

# 窄发散角量子阱激光器的结构设计与分析

杨国文 徐俊英 张敬明 徐遵图 陈良惠 王启明

(中国科学院半导体研究所 北京 912 信箱 100083)

**摘要** 本文对 GaAs/AlGaAs 量子阱结构激光器中重要的结构参数与远场垂直发散角的关系作了系统的理论计算与分析,提出了实现  $20^\circ \sim 30^\circ$  垂直发散角的有效途径,并同时研究了激光器光功率限制因子、阈值电流密度等重要参数的影响。

PACC: 4260H, 4280, 7865

## 1 引言

一般半导体激光器由于在垂直于结平面方向较小的发光尺度使得该方向的光束发散角很大,目前较为典型的缓变折射率限制(GRIN-SCH)量子阱激光器虽然在低阈值电流、高量子效率等方面<sup>[1]</sup>发挥了巨大的优势,但由于该结构对光场的强烈限制使得垂直结平面方向的光束发散角的典型值在  $40^\circ$  到  $60^\circ$  之间<sup>[2,3]</sup>,而一般的器件结构在平行结平面方向的光束发散角为  $10^\circ$  左右,从而导致了非常不对称的椭圆远场光斑,这对于许多应用来说十分不利.比如对于半导体激光器作为固体激光器泵浦源来讲,如果将典型的垂直发散角  $50^\circ$  降低到  $30^\circ$  或  $20^\circ$  则将大大提高激光器的泵浦效率.对于光纤耦合来讲,降低发散角可以有效地提高光纤耦合效率,同时降低对激光光源的要求,延长使用寿命等.另外对于光学存储以及自由空间光互连等应用方面也有着十分重要的实际意义.但对于近年来十分活跃的量子阱结构激光器的垂直发散角优化设计方面的系统理论分析还很少有过报道,本文将就此以典型的 850nm GaAs/AlGaAs 量子阱激光器为例,对量子阱激光器中结构各参数与远场垂直发散角的关系作一定量的数值计算分析,并同时考虑了光限制因子、阈值电流密度等重要参数,提出了改善发散角的有效途径.

## 2 理论

远场分布实际上是近场分布的富里叶变换,其远场强度的角分布可表示为:

$$I(\theta) = \frac{\cos^2\theta}{\lambda_0 r} \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x) \exp(ik_0 x \sin\theta) dx \right|^2 \quad (1)$$

杨国文 男,1966年生,助理研究员,目前主要从事于量子阱激光器的结构设计、MBE生长以及器件制备等工作  
1995年3月16日收到初稿,1995年7月17日收到修改稿

其中  $\lambda_0$  为真空波长;  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ;  $x$  为垂直于结平面方向坐标;  $r, \theta$  各为远场一点相对于有源层出射端面中心的距离和与波导中心轴的夹角;  $E_y(x)$  为端面光场分布, 我们一般关心的基横模(即零阶模)的远场发散角定义为远场分布的半峰值点之间的全角宽(FWHM), 即  $I(\theta_{\perp}/2) = I(0)/2$ .

(1)式中的近场分布  $E_y(x)$ , 可对任意一维折射率分布的波导结构求解波动方程:

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + [k_0^2 n^2(x) - \beta^2] E_y(x) = 0 \quad (\text{TE 模}) \quad (2)$$

及其边界条件得到, 其中  $n(x)$  为  $x$  方向折射率分布;  $\beta$  为该特定波导结构的传播常数.

我们可利用一维打靶法来求解方程(2), 假设求解期间为  $[0, t]$ , 在  $x < 0$  和  $x > t$  区域,  $E_y(x)$  应为指数衰减函数, 设折射率分别为常数  $n_1$  和  $n_3$ , 即有:

$$E_y(x) = E_y(0) \exp(\gamma_1 x) \quad (x < 0) \quad (3)$$

$$E_y(x) = E_y(t) \exp(-\gamma_3 x) \quad (x > t) \quad (4)$$

其中  $\gamma_i = (\beta^2 - k_0^2 n_i^2)^{1/2}$ , 由  $x=0$  和  $x=t$  处的导数连续可得:

$$f_0 = \left. \frac{dE_y(x)}{dx} \right|_{x=0} - \gamma_1 E_y(0) = 0 \quad (5)$$

$$f_t = \left. \frac{dE_y(x)}{dx} \right|_{x=t} + \gamma_3 E_y(t) = 0 \quad (6)$$

取假定的  $\beta$  值, 则(2)、(3)、(5)构成通常的一元二次常微分方程边值问题, 用差分法求解得到场分布  $E_y(x)$ , 看(6)式是否满足, 若不满足则继续改变  $\beta$ , 重新求解, 直到  $f_t=0$  满足为止. 此时就可以得到该给定波导结构的传播常数  $\beta$ , 近场分布  $E_y(x)$ , 从而可以得到近场光强分布  $|E_y(x)|^2$ 、远场角分布  $I(\theta)$  及光限制因子  $\Gamma$ 、近场半宽  $W_{1/2}$  和远场发散角  $\theta_{\perp}$  等重要参数.

由近场和远场的富里叶变换关系可知, 对于给定的波导结构, 近场光扩展越宽, 远场角越小, 从下面的数值分析也可清楚地了解这一点, 因此欲获得小的远场发散角, 就必须尽可能的使光场扩展得大一些, 而要扩展光场, 将会使反映光场限制程度的光限制因子  $\Gamma$  (定义为有源区中光功率与总光功率之比)减小. 我们知道, 一般量子阱激光器的阈值电流密度可表示为:

$$J_{th} = \frac{1}{\eta_i} \left( J_0 + \frac{\alpha_i + \ln(1/R)/L}{\Gamma \beta^*} \right) \quad (7)$$

其中  $\eta_i$  为内量子效率;  $J_0$  为透明阈值电流密度;  $\beta^*$  为增益因子;  $\alpha_i$  为激光器腔内内损耗, 主要包括载流子吸收损耗和界面散射损耗,  $L$  为激光器腔长;  $R$  为端面反射率. 在不考虑结构改变可能带来的载流子漏泄损失和内量子效率下降的情况下, 激光器的阈值电流密度反比于光功率限制因子, 即限制因子越小, 阈值电流密度会越大, 因此, 在扩展光场的同时, 必须兼顾限制因子减小可能带来的阈值电流密度急剧增大的缺点.

对于一般典型的 GaAs/AlGaAs 量子阱激光器的参数为  $\eta_i = 0.9$ ,  $J_0 = 100 \text{ A/cm}^2$ ,  $\Gamma = 3.5\%$ ,  $\beta^* = 4 \text{ cm/A}$ ,  $\alpha_i = 5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $L = 600 \mu\text{m}$ , 计算得到的阈值电流密度  $J_{th}$  为  $250 \text{ A/cm}^2$ , 实验值也基本与此相符<sup>[4]</sup>. 考虑到激光器的实际应用, 阈值电流密度最好不超过  $500 \text{ A/cm}^2$ , 那么假设其它参数不变, 则至少应要求限制因子保持在  $1.7\%$  以上, 否则阈值电流密度太高也将不利于激光器的工作.

组成激光器的主要结构参数如有源层、波导层和限制层的设计均直接影响着激光器的

发散角的大小和其它性能参数,我们针对激光器的主要结构参数与远场垂直发散角、光限制因子等的关系作了数值计算分析,以获得具有指导意义的较为直观的定量结果.

### 3 数值计算结果与分析讨论

图 1 为典型的 GaAs/AlGaAs 量子阱激光器结构示意图,其结构主要包括 p-和 n-AlGaAs 上下限制层,不故意掺杂的波导层及有源层.典型的波导结构可分为突变波导层结构(Step)和缓变折射率分布波导层结构(GRIN).

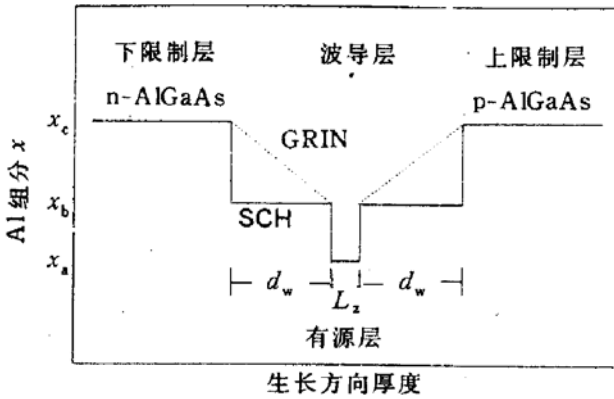


图 1 典型 AlGaAs 量子阱激光器结构示意图  
对于发射波长在  $0.85\mu\text{m}$  波段,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的折射率可采用如下关系式<sup>[5]</sup>:

$$\bar{n}(x) = 3.63 - 0.64x;$$

图 2 给出了  $x_b = 0.2$ ,  $x_a = 0$ ,  $L_z = 10\text{nm}$ ,  $x_c = 0.6$  和  $x_c = 0.4$  两种情况下,线性缓变折射率分布波导层结构和突变波导层结构随波导层厚度  $d_w$  的计算结果.

#### 3.1 波导层厚度的影响

图 2 中(a)、(b)、(c)分别给出了光限制因子  $\Gamma$ 、远场发散角  $\theta_{\perp}$  及近场宽度  $W_{1/2}$  与波导层厚度的关系曲线,可以看出波导层厚度  $d_w$  对远场光束发散角、光限制因子及近场分布的影响较大.

这里我们以  $x_c = 0.6$  线性折射率波导 (GRIN) 情况来说明其变化关系,在  $d_w$  较小时,限制因子  $\Gamma$  较小,光场扩展  $W_{1/2}$  较大,远场发散角也比较小.但若  $d_w$  太小,如在极限情况  $d_w = 0$  时,  $\theta_{\perp}$  很小仅  $7.5^\circ$ ,但限制因子却只有  $0.7\%$ ,光场扩展十分严重,这会使阈值电流密度急剧增大,是十分不利的.随着波导层厚度的增大,光限制因子逐渐增大,光场限制逐渐增强,近场半宽减小,远场的光束发散角也逐渐增大,如在  $d_w = 170\text{nm}$  附近,限制因子  $\Gamma$  达到最大  $3.7\%$ ,远场发散角为  $48^\circ$ .当波导层厚度再进一步增大时,限制因子开始变小,但变化较弱,相应的近场

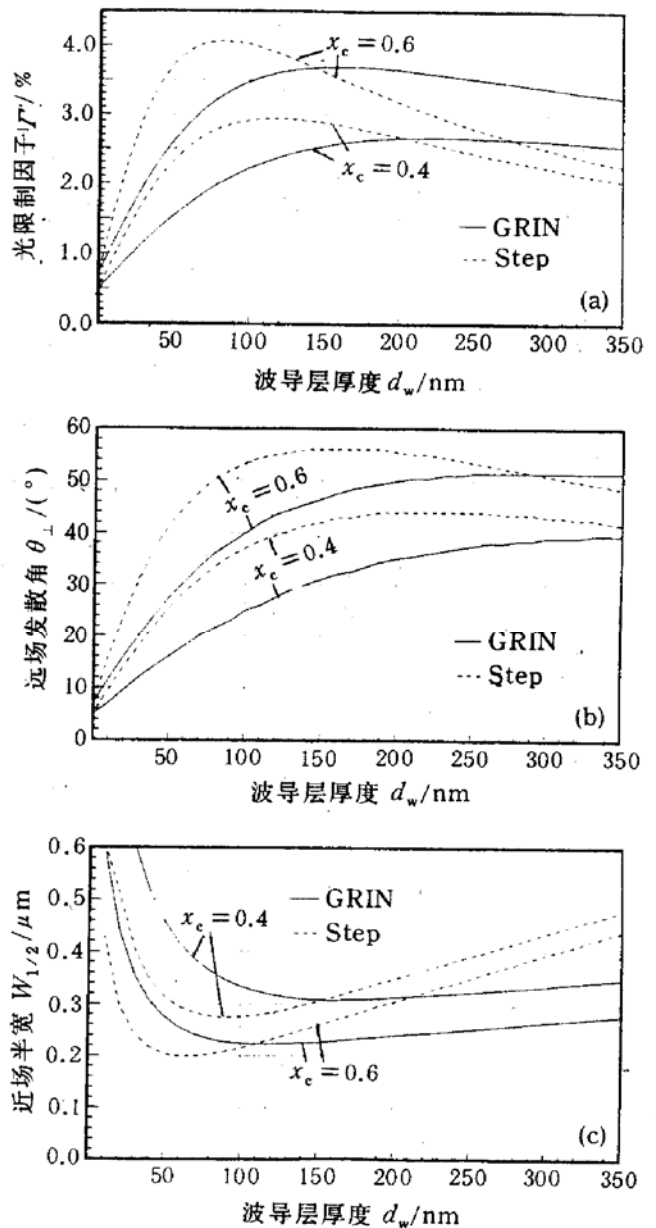


图 2 计算的线性折射率波导结构和突变波导结构的光限制因子  $\Gamma$ 、远场发散角  $\theta_{\perp}$  及近场半宽  $W_{1/2}$  随波导层厚度  $d_w$  的变化关系曲线

半宽、远场发散角变化也不十分敏感,而且  $\theta_{\perp}$  随  $d_w$  增大略有增大,如在  $d_w=250\text{nm}$  时  $\theta_{\perp}$  为  $52^\circ$ . 因此根据图 2(b)的曲线可明显看出,欲获得较小的远场垂直发散角(如  $30^\circ$  以下),应选取较小的  $d_w$  值.

### 3.2 波导层形状的影响

线性折射率分布缓变波导层结构和突变波导层结构是经常采用的结构.由图 2 可见,波导层不同的折射率分布也直接影响着光限制因子  $\Gamma$ 、远场发散角  $\theta_{\perp}$  的大小.与线性分布波导结构相比较,突变波导结构的光限制因子随  $d_w$  的变化要敏感一些.从图 2 还可以看出,要获得同样大小的小发散角,线性波导层结构较突变波导层结构可以容许更厚一些的波导厚度,如  $30^\circ$  发散角时对于  $x_c=0.6$  情况,线性波导结构可以有  $60\text{nm}$  的波导宽度,而突变波导结构只有  $30\text{nm}$ ,此时有源层的光限制因子基本相近约  $2.8\%$  左右,而在限制层中的总光强分别为  $70\%$  和  $83\%$ ,前者对减小限制层中载流子的吸收损耗从而减小  $\alpha_i$  是有意义的.

如果我们采用介于突变波导层结构和线性折射率波导层结构之间的其它折射率分布结构,如由几个逐步递变的台阶构成的分步缓变波导层结构(称之为 Step-GRIN),则可以使限制因子和发散角介于上述两种波导结构之间,即在同一  $d_w$  时具有比突变波导结构小的发散角而比线性波导结构大的限制因子,3.5 节中给出了分步缓变波导层结构的计算结果.

### 3.3 限制层组分 $x_c$ 的影响

降低限制层的组分  $x_c$  可以减小折射率差从而有效的扩展光场,使  $\theta_{\perp}$  显著下降.从图 2 中  $x_c=0.4$  与  $x_c=0.6$  的数值计算结果比较可以清楚地看出,对于同一波导层厚度,  $x_c$  为  $0.4$  的波导结构要比相应的  $x_c$  为  $0.6$  的  $\theta_{\perp}$  小许多,最大可差别  $15^\circ$  以上,如对于  $d_w=150\text{nm}$  和  $x_c=0.6$  时,突变波导结构和线性波导结构的  $\theta_{\perp}$  分别为  $56^\circ$  和  $46^\circ$ ,而  $x_c=0.4$  时则分别为  $42^\circ$  和  $31^\circ$ .

采用降低限制层组分来减小发散角是有一定限度的,因为限制层组分降得过低不仅会使光限制因子比  $x_c$  为  $0.6$  的结构小许多,而且更为重要的是由于小的组分差造成的低的带隙差别可能会引起严重的载流子漏泄损失<sup>[6,7]</sup>,从而使内量子效率下降,阈值电流密度提高,这显然也是不利于器件工作的.为此应当适度降低限制层组分  $x_c$  以在不增加额外载流子损失的情况下降低发散角.

### 3.4 有源层的影响

有源层的厚度一般根据发射波长而定,但其厚度大小对远场发散角也略有影响,图 3 中给出了  $50\text{nm}$ 、 $150\text{nm}$ 、 $250\text{nm}$  三种不同波导层厚度时在  $x_c=0.5$  情况下线性折射率波导结构  $\theta_{\perp}$  随  $L_z$  的计算结果,可以看出  $\theta_{\perp}$  随阱宽  $L_z$  的增大而增大.另外在波导层厚度越小时,有源层厚度的变化对远场发散角的影响越大.

采用多量子阱结构可以弥补单阱结构光限制因子较小的缺点,图 4 给出了  $x_c=0.5$ ,  $x_b=0.2$ ,  $L_b=10\text{nm}$  (势垒宽度),  $L_z=7\text{nm}$  情况下单阱、双阱与三阱波导结构的计算结果,与单阱相比,多量子阱结构的  $\theta_{\perp}$  要大一些,但与单阱相

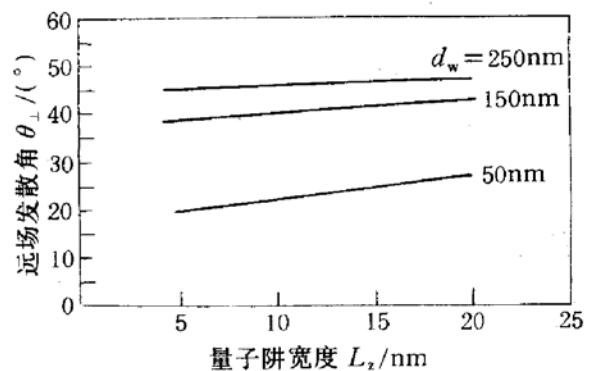


图 3 计算的 GaAs/AlGaAs 线性折射率波导结构量子阱激光器的远场发散角  $\theta_{\perp}$  在不同波导层厚度时随阱宽  $L_z$  的变化关系

其中  $x_c=0.5$ ,  $x_b=0.2$

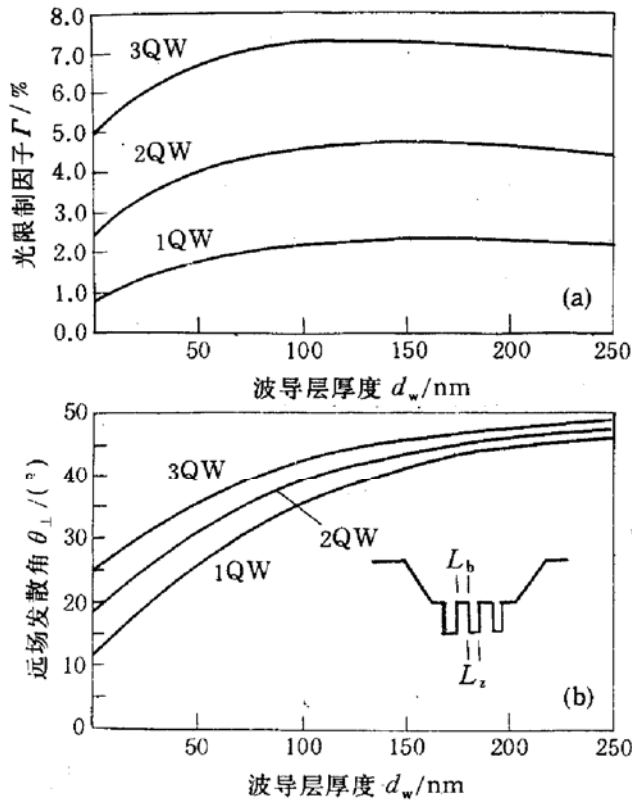


图 4 计算的单阱、双阱及三阱结构的光限制因子  $\Gamma$  和垂直发散角  $\theta_{\perp}$  随波导层厚度的变化关系

比,多阱结构的光限制因子也要高许多倍,这对于避免小  $d_w$  时限制因子太小是十分有利的。

### 3.5 窄发散角量子阱激光器

根据上面的计算分析我们可以知道,采用较小的波导层厚度和适当降低限制层组分是实现小发散角的有效途径.但不致使阈值电流密度增大过多,须尽可能保持较大的光限制因子,这就需要波导层宽度在满足所需要的小发散角时应尽可能大一些,表 1 给出了所设计的  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$  的窄发散角单阱与双阱线性折射率波导层结构激光器的计算结果,所用参数为:  $x_c=0.48, x_b=0.22, x_a=0, L_z=10\text{nm}, L_b=10\text{nm}$ .

另外,采用如图 5 所示的具有较少台阶数和小台阶厚度的分步缓变波导层结构也可以得到较小的  $\theta_{\perp}$ ,表 2 给出了 3 台阶结构(假设台阶厚度相同)的计算结果.

表 1 窄发散角量子阱激光器结构计算结果

$d_w/\text{nm}$		10	20	30	40	50	60	70	80
1QW	$\Gamma/\%$			1.9	2.1	2.3	2.5	2.6	2.7
	$\theta_{\perp}/(^{\circ})$			20.0	22.5	24.5	26.5	28.5	30.5
2QW	$\Gamma/\%$	4.3	4.7	5.1	5.4	5.6			
	$\theta_{\perp}/(^{\circ})$	22.5	25.0	27.0	29.0	31.0			

表 2 分步缓变波导结构计算结果(参数如图 5 所示)

$d/\text{nm}$	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0
$\Gamma/\%$	1.5	1.7	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7	2.8
$\theta_{\perp}/(^{\circ})$	15.0	17.5	20.5	23.0	25.0	27.5	29.5	31.0

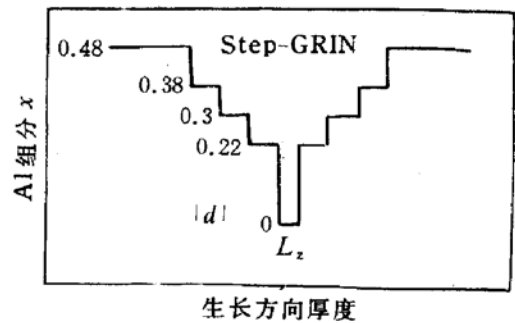


图 5 分布缓变波导结构 (Step-GRIN) 示意图

## 4 结论

我们通过对量子阱激光器中波导层、限制层以及有源层等结构参数与远场发散角关系的数值计算分析,研究了影响远场发散角的重要因素,分析了获得具有窄发散角,而又不严重影响激光器其它性能的有效途径,提出了可实现 $30^\circ$ 以内垂直发散角的窄波导层厚度激光器结构.对于GaAs/AlGaAs线性折射率波导结构量子阱激光器,为不致使阈值电流密度超过 $500\text{A}/\text{cm}^2$ ,选择波导厚度在 $40\sim 80\text{nm}$ 范围内则可实现 $20^\circ\sim 30^\circ$ 的发散角.对于分步缓变波导结构量子阱激光器,选择台阶厚度为 $10\sim 25\text{nm}$ 的3台阶结构也可有效的实现较小的远场发散角.

## 参 考 文 献

- [1] W. T. Tsang, Appl. Phys. Lett., 1982, **40**: 217.
- [2] S. Uehara, M. Okayasu, T. Takeshita *et al.*, Optoelectronics, 1990, **5**: 71.
- [3] 徐遵图,杨国文,肖建伟,等,半导体学报, 1995, **16**(8): 598.
- [4] 杨国文,等,半导体学报, 1994, **15**(9): 650.
- [5] "Optical functions of AlGaAs: Tables(0.5-6.0eV)", in Properties of Gallium Arsenide, 2nd ed. INSPEC, 1990.
- [6] A. R. Reisinger, P. S. Zory and R. G. Waters, IEEE J. Quantum Electron., 1987, **QE-23**: 993.
- [7] J. Nagle, S. Hersee, M. Krakowski *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1986, **49**: 1325.

## Structure Design and Analysis of Quantum Well Lasers With Low Beam Divergence

Yang Guowen, Xu Junying, Zhang Jingming, Xu Zuntu,  
Chen Lianghai and Wang Qiming

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 16 March 1995, revised manuscript received 17 July 1995

**Abstract** In this paper, we report the systematic theoretical calculation and analysis on far field transverse beam divergence as a function of structure parameters for GaAs/AlGaAs quantum well laser. The effective methods of decreasing transverse beam divergence to  $20^\circ\sim 30^\circ$  are found, and the effect on optical confinement factor, threshold current density, etc. are also studied.

**PACC:** 4260H, 4280, 7865