

# 重掺补偿的 p-GaAs 的指数带尾和激光特性

杜 宝 勋

(中国科学院半导体研究所)

1981年6月22日收到

## 提 要

本文讨论了重掺补偿的 p-GaAs 的指数带尾, 得到了计算激光特性的解析表达式, 并给出了典型样品的计算结果。

## 一、引言

重掺补偿的 p-GaAs 是重要的半导体激光材料之一。在这种半导体材料中, 电离的施主和受主是随机分布的, 由这个分布建立起来的库仑势对导带边和价带边产生微扰, 因而形成了与本征带衔接的带尾。

带尾对定量计算激光特性具有重要意义。Stern<sup>[1]</sup> 采用 Kane<sup>[2]</sup> 带尾计算了重掺补偿的 p-GaAs 的激光特性。但是, 采用 Kane 带尾不能得到激光特性的解析表达式, 必须用计算机进行大量的数值计算。

作者采用指数带尾计算了重掺补偿的 p-GaAs 的激光特性。虽然采用指数带尾是一个唯象的近似方法, 但是却使数学分析大为简化, 因而得到了激光特性的解析表达式。这样一来, 反而使分析过程的物理线索更清楚了。

## 二、指数带尾

把能量坐标的原点取在名义带边, 并令朝着带内的方向为正。Kane 带尾的电子态密度函数是<sup>[2]</sup>

$$\rho_i(E') = a_i \eta^{1/2} y(E'/\eta), \quad (1)$$

$$a_i = \frac{4\pi(2m_i^*)^{3/2}}{\hbar^3}, \quad (2)$$

$i$  为 c 或 v, c 表示导带, v 表示价带。 $\hbar$  是普朗克常数,  $m^*$  是载流子有效质量,  $E'$  是能量坐标,  $\eta$  是带尾参量,  $y(x)$  是 Kane 函数。

$$y(x) = \pi^{-1/2} \int_{-\infty}^x (x-z)^{1/2} e^{-z^2} dz, \quad (3)$$

图 1 中的实线是 Kane 函数曲线。

指数带尾的电子态密度函数是<sup>[3,4]</sup>

$$\rho_i(E') = \begin{cases} a_i E'^{1/2}, & E' > E_0/2, \\ a_i \left(\frac{E_0}{2e}\right)^{1/2} e^{E'/E_0}, & E' \leq E_0/2, \end{cases} \quad (4)$$

$E_0$  是指数带尾的特征能量。显然,  $E_0$  的取值是这个问题的关键。

现在, 取指数带尾态密度在  $x = -1.0$  ( $y \approx 0.045$ ) 处等于 Kane 带尾态密度的吻合近似。令

$$Q = \eta/E_0, \quad (5)$$

可以写出方程

$$a_i \left(\frac{\eta}{2eQ}\right)^{1/2} e^{-Q} = 0.045 a_i \eta^{1/2}, \quad (6)$$

消去  $a_i$  和  $\eta$  后得到

$$0.045(2eQ)^{1/2} = e^{-Q}, \quad (7)$$

由式(7)求出  $Q \approx 2$ , 因而

$$E_0 \approx \eta/2. \quad (8)$$

为了考察这个吻合近似的程度, 在  $E' \leq E_0/2$  的情况下, 由式(1)和式(4)得到

$$y(x) \approx \frac{1}{3} e^{2x}, \quad (9)$$

图 1 中的  $\times$  就是根据式(9)画出的数据, 可见指数带尾与 Kane 带尾非常吻合。

下面来推导  $E_0$  的表达式。可以写出<sup>[5]</sup>

$$E_0 = 2^{-1/2} V_{\text{rms}}, \quad (10)$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon} [2\pi(N_a^- + N_d^+)l]^{1/2}, \quad (11)$$

$V_{\text{rms}}$  是库仑势的均方根值,  $q$  是电子的电荷量,  $\epsilon$  是材料的介电常数,  $l$  是自由载流子屏蔽长度,  $N_d^+$  和  $N_a^-$  是电离的施主和受主浓度。

屏蔽长度的普遍表达式为<sup>[1]</sup>

$$l^{-2} = \frac{q^2}{\epsilon} \left( \frac{\partial N}{\partial F_c} + \frac{\partial P}{\partial F_v} \right), \quad (12)$$

$N$  和  $P$  是导带电子浓度和价带空穴浓度,  $F_c$  和  $F_v$  是导带准费米能级和价带准费米能级。

一般说来, 在重掺补偿的 p-GaAs 中, 载流子主要填充在带尾之内<sup>[1]</sup>, 在  $kT < 0.9E_0$  的情况下有<sup>[3]</sup>:

$$N \approx a_c \left(\frac{E_0^3}{2e}\right)^{1/2} e^{F_c/E_0} \times \frac{\pi k T / E_0}{\sin(\pi k T / E_0)}, \quad (13)$$

$$P \approx a_v \left(\frac{E_0^3}{2e}\right)^{1/2} e^{F_v/E_0} \times \frac{\pi k T / E_0}{\sin(\pi k T / E_0)}, \quad (14)$$

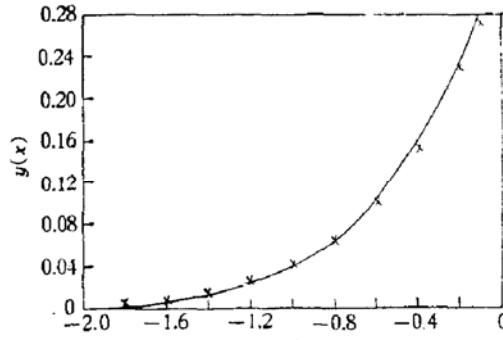


图 1 指数带尾与 Kane 带尾的比较 实线是 Kane 函数曲线,  $\times$  是指数函数的数据

$k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是绝对温度.

由式(13)和式(14)得到:

$$\frac{\partial N}{\partial F_c} \simeq \frac{N}{E_0}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial P}{\partial F_v} \simeq \frac{P}{E_0}, \quad (16)$$

显然, 这个结果表明,  $E_0$  也就是载流子的扩散能量<sup>[1]</sup>. 这样一来, 指数带尾的特征能量  $E_0$ , 不仅是一个引用的参量, 而且具有明确的物理意义.

把式(15)和式(16)代入式(12)中求出

$$l^{-2} \simeq \frac{q^2}{\epsilon E_0} (N + P), \quad (17)$$

最后, 由式(10)、(11)和式(17)得到

$$E_0 \simeq \frac{q^2}{4\epsilon} \left[ \frac{(N_a^- + N_d^+)}{2\pi(N + P)^{1/2}} \right]^{2/3}. \quad (18)$$

由此可见, 重掺补偿的 p-GaAs 的  $E_0$ , 只与电离的杂质浓度和自由载流子浓度有关, 而与温度无关, 这与 Stern 的结果<sup>[1]</sup>一致.

注意到  $N \ll P$ ,  $P \simeq N_a^- - N_d^+$ , 还可以把式(18)简化为

$$E_0 \simeq \frac{q^2}{4\epsilon} \left[ \frac{N_a^- + N_d^+}{2\pi(N_a^- - N_d^+)^{1/2}} \right]^{2/3}, \quad (19)$$

取  $\epsilon = 12.5\epsilon_0$ ,  $\epsilon_0$  是真空中的介电常数, 把式(19)改写为

$$E_0 \simeq 1.06 \times 10^{-8} \frac{(N_a^- + N_d^+)^{2/3}}{(N_a^- - N_d^+)^{1/3}} (\text{eV}). \quad (20)$$

取  $N_a^- - N_d^+ = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 计算的  $E_0$  随掺杂浓度变化的曲线如图 2 所示.

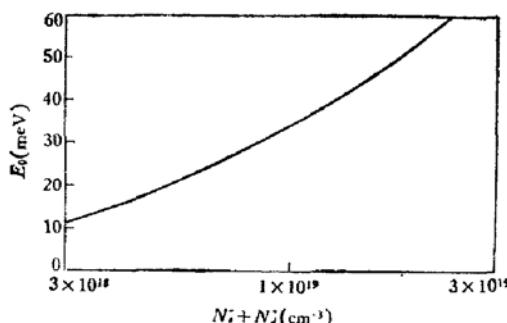


图 2  $N_a^- - N_d^+ = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的 p-GaAs 的  $E_0$  随掺杂浓度变化的曲线

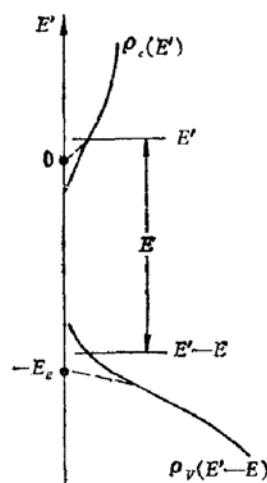


图 3 计算激光特性时采用的能量-态密度坐标系

### 三、激光特性

令光子能量为  $E$ , 取图 3 所示的能量-态密度坐标系, 考虑相关能级  $E'$  和  $(E' - E)$  之间的光跃迁。可以写出受激发射函数<sup>[6]</sup>

$$R_{st}(E) = B \int_{-\infty}^{\infty} \rho_c(E') \rho_v(E' - E) [f_c(E') - f_v(E' - E)] dE', \quad (21)$$

$B$  是辐射复合常数,  $f_c$  和  $f_v$  是导带和价带的费米分布函数。

取指数态密度函数近似:

$$\rho_c(E') = a_c \left( \frac{E_0}{2e} \right)^{1/2} e^{E'/E_0}, \quad (22)$$

$$\rho_v(E' - E) = a_v \left( \frac{E_0}{2e} \right)^{1/2} e^{(E-E_g-E')/E_0}. \quad (23)$$

写出费米分布函数:

$$f_c(E') = [1 + e^{(E'-E_c)/KT}]^{-1}, \quad (24)$$

$$f_v(E' - E) = [1 + e^{(E'-E+E_g+F_v)/KT}]^{-1}. \quad (25)$$

把式(22)–(25)代入式(21)中得到

$$R_{st}(E) = \frac{B a_c a_v E_0^2}{2} e^{-\frac{\Delta F - E_g}{E_0}} - \left[ \frac{\Delta F - E}{E_0} e^{-\frac{E - \Delta F}{E_0}} \right], \quad (26)$$

$$\Delta F = E_g + F_c - F_v, \quad (27)$$

$E_g$  是名义带隙宽度。

令受激发射峰值的光子能量为  $E_m$ , 由式(26)求出

$$E_m = \Delta F - E_0, \quad (28)$$

故受激发射峰值为

$$R_{st}(E_m) = \frac{B a_c a_v E_0^2}{2} e^{-\frac{\Delta F - E_g}{E_0}}. \quad (29)$$

定义受激发射谱宽度为

$$\Delta = \int_0^{\Delta F} R_{st}(E) dE / R_{st}(E_m), \quad (30)$$

注意到  $\frac{\Delta F}{E_0} \gg 1$ , 由(26)求出

$$\int_0^{\Delta F} R_{st}(E) dE \approx \frac{B a_c a_v L_{10}^{1/2}}{2} e^{-\frac{\Delta F - E_g}{E_0}}, \quad (31)$$

把式(29)和(31)代入式(30)中求出

$$\Delta \simeq e E_0 \quad (32)$$

光增益系数为<sup>[7]</sup>

$$g(E) = \left(\frac{\bar{n}}{c}\right) \frac{R_{st}(E)}{\phi(E)}, \quad (33)$$

$$\phi(E) = 8\pi E^2 (\bar{n}/ch)^3, \quad (34)$$

$c$  是真空中的光速,  $\bar{n}$  是材料的折射率。

就带边附近的光跃迁而言, 可以取近似  $\phi(E) \approx \phi(E_g)$ , 把式(26)代入式(33)中得到

$$g(E) = g_0 e^{\frac{\Delta F - E}{E_0}} \left[ \frac{\Delta F - E}{E_0} e^{\frac{E - \Delta F}{E_0}} \right], \quad (35)$$

$$g_0 = \frac{B \bar{n} a_e a_p E_0^3}{2 c \phi(E_g)}, \quad (36)$$

因而最大光增益系数为

$$g = g(E_m) = g_0 e^{\frac{\Delta F - E_m}{E_0}}. \quad (37)$$

由式(37)得到

$$\Delta F = E_g + E_0 \left( 2 + \ln \frac{g}{g_0} \right), \quad (38)$$

代入式(28)中求出

$$E_m = E_g + E_0 \left( 1 + \ln \frac{g}{g_0} \right). \quad (39)$$

取名义电流密度为<sup>[6]</sup>

$$j_{nom} = q B N P, \quad (40)$$

这是厚度为  $1\mu\text{m}$  的有源材料内的辐射复合电流密度。把式(13)和(14)代入式(40)中得到

$$j_{nom} \approx j_0 \gamma e^{\frac{\Delta F - E_m}{E_0}}, \quad (41)$$

$$j_0 = \frac{q B a_e a_p E_0^3}{2}, \quad (42)$$

$$\gamma = \left[ \frac{\pi k T / E_0}{\sin(\pi k T / E_0)} \right]^2. \quad (43)$$

由式(37)和式(41)求出

$$j_{nom} = \frac{\gamma}{g_0} g, \quad (44)$$

$$\beta_0 = \frac{g_0}{c j_0}, \quad (45)$$

$\beta_0$  是由材料参数决定的光增益常数。

式(44)表明, 重掺补偿的 p-GaAs 的光增益系数与名义电流密度呈线性关系。这种线性关系与实验结果一致<sup>[8]</sup>。

对于典型样品, 取  $B = 1 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{S}$ ,  $N_d^+ = 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  和  $N_a^- = 8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。

分别求出:  $E_0 \approx 40\text{meV}$ ,  $g_0 \approx 2.5 \times 10^3/\text{cm}$ ,  $j_0 \approx 1.8 \times 10^4 A/\text{cm}^2 \cdot \mu$ ,  $\beta_0 \approx 5 \times 10^{-2}\text{cm} \cdot \mu/A$ .

以  $T$  为参量的  $g$  与  $j_{\text{nom}}$  的关系如图 4 所示。图 5 表示室温光增益谱随激发水平的变化, 图 6 是  $E_m$  (波长  $\lambda_m$ ) 随  $g$  变化的曲线。

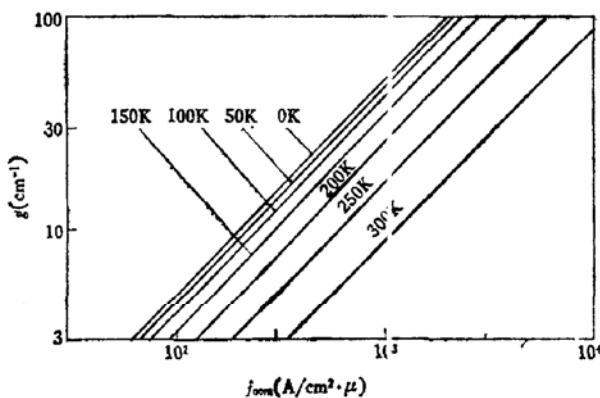


图 4 典型重掺补偿的 p-GaAs 在不同温度下的最大光增益系数与名义电流密度的关系

$$E_0 = 40\text{meV}, B = 1 \times 10^{-10}\text{cm}^3/\text{s}$$

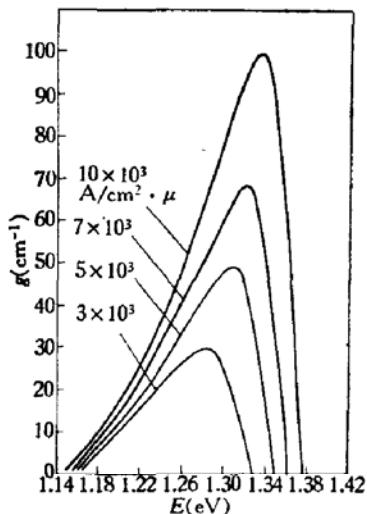


图 5 典型重掺补偿的 p-GaAs 的室温光增益谱随激发水平的变化

$$T = 300\text{K}, E_g = 1.42\text{eV}, E_0 = 40\text{meV}, B = 1 \times 10^{-10}\text{cm}^3/\text{s}$$

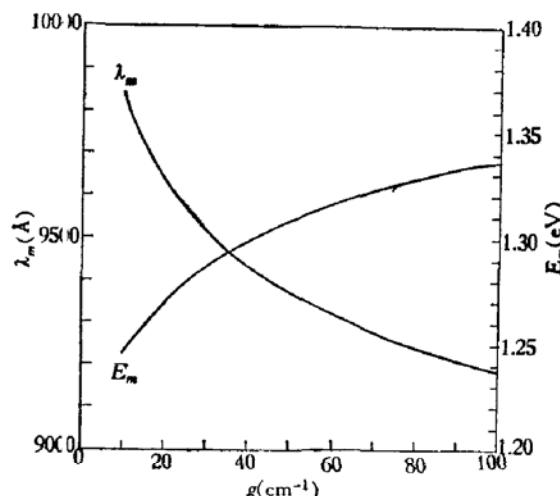


图 6 典型重掺补偿的 p-GaAs 的室温  $E_m$  (波长  $\lambda_m$ ) 随  $g$  变化的曲线

$$T = 300\text{K}, E_g = 1.42\text{eV}, E_0 = 40\text{meV}, B = 1 \times 10^{-10}\text{cm}^3/\text{s}$$

## 四、结语

本文讨论了重掺补偿的 p-GaAs 的指数带尾, 并得到了指数带尾的特征能量  $E_0$  的解析表达式。若取  $E_0$  为 Kane 带尾参量  $\eta$  之半, 则指数带尾与 Kane 带尾十分吻合, 这样也就有了  $\eta$  的解析表达式。

作者采用指数带尾分析了重掺补偿的 p-GaAs 的激光特性, 并得到了一系列有用的解析表达式, 尤其是最大光增益系数与名义电流密度呈线性关系的解析表达式与大量的

实验结果一致。

本文承蒙北京大学郭长志副教授审阅，作者谨表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] F. Stern, *Phys. Rev.*, **148**, 186(1966).
- [2] O. Kane, *Phys. Rev.*, **131**, 79(1963).
- [3] M. J. Adams, *Solid-State Electronics*, **12**, 661(1969).
- [4] M. J. Adams and M. Cross, *Solid-State Electronics*, **14**, 865(1971).
- [5] H. C. Casey, Jr and M. B. Panish, "Heterostructure Lasers", **136**(1978).
- [6] G. Laser and F. Stern, *Phys. Rev.*, **133**, A553(1964).
- [7] 王启明、杜宝勋, 半导体通讯, **54**, 57 (1979).
- [8] 北京大学物理系激光一组, 北京大学学报(自然科学试刊版), **1**, 57 (1973).

## Exponential Band-Tails and Lasing Characteristics in Heavily-Doped Compensative p-GaAs

Du Baoxun

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

### Abstract

Exponential band-tails in heavily-dope compensative p-GaAs are discussed. Analytical expressions of lasing characteristics are obtained, and the results calculated for a typical material are given.