

纳米压印工艺制作 DFB 激光器的可靠性研究

赵建宜¹ 陈鑫¹ 周宁² 曹明德² 黄晓东² 刘文^{1,3}

¹ 华中科技大学光学与电子信息学院光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

² 光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074; ³ 中国科学技术大学先进技术研究院, 安徽 合肥 230026

摘要 利用光荧光谱及 X 射线双晶衍射研究了纳米压印工艺对半导体外延材料的影响。利用纳米压印工艺制作了 1.55 μm 通信用分布反馈(DFB)半导体激光器,并对制作的器件进行了老化寿命试验。实验结果表明,采用软模版压印并不会劣化半导体外延材料的特性。制作的半导体激光器预期寿命与普通双光束曝光法制得的器件预期相当,表明纳米压印工艺制作半导体激光器是可靠的。

关键词 集成光学;纳米压印;半导体激光器;单片光子集成电路

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0206003

Reliability Study of DFB Laser Fabricated by Nanoimprint Technology

Zhao Jianyi¹ Chen Xin¹ Zhou Ning² Cao Mingde² Huang Xiaodong² Liu Wen^{1,3}

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² Accelink Technologies Company, Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

³ Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The influence of nanoimprint technology on the epitaxial materials is analyzed with the use of photoluminescence and X-ray diffraction. 1.55 μm distributed feedback (DFB) laser diodes for optical fiber communication are fabricated using nanoimprint technology, and then accelerating life test is applied to these devices. Results show that soft stamp nanoimprint will not lead to a serious degradation of the epitaxial materials. The lifetimes of the lasers fabricated by nanoimprint and exposure method are on the same order of magnitude, indicating that nanoimprint technology is safe and reliable to the fabrication of lasers.

Key words integrated optics; nanoimprint; semiconductor laser; monolithic photonic integrated circuit

OCIS codes 060.1810; 130.3120; 130.5990; 050.2770

1 引言

分布反馈(DFB)半导体激光器是目前光通信系统中广泛使用的光源。由于采用了内藏布拉格光栅选择工作波长,使其谐振腔的损耗有了明显的波长依赖性,因此在单色性及稳定性方面优于一般的法布里-珀罗(FP)腔激光器^[1]。由于光栅尺度一般在亚微米量级,典型周期为 240 nm,因此很难用传统光刻技术制作。目前 DFB 激光器常用的光栅制作技术为双光束全息曝光法,该方法可以快速低成本地制作均匀光栅。但是用均匀光栅制作的 DFB 激

光器在布拉格阻带边上存在两个对称的激射模,一般通过在两侧解离面上一边镀高反射膜,一边镀低反射膜的方式消除模式简并^[2]。但是解离面相对光栅存在一个随机相位,造成激光器腔长不能恰好是光栅长度的半整数倍,在某些特定相位范围内,简并依然不能有效消除,限制了均匀光栅 DFB 激光器单模成品率。随后双面镀增透膜的四分之一相移激光器的方法被提出来以解决这个问题^[3]。由于光栅存在四分之一相移,使激射模恰好处于布拉格波长处,模式简并被消除,激光器单模成品率大大提高。但

收稿日期: 2013-07-19; **收到修改稿日期:** 2013-09-13

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603)、国家 863 计划(2011AA010304)、武汉市科技晨光计划(2013070104010033)

作者简介: 赵建宜(1986—),男,博士研究生,主要从事光电子器件设计与制造方面的研究。

E-mail: Jianyi.zhao@accelink.com

导师简介: 刘文(1960—),男,博士,教授级高工,主要从事光通信系统及器件方面的研究。E-mail: wen.liu@wri.com

是四分之一相移激光器由于相移的引入,使该处光场不连续,导致光子在该处集中,产生了所谓空间烧孔效应,限制了其高功率运用。为解决空间烧孔效应,DFB激光器设计者在20世纪90年代初提出了各式各样的解决方案,主要集中在四个方面:1)在光栅中引入多个相移,如两相移^[4]、三相移^[5-6]、五相移等;2)引入分布相移即所谓变节距光栅^[7];3)分布耦合系数^[8];4)增益耦合光栅^[9]。以上四种方案中前三种既可以单独使用也可以组合使用,如双变节距光栅^[10]、三变节距光栅^[11]和分布相移分布耦合系数光栅^[12],通过排列组合可以延伸出各种形式的光栅。面对这些复杂光栅,双光束曝光的方式制作效果往往不理想。而电子束光刻(EBL)生产效率太低,不适合工业级批量制造时应用。因此,由于加工手段的限制,此类高性能复杂光栅DFB激光器的研究与应用在相当长一段时间内停滞不前,阻碍了DFB激光器的发展。

1995年,Chou等^[13]发明了纳米压印光刻(NIL)技术,将印章技术成功地运用于纳米级图形制作中。目前,几乎所有的光电子器件都可采用纳米压印技术制作出来^[14-17],这其中光栅作为光学基础器件,其线宽更是已经作为衡量纳米压印技术进步的标志之一。将纳米压印制作技术应用于DFB半导体激光器中^[18],可以获得和电子束光刻近似的加工能力,同时极大地提高产率、降低成本。Zhao等^[18]开展了纳米压印制作半导体激光器的研究,先后研制出基于纳米压印的16波长密集波分复用(DWDM)阵列激光器、四通道粗波分复用(CWDM)阵列激光器、多相移激光器^[19]等,验证了纳米压印技术在制作复杂光栅DFB激光器中的独特优势。

不同于普通光刻技术,纳米压印技术属于接触式工艺,需要依靠机械接触,挤压光刻胶变形转移图形,因此机械损伤是纳米压印技术不同于普通光刻技术且难以回避的问题。通过光荧光谱(PL)及X射线双晶衍射(XRD)分析,对纳米压印造成的DFB激光器量子阱外延材料的退化进行了分析。对本课题组用纳米压印技术制作的 $1.55\ \mu\text{m}$ 通信用半导体激光器的可靠性进行了初步分析。结果表明,纳米压印工艺制作的DFB激光器实际预期寿命大于 $1\times 10^6\ \text{h}$,满足半导体激光器对可靠性的要求。

2 实 验

实验样品为普通商用DFB激光器一次外延片。纳米压印实施前首先在一次外延片上利用相对位置

坐标标记六个测试点,如图1所示,利用XRD测试了外延片上这六个点的双晶衍射图样。同时在外延片中心标记了 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 的正方形区域,在该区域划分了25个格点,依次测试了该区域每个格点处的光荧光谱。

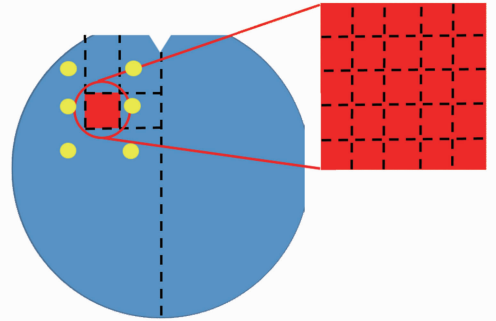


图1 测试位置示意图

Fig. 1 Schematic of test position

完成测试以后,再在一次外延片上利用纳米压印工艺制作光栅,采用的是软模版热辅助紫外(UV)压印技术。传统的硬压印技术直接用硬质模板压印衬底,容易因为杂质而损坏图形,严重时甚至会损坏模版及衬底。而软模版压印利用有机高分子聚合物作为中间介质转移图形,避免了硬质的模版与衬底的直接接触,可以有效地提高压印质量,避免模版及衬底的损伤。具体的工艺过程如图2所示。

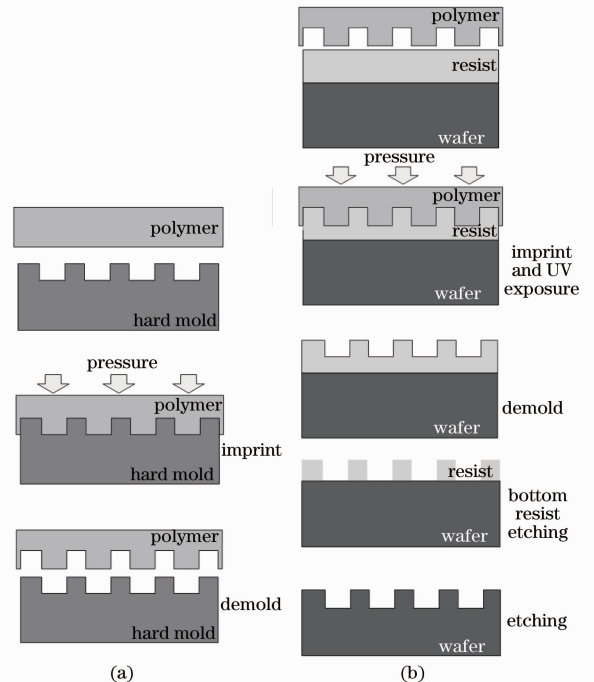


图2 压印流程。(a)软模板制作;(b)光栅压印
Fig. 2 Nanoimprint process. Fabrication of (a) soft stamp and (b) grating

首先使用硬质模版通过热压印技术将图形转移到高分子聚合物软模板上。热压印温度为 120 °C，高于软模版的玻璃化转换温度，压印压强为 15 bar (1 bar=10⁵ Pa)，如图 2(a)所示。然后以转移了图形的软模板作为正式的压印模版。压印前，首先需要仔细清洗外延片，然后旋涂 190 nm, STU-220 纳米压印胶。旋涂的压印胶厚度要略大于模版图形深度。将软模版代替硬质母模版压印至衬底上，将图形转移至压印胶中，如图 2(b)所示。压印温度为 70 °C，大于压印胶的玻璃化温度，小于软模版的玻璃化温度，压强为 15 bar。完成压印以后，将外延片解离成对称两片，将其中标记测试过的半片外延片，去除压印胶，仔细清洗后，做第二次 XRD 及 PL 测试。另外半片首先用反应离子(RIE)刻蚀去除压印底胶，再利用感应耦合(ICP)RIE 技术刻蚀外延片，制作光栅。完成光栅

刻蚀以后，洗去外延片上的压印胶，进行第二次外延生长，完成 DFB 激光器全结构生长。

对比了纳米压印技术与双光束曝光法制作的光栅，如图 3 所示。全息曝光法采用空间光路，受环境影响大。平台震动、空气中的颗粒、基片表面的不平整等都会导致干涉条纹在光栅边缘处不光滑，出现抖动，最终使光栅质量下降。而纳米压印技术采用真空环境、机械压印，受环境影响非常小，光栅质量几乎完全取决于模板。而模板通常使用电子束曝光 (EBL) 制作，可以达到相当高的质量。一般而言，边缘粗糙的光栅更容易引起光的散射，光栅的高次谐波也会更多，使 DFB 激光器光谱线宽展宽。而采用纳米压印技术，可以显著提高 DFB 激光器光栅质量，显著降低 DFB 激光器的线宽。

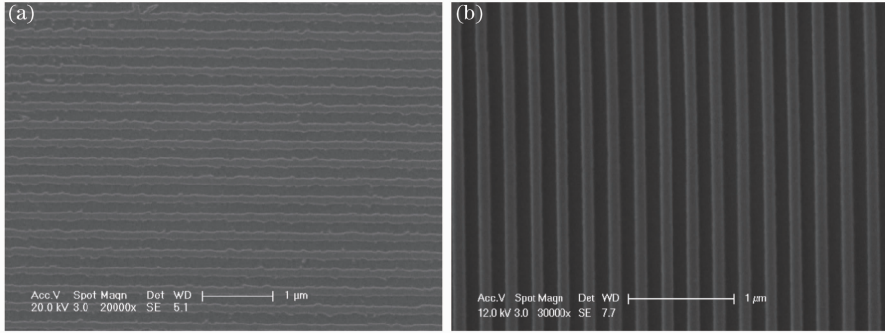


图 3 (a)全息曝光法制作的光栅；(b)纳米压印技术制作的光栅

Fig. 3 (a) Grating fabricated through holographic technique; (b) grating fabricated through nanoimprint technology

在二次外延片上制成 DFB 激光器。制成的器件随机选出 10 个管芯做 72 h 老化测试，通过老化测试筛选的管芯继续做寿命试验。

3 结果及分析

首先对比了压印前后一次外延片六个测试点的 XRD 图谱，如图 4 所示。结果表明，压印前后的衍射图样中，卫星峰与 InP 衬底峰间距、卫星峰间距均无明显变化，说明压印过程中施加的应力并没有影响量子阱本身的应变情况，量子阱各层组分、应变在压印前后没有明显变化。并且超晶格卫星峰强度及宽度也没有下降和展宽，说明压印的高压过程并没有在晶格中引入位错，不会影响量子阱材料本身的组分均匀性及弛豫均匀性。

为了更进一步测试压印过程对量子阱材料发光性能的影响，同时测试了压印前后的 PL 光谱。图 5(a), (b)为压印前后 PL 光谱峰位随位置的变化图，可知峰位变化在 ±2 nm 以内。这主要是由于测

试中，光谱仪分辨率有限，在 PL 光谱峰值处出现了较大的抖动，导致测量本身存在一定的误差。该误差在纳米量级，如图 5(c)所示，因此从 PL 光谱峰位无法完全得到压印对量子阱材料 PL 峰值的影响。即使有影响，这个影响也是很小的，不至于引起后续激光器特性的大幅度改变。

图 6 为压印前后 PL 强度随位置的变化，测试前首先用标准外延片对测试系统激光器强度定标，测试时激光器强度均以测量标准片 PL 强度为 1 作为实际测试时激光器的强度。可知 PL 强度略有降低，但是变化率小于 10%，说明实验过程对外延片的 PL 强度存在一定的影响。为进一步验证该影响，对比了 PL 谱压印前后的半峰全宽(FWHM)，如图 7 所示。可以看出，PL 谱半峰全宽并不存在大的展宽，压印前后外延片 PL 的平均半峰全宽均为 43.4 mV，因此可认为压印对 PL 半峰全宽不存在明显的劣化。同时也说明前述 PL 强度的降低，并不完全来自于压印，可能在外延片清洗过程中，对外延片表面造成

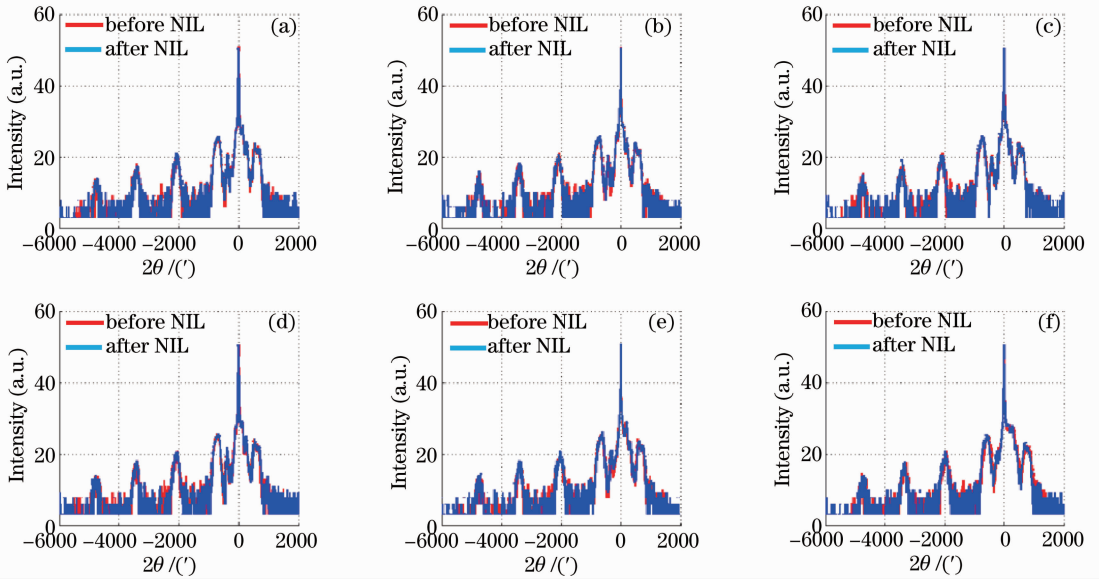


图 4 六个测试点的 XRD 光谱。(a)测试点 1；(b)测试点 2；(c)测试点 3；(d)测试点 4；(e)测试点 5；(f)测试点 6
Fig. 4 XRD spectra of the six test points. (a) Test point 1; (b) test point 2; (c) test point 3; (d) test point 4; (e) test point 5; (f) test point 6

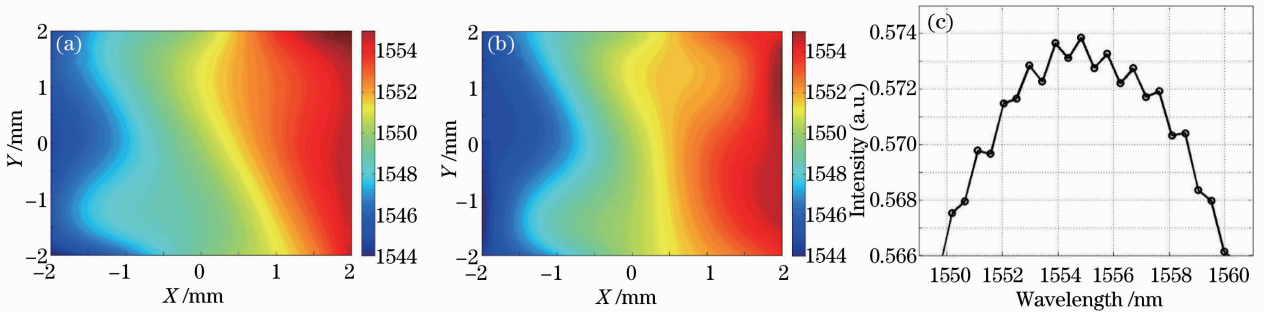


图 5 (a) 光荧光谱在压印前的峰值随位置变化；(b) 压印后的峰值随位置变化；(c) 光荧光谱
Fig. 5 (a) PL peak differences spatial distribution before NIL process; (b) PL peak differences spatial distribution after NIL process; (c) detailed PL spectrum

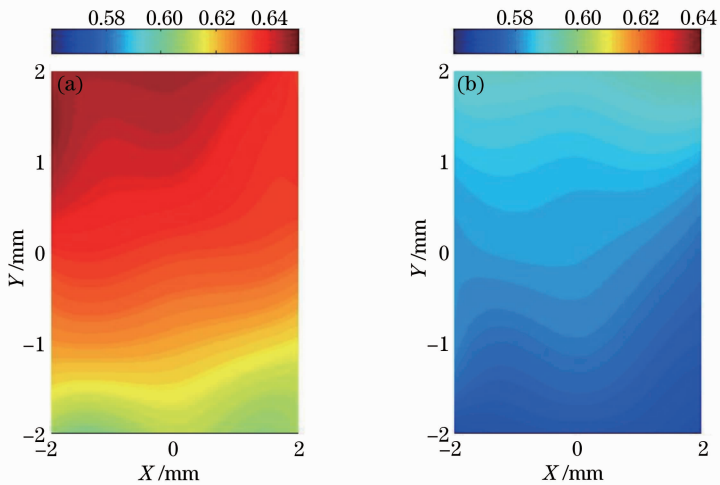


图 6 光荧光谱强度随位置分布。(a) 压印前；(b) 压印后
Fig. 6 PL strength spatial distribution. (a) Before NIL; (b) after NIL

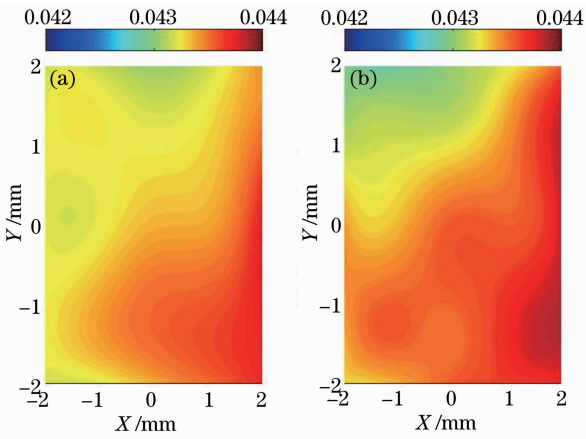
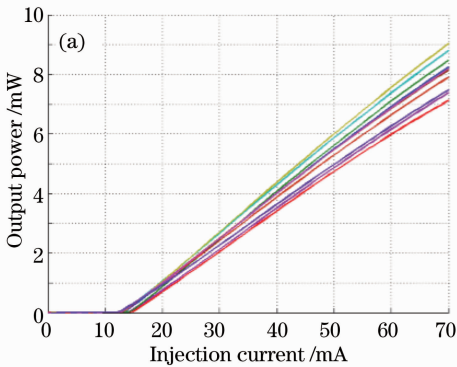


图 7 光荧光谱半峰全宽随位置变化。(a)压印前；(b)压印后

Fig. 7 PL FWHM spatial distribution. (a) Before NIL; (b) after NIL

了一定损伤,致使光荧光在出射时受到衰减,导致 PL 测试降低。因此可认为 PL 半峰全宽更能说明压印前后外延片质量的变化。

综合 XRD 及 PL 测试,认为压印工艺不会导致严重的外延片劣化,工艺上是安全的。为进一步减小压印过程中过高的压印压强对衬底可能的损伤,对工艺进行了改进,如图 8 所示。减小压印过程中的最大压强,同时增大压印过程中提高压印胶填充



能力的压强差,在不劣化压印成型效果的情况下,尽可能使用低的最高压强。这样可以进一步减轻压印工艺对外延片的影响。

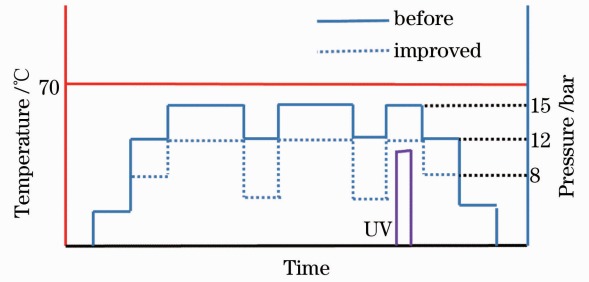


图 8 光栅压印中温度,压强变化曲线
Fig. 8 Variation of temperature and pressure in grating imprint

为进一步验证压印工艺的可靠性,对压印工艺制作的激光器进行了老化及寿命测试^[20]。随机挑选了 10 支纳米压印制作管芯,首先测试了管芯的功率-电流 ($P-I$) 曲线,如图 9(a) 所示,器件阈值为 10~15 mA。相应的光谱曲线如图 9(b) 所示,由于采用了四分之一相移,只要激光器激射,均为单模,光谱质量较好,边模抑制比均达到了 45 dB。在制作模版时,阵列器件各个管芯光栅周期稍有不同,相邻管芯激射波长间隔为 1.6 nm 左右。

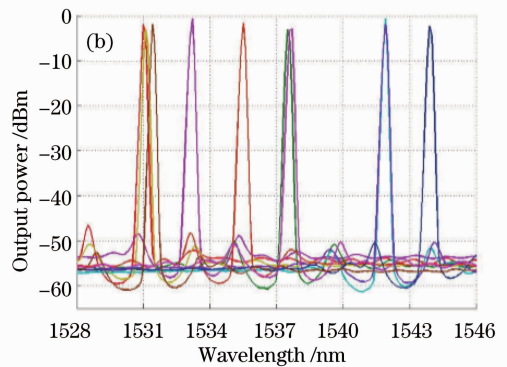


图 9 10 支管芯 $P-I$ 曲线
Fig. 9 $P-I$ curves of the ten lasers

然后对这 10 支管芯在 100 °C, 100 mA 的情况下进行了 72 h 老化测试,阈值变化率在 5% 以内,符合老化筛选合格标准。在老化筛选的基础上进行了半导体激光器的寿命测试。测试半导体激光器的寿命时通常有两种工作方式:规定器件恒定电流工作和规定器件恒定功率工作。这两种方案各有利弊,前一种方案不需要闭环控制,测试系统简单方便,后一种方案更接近激光器实际使用时的工作模式,但需要闭环控制,测试系统较为复杂。在此选用前一

种工作方式,在 100 °C, 100 mA 的情况下,进行了 5000 h 的长时间老化,测试了阈值随老化时间的变化,在这里阈值均在室温 25 °C 下测得。测试曲线如图 10(a) 所示。为了更加真实地反映压印工艺对寿命的影响,在同一次流片中也用双光束全息曝光法制作了一批激光器,除光栅工艺不同外,其余工艺均一样。类似地,随机抽取 10 支管芯,进行了相同条件下的老化及寿命测试,测试曲线如图 10(b) 所示。

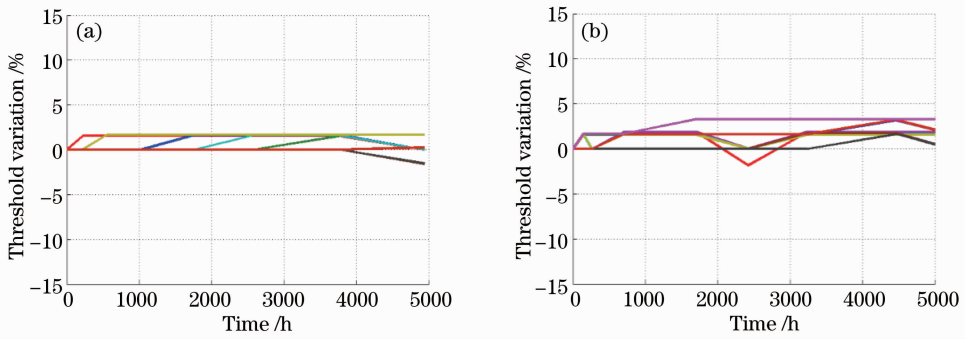


图 10 阈值变化率随老化时间的变化。(a)压印制作的激光器；(b)曝光法制作的激光器
Fig. 10 Threshold variation versus test time. (a) Lasers fabricated through NIL; (b) lasers fabricated through exposure method

一般认为,在激光器阈值随时间的变化中,可进行线性拟合、指数拟合等多种情况。在此选取线性拟合方式,取激光器阈值变化率超过 50% 作为激光器失效的判据,推算得到 10 只管芯的寿命及管芯失效率随时间的分布,如图 11 所示。使用指数模型拟合测试数据,可以知管芯失效率与指数模型拟合曲线符合得比较好。但是由于测试管芯数目有限,测得的数据量不够多,拟合的曲线尚不足信,因此不能采用该拟合曲线得出 50% 失效率对应的寿命。在这里采用的是这 10 支管芯的中值寿命作为这一批次管芯预期寿命。得到在加速老化的情况下,压印工艺制作的激光器预期寿命为 2.72×10^5 h,双光束曝光法制作的激光器预期寿命为 2.39×10^5 h。在单一缓慢退化方式下,加速寿命试验的阿累尼乌斯方程为^[20]

$$\frac{t_2}{t_1} = \exp\left[\frac{E_a}{K}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right], \quad (1)$$

式中 E_a 为激活能, K 为玻尔兹曼常数, T_1, T_2 为开氏测试温度, t_1, t_2 分别为 T_1, T_2 温度下器件寿命。在这里激活能是未知量,对于 InGaAsP/InP 体系的激光器,该值在 0.7~0.2 eV 之间。通常可以采用

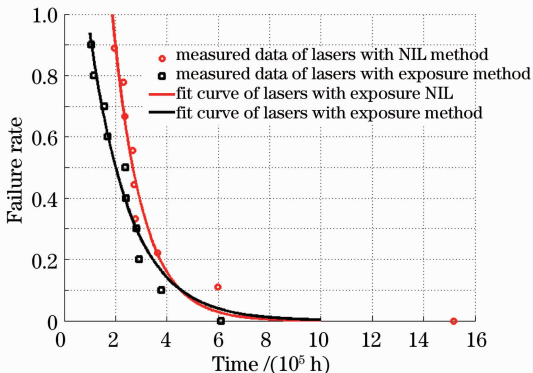


图 11 管芯失效率随时间的变化
Fig. 11 Failure rate versus time

两种不同温度点下的老化试验求出该值,但是为了节省测试设备,只用了一个测试温度点,而激活能取最严格的值,即 0.2 eV。外推得到压印制作的激光器室温下寿命为 1.33×10^6 h,双光束曝光法制作的激光器室温下寿命为 1.17×10^6 h,两者处于一个数量级,远大于普通商用通信激光器 20 年(约 2×10^5 h)的寿命要求。因此可认为压印制作的激光器寿命相比于传统光刻工艺没有退化,满足商用通信激光器对寿命的要求。

4 结 论

利用 XRD 及 PL 两种测试手段对软模版压印前后的 DFB 激光器外延片进行了检测。结果表明,XRD 光谱在压印前后强度没有下降,各个卫星峰位置没有移动,卫星峰半峰全宽也没有展宽。PL 光谱在压印前后强度略微降低,而半峰全宽没有增加,分析强度的降低可能的原因为压印后的清洗对外延片表面造成的损伤。最后对压印制作的激光器与光束曝光法制作的激光器进行了老化寿命测试。结果表明,两者预期寿命相当,均达到了 1×10^6 h,满足商用 DFB 激光器的寿命要求。压印工艺对激光器寿命无明显的影响。

参 考 文 献

- 1 W Steeifer. Coupled wave analysis DFB and DBR laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1977, 13(4): 134-141.
- 2 Peter P G Mols, P I Kuindersma, W V Es-Spiekman, et al. Yield and device characteristics of DFB lasers: statistics and novel coating design in theory and experiment [J]. IEEE J Quantum Electron, 1989, 25(6): 1303-1313.
- 3 S Akiba, M Usami, K Utaka. 1.5 μm $\lambda/4$ -shifted InGaAsP/InP DFB lasers [J]. J Lightwave Technol, 1987, 5(11): 1564-1573.
- 4 J Kinoshita, K Matsumoto. Yield analysis of SLM DFB lasers with an axially-flattened internal field [J]. IEEE J Quantum Electron, 1989, 25(6): 1324-1332.

- 5 G P Agrawal, J E Geusic, P J Anthony. Distributed feedback lasers with multiple phase-shift regions [J]. Appl Phys Lett, 1988, 53(3): 178-179.
- 6 H G Shiraz, B S K Lo, C Y J Chu. Structural dependence of three-phase-shift distributed feedback semiconductor laser diodes at threshold using the transfer matrix method [J]. Semicond Sci Technol, 1994, 9(5): 1126-1132.
- 7 G Chen, S R Seshadri, F Cerrina. Distributed feedback lasers with distributed phase-shift structure [J]. Appl Phys Lett, 1992, 60(21): 2586-2588.
- 8 G Morthier, R Baets. Design of index-coupled DFB laser with reduced longitudinal spatial hole burning [J]. J Lightwave Technol, 1991, 9(10): 1305-1313.
- 9 Y Luo, Y Nakano, K Tada. Purely gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers [J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(17): 1620-1622.
- 10 Shi Yuechun, Tu Xinghua, Li Simin, *et al.*. Numerical study of three phase shifts and dual corrugation pitch modulated CCPM, DFB semiconductor laser based on reconstruction equivalent chirp technology [J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(19): 1944-1950.
施跃春, 涂兴华, 李思敏, 等. 基于重构-等效啁啾技术的三相移和双周期调制的分布反馈半导体激光器的数值研究 [J]. 科学通报, 2010, 55(19): 1944-1950.
- 11 Q Zuo, Jianyi Zhao, Z Wang, *et al.*. High performance asymmetric three corrugation pitch modulated DFB lasers suitable for stable single longitudinal mode operation [J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3: 57-60.
- 12 Thierry Fessant. Influence of a nonuniform coupling coefficient on the static and large signal dynamic behavior of Bragg-detuned DFB lasers [J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(3): 419-427.
- 13 S Y Chou, P R Krauss, P J Renstrom. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers [J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(21): 3114-3116.
- 14 H Hauser, B Michl, S Schwarzkopf, *et al.*. Honeycomb texturing of silicon via nanoimprint lithography for solar cell applications [J]. IEEE J Photovoltaics, 2012, 2(2): 114-122.
- 15 K Haring, J Viheriälä, M R Viljanen, *et al.*. Laterally-coupled distributed feedback InGaSb/GaSb diode lasers fabricated by nanoimprint lithography [J]. Electron Lett, 2012, 46(16): 1146-1147.
- 16 C Y Chao, L J Guo. Polymer microring resonators fabricated by nanoimprint technique [J]. J Vac Sci Technol B, 2002, 20(6): 2862-2867.
- 17 S Buzzi, F Robin, V Callegari, *et al.*. Metal direct nanoimprinting for photonics [J]. Microelectronic Engineering, 2008, 85(2): 419-424.
- 18 J Zhao, X Chen, N Zhou, *et al.*. Experimental demonstration of a 16-channel DFB laser array based on nanoimprint technology [J]. Semiconductor Science and Technology, 2013, 28(5): 055015.
- 19 Z Qiang, Zhao Jianyi, Chen Xin, *et al.*. A multiple phase-shifted distributed feedback (DFB) laser fabricated by nanoimprint lithography [J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(5): 054205.
- 20 Ding Ying, Wang Lufeng, Zhao Lingjuan, *et al.*. Reliability analysis of 1.55 μm DFB laser diodes for optical fiber communication [J]. J Optoelectronics • Laser, 2004, 15(4): 393-396.
丁颖, 王鲁峰, 赵玲娟, 等. 用于光纤通信的 1.55 μm DFB 激光器的可靠性分析 [J]. 光电子 • 激光, 2004, 15(4): 393-396.

栏目编辑: 张 腾