

退火对离子注入铌酸锂平面波导中 折射率分布的影响*

卢 菲¹ 孟鸣岐² 李 伟² 王凤翔² 王克明² 邴永红³

(山东大学¹ 光学系,² 物理系,³ 晶体材料研究所 济南 250100)

提要 研究了不同退火条件对氢离子和氦离子注入铌酸锂平面波导中折射率分布的影响。在不同时间和温度下退火处理后用棱镜耦合法测量了两种波导的暗模,并给出退火处理前后两种波导的折射率分布。实验结果表明两种离子的注入均造成了损伤层中正常折射率的减小,而反常折射率在波导区却有所增加。退火处理对损伤层中的正常折射率分布影响较明显,而在 400℃ 以下反常折射率几乎不受退火处理的影响。

关键词 离子注入波导, 铌酸锂, 退火, 折射率分布

铌酸锂(LiNbO_3) 晶体是重要的非线性光学及光折变晶体,广泛应用于光学二次谐波、光学存储、光学相位共轭等光学信息处理的许多方面,在这样的光学材料上形成光波导将能使材料的光学性能与光波导优良的传输特性相结合,提供一种高效小型化的光学系统,因而已成为集成光学研究领域的重要内容。离子注入是制作光波导的重要方法之一,目前采用离子注入的方法已经可以在许多晶体上形成光波导,注入多采用 MeV 氦或氢离子^[1-3]。离子注入形成光波导的原理是:经电场加速的离子在注入材料后,由于在离子注入末端注入离子与晶格原子的碰撞破坏了晶体的有序结构,从而造成这部分晶格的部分非晶化。这层部分非晶化的损伤层具有较低的折射率,使得在损伤层与晶体表面之间传输的光发生全反射,即形成波导结构。离子注入在形成损伤层的同时,由于注入过程中的电子激发也会在波导区产生色心,使得波导的传输损耗增加,因而通常采用注入后退火处理的方法来减小波导的损耗^[4]。但退火处理在消除色心的同时也影响损伤层的折射率分布。本文采用不同的时间及温度对离子注入波导进行退火处理,并对每次退火后的波导模式进行测试,给出相应的折射率分布,由此分析不同退火条件对离子注入 LiNbO_3 波导的影响,并对氦和氢离子注入波导在不同退火条件下的性质进行比较。

1 波导制作及测试

选用山东大学晶体材料研究所生长的 Z 切 LiNbO_3 两片,晶体尺寸为 5 mm × 10 mm × 1.

* 国家教委博士点基金资助项目。

5 mm, 样品的注入面及底面均被抛光, 注入离子分别为氦和氢离子。注入氦离子能量为 2.8 MeV, 剂量为 1.5×10^{16} 离子每平方厘米; 氢离子能量为 2.8 MeV, 剂量为 2×10^{16} 离子每平方厘米。注入过程中离子束均匀扫描样品, 晶体稍作倾斜以避免沟道效应。由 TRIM '96 (Transport of Ion in Matter '96) 对两种离子注入过程进行模拟, 可以估计 2.8 MeV 氦离子注入的波导深度约为 $6.5 \mu\text{m}$; 1.5 MeV 氢离子注入的波导深度约为 $17 \mu\text{m}$ 。

波导测试采用金红石棱镜耦合法。光束入射到金红石棱镜上折射后经耦合点进入波导区, 反射部分将给出暗线分布即波导暗模。逐个测量暗模对应的角度可计算出各导模对应的有效折射率。通过调节入射光的偏振方向可分别测量波导的 TE 和 TM 暗模, 由这两种暗模的测量可相应给出波导区的正常和反常折射率分布。采用 He-Ne 激光作为光源, 实验装置见图 1。

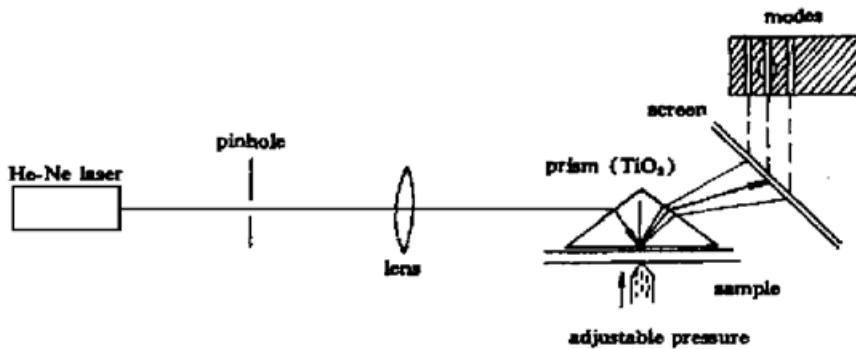


图 1 棱镜(TiO₂) 耦合的实验装置
Fig.1 Experimental setup of the prism (TiO₂) coupling method

2 实验结果及讨论

注入后在未退火之前采用棱镜耦合法测量两种波导的暗模, 发现在氦离子注入波导中可观察到 15 条 TE 暗模和 3 条 TM 暗模, 但在氢离子注入的波导中只能观察到 12 条分布很密的 TE 暗模。分别对两个样品在 200℃ 进行退火处理, 退火时间分别为 60, 150 和 240 min, 每次退火后测量波导的暗模。由于测量是在相同条件下进行的, 测量结果具有较好的重复性。采用 IWKB 及 PIPR^[5,6] 方法, 在图 2 和图 3 中分别给出了氦离子注入和氢离子注入波导中的正常折射率在退火前后的分布。其中虚线和实线是采用最小二乘法对实验点拟合后给出的折射率分布曲线, 计算值与实验值的误差一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$; 实心与空心圆分别为实验点, 直虚线为衬底晶体的正常折射率。由两图可看出氢离子注入在损伤层造成的折射率减小约为晶体折

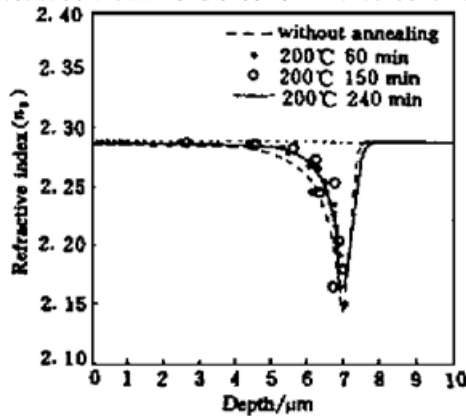


图 2 氦离子注入波导在 200℃ 退火后的正常折射率分布

Fig. 2 The ordinary refractive index profiles of a He ions implanted waveguide after 200℃ annealing treatment

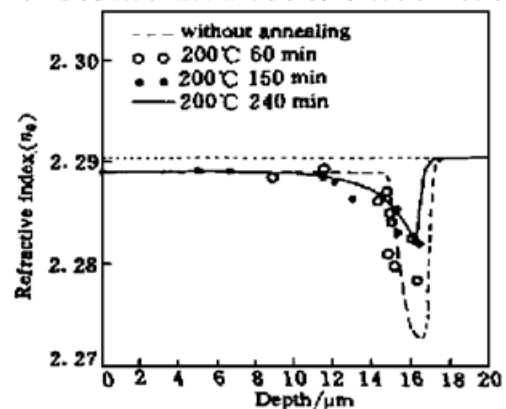


图 3 氢离子注入波导在 200℃ 退火后的正常折射率分布

Fig. 3 The ordinary refractive index profiles of a H ions implanted waveguide after 200℃ annealing treatment

射率的 6%。而氢离子注入在损伤层造成的折射率减小仅为晶体折射率的 0.8%, 约为氦离子的 1/8。图 2 和图 3 表明 200℃退火在消除色心的同时对氦离子注入波导损伤层中的折射率分布影响不大, 但对氢离子注入波导的正常折射率分布影响较明显, 折射率位垒随退火时间的延长逐渐降低。在退火 150 min 后两种波导的正常折射率分布随退火时间的变化都很小, 说明在退火温度为 200℃的条件下, 退火时间达到 2 h 后损伤层的折射率分布已基本稳定。此后我们对两种波导再在 300℃, 350℃, 385℃, 420℃, 450℃分别退火 30 和 60 min, 退火后的折射率分

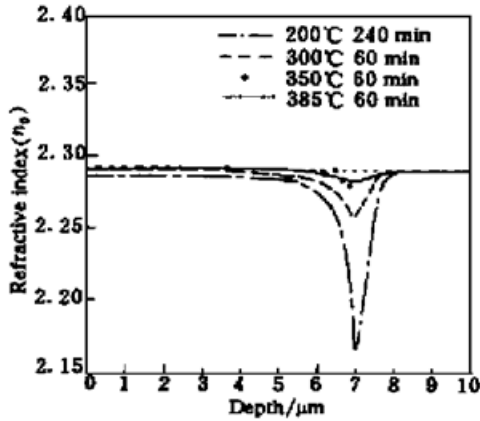


图 4 氦离子注入波导在 300℃, 350℃, 385℃退火后的正常折射率分布

Fig. 4 The ordinary refractive index profiles of a He ions implanted waveguide after 300℃, 350℃, 385℃ annealing treatment

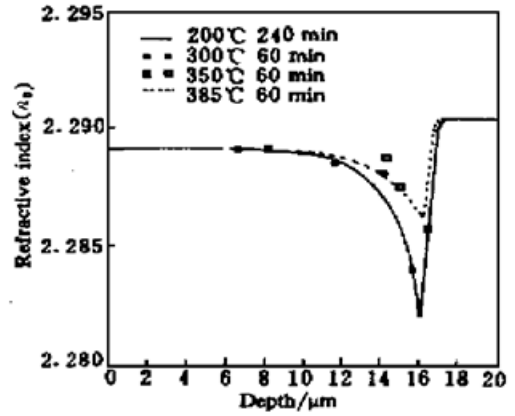


图 5 氢离子注入波导在 300℃, 350℃, 385℃退火后的正常折射率分布

Fig. 5 The ordinary refractive index profiles of a H ions implanted waveguide after 300℃, 350℃, 385℃ annealing treatment

布分别见图 4 和图 5。由图 4 和图 5 可以看出, 当退火温度超过 300℃时两种波导损伤层中的折射率分布都有明显的变化, 损伤层的位垒明显降低, 这表明退火温度达到或超过 300℃时, 损伤层中注入离子的扩散导致了晶体的重结晶。由于折射率位垒高度的降低, 可观察到的 TE 暗模也明显减小。氢离子注入波导在多次退火处理后, 波导区的吸收显著减小, 因而在 300℃退火 30 min 后也观察到了 3 条 TM 暗模。当 420℃退火 60 min 后两种波导中只能观察到 1~2 条很弱的 TE 暗模。450℃退火 60 min 后已观察不到暗模, 说明此时损伤层中的折射率已基本与衬底折射率相同, 两个样品中已不再有损伤层与晶体表面之间构成的波导结构。

反常折射率随退火时间和温度的变化与正常折射率有明显不同。由测量的 TM 暗模计算出的波导中的反常折射率分布显示在波导区晶体的反常折射率是增加的, 氦离子注入波导中反常折射率增加约为衬底折射率的 0.2%。图 6 给出了几次退火处理后氦离子注入波导中的反常折射率分布, 其中实线是对 300℃退火 30 min 后实验点的拟合曲线, 虚直线为晶体衬底折射率。由图 6 可以看出波导中的反常折射率在不同条件下的退火处理后几乎保持不变, 即反常折射率基

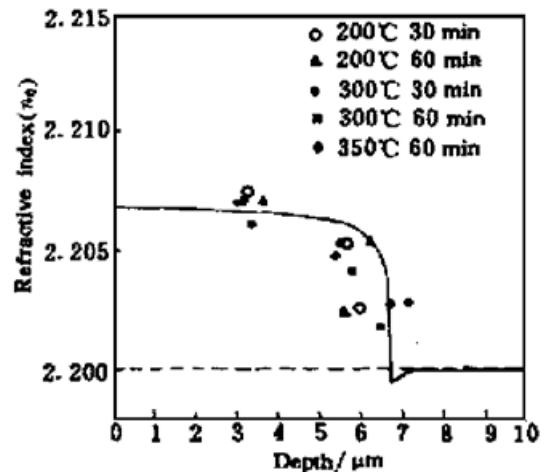


图 6 退火后氦离子注入波导中的反常折射率分布
Fig. 6 The extraordinary refractive index profiles of a He ions implanted waveguide after annealing treatment

本不随损伤层的变化而改变。这说明在氦离子注入铌酸锂平面波导中所观察到的 TM 导模不是来自损伤层与晶体表面形成的波导,而是来自波导区折射率增加所形成的波导。氦离子注入波导在退火处理后的反常折射率分布与氦离子注入波导相似,但波导区的反常折射率增加只为衬底折射率的 0.1%。当退火温度达到 420°C 时仍可以观察到一条很弱的 TM 暗模,由此计算出的反常折射率已接近衬底的反常折射率,这说明超过 420°C 时退火处理已可以基本消除注入离子对晶格结构的影响。

致谢 此项研究得到了北京大学重离子物理实验室和山东大学晶体材料国家重点实验室开放课题的资助,对北京大学重离子物理实验室的沈定予、王雪梅等老师以及山东大学物理系离子束研究室的诸位老师在实验中所给予的帮助表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 P. D. Townsend, P. I. Chandler, L. Zhang. Optical effects of ion implantation. Printed in Great Britain at the University Press, Cambridge. Published by the Press Syndicate of University of Cambridge. 1994, 151~ 222
- 2 N. Hamelin, G. Lifante, P. J. Chandler *et al.*. Second harmonic generation in ion implanted lithium niobate planar waveguides. *Journal of Modern Optics*, 1994, **41**(7) : 1339~ 1348
- 3 F. P. Strokindl, P. Gunter, Ch. Buchal *et al.*. Formation of optical waveguides in KNbO₃ by low dose MeV He⁺ implantation. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(1) : 84~ 88
- 4 M. Rottschalk, T. Bachmann, St. Steinberg *et al.*. Annealed proton-implanted channel waveguides in LiNbO₃ and their photorefractive properties. *Opt. Commun.*, 1994, **106**(4~ 6) : 187~ 197
- 5 Z. Zhuang, H. Ming, M. Xiaodong *et al.*. A precise method for measurement of the waveguide parameters—M line spectroscopy. *J. Synthetic Crystal*, 1994, **23** : 88
- 6 D. Fluck, D. H. Jundt, P. Gunter *et al.*. Modeling of refractive index profiles of He⁺ ion-implanted KNbO₃ waveguides based on the irradiation parameters. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(10) : 6023~ 6031

The Influence of Annealing Treatment on the Refractive Index Profiles of Ion-implanted Lithium Niobate Planar Waveguides

Lu Fei¹ Meng Mingqi² Li Wei²

Wang Fengxiang² Wang Keming² Bing Yonghong³

(¹Department of Optics, ²Department of Physics, ³Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract We have studied the influence of different annealing conditions on refractive index profiles of He and H ions implanted lithium niobate planar waveguides. After annealing treatment with different times and different temperatures the dark modes of both kinds of waveguides are measured by using a prism coupling method. The refractive index profiles of both waveguides before and after annealing treatment are given. The results show that both He and H ions implantations result in the decrease of the ordinary refractive index in barriers, but in the region of guides the extraordinary refractive index increases. Annealing treatment influences the ordinary refractive index profiles obviously, but under 400°C the annealing treatment almost has no influence on the extraordinary refractive index profiles.

Key words ion-implanted waveguide, lithium niobate, annealing treatment, refractive index profile