, et al. Analysis and simulation of process and performance of silicon avalanche photodiode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 140-144. (in Chinese)
王巍, 冯其, 武透, 等. 硅基 APD 器件的工艺及性能仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 140-144.
- [5] Cava R F, Peck W F, Krajewski J J. Enhancement of the dielectric constant of Ta₂O₅ through substitution with TiO₂[J]. *Nature*, 1995, 377(6546):215-217.
- [6] Zhang Qian, Jiao Hongfei, Cheng Xinbin, et al. Analysis of optical and damage properties for several ultraviolet thin film materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1230-1234. (in Chinese)
张乾, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 几种紫外薄膜材料的光学及损伤特性分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1230-1234.
- [7] Donkov N, Mateev E, Safonov V, et al. Comparative analysis of electrophysical properties of ceramic tantalum

- pentoxide coatings, deposited by electron beam evaporation and magnetron sputtering methods [J]. *Journal of Physics*, 2004, 558: 012036.
- [8] Rabiei P, Ma J, Khan S, et al. Heterogeneous lithium niobate photonics on silicon substrates.[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25573–25581.
- [9] Rabiei P, Ma J, Khan S, et al. Submicron optical waveguides and microring resonators fabricated by selective oxidation of tantalum.[J]. *Optics Express*, 2013, 21(6):6967–6972.
- [10] Tan Na. Influence of phase structure on photoluminescence spectrum of Er/Yb co-doped TiO₂ films [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(3): 249–252. (in Chinese)
- 谭娜. 晶体结构对 Er/Yb 共掺 TiO₂ 薄膜荧光光谱的影响 [J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(3): 249–252.
- [11] Pan Ruikun, Zhang Tianjin, Yan Xiaohei, et al. Advances in research on the materials of optical waveguide amplifier [J]. *Materials Review*, 2005, 19(11): 28–30. (in Chinese)
- 潘瑞琨, 章天金, 严小黑, 等. 光波导放大器用材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2005, 19(11): 28–30.
- [12] Subramanian A Z, Murugan G S, Zervas M N, et al. Spectroscopy, modeling, and performance of Erbium-doped Ta₂O₅, waveguide amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(10): 1455–1462.