文章编号：1000-7032(2025)10-1940-08

偏振相关的压应变量子阱增益芯片

段宜江[1,2]，陈　超[1,2*]，孙晶晶[1,2]，张建伟[1]，刘朝晖[1,2]，陈　鹏[1,2]，
周寅利[1]，吴　昊[1,2]，张　卓[1]，刘天娇[1]，张大勇[1]，宁永强[1]，王立军[1]
（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术全国重点实验室，吉林 长春　130033；
2. 中国科学院大学，北京　100049）

摘要：半导体增益芯片作为外腔半导体激光器(ECSL)的有源介质，其功率、偏振相关性及线宽展宽因子等特性直接决定着激光器的核心性能。为提高半导体增益芯片的偏振消光比，降低激光器中模式竞争引入的噪声，本文研究了量子阱厚度、量子阱应变对横电(TE)、横磁(TM)模式材料增益的影响，并同时探究了有源区长度对增益芯片功率及自发辐射谱的影响。通过在InGaAs/AlGaAs量子阱中引入压应变，提高了TE与TM模式之间的材料增益差，实现了具有明显偏振相关性的850 nm波段半导体增益芯片，最高偏振消光比为9.58 dB，最大自发发射光谱带宽28.72 nm，最高输出功率28.53 mW。该工作为量子精密测量、相干激光雷达与相干光通信等领域所需的窄线宽、线偏振激光器提供了偏振特性显著的有源增益介质。

关　键　词：增益芯片；外腔半导体激光器；量子阱；偏振消光比；线偏振
中图分类号：TN248.4　　**文献标识码：**A
DOI：10.37188/CJL.20250114　　**CSTR：**32170.14.CJL.20250114

Polarization-dependent Strain Quantum Well Gain Chips

DUAN Yijiang[1,2], CHEN Chao[1,2*], SUN Jingjing[1,2], ZHANG Jianwei[1], LIU Zhaohui[1,2],
CHEN Peng[1,2], ZHOU Yinli[1], WU Hao[1,2], ZHANG Zhuo[1], LIU Tianjiao[1],
ZHANG Dayong[1], NING Yongqiang[1], WANG Lijun[1]
(1. *State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: chenc@ciomp.ac.cn*

Abstract: The semiconductor gain chip, serving as the active medium of external cavity semiconductor lasers (ECSL), directly determines the core performance of the laser through its characteristics including output power, polarization dependence, and linewidth enhancement factor. To enhance the polarization extinction ratio of semiconductor gain chips and mitigate mode competition-induced noise in lasers, this study investigates the effects of quantum well thickness and quantum well strain on the material gains of transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes, while simultaneously exploring the influence of cavity length on the output power and spontaneous emission spectrum of the gain chip. By introducing compressive strain into the InGaAs/AlGaAs quantum wells, the material gain difference between TE and TM modes was significantly enhanced, resulting in an 850 nm-band semiconductor gain chip with pronounced polarization characteristics. The optimized device demonstrates a maximum polarization extinction ratio of 9.58 dB, a broad spontaneous emission spectral bandwidth of 28.72 nm, and a peak output power

收稿日期：2025-04-13；**修订日期：**2025-04-30
基金项目：国家重点研发计划(2023YFB2805102)；国家自然科学基金(62374164,U23A20355)；吉林省科技发展计划(20220201063GX,20240201001GX,20240601031RC)；长春市科技发展计划(22SH01)；中国工程院院地合作项目(JL2024-02)
Supported by National Key Research & Development Program of China (2023YFB2805102); National Natural Science Foundation of China (62374164, U23A20355); Science and Technology Development Project of Jilin Province (20220201063GX, 20240201001GX, 20240601031RC); Changchun Science and Technology Development Plan Project (22SH01); Chinese Academy of Engineering Cooperation Project (JL2024-02)

of 28.53 mW. This work provides an active gain medium with distinctive polarization properties for applications requiring narrow-linewidth linearly polarized lasers in quantum precision measurement, coherent lidar systems, and coherent optical communications.

Key words: gain chip; external-cavity semiconductor laser; quantum well; polarization extinction ratio; linear polarization

1　引　　言

近年来，激光雷达[1-3]、相干光通信[4-5]和量子精密测量[6-7]等信息领域展现出蓬勃的发展趋势，技术迭代使得这些领域对激光器的线宽、频率噪声和偏振消光比（PER）提出了更严苛的要求。以相干光通信系统为例，低噪声的线偏振窄线宽激光器将有助于提高接收机灵敏度并降低误码率[8-9]。在偏振激光雷达探测领域，高线偏振窄线宽光源有助于提高探测器的目标识别精度和抗干扰能力[10-11]。在众多激光器结构中，外腔半导体激光器（ECSL）由于可以显著扩展谐振腔腔长以及调控激光偏振态，是实现低噪声、线偏振和窄线宽激光输出的一种优质光源[12]。

对于ECSL而言，半导体增益芯片作为提供宽谱光增益的有源介质，其功率、自发辐射谱、偏振相关性和线宽展宽因子等特性将直接影响到激光器的性能。C. H. Henry修正的Schawlow-Townes线宽理论表明，具备更高输出功率以及更小线宽展宽因子的增益芯片将有助于激光器线宽的压窄，实现更高的光谱纯度[13]。除此之外，偏振相关模式之间的竞争也会引入一定的频率噪声，从而对激光器的线宽产生影响。通过对增益芯片量子阱结构进行设计，增大横电（TE）与横磁（TM）偏振模式的增益差从而降低模式竞争引入的噪声，有助于减小ECSL的线宽。Sun等通过将单角度面增益芯片与保偏单模光纤外腔混合集成，利用增益芯片单偏振特性与保偏单模光纤光栅进行偏振耦合，实现了洛伦兹线宽4.85 kHz、输出功率30 mW、PER达到25 dB的稳定单纵模、单偏振窄线宽激光输出[14]。Luo等使用偏振选择性增益芯片配合偏振相关波导布拉格光栅（WBG），实现了高线偏振、窄线宽输出的混合集成半导体激光器[15]，线宽低至4.15 kHz，同时PER高达39.6 dB。而截至目前，虽然已有研究通过减小增益芯片偏振模式增益差实现了较低模式间竞争[16]，但是针对半导体增益芯片偏振相关性能进行优化研究也是比较重要的方向。

本文展示了一种具有模式偏振选择性的850 nm波段半导体增益芯片，压应变量子阱结构提高了TE模式与TM模式之间的增益差，偏振相关性自发发射光谱的PER达到9.58 dB，最大带宽28.72 nm，最高输出功率28.53 mW。该芯片为相干激光雷达和相干光通信等领域所用窄线宽线偏振外腔半导体激光器提供了偏振特性显著的有源增益介质。

2　增益芯片原理与结构设计

增益芯片有源部分为量子阱结构[17-20]，由于量子二维限制，势阱中电子和空穴的能带演变为阶梯状，导带底和价带顶分别变为导带第一阶梯子能带E_{C1}和价带第一个阶梯重空穴带E_{HH1}。在正向电流的注入下，导带费米能级E_{FC}与价带费米能级E_{FV}分别向导带底与价带顶移动，当满足$(E_{FC}-E_{FV})>(E_{C1}-E_{HH1})$时，即达到粒子数反转的条件，材料的正增益效果和光子密度随电流升高逐渐增加[21]。有源介质在外加电泵浦下产生光增益原理示意图如图1所示，其中N_p与ΔN_p分别表示初始光子密度与经过长度为Δx增益介质后的光子密度变化量，则单位长度和单位电流密度下的光增益效率表示为$g = \Gamma\Delta N_p/N_p$，Γ为光场限制因子。有源区厚度一定的情况下，增益芯片的饱和电流和饱和输出功率将受芯片长度影响。此外，能级的量子化导致了轻重空穴带在k=0点处的增益差异，这将对芯片输出光的偏振特性产生直接影响，同时势阱层和势垒层材料之间晶格常数不匹配产

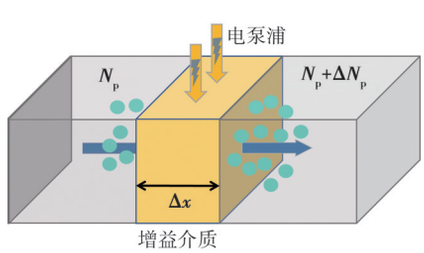

图1　有源介质产生的光增益

Fig.1　Optical gain generated by an active medium

生的应变以及量子阱厚度也将引起能带位置变化，从而导致偏振特性的改变[22]。因此，在偏振相关增益芯片的设计过程中，需要着重考虑以上因素。

2.1 外延与量子阱结构设计

针对ECSL结构的构建，由于增益芯片需要与衍射光栅、标准具等外腔滤波器件或者硅基微环滤波芯片进行耦合集成，更小的有源部分波导损耗将有助于实现更高的输出功率与更窄的激光线宽。由于p区的自由载流子吸收系数远高于n区[23]，通过采用非对称波导结构，能够减少光场在p区中的分布占比，从而降低波导本身的吸收损耗。所设计的p型上波导层和n型下波导层均采用$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$材料，n区波导层厚度为p区波导层厚度的两倍。图2为本文所用增益芯片的外延结构示意图以及光场强度与折射率分布示意图，光场中心相比量子阱中心有所偏移，呈现出明显偏向n区波导层的不对称分布，这将有助于实现更高的输出功率。

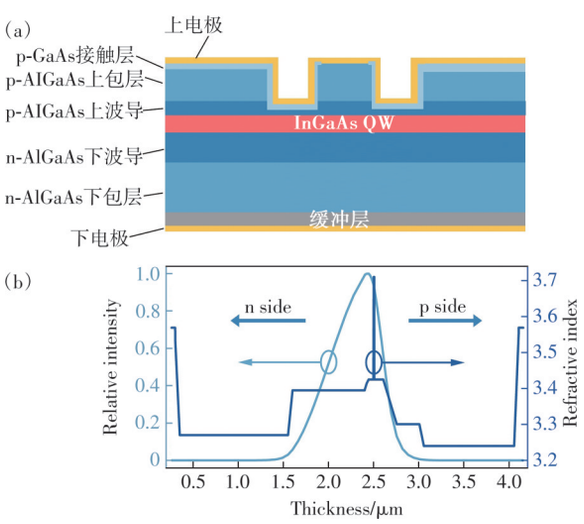

图2 (a)增益芯片外延结构示意图；(b)光场及折射率分布

Fig.2 (a) Epitaxial structure of the gain chip. (b) Light field and refractive index distribution

对于量子阱结构增益芯片，量子化的子能级消除了轻重空穴带在Γ点处的简并，由于重空穴带上升，电子在导带与重空穴子能带之间的跃迁加强，该跃迁过程将只提供TE模式的增益[24-25]，对TM模式有贡献的跃迁过程因轻空穴带下降被抑制，使TM模式与TM模式的材料增益出现差异。由于匹配量子阱的模式材料增益差并不显著，无法实现更高偏振消光比的光输出，因此在量子阱结构上引入一定程度的压应变，使轻重空穴带进一步分离，提高TE模式材料增益的同时也增强TM模式的抑制作用。本文所用增益芯片采用压应变InGaAs /AlGaAs量子阱，设量子阱宽度为L_z，则材料增益谱可用以下公式计算[26]：

$$g^{p}(\hbar\omega)=\frac{2\pi e^{2}}{n_{r}c\varepsilon_{0}m_{0}^{2}\omega L_{z}}\sum_{\sigma}\sum_{\eta}\sum_{n,m}\int_{0}^{\infty}\frac{k_{t}\mathrm{d}k_{t}}{2\pi}\times M_{nm}^{p\sigma}(k_{t})\frac{\Gamma/2\pi}{\left[E_{CV}^{nm\sigma}(k_{t})-\hbar\omega\right]^{2}+(\Gamma/2)^{2}}f_{C}(1-f_{V}),\quad(1)$$

其中p=TE或TM，分别表示这两个正交偏振的情况；c、e、ε_0分别表示真空中的光速、电子电量和介电常数；n_r和Γ为材料折射率和电子带内的弛豫碰撞参数；$\sum_{\sigma}\sum_{\eta}\sum_{n,m}$分别代表对上下哈密顿矩阵、电子的上下自旋态以及电子从导带第n到价带第m子能级跃迁的情况进行求和；$M_{nm}^{p\sigma}$为偏振的跃迁矩阵元；$E_{CV}^{nm\sigma}=E_{CV}^{n\sigma}-E_{CV}^{m\sigma}$表示导带第$m$子能级与价带第$n$子能级之间的能量差；$f_C$和$f_V$分别表示导带与价带中的费米分布函数。除应变外，量子阱厚度也会对TE与TM的材料增益产生影响，量子阱厚度的增加将减弱量子限制效应，使得轻重空穴带靠近从而减弱了对TM模式的抑制作用，TE模式与TM模式之间的增益差也随之减小。图3(a)给出了量子阱厚度分别为5.5 nm、6 nm及6.5 nm

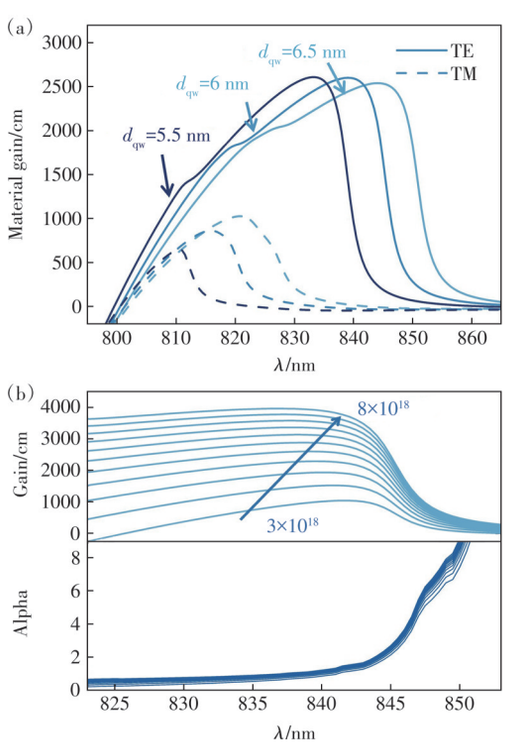

图3 (a)不同量子阱厚度下的材料增益；(b)不同载流子浓度下的材料增益和线宽展宽因子

Fig.3 (a) Material gain at different quantum well thicknesses. (b) Material gain and linewidth enhancement factors at different carrier concentrations

下的TE与TM模式的材料增益随波长变化，考虑到实际应用的波段，本文增益芯片量子阱厚度设计为6 nm，偏振模式之间显著的材料增益差使得该增益芯片具有较高的偏振选择特性，这将在第三部分测试结果中展现。

线宽展宽因子是增益芯片的另一重要特性，由于自发辐射噪声和粒子数反转改变了有源区内的载流子浓度，导致折射率和增益的改变，从而带来激光谱线的展宽。线宽展宽因子定义为$\alpha = \Delta n'/\Delta n''$，其与微分增益呈负相关，基于修正的Schawlow-Townes线宽公式，激光线宽与光学限制因子Γ及线宽展宽因子的α平方呈正比[13]。为实现高功率、窄线宽输出的ECSL，增益芯片需具备较小的线宽展宽因子。通过理论模拟不同载流子浓度下的增益曲线拟合出微分增益，得到的增益谱线与线宽展宽因子随波长变化关系如图3(b)所示。随着波长的增加，微分增益的减小使得线宽展宽因子增加，这在材料增益出现降低的长波侧尤为明显。因此，将工作波长设计在增益谱的短波长侧，可以有效地减小线宽展宽因子。

2.2　弯曲脊波导设计

增益芯片作为ECSL的有源部分，配合外腔滤波器件实现高相干激光输出，为了避免因增益芯片解理面本身法布里-珀罗(F-P)腔效应引起的不必要激射，需要对端面进行处理并改进波导形状。通过采用单角度面弯曲波导设计，避免了端面反射光直接耦合回波导内，能够有效减少端面的模式反射率，抑制腔面F-P谐振[27]。由于弯曲波导的引入也会增加芯片内的传输损耗，因此，在综合考虑端面反馈强度和波导损耗后，所制备的增益芯片采用了7°弯曲波导[28-30]，配合出光端面增透(AR)镀膜，实现了目标波长处低于10^{-4}的有效模式反射率。

外延后的增益芯片通过等离子体刻蚀形成脊波导，刻蚀深度直接影响到波导脊区的有效折射率，这将影响脊波导对光场的横向约束，从而引起模式尺寸变化。为探究刻蚀深度对模式尺寸以及光在脊波导中的传输情况，利用Lumerical MODE软件仿真得到了刻蚀深度为1.4 ~1.7 μm时增益芯片截面模场及弯曲波导内的光分布情况，如图4所示。

随着刻蚀深度的增加，波导对光的约束能力显著增强。图4(a)~(d)中的横向模式尺寸从12 μm减小至4 μm，特别是在1.7 μm刻蚀深度，光模式高度集中，沿波导传播效果显著改善，如图4(e)、(f)所示，展示出波导的刻蚀深度与其光传输能力密切相关。较深的刻蚀深度能够提高脊区有效折射率，抑制光场能量向包层的横向泄露，从而获得更小的光斑尺寸，这将有利于增益芯片与外腔之间的耦合。

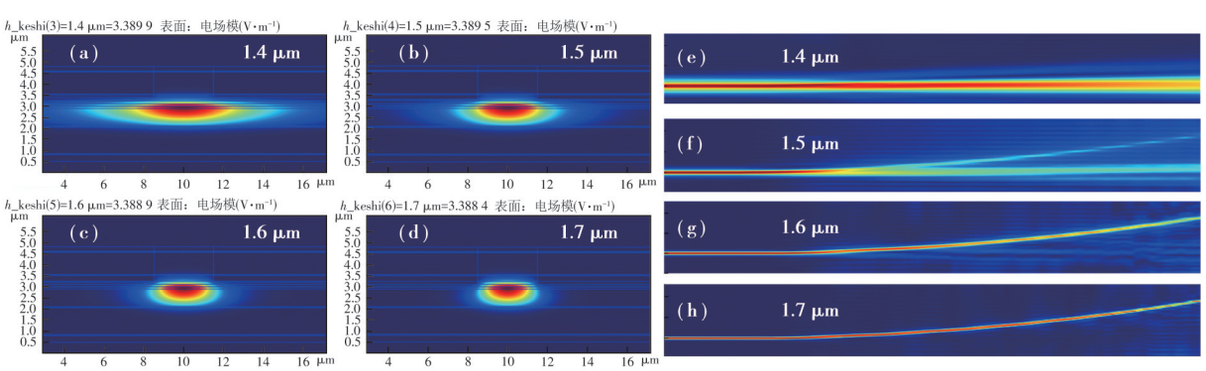

图4　(a)~(d)刻蚀深度1.4~1.7 μm增益芯片截面光场分布；(e)~(h)光在弯曲波导中的传输

Fig.4　(a)-(d)Light field distribution of gain chip with different etching depth from 1.4 μm to 1.7 μm. (e)-(h)Transmission of light in curved waveguides

3　增益芯片测试与结果

3.1　*P-I-V*与自发辐射谱

由于激励电流是从增益芯片顶部注入，不同长度的增益芯片除有源区体积差异外，相同激励电流下的电流密度也有所区别。为了探究不同长度增益芯片的功率-电流/电压-电流(*P-I-V*)曲线和光谱特性，我们采用MOCVD外延和干法刻蚀工艺制备了750 μm、1 000 μm和1 250 μm三种长度的增益芯片。借助光谱分析仪(OSA, AQ6370D, Yokogawa)和光功率计(OPM, PM400, Thorlabs)，在设定TEC温度为20 ℃下测量了三种长度增益

芯片的*P-I-V*曲线及自发辐射(ASE)谱,如图5所示。在较低电流条件下,长度较短的增益芯片具有更高的电流密度,因此在一定电流区间内能够获得比长增益芯片更高的功率;而随着电流继续增加,较长增益芯片带来的大有源区体积的优势更加显著,使得长增益芯片能够获得更高的饱和功率。所制备的1 250 μm长度的增益芯片在500 mA驱动电流下实现了28.53 mW的峰值功率输出。三种长度增益芯片的最高光谱带宽分别为46.68 nm(750 μm)、37.23 nm(1 000 μm)和28.72 nm(1 250 μm)。

除增益芯片功率会对外腔激光器的线宽产生影响外,有源区的尺寸也会引起激光器线宽性能改变,更长的增益芯片增加了光子在有源介质内的往返时间。根据绝热啁啾降低理论,这将使得对线宽压缩有显著影响的F^2因子减小并引入更多自发辐射噪声[31],从而导致激光器线宽展宽,因此在相同功率下,更短的增益芯片将有助于激光器线宽压窄。同时,更小的有源区宽度和厚度由于减小了阈值电流,降低了芯片的热效应和载流子浓度波动引起的频率噪声,因此更小的有源区体积将有利于实现线宽更窄的外腔激光器[32]。在实际设计过程中,需结合输出功率对有源区体积进行综合考虑。

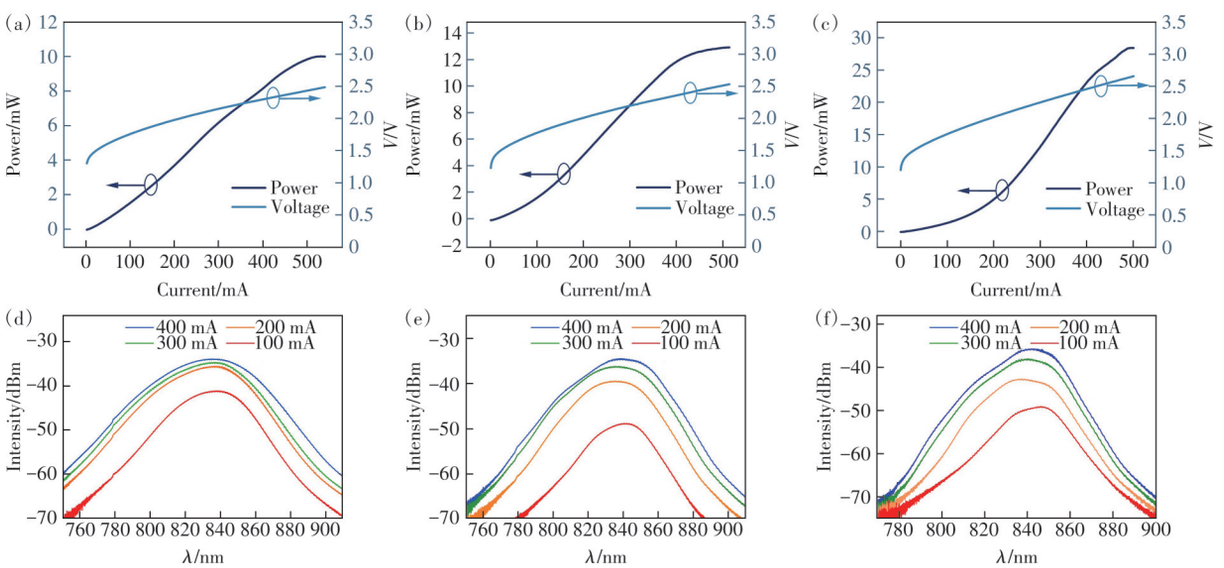

图5 20 ℃下测得的增益芯片*P-I-V*曲线。(a)750 μm;(b)1 000 μm;(c)1 250 μm;(d)~(f)自发辐射光谱

Fig.5 *P-I-V* curve of gain chip under temperature of 20 ℃. (a)750 μm. (b)1 000 μm. (c)1 250 μm. (d)-(f)ASE spectra

图6为三种长度增益芯片ASE谱中心波长以及3 dB带宽随电流变化关系。电流逐渐升高的过程中,量子阱内载流子密度增加,载流子对极化场的屏蔽效应以及高能态占据概率的提升使得发射波长向短波偏移;而随着载流子密度进一步提高,能带重整效应和器件热效应将导致带隙变窄,

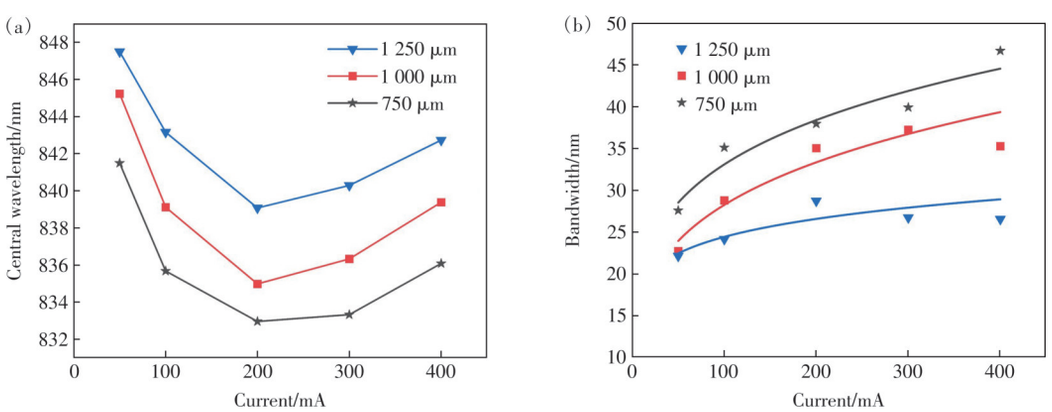

图6 (a)三种长度增益芯片中心波长随电流变化关系;(b)3 dB带宽随电流变化关系

Fig.6 (a)The relationship between the central wavelength of three kinds of length gain chip. (b)The change of current and 3 dB bandwidth

自发辐射谱中心波长随电流呈现先蓝移后红移过程，如图6(a)所示。图6(b)展示了不同长度增益芯片ASE谱的3 dB带宽随电流的变化关系，相同电流下，较短的增益芯片凭借更高的电流密度获得了更为明显的能带重整化程度，因而具备更宽的光谱。随着电流升高，带隙宽度变窄扩展了跃迁能量范围，对于不同长度的增益芯片均有助于拓宽光谱带宽。

3.2　线偏振特性

为了表征增益芯片的偏振特性，验证前述量子阱设计对TE偏振模式的增强，增益芯片的输出光经过保偏光纤光束准直器引导至旋转线偏振片(FBR-LPVIS，Thorlabs)，再通过光束准直器聚焦至保偏光纤，进行功率和光谱测量。通过旋转偏振片的角度，对TE和TM这两个正交偏振模式进行分离，记录偏振片滤光后的功率并进行归一化处理。对1 250 μm长度增益芯片进行测试，得到的不同偏振片旋转角度下的归一化光场强度与归一化功率的极坐标曲线如图7所示。

由图7(a)可以看出，随着偏振片的旋转角度从355°开始以10°增量逐渐增加，光强也逐渐增大并在85°达到最大值，TE与TM光谱峰值强度差为10.45 dB。归一化光场强度的显著差异体现出对TM偏振模式的高度抑制，通过记录偏振片角度与归一化光功率的变化，绘制了如图7(b)所示的极坐标曲线，最终测得的PER达9.58 dB，展现出显著的偏振相关性，这是压应变下轻重空穴带分离引起显著模式增益差导致的结果。

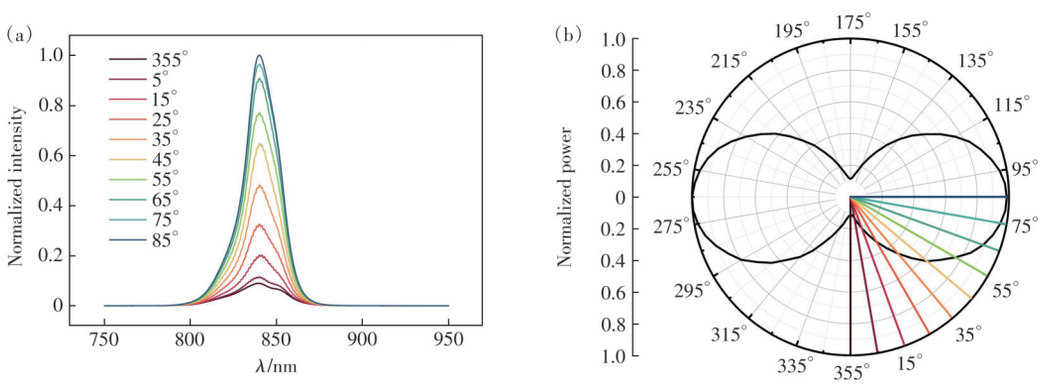

图7　(a)不同偏振片旋转角度下的归一化光强；(b)归一化功率随偏振片角度变化的极坐标曲线

Fig.7　(a)Normalized intensity under different polarizer rotation angles. (b)Polar curve of normalized power *versus* polarizer angles

使用该增益芯片构建的ECSL可以很大程度上降低TE模和TM模之间的模式竞争，从而减小了激光器中相频噪声以及相对强度噪声对线宽的影响，有助于实现线宽更窄的线偏振外腔半导体激光器。

4　结　　论

本文展示了一种具有高偏振相关性的量子阱增益芯片，通过优化量子阱厚度并引入一定的压应变，实现了TE模和TM模之间10.45 dB的光谱峰值强度差，有望减小正交偏振模式竞争引入的相频噪声及相对强度噪声，从而有利于激光器线宽的压窄。此外，我们分析了不同长度增益芯片的*P-I-V*曲线和自发辐射谱特性，以及ASE谱中心波长及带宽随电流变化的趋势。通过对芯片输出功率和偏振模式归一化功率的测量，所制备的1 250 μm长度增益芯片在20 ℃下，实现了28.53 mW@500 mA的峰值功率输出，偏振消光比达9.58 dB，最大带宽28.72 nm。该芯片为相干光通信、量子密钥分发、偏振激光雷达传感等领域所需的线偏振窄线宽激光器提供了一个富有潜力的有源增益介质。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址：http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250114

参　考　文　献：

[1] TANG L W, JIA H X, SHAO S, *et al*. Hybrid integrated low-noise linear chirp frequency-modulated continuous-wave laser source based on self-injection to an external cavity [J]. *Photonics Res.*, 2021, 9(10): 1948-1957.

[2] TANG L W, LI L B, LI J C, *et al*. Hybrid integrated ultralow-linewidth and fast-chirped laser for FMCW LiDAR [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(17): 30420-30429.

[3] 罗晓翩, 冯力天, 尹微, 等. 基于相干激光雷达的双偏振探测技术 [J]. 激光技术, 2025, 49(1): 8-13.
LUO X P, FENG L T, YIN W, *et al*. Dual polarization detection technology based on coherent LiDAR [J]. *Laser Technol.*, 2025, 49(1): 8-13. (in Chinese)

[4] 冯志庆, 白兰, 王宁, 等. 基于双透镜外腔结构的窄线宽可调谐半导体激光器 [J]. 发光学报, 2012, 33(10): 1138-1142
FENG Z Q, BAI L, WANG N, *et al*. Narrow-linewidth tunable semiconductor lasers based on dual-lens external-cavity structure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(10): 1138-1142. (in Chinese)

[5] 孙鑫, 李林. 基于动态门限的幅度调制空间相干光通信系统 [J]. 发光学报, 2019, 40(9): 1200-1206.
SUN X, LI L. Free-space coherent optical communication system using irradiance modulation with dynamic detection threshold [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(9): 1200-1206. (in Chinese)

[6] SCHIOPPO M, BROWN R C, MCGREW W F, *et al*. Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles [J]. *Nat. Photonics*, 2017, 11(1): 48-52.

[7] 杨小丹, 徐修奕, 魏启. 线偏振激光场中 Kramers-Henneberger 原子本征态的研究 [J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1727001.
YANG X D, XU X Y, WEI Q. Research on eigenstates of Kramers-Henneberger atoms in linearly polarized laser field [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(17): 1727001. (in Chinese)

[8] GRILLOT F, DUAN J N, DONG B Z, *et al*. Uncovering recent progress in nanostructured light-emitters for information and communication technologies [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 156.

[9] ZHANG Y N, ZHANG Y F, ZHAO Q L, *et al*. Ultra-narrow linewidth full C-band tunable single-frequency linear-polarization fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(23): 26209-26214.

[10] LIU X D, ZHANG L P, ZHAI X Y, *et al*. Polarization Lidar: principles and applications [J]. *Photonics*, 2023, 10(10): 1118.

[11] 王来彬, 刘东. 光学器件性能参数对激光雷达探测气溶胶和云退偏比的影响 [J]. 光学学报, 2023, 43(24): 2428002.
WANG L B, LIU D. Influence of performance parameters of optical devices on depolarization ratio of Lidar detection of aerosols and clouds [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(24): 2428002. (in Chinese)

[12] 苏鹏, 高欣, 张悦, 等. 970 nm 高功率光栅外腔可调谐半导体激光器 [J]. 发光学报, 2023, 44(4): 664-672.
SU P, GAO X, ZHANG Y, *et al*. High power 970 nm semiconductor laser with a tunable grating external cavity [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(4): 664-672. (in Chinese)

[13] HENRY C. Theory of the linewidth of semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 1982, 18(2): 259-264.

[14] 孙广伟, 魏芳, 张丽, 等. 基于保偏光纤光栅的低噪声外腔半导体激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0601004.
SUN G W, WEI F, ZHANG L, *et al*. Low-noise external cavity semiconductor lasers based on polarization-maintaining fiber Bragg gratings [J]. *Chin. J. Lasers*, 2018, 45(6): 0601004. (in Chinese)

[15] LUO X C, CHEN C, NING Y Q, *et al*. High linear polarization, narrow linewidth hybrid semiconductor laser with an external birefringence waveguide Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(21): 33109-33120.

[16] LIU S J, ZHOU Y, ZHOU S, *et al*. Structural design and fabrication of 830 nm GaAsP/AlGaAs low polarization superluminescent diode with tensile-strained wells [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2018, 29(12): 10102-10108.

[17] CALÒ C, BENYAHYA K, MARDOYAN H, *et al*. Hybrid InP-SiN microring-resonator based tunable laser with high output power and narrow linewidth for high capacity coherent systems [C]. 2022 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, USA*, 2022: 1-3.

[18] XIANG C, MORTON P A, BOWERS J E. Ultra-narrow linewidth laser based on a semiconductor gain chip and extended Si_3N_4 Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44(15): 3825-3828.

[19] CHEN C, WEI F, HAN X Y, *et al*. Narrow linewidth, tunable external cavity diode laser using AlGaAs-Si_3N_4 hybrid integration [C]. 2023 *Asia Communications and Photonics Conference*/2023 *International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM), Wuhan, China*, 2023: 1-3.

[20] FAN Y W, VAN REES A, VAN DER SLOT P J M, *et al*. Hybrid integrated InP-Si_3N_4 diode laser with a 40 Hz intrinsic

linewidth [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(15): 21713-21728.
[21] 余金中. 半导体光子学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
YU J Z. *Semiconductor Photonics* [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
[22] CHUANG S L. *Physics of Optoelectronic Devices* [M]. New York: Wiley-Interscience, 1995.
[23] RYVKIN B S, AVRUTIN E A. Asymmetric, nonbroadened large optical cavity waveguide structures for high-power long-wavelength semiconductor lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97(12): 123103.
[24] 黄黎蓉. 半导体光放大器偏振相关性及其宽谱特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
HUANG L R. *Study on Polarization Dependence and Wideband Characteristics of Semiconductor Optical Amplifier* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
[25] MINCH J, PARK S H, KEATING T, *et al*. Theory and experiment of InGaAsP and InGaAlAs long-wavelength strained quantum-well lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, 35(5): 771-782.
[26] CHANG C S, CHUANG S L. Modeling of strained quantum-well lasers with spin-orbit coupling [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 1995, 1(2): 218-229.
[27] SCIFRES D, STREIFER W, BURNHAM R. GaAs/GaAlAs diode lasers with angled pumping stripes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, 14(4): 223-227.
[28] NAWROCKA M, LU Q Y, GUO W H, *et al*. Widely tunable six-section semiconductor laser based on etched slots [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(16): 18949-18957.
[29] SEMENOV A T, SHIDLOVSKI V R, SAFIN S A. Wide spectrum single quantum well superluminescent diodes at 0.8 μm with bent optical waveguide [J]. *Electron. Lett.*, 1993, 29(10): 854-856.
[30] RIDEOUT W, HOLMSTROM R, LACOURSE J, *et al*. Ultra-low-reflectivity semiconductor optical amplifiers without antireflection coatings [J]. *Electron. Lett.*, 1990, 26(1): 36-38.
[31] TRAN M A, HUANG D N, GUO J, *et al*. Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2020, 26(2): 1500514.
[32] 刘大鹏, 陈超, 秦莉, 等. 光纤光栅外腔半导体激光器的线宽特性研究 [J]. 半导体光电, 2016, 37(2): 165-169.
LIU D P, CHEN C, QIN L, *et al*. Study on linewidth characteristics of fiber grating external cavity semiconductor laser [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2016, 37(2): 165-169. (in Chinese)

段宜江(2000-),男,河南洛阳人,硕士研究生,2023年于重庆理工大学获得学士学位,主要从事混合集成窄线宽半导体激光器的研究。
E-mail: duanyijiang23@mails.ucas.ac.cn

陈超(1982-),男,吉林长春人,博士,研究员,2014年于吉林大学获得博士学位,主要从事窄线宽半导体激光器、混合集成激光器的研究。
E-mail: chenc@ciomp.ac.cn