

文章编号: 1000-7032(2010)01-0086-05

## 变条长实验测量 GaN 增益时条宽的影响

王 伟, 杨子文, 于 涛, 邢 兵, 王 磊, 李 睿, 杜为民\*, 胡晓东

(北京大学 物理学院, 北京 100871)

**摘要:** 研究了光学变条长实验中条的宽度对半导体激光器光增益测量的影响, 提出利用光刻溅射处理样品来控制泵浦条的宽度, 并详细研究了泵浦条宽度与样品增益及饱和长度关系。实验表明: 泵浦条宽度越窄, 饱和长度越长, 但测得的增益系数有所减小。本文利用非平衡载流子扩散模型对此现象进行了解释。

**关键词:** GaN; 条宽; 变条长; 模式增益; 饱和长度

**中图分类号:** O472.3; TN248.4 **PACS:** 78.55.Cr; 78.66.Fd **PACC:** 7855E; 7865K **文献标识码:** A

## 1 引 言

虽然高量子效率的 GaN 基器件已经实现商业化, 但对于其发光的物理机制至今尚未有定论。GaN 基材料光谱性质的研究<sup>[1~5]</sup>对于分析其物理机制, 表征优化材料有重要的价值。测量增益的方法有多种, 比如 Hakki-Paoli 方法<sup>[6]</sup>、时间分辨方法<sup>[7]</sup>、泵浦-探测谱法<sup>[8]</sup>等, 但研究应用最多的是 20 世纪 70 年代提出的变条长方法 (Variable Stripe Length Method, VSLM)。

VSLM 是通过分析放大的自发发射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 谱随泵浦长度的变化来获取半导体激光器的光增益, 是只考虑光沿着一维方向放大情况的近似模型。已有的研究结果在利用此模型分析光增益时, 实验过程很少考虑到泵浦条宽度对增益的影响。有些文献中虽然也指出了实验时宽度的条件 (5~30  $\mu\text{m}$ )<sup>[9~14]</sup>, 但均未考虑泵浦条的宽度对结果有何影响。文献[9]指出宽度应远小于典型长度, 否则在宽度方向的载流子损耗会影响增益的测量。

本文设计了严格控制泵浦条宽度的实验, 并详细研究了泵浦条宽度与样品增益及饱和长度间的关系。

## 2 实 验

变条长实验所用样品是用 MOCVD 方法在蓝

宝石衬底上生长的。有源区包含 3 个 InGaIn (8 nm)/GaN(3 nm)量子阱, 位于 4  $\mu\text{m}$  厚掺 Si 的 n 型 GaN 缓冲层和 200 nm 掺 Mg 的 p 型 GaN 盖帽层之间。如图 1 所示, 对样品进行光刻溅射, 使样品分别只露出 2.6, 6.2, 10.5  $\mu\text{m}$  三个宽度不同的条, 其余部分被约 100 nm 厚铝膜覆盖, 以很好地实现变条长实验中对泵浦条宽度的限制。而样品表面距有源区只有很薄的 p-GaN (200 nm), 激发光到达量子阱时, 由衍射带来的对条宽和激发功率密度的影响非常微弱, 可以忽略。在进行光刻溅射时特别注意到使露出的样品条均沿相同的晶格取向, 从而避免了因晶格取向不同而带来的增益变化<sup>[15]</sup>。

实验光路如图 2, 光源使用 3 倍频调 Q Nd: YAG

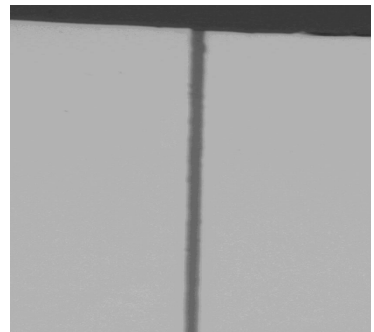


图 1 实验所用样品: 暗条为泵浦条, 浅色区为铝膜覆盖区。

Fig. 1 Schematic photo of sample. The dark zone is the pump stripe; the light zone is aluminum coating.

收稿日期: 2009-01-25; 修订日期: 2009-06-24

基金项目: 国家“863”计划(2007AA03Z403); 国家自然科学基金(60776042); 国家重大科学研究计划(2009CB930504)资助项目

作者简介: 王伟(1984-), 女, 河北石家庄人, 主要从事半导体材料的光学性质的研究。

E-mail: wangweiphy@gmail.com

\*: 通讯联系人; E-mail: wd00@pku.edu.cn, Tel: (010)62757387

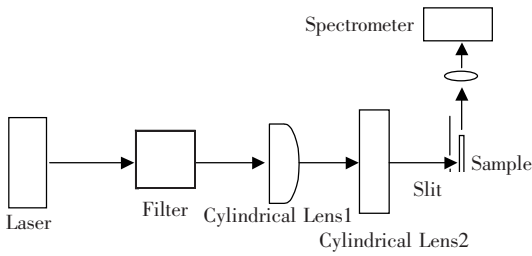


图2 变条长的实验装置

Fig. 2 Schematic of the experimental setup for variable stripe length experiment

激光器的 355 nm 脉冲激光,其脉宽为 10 ns、频率 10 Hz。激光分别经水平方向的柱透镜 1 (焦距 110 mm) 和垂直方向的柱透镜 2 (焦距 76 mm) 聚焦成条状垂直照射在样品表面上。紧贴样品前,放置一个宽度可变的狭缝来控制泵浦条长度。所用激光功率 2 mW,聚焦到狭缝前的泵浦条总长 10 mm。根据衍射极限可估计泵浦条宽度约 15  $\mu\text{m}$ ,考虑到传播中的吸收散射,则到达样品处的激发功率密度约为 15  $\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。照射到样品上的泵浦条长度由横向移动狭缝来控制,泵浦条长度每增加 10  $\mu\text{m}$  采集一次光谱。利用此实验装置在室温条件下分别对 2.6, 6.2, 10.5  $\mu\text{m}$  三个不同泵浦条宽度的样品条进行 VSL 测量。

在一维光放大模型中,假设模式增益系数只与泵浦能量有关而与条长无关,注入能量为  $E$ 、条长度为  $L$  时的放大的自发辐射强度  $I(E, L)$  与条长度的关系可表示为<sup>[8, 16, 17]</sup>

$$I(E, L) = \frac{\beta I_{\text{sp}}(E)}{g_{\text{mod}}(E)} [e^{g_{\text{mod}}(E)L} - 1], \quad (1)$$

其中  $I_{\text{sp}}$  为自发辐射强度,  $\beta$  为自发辐射系数,与收集的 ASE 谱的立体角相关,  $g_{\text{mod}}(E, x)$  是模式增益系数,即净增益系数,  $g_{\text{mod}}(E, x) = \Gamma g_{\text{mat}}(E, x) - \alpha(E, x)$ ,  $\Gamma$  为光学限制因子,  $g_{\text{mat}}(E, x)$  为材料增益系数,  $\alpha(E, x)$  为晶体中对光的吸收、散射以及缺陷等原因导致的总损耗。

式(1)给出了 ASE 强度随条长  $L$  的变化趋势,它只适用于非饱和和增益的情况。实验中可以通过改变条长  $L$  获得一系列的  $I-L$  数据,依据式(1)拟合出  $g_{\text{mod}}(E)$  值来,进而获得模式增益、饱和长度及其它一些材料参数<sup>[13, 16, 18]</sup>。

### 3 结果与讨论

如图 3 为室温下泵浦条宽度为 2.6, 6.2,

10.5  $\mu\text{m}$  的样品在激发功率密度 15  $\text{MW}/\text{cm}^2$  的实验条件下,在同一波长 430 nm 处 ASE 强度与泵浦激光条长度的关系。横轴对应激光泵浦条长度  $L$ ,纵轴对应放大自发发射谱强度。由图 3 看到,在条长较短时发射谱强度的对数与条长呈线性关系,与利用式(1)对实验数据拟合的直线相吻合。根据式(1),实线的斜率代表模式增益  $g_{\text{mod}}(E)$  的大小,该拟合直线与实验数据曲线的交点对应的横轴坐标就是饱和长度  $L_s$ ,条长大于  $L_s$  后发射谱出现增益饱和现象,式(1)不再适用。

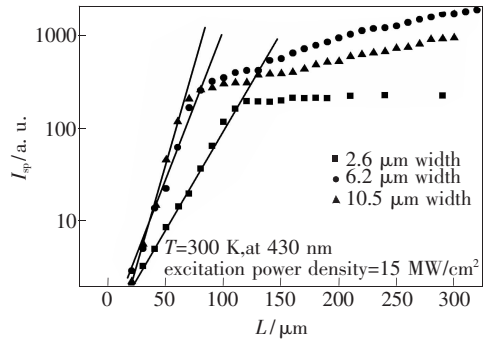


图3 430 nm 处 ASE 强度与条长的关系,三条曲线表示 2.6, 6.2, 10.5  $\mu\text{m}$  三个不同的泵浦条宽度。

Fig. 3 ASE intensity versus stripe length at 430 nm. The three samples are with different stripe width of 2.6, 6.2, 10.5  $\mu\text{m}$ .

从图 3 可以看到在 ASE 谱 430 nm 波长处,泵浦条的宽度越大,直线斜率越大,它与实验数据曲线的交点对应的横轴坐标越小,即表示随泵浦条变宽,模式增益  $g_{\text{mod}}(E)$  逐渐变大,饱和长度  $L_s$  则逐渐变短。

利用这个分析方法,可以得到泵浦条宽度为 2.6, 6.2, 10.5  $\mu\text{m}$  的样品在整个 ASE 谱范围的光增益谱,如图 4。可以看到对于 ASE 谱上的几乎所有波长,随着泵浦条宽度变大,模式增益  $g_{\text{mod}}(E)$  变大,饱和长度  $L_s$  变短。

泵浦条宽度不同造成增益变化的现象可能由于载流子扩散造成。可唯象地解释如下,在热平衡时半导体量子阱单位体积中有一定数目的载流子,其载流子浓度在各处是均匀的。当泵浦光照射在样品条形区域时,将产生超出热平衡的多余载流子即非平衡载流子。泵浦条的边界处存在载流子浓度的突变,从而造成载流子扩散<sup>[19]</sup>。对于 GaN, 考虑到扩散长度  $L_p \approx 2 \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>,表示非平衡载流子深入样品的平均距离。对于宽度为 2.6  $\mu\text{m}$

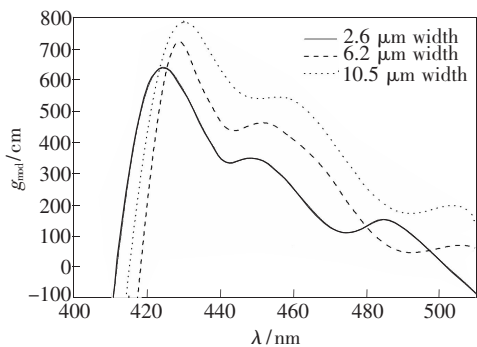


图 4 不同泵浦条宽度 2.6, 6.2, 10.5  $\mu\text{m}$  对应的光增益谱

Fig. 4 Measured optical gain spectra at various stripe width

条整个泵浦区域内非平衡载流子都可能扩散到条外侧区域;而对于宽度为 6.2, 10.5  $\mu\text{m}$  条则只有靠近条两侧的部分区域内载流子可能扩散到条外侧,故宽条的非平衡载流子浓度受扩散影响更小,参与发光的非平衡载流子浓度更高。而增益大小与非平衡载流子浓度成正比例关系<sup>[21]</sup>,所以在非饱和时泵浦条越宽,非平衡载流子浓度越高,增益越大,与实验结果相吻合。

具体的理论计算模型如图 5,考虑一维情况,即假定少数非平衡载流子浓度只随  $x$  变化,可写成  $\Delta p(x)$ ,那么在  $x$  方向,载流子浓度梯度为  $\frac{d\Delta p(x)}{dx}$ 。若用  $s_p$  表示空穴扩散流密度,则有  $s_p = -D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx}$ ,比例系数  $D_p$  称为空穴扩散系数,图中  $w$  表示泵浦条的宽度。由于三个不同条宽的样品结构完全相同,则空穴扩散系数相等,在相同功率密度光照射下  $t_0 = 0$  时刻产生的非平衡少数载流子浓度相等均为  $\Delta p_0$ 。当脉冲停止后经过短时间  $t$ ,空穴的一维扩散方程的解为<sup>[20]</sup>

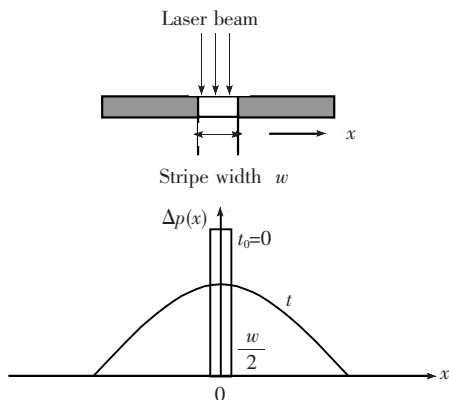


图 5 非平衡载流子向条两侧的扩散模型

Fig. 5 Model of diffusion for the non-equilibrium carrier

$$\Delta p = \frac{N_p}{\sqrt{4\pi D_p t}} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{4D_p t} + \frac{t}{\tau_p}\right)\right], \quad (2)$$

式(2)中  $N_p$  表示单位长度的宽为  $w$  的泵浦条上产生的总空穴数。设  $n_p$  表示单位面积产生空穴数,  $n_p h\nu =$  功率密度  $\times$  脉宽,则  $N_p = n_p g w$ ,  $\tau_p$  为载流子寿命。则扩散到条外侧的载流子数为

$$N_{\text{diff}}(t) = 2 \int_{w/2}^{\infty} \Delta p(x, t) dx = \frac{2N_p e^{-t/\tau_p}}{\sqrt{4\pi D_p t}} \int_{w/2}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_p t}\right) dx = N_p e^{-t/\tau_p} \operatorname{erfc}\left(\frac{w}{4\sqrt{D_p t}}\right), \quad (3)$$

则脉冲结束后任意时刻  $t$  在条内的平均载流子密度为

$$n(t) = \frac{N_p - N_{\text{diff}}}{w} = n_p \left[1 - e^{-t/\tau_p} \operatorname{erfc}\left(\frac{w}{4\sqrt{D_p t}}\right)\right], \quad (4)$$

对于任意某时刻  $t$ ,式(4)都是泵浦条的宽度  $w$  的增函数,则均有  $n_{2.6}(t) < n_{6.2}(t) < n_{10.5}(t)$ 。

对于 InGaN/GaN 量子阱,式中载流子寿命  $\tau_p = 8 \times 10^{-9} \text{ s}$ ,  $n_p \approx 3.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ,  $D_p \approx 5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,以  $t = \tau_p$  时刻为例,根据式(3)和(4),将各数值代入可计算得到

$$\begin{aligned} n_{2.6} &= 2.59 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}, \\ n_{6.2} &= 3.05 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}, \\ n_{10.5} &= 3.32 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}, \end{aligned} \quad (5)$$

扩散出条外的载流子并不参与发光。由计算结果可看到随泵浦条宽度变大,参与发光的非平衡载流子浓度增高。

很多变条长实验中<sup>[22,23]</sup>,为尽可能获取有效的光增益,使饱和和长度足够长,尽量将光限制在窄的有源区内,但这种做法并没有考虑到扩散的影响。本文证明泵浦条宽很窄时,扩散的影响不能忽略。条宽越窄,由于扩散造成的非平衡载流子浓度降低的幅度越大,模式增益值减小。

## 4 结 论

通过实验研究发现:泵浦条的宽度是变条长测增益方法的重要参量,在运用变条长方法研究光增益时应该考虑泵浦条宽度这一实验条件。本文介绍了严格控制泵浦条宽度的方法,并通过实验研究得出:尽管泵浦条宽度越窄,饱和长度越长,但由于扩散的影响,将带来增益的减小。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Xie Lunjun, Chen Guangde, Zhu Youzhang, *et al.* Different luminescence behavior between the surface and edge of ZnO film [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2006, **27**(6):910-915 (in Chinese).
- [ 2 ] Wang Mingyue, Yuan Jinshe, Yu Guohao. Correlation of the yellow photoluminescence and excitation sources of GaN film grown by MOVPE [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(1):73-76 (in Chinese).
- [ 3 ] Zheng Weimian, Lu Yingbo, Song Shumei, *et al.* Photoluminescence study of the acceptor binding energy in GaAs/AlAs quantum wells [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(1):156-160 (in Chinese).
- [ 4 ] Wu Dianzhong, Wang Wenxin, Yang Chengliang, *et al.* InAs quantum dots with InGaAs caplayer infrared detector grown by MBE [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(2):209-213 (in Chinese).
- [ 5 ] Yi Juemin, Li Hongbo, Tang Fangqiong, *et al.* White lighting LEDs from InGaN blue LEDs and CdTe nanocrystals [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(6):1071-1075 (in Chinese).
- [ 6 ] Hakki B W, Paoli T L. A way to measure the gain of semiconductor [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**:4413-4415.
- [ 7 ] Lange C, Chatterjee S, Schlichenmaier C, *et al.* Transient gain spectroscopy of (GaIn)As quantum wells: Experiment and microscopic analysis [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(25):251102-1-3.
- [ 8 ] Kawakami Y, Narukawa Y, Omae K, *et al.* Dynamics of optical gain in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  multi-quantum-well-based laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(14):2151-2153.
- [ 9 ] Lange C, Schwalm M, Chatterjee S, *et al.* The variable stripe-length method revisited: Improved analysis [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(19):191107-1-4.
- [ 10 ] Penzkofer A, Holzer W, Tillmann H, *et al.* Leaky-mode emission of luminescent thin films on transparent substrates [J]. *Opti. Commun.*, 2004, **229**(1-6):279-290.
- [ 11 ] Vehse M, Meinertz J, Lange O, *et al.* Analysis of gain saturation behavior in GaN based quantum well lasers [J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2002, **1**(1):43-50.
- [ 12 ] Swietlik T, Franssen G, Skierbiszewski C, *et al.* Comparison of gain in group-III-nitride laser structures grown by metal-organic vapour phase epitaxy and plasma-assisted molecular beam epitaxy on bulk GaN substrates [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2007, **22**(7):736-741.
- [ 13 ] Mickevičius J, Tamulaitis G, Shur M S, *et al.* Saturated gain in GaN epilayers studied by variable stripe length technique [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(10):103513-1-6.
- [ 14 ] Vehse M, Michler P, Gutowski J, *et al.* Influence of composition and well-width fluctuations on optical gain in (In,Ga)N multiple quantum wells [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2001, **16**(5):406-412.
- [ 15 ] Chii-Chang Chen, Kun-Long Hsieh, Jinn-Kong Sheu, *et al.* Dependence of optical gain on direction of optically pumped cavity on (0001)-plane for InGaN/GaN multiple quantum well structure [J]. *Materials Science and Engineering (b)*, 2002, **93**(1-3):28-30.
- [ 16 ] Kyhm K, Taylor R A, Ryan J F, *et al.* Analysis of gain saturation in  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}/\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$  multiple quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(21):3434-3436.
- [ 17 ] Frankowsky G, Steuber F, Haörle V, *et al.* Optical gain in GaInN/GaN heterostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(26):3746-3748.
- [ 18 ] Mohs G, Aoki T, Nagai M, *et al.* Failure of the modal gain model in a GaN based laser diode [J]. *Sol. Stat. Commun.*, 1997, **104**(11):643-648.
- [ 19 ] Enke L, Bingsheng Z H, Jinsheng L. *Physics of Semiconductors* [M]. 7th edition, Beijing: China Publishing House of Electronics Industry, 2008, 145-178 (in Chinese).
- [ 20 ] Chernyak L, Osinsky A, Schulte A. Minority carrier transport in GaN and related materials [J]. *Sol. Stat. Electron.*, 2001, **45**(9):1687-1702.
- [ 21 ] Yariv A. *Quantum Electronics* [M]. 3rd edition, San Francisco: John Wiley & Sons, 1989, 560-581.
- [ 22 ] Michler P, Lange O, Vehse M, *et al.* Gain saturation in (In,Ga)N/GaN/(Al,Ga)N laser structures [J]. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2000, **180**(1):391-396.
- [ 23 ] Vehse M, Michler P, Lange O, *et al.* Optical gain and saturation in nitride-based laser structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(12):1763-1765.

## The Impact of Stripe Width in the Variable Stripe Length Method on GaN Gain Measurements

WANG Wei, YANG Zi-wen, YU Tao, XING Bing, WANG Lei, LI Rui,

DU Wei-min, HU Xiao-dong

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In this paper, a method strictly controlling the width of pump stripe in the measurement of variable stripe length (VSL) method is present. For the gain measurements, we deal samples with lithography and sputtering, so that three different wide stripes, 2.6, 6.2 and 10.5  $\mu\text{m}$ , are exposed separately on three samples, besides the rest parts are covered by 100 nm thick aluminum coating to strictly control the width of the pump stripe. We specially noticed that the pump stripes exposed are all along the same crystal orientation, in order to avoid the influence of different crystal orientation on optical gain. Using the VSL method, we studied the optical gain and saturation semiconductor laser with different pump stripe width. The gain spectra were discussed for three different pump stripe widths of 2.6, 6.2 and 10.5  $\mu\text{m}$ , respectively. An increase of the modal gain and the decrease of saturation length with increasing stripe width were observed for most wavelengths on the amplified spontaneous emission spectrum through our experiments. The phenomenon that the gain changes with the pump stripe width could be due to the carrier diffusion. The carrier diffusion's impact on different width pump stripe was discussed by theoretical calculation. The conclusion indicated that diffusion leads to lower non-equilibrium carrier concentration in a narrower pump stripe, and the modal gain decreases. To obtain effective optical gain and the long saturation length, experiments in many papers suggested making the pump stripe as narrow as possible, but this approach did not take the impact of diffusion into account. Our experiments showed that the diffusion can not be ignored when the stripe is narrow. Based on our experiments and calculation, pump stripe width is an important parameter related to the optical gain in VSL. We can choose an appropriate width of the pump stripe according to the needs when measuring the optical gain and its spectrum through the variable stripe length method.

**Key words:** GaN; variable stripe length; stripe width; modal gain; saturation length

**CLC number:** O472.3; TN248.4    **PACS:** 78.55.Cr; 78.66.Fd    **PACC:** 7855E; 7865K    **Document code:** A