

1.3 μm DH-SLD 的性能与工作电流和温度的关系*

韦文生^{1,2} 张春熹² 马 静² 周克足² 米剑² 王天民¹

(¹ 北京航空航天大学理学院材料物理与化学研究中心, 北京, 100083)

(² 北京航空航天大学光电技术研究所, 北京, 100083)

摘 要 全面地测试并分析了掩埋双异质结型超辐射激光二极管模块的输出光功率、光谱和消光比与注入电流及温度的变化关系。得到: DH-SLD 显示了软阈值特性, 其输出光功率随注入电流的增大而增加, 随管芯温度的升高而降低。温度不变时, 当注入电流小于 110mA(约)时, 峰值波长随注入电流的增大而减小, 当注入电流大于 110mA(约)时, 峰值波长随注入电流的增大有所增大; 峰值波长随温度升高而增大。3dB 带宽随注入电流的增大而减小, 随温度的升高而略有增大。消光比随注入电流和温度的升高而变化。

关键词 超辐射激光二极管 光谱 输出功率 消光比

Relationship between Performance of a 1.3 μm Double Heterojunction Super-Luminescent Diode and Its Operation Current and Temperature

WEI Wensheng^{1,2} ZHANG Chunxi² MA Jing²
MI Jian² ZHOU Kezu² WANG Tianmin¹

(¹ Center of Material Physics & Chemistry, School of Science, Beihang University (BUAA), Beijing, 100083)

(² Institute of Opto-Electronics Technology, Beihang University (BUAA), Beijing, 100083)

Abstract: The output optical power, spectra and extinction ratio of a buried double heterojunction type Super-Luminescent Diode (DH-SLD) module were entirely measured and analyzed when it was operated with different operation current at different temperatures. The measurement results have shown that as a soft threshold device, the SLD' output optical power increases with the operation current and decreases with temperature. Its peak wavelength decreases with the operation current lower than about 110mA. However, the peak wavelength increases with the operation current higher than about 110mA at the same temperature. The peak wavelength increases with the rising of temperature at the same operation current. The 3dB bandwidth decreases with the operation current at the same temperature and increases with temperature at the same operation current. The extinction ratio changes with the operation current and temperature.

* 国家 863 计划、高校博士点基金 (200220006037)、北京航空航天大学博士生基础性研究基金资助项目。
作者简介: 韦文生 (1966-), 副教授, 博士研究生, 主要研究兴趣是低维半导体材料及其器件、光电集成。Email: weiwensheng287@sohu.com; Tel:010-82316547; Fax:010-82316906。

Key words: super-luminescent diode, optical spectrum, output optical power, extinction ratio

1 引言

激光、半导体微电子、计算机、生物基因工程等四大科学技术的发明和应用为人类作出了巨大贡献,对科学技术的进步产生了广泛而深远的影响。超辐射激光二极管(SLD)光源是同时集激光二极管(LD)和发光二极管(LED)优点的半导体发光二极管,是典型的光电子器件。它具有输出光功率高、光谱宽、短相干性、低强度噪声和高效率的管芯——光纤耦合等优点。DH-SLD的发光效率高、谱宽可控,在光通信和光传感如波分复用(WDM)、全固态光纤陀螺仪(FOG)以及生物医学光相干测试技术(OCT)等领域^[1-3]具有广阔的应用前景和重要的使用价值。DH-SLD模块属于半导体激光器,但由于结构特殊(前端蒸镀了抗反射膜,后端设置了吸收区),它的发光效率比普通法布里-珀罗型LD的低得多,要得到较高的出光功率,就得增大其工作电流,所以它的光谱、输出光功率和偏振态等性能参数对工作电流和温度等因素的变化是十分敏感的。在已有的文献报道^[4,5]或者产品说明书中,只有在某个固定温度和特定工作电流时测试的性能参数,没有反映温度和电流的变化对性能的影响。少量文献^[6]提到了变温的输出光功率——工作电流的关系,而没有研究温度改变时光谱和偏振态等性能参数随着工作电流的变化关系。在实际应用DH-SLD(如WDM、FOG、OCT)的精密系统中,必须准确掌握这些参数随工作电流和温度变化的规律和DH-SLD的器件物理特性,作为了解其性能特点的参考,并根据实际需要设置DH-SLD模块的工作点,调试其应用系统以达到最佳性能。本工作在不同温度下测试了该SLD模块的光谱、输出功率和偏振态,发现它们随工作电流和温度的变化而发生漂移,并分析了引起这些漂移的物理本质。

2 DH-SLD的性能测试

本测试所用的是峰值波长约为 $1.30\mu\text{m}$ 的DH-SLD管芯封装而成的模块,管芯和模块外型分别如图1和图2所示。其中DH-SLD管芯为掩埋新月型双异质结构,后端为减反射窗口吸收区结构(用液相外延技术研制),如图1所示。掩埋异质结构有效地防止了漏电流,进一步降低了 I_{th} ,控制了侧模,有效地限制了光场。为了增大光输出功率和减小光损伤,管芯的出光端面蒸镀了减反射膜,后端的减反射窗口吸收区是为了抑制激射而引入的。厚度变化的月型有源区结构,导致平行于结的侧向折射率的变化,使得垂直于结平面的发散角(θ_{\perp})减小,激光光的远场分布接近于对称的椭圆偏振光^[7,8]。

设中心波长 λ 为 $1.30\mu\text{m}$,对应有源区材料体系 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$,它必须与相邻的n-InP和p-InP光限制层的晶格匹配。设温度为300K时,令有源区的禁带宽度为 E_g ,晶格常数为 a_1 ,InP限制层的晶格常数为 a_2 ,根据文献^[9]有:

$$\begin{cases} E_g = 1.24/\lambda \\ E_g = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2 \\ y = 2.2x \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)得到: $x=0.28$, $y=0.63$,由相图计算出所用液相的组分。

DH-SLD模块是采用标准工艺在8针蝶型金属管壳中封装的。管壳内装配了半导体热电制冷器(TEC)、热沉、DH-SLD管芯、热敏电阻等部件。耦合用尾纤是熊猫(Panda)型保偏光纤,用金属支架支撑和激光加工技术固定。测试过程中,模块在恒流驱动加温控条件下工作,恒流精度优于0.1%,温度漂移 $\leq 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此可以忽略测试过程中管芯与光纤头之间的相对位移。用温控电路实现了本测试所需的变温环境;光谱是用Agilent 86142B型光谱分析仪测试的;输出光功率是用ILX Lightwave EPM8200型光功率计测试的。

3 结果与讨论

3.1 DH-SLD 的输出光功率与工作电流和温度的关系

图 3 是不同温度下 DH-SLD 的输出光功率 (P) 与注入电流 (I) 的关系图。图中显示了明显的软阈值特性 (不像 LD 的 I-P 曲线的拐点 (对应阈值电流 I_{th}) 那样非常明显), 是因为有源区的前端蒸镀了减反射膜、后端的吸收区抑制了法布里-珀罗振荡所致。注入电流小于 I_{th} 时, DH-SLD 处于自发发射状态, 输出光功率很低, 并且随着注入电流的增大而缓慢地增加。而 I 大于阈值电流后, 受激辐射产生, 发光功率 P 随 I 线性增加。但当电流超过一定值时 (图 3 中显示的约 110mA), 光功率增加缓慢, 原因是注入电流的热效应增加, 使得光电转换效率降低, 光功率输出会出现饱和。

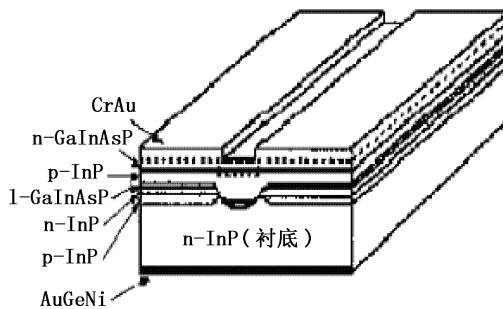


图 1 掩埋新月型双异质结 DH-SLD 管芯的结构

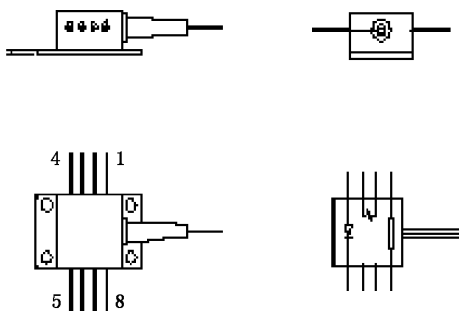


图 2 8 针碟型封装 DH-SLD 模块的结构

随着管芯温度升高, 受激辐射 DH-SLD 的 I-P 曲线的斜率减小, 说明散射作用增强导致无辐射复合增加, 辐射复合效率下降, 内量子效率降低, 损耗增加, 发光效率降低。阈值电流随温度的升高而增大, 是因为随着温度的升

高, 电子扩散加快, 更容易越过势垒而漏掉, 漏电流增加, 导致了阈值电流随温度的升高而增大。可见 DH-SLD 的阈值电流与温度的依赖关系比增益系数与温度的依赖关系更加密切, 阈值电流更快地随温度的升高而增加, 结果与阈值电流-温度的关系式^[10]吻合。

$$J_{th} = J_0 \exp(T/T_0) \quad (2)$$

式中, T_0 为特征温度, 对 InGaAsP 体系而言, 其取值范围在 100K ~ 150K, J_0 是 T_0 时的电流密度。

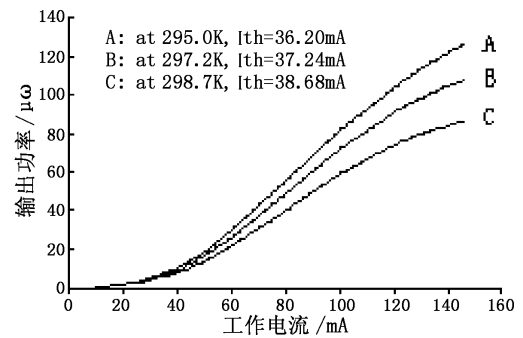


图 3 不同温度下 DH-SLD 的 I-P 关系

图 3 中显示, 温度变化范围不大, 而 I-P 曲线表现出了较为明显的差别, 这说明这种 DH-SLD 有一定的温度敏感性。

3.2 DH-SLD 的光谱与工作电流和温度的关系

图 4 与图 5 分别是不同温度下 DH-SLD 的峰值波长 (λ_p) 和光谱的 3dB 带宽与工作电流的关系图。它们明显地表明了峰值波长随注入电流的变化是带填充效应与电流的热效应竞争的结果。注入电流较小时, 带填充效应占优。注入电流小于 I_{th} 时, DH-SLD 处于自发辐射状态, 随着电流的增加, 电子进入导带的高能带, 能隙变宽, 根据 $\lambda = 1.24/E_g(\mu\text{m})$, 激发光谱的峰值波长变小。当注入电流大于 I_{th} 后且未饱和前, DH-SLD 处于受激辐射状态。随着电流的增加, 电子进入导带的更高能带, 能隙变得更宽, 峰值波长更小。但当电流超过一定值时 (图 4 中显示的约 70mA ~ 110mA), 随着工作电流的增加, 管芯双异质结的漏电流增大, 降低了给定注入电流强度下的有效过剩载流子的密度,

同时结区的有效温度升高，结区的温度高出热沉的温度差 ΔT 可表示为^[11]：

$$\Delta T = (I^2 R_S + IV_j)\phi(1 - \eta_p)D \quad (3)$$

式中， I 是注入电流， R_S 是 DH-SLD 的电阻， V_j 是它的结电压， ϕ 是热阻， η_p 是注入电流转换为激光的效率， D 是占空比 (对于连续工作而言 $D=1$)。可见 I 越大， ΔT 越大。结区温度升高引起峰值波长的变化 $\Delta\lambda$ 可表示为^[12]：

$$\Delta\lambda/\Delta T \approx 0.3nm/K \quad (4)$$

如图 4 所示，注入电流 $\geq 110mA$ 时，电流的热效应优于带填充效应，使得激光的峰值波长向长波方向移动。

此 DH-SLD 的 3dB 带宽随 I 的增加反而减小，如图 5 所示。分析原因，一是随着工作电流的增大，峰值波长附近的模式激励增强，远离峰值波长的模式基本不变；二是随着 I 的增大，增益变大，流过有源层两侧光限制层的载流子浓度升高，由于等离子体效应，使光限制层的

折射率变小。但 DH-SLD 激励后，有源层的载流子浓度不再变化。总的效果是使光限制层与有源层的折射率差变小，导致光谱变窄^[8,13]，因此 3dB 带宽减小了。

从图 5 中可见，在相同电流下，此 DH-SLD 的 3dB 带宽随温度升高而增大。推测原因是，随着温度的升高，峰值波长处的激励增益降低，导致激励光谱展宽，所以 3dB 带宽会随着温度的升高而略有增大。

在一定温度 (T) 下，处于受激辐射状态的 DH-SLD 的光谱调制度 (Ripple) 会随着注入电流的增加而增大，如图 6 所示。光谱实际上是所包含的各个模式的波包，随着注入电流的增加，光谱包含各个模式 (频率) 的增益随着激励的增加而变化。有些频率的增益被钳位，其它频率的增益出现振荡，即“频率烧孔效应”。而且随着注入水平的提高，这种效应更加明显，即光谱的调制度随着注入电流增加而增大。对比图 6 的 (a)、(b) 和 (c)，便可以得到直观反映。比较图 6 的 (c) 和 (d) 可得，其光谱的调制度会

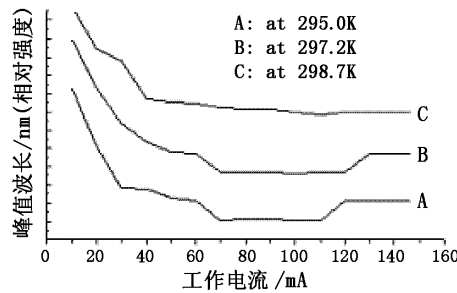


图 4 不同温度下的峰值波长 (λ_p) 与工作电流的关系

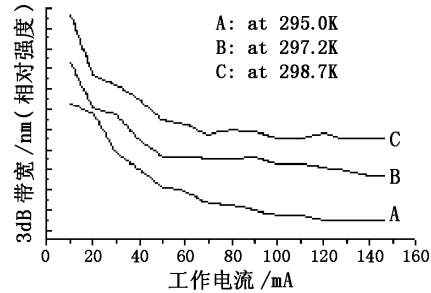
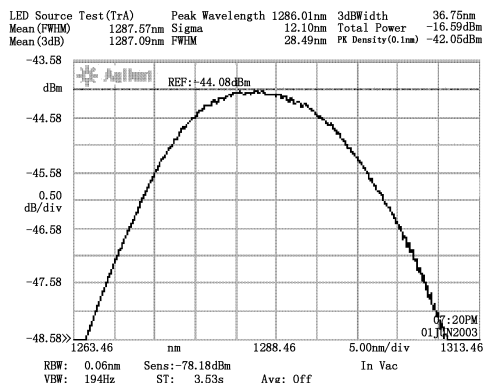
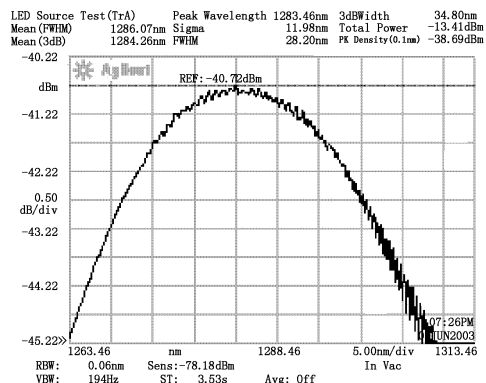


图 5 不同温度下的 3dB 带宽与工作电流的关系



(a) $I=70mA$ 和 $T=295.0K$ 的光谱



(b) $I=90mA$ 和 $T=295.0K$ 的光谱

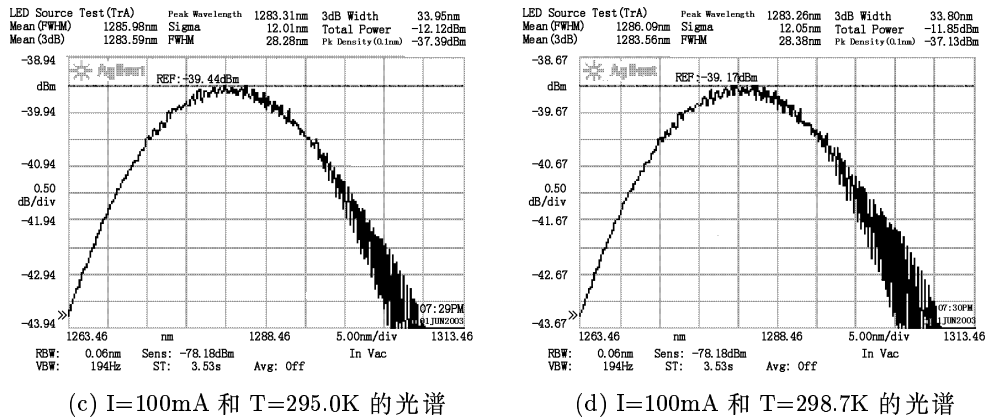


图 6 DH-SLD 模块的光谱

随着管芯温度的升高而增大。推测原因是，随着管芯温度的升高，各个模式的噪声增强，因此 DH-SLD 光谱的调制度随着注入温度的升高而增大。另外，从图 6 可见，光谱长波端的调制度大，是由于对接近带隙能量的光子的吸收低和激射增强所造成的^[14]。

3.3 DH-SLD 的消光比与工作电流和温度的关系

图 7 是不同温度下 DH-SLD 的消光比与注入电流的关系图。图中显示的注入电流小于阈值电流 (I_{th}) 时，DH-SLD 是自发辐射，消光比随着注入电流的增大而较快地增加，达到 I_{th} 时，消光比转而变小。说明 DH-SLD 自发辐射时，其激发的 TE 模与 TM 模之间有竞争，某一种模式占优，但两种模式有相同的 I_{th} ，显示了 LED 的特征^[15]。注入电流小于 I_{th} 时，管芯温度的变化对消光比随注入电流的变化趋势影响较小，说明小于 I_{th} 的注入电流其热效应——欧姆热不显著，它引起的温升对 DH-SLD 的消光比等物理参数随注入电流的变化趋势影响较小。注入电流大于 I_{th} 时，激射开始，消光比随注入电流的增大而减小，并达到一个极小值。当注入电流超过此电流值后，消光比又随着注入电流的增加而增大。图 7 表明在三种温度下消光比随注入电流的变化趋势大致相同，但在不同的温度下，这种趋势有差别。原因是阈值电流、TE 模和 TM 模的偏振输出等因素与温度的关系密切。反映了注入电流在 $I_{th} \leq I \leq 110\text{mA}$ (约) 范

围，TE 模和 TM 模的输出功率与注入电流成正比，所以消光比变小^[16]。当达到某个电流值时，TE 模和 TM 模的输出光功率几乎相等，消光比最小。随着注入电流的继续增加，其中一个模式的输出功率随着注入电流的增加趋于饱和，而另一个模式的输出光功率随着注入电流却保持线性地增加，消光比变大^[17]。图 7 中 A、B、C 三条曲线的差别表明了注入电流的欧姆热引起的温升与管芯温度的变化的总体效果对 DH-SLD 的消光比随注入电流的变化趋势影响不同，是因为激射模式对温度的变化十分敏感而造成的。

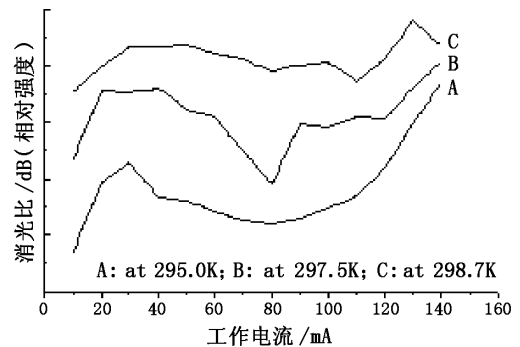


图 7 不同温度下 DH-SLD 的消光比与工作电流的关系图

4 结论

- (1) 温度不变时 DH-SLD 经历了自发辐射、受激辐射和逐步饱和的过程，模块的输出功率随注入电流的增大而增大；注入电流不变时，它随管芯温度的升高而降低。
- (2) 温度不变时，峰值波长随注入电流的增大 (0mA ~ 110mA) 而减小，当注入电流较大 (>

110mA) 时, 峰值波长随注入电流的增大有所增大。注入电流不变时, 峰值波长值随管芯温度的升高而略有增大。

(3) 温度不变时, 3dB 带宽随注入电流的增大而减小; 注入电流不变时, 它随管芯温度的升高而有所增大。

(4) 温度不变时, 消光比随注入电流的增大经历了升高 → 减小 → 再升高的过程; 注入电流不变时, 它随管芯温度的变化而变化。

可见, 在应用 DH-SLD 模块的系统中, 在满足系统对输出光功率、光谱和偏振态要求的前提下, 稳定温度和尽可能降低工作电流十分必要。

致谢: 本课题得到国家 863 计划、高校博士点基金 (200220006037)、北京航空航天大学博士生基础性研究基金的资助。

参考文献

- [1] Norman S. Kwong. High-Power, Broad-Band 1550nm Light Source by Tandem Combination of a Superluminescent Diode and an Er-Doped Fiber Amplifier [J], IEEE Photonics Technology Letters, Vol.4, No.9 (1992): 996-999.
- [2] Herve C. Lefevre. Fundamentals of the Interferometric Fiber-Optic Gyroscope [M], Fiber-Optic Gyroscope 20th Anniversary Conference, SPIE 2837 (1996): 1-17.
- [3] G. J. Tearney, M. E. Brezinski, B. E. Bouma, et al., In Vivo Endoscopic Optical Biopsy with Optical Coherence Tomography [J], Science, Vol.276 (1997): 2037-2039.
- [4] Gerard A. Alhonse, Dean B. Gilbert, M. G. Harvey, et al. High-Power Superluminescent Diodes [J], IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.24, No.12 (1988): 2454-2457.
- [5] Osamu Mikami, Yoshio Noguchi, Katsuaki Magari, et al. Polarization-Insensitive Superluminescent Diode at 1.5 μm with a tensile-Strained-Barrier MQW [J], IEEE Transactions Photonics Technology Letters, Vol.4, No.7 (1991): 703-705.
- [6] Haruo Nagai, Yoshio Noguchi, Shoichi Sudo. High-power, High-efficiency 1.3 μm superluminescent diode with a buried bent absorbing guide structure [J]. Applied Physics Letters, Vol.54, No.18 (1989): 1719-1721.
- [7] T. R. Chen, Y. H. Zhuang, Y. J. Xu, et al. 1.5 In-GaAsP buried crescent superluminescent diode on a p-InP substrate [J], Applied Physics Letters, Vol.56, No.22 (1990): 2502-2503.
- [8] Jiang Jianping. Semiconductor Laser Device [M], Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1995: P90-92. (江剑平. 半导体激光器 [M], 北京: 电子工业出版社, 1995: P90-92).
- [9] S. M. Sze edited. Modern Semiconductor Device Physics [M], Beijing: Publishing House of Science, 2001:P314. (施敏 主编. 现代半导体器件物理 [M], 北京: 科学出版社, 2001:P314).
- [10] Shigehisa ARAI, Yasuharu SUEMATSU. 1.11-1.67 (100) GaInAsP/InP Injection Lasers Prepared by Liquid Phase Epitaxy [J], IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.16, No.2 (1980): 197-205.
- [11] Michael Ettenberg, Henry Kressel. The Reliability of (AlGa)As CW Laser Diodes [J], IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.16, No.2 (1980): 186-196.
- [12] Shan Zhenguo, Liu Zhuan, Wan Zujie, et al. Chinese Journal of Laser, Vol.17, No.10 (1990): 577-581. (单振国, 刘祝安, 万祖捷 等. 中国激光, Vol.17, No.10 (1990): 577-581).
- [13] Kim S. Jepsen, Niels Storkfelt, Kristian E. Stubkjaer. Polarization Dependence of Linewidth Enhancement Factor in InGaAs/InGaAsP MQW Material [J], IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.30, No.3 (1994): 635-639.
- [14] N. S. K. Kwong, K. Y. Lau, N. Bar-Chaim. High-Power High-Efficiency GaAlAs Superluminescent Diodes with an Internal Absorber for Lasing Suppression [J], IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.25, No.4 (1989): 696-704.
- [15] Yutaka Takahashi, Arup Neogi, Hitoshi Kawaguchi. Polarization-Dependent Nonlinear Gain in Semiconductor Lasers [J], IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.34, No.9 (1998): 1660-1672.
- [16] Atul Mathur, P. Dapkus. 1.55 Dual-Polarization Lasers Implemented with Compressive and Tensile-Strained Quantum Wells [J], IEEE Photonics Letters, Vol.7, No.11(1995): 1243-1245.
- [17] Mitsuhiro YANO, Yorimitsu Nishitani, Ken-Ichi HORI, et al. Temperature Characteristics of Double-Carrier-Confinement (DCC) Heterojunction InGaAsP (1.30 μm)/InP Lasers [J], IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.19, No.8 (1983): 1319-1327.