

# 半导体激光器在微波场加热电子 变温调制中的增益开关效应\*

郭 长 志

(北京大学物理系北京 100871 集成光电子学国家重点联合实验室半导体所实验区)

陈 水 莲

(清华大学应用数学系 北京 100084)

**摘要** 本文从理论上得出半导体激光器中晶格和空穴温度保持室温不变,但电子因受微波场加热而变温时,光增益的变化,并与晶格、空穴和电子温度一起变化时的结果作比较。据此分析了电子温度单独变化对半导体激光器静态行为的影响,指出新提出的微波场加热电子变温调制过程的物理机制与通常电流调制过程的根本区别。

**EEACC:** 4270, 4320J

## 1 引言

最近有人提出<sup>[1]</sup>用垂直于电流注入方向的微波场, 加热半导体激光器有源区内的注入电子, 使其温度随微波场的调幅讯号变化, 而晶格和空穴仍保持室温不变的方式来实现超高速激光调制, 并根据电子对微波场加热升温的响应时间约为 1ps, 估计这种调制方式将可达到远比通常电流振幅调制方式高得多的速率。显然, 为了实现这种调制方式, 作为载波的微波场频率必须很高, 其振幅应被重复率很低的短方波脉冲所调制, 以保证在短脉宽时间内出现稳定的偏置温度, 脉码调制讯号就叠加到这短方波脉冲上。但这种调制方式的调制速率是否仅受电子升温的响应时间限制, 小讯号和大讯号调制的速率极限是否相同, 受何限制, 限制机制与电流调制有何不同, 等等, 需要进行审慎的探讨。为了充分探讨其最大的潜在可能性, 暂不考虑其非本征性的技术困难, 并假设电子可以单独从微波场的包络振幅瞬时获得所需的温度而不影响空穴和晶格的温度。作为此项系列研究工作的第一部分, 本文将从理论上研讨在这种变温情况下, 半导体光增益和静态激射的行为, 为其它部分提供基础。

## 2 理论

### 2.1 光增益谱和自发辐射谱

温度对激射过程的影响主要通过改变: (a) 晶格常数和晶格振动; (b) 带隙和有效

\* 国家自然科学基金资助项目

1993年6月23日收到初稿, 1993年11月26日收到修改稿

质量等；(c) 费米分布；从而改变光跃迁，折射率，载流子散射等。

设有效质量基本不随温度变化，带隙主要由晶格温度  $T_L$  决定，电子费米能级主要由电子温度  $T_e$  和晶格温度  $T_L$  决定，空穴费米能级主要由空穴温度  $T_v$  和晶格温度  $T_L$  决定，则在  $\mathbf{k}$  守恒条件下，半导体的光增益谱，自发发射谱，和自发辐射复合率可分别表示为<sup>[2-4]</sup>

$$g(n, T_e, T_v, T_L, E) = \frac{q_e^2 \sqrt{2m_0}}{\pi n_r \epsilon_0 c_0 \hbar^2} \left( \frac{m_r}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\xi(T_L) E_g^r(T_L)}{E} \cdot \sqrt{E - E_g^r(T_L)} [f_e(T_e, T_L) - f_v(T_v, T_L)] \quad (1)$$

$$r_{sp}(n, T_e, T_v, T_L, E) = \frac{q_e^2 n_r \sqrt{2m_0}}{\pi^3 \epsilon_0 c_0^3 \hbar^5} \left( \frac{m_r}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} \xi(T_L) E_g^r(T_L) E \cdot \sqrt{E - E_g^r(T_L)} f_e(T_e, T_L) [1 - f_v(T_v, T_L)] \quad (2)$$

$$R_{sp}(n, T_e, T_v, T_L) = \int r_{sp}(n, T_e, T_v, T_L, E) dE = B_{eff}(n, T_e, T_v, T_L) n^2 = \frac{n}{\tau_{sp}(n, T_e, T_v, T_L)} \quad (3)$$

其中

$$\xi(T_L) = 1.27 \frac{[E_g^r(T_L) + \Delta_s] \left( 1 - \frac{m_e}{m_0} \right)}{6 \left( \frac{m_e}{m_0} \right) \left[ E_g^r(T_L) + \frac{2}{3} \Delta_s \right]} \quad (4)$$

$$f_e(T_e, T_L) = \frac{1}{1 + \exp \left\{ \frac{\frac{m_r}{m_e} [E - E_g^r(T_L)] - F_e(T_e, T_L)}{k_B T_e} \right\}} \quad (5)$$

$$f_v(T_v, T_L) = \frac{1}{1 + \exp \left\{ \frac{F_v(T_v, T_L) - \frac{m_r}{m_v} [E - E_g^r(T_L)]}{k_B T_v} \right\}} \quad (6)$$

$$F_e(T_e, T_L) \approx k_B T_e \left[ \ln \left( \frac{n}{N_e} \right) + s_1 \left( \frac{n}{N_e} \right) + s_2 \left( \frac{n}{N_e} \right)^2 + s_3 \left( \frac{n}{N_e} \right)^3 + s_4 \left( \frac{n}{N_e} \right)^4 \right] \quad (7)$$

$$F_v(T_v, T_L) \approx k_B T_v \left[ \ln \left( \frac{n}{N_v} \right) + s_1 \left( \frac{n}{N_v} \right) + s_2 \left( \frac{n}{N_v} \right)^2 + s_3 \left( \frac{n}{N_v} \right)^3 + s_4 \left( \frac{n}{N_v} \right)^4 \right] \quad (8)$$

$$N_e = N_e(T_e, T_L) = N_0(T_L) \left( \frac{T_e}{T_L} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \frac{m_e^r}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} + 4 \left( \frac{m_e^r}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\Delta E^L - F_e(T_L)}{k_B T_e}} \right]$$

$$+ 3 \left( \frac{m_c^X}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\Delta E^X - T(T_L)}{k_B T_e}} \quad (9)$$

$$N_v = N_v(T_p, T_L) = N_0(T_L) \left( \frac{T_p}{T_L} \right)^{\frac{3}{2}} \left[ \left( \frac{m_{hh}}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{m_{lh}}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (10)$$

$$N_0(T_L) = 2 \left( \frac{m_0 k_B T_L}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

电子和空穴费米能级  $F_e(T_e, T_L)$  和  $F_h(T_p, T_L)$  分别以其带边为 0, 向带内为正。其它参数皆系熟知(见 3)。体材料的增益谱的峰值  $g_p$  可近似表示为

$$g_p = a[n - n_e] \quad (12)$$

$a, n_e$  分别为受激辐射复合截面和透明载流子浓度。

## 2.2 静态激励过程

注入电子浓度  $n$  和所生光子数密度  $s$  随时间  $t$  的变化, 可近似用最简单的单模速率方程描述

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\eta_s I}{q_e V_a} - \frac{n}{\tau_{sp}} - \Gamma \nu_g g_p(n, T_e) s, \quad V_a = WLd \quad (13)$$

$$\frac{ds}{dt} = \left[ \Gamma \nu_g g_p(n, T_e) - \frac{1}{\tau_{ph}} \right] s + \gamma \frac{n}{\tau_{sp}}, \quad \nu_g \approx \frac{c_0}{n_r} \quad (14)$$

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = \nu_g \alpha_T, \quad \alpha_T = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R} \right) = \Gamma g_p(n_e, T_e) \quad (15)$$

其中已设

$$T_p = T_L = \text{常数}, \quad \tau_{sp} \approx \bar{\tau}_{sp}, \quad \eta_s \approx 1 \quad (16)$$

故增益峰值  $g_p$  只与  $n, T_e$  有关, 自发辐射复合项近似为单分子型,  $I, \eta_s, L, W, d, V_a$  分别为外加电流, 注入效率, 腔长, 有源区宽度、厚度和体积;  $\Gamma, \nu_g, \tau_{ph}, \gamma$  分别为光功率限制因子, 光群速, 光子腔寿命时间, 自发发射因子;  $\alpha_i, \alpha_T, R, n_e$  分别为光杂散损耗系数, 总光损耗系数, 端面反射率和阈值电子浓度。在静态条件下,  $\frac{dn}{dt} = 0, \frac{ds}{dt} = 0$ , 对应于偏置电流  $I_0$  和电子温度  $T_e$  的静态电子浓度  $n_0$  和光子数密度  $s_0$  分别为

$$n_0 = \frac{1}{2(1-\gamma)} [n_{00} + n_e - \gamma n_e - \sqrt{(n_{00} + n_e - \gamma n_e)^2 - 4(1-\gamma)n_{00}n_e}] \\ < n_e \quad (17)$$

$$s_0 = \frac{\tau_{ph}}{2\tau_{sp}} [n_{00} - n_e + \gamma n_e + \sqrt{(n_{00} + n_e - \gamma n_e)^2 - 4(1-\gamma)n_{00}n_e}] \quad (18)$$

其中

$$n_{00} = \frac{I_0 \tau_{sp}}{q_e V_a}, \quad n_e = n_e(T_e) = \frac{1}{\Gamma \nu_g a(T_e) \tau_{ph}} + n_e(T_e) \quad (19)$$

$n$  和  $T_e$  对静态值  $n_0$  和  $T_{e0}$  作微小偏离  $\Delta n$  和  $\Delta T_e$  时, 增益峰值可近似表示为

$$g_p(n, T_e) = g_p(n_0, T_{e0}) + \left( \frac{\partial g_p}{\partial n} \right)_{T_{e0}} \Delta n + \left( \frac{\partial g_p}{\partial T_e} \right)_{n_0} \Delta T_e. \quad (20)$$

由 (12),

$$\left( \frac{\partial g_p}{\partial n} \right)_{T_e=0} = a \quad (21)$$

$$\left( \frac{\partial g_p}{\partial T_e} \right)_{n_0} = \left( \frac{\partial a}{\partial T_e} \right)_{n_0} (n_0 - n_e) - a \left( \frac{\partial n_e}{\partial T_e} \right)_{n_0} \quad (22)$$

这些参数的行为对微波加热电子变温调制过程有根本性的影响。

### 3 结果与讨论

作为典型, 对 GaAs 进行具体计算。所涉参数取值为<sup>[2,4]</sup>:  $\Gamma$  带隙  $E_g^{\Gamma}(T_L) = 1.519 - \frac{5.405 \times 10^{-4} T_L^2}{T_L + 204}$ ,  $L$  带底与  $\Gamma$  带底之差  $\Delta E^{L-\Gamma}(T_L) = 284$ eV,  $X$  带底与  $\Gamma$  带底之差  $\Delta E^{X-\Gamma}(T_L) = 0.476$ eV, 轻重空穴带顶与自旋轨道分裂带顶之差  $\Delta_s = 0.34$ eV, 折射率  $n_r(T_L) \approx 3.59$ ,  $\Gamma$ -,  $L$ -,  $X$ -带电子有效质量分别为  $m_e^{\Gamma} = 0.0665m_0$ ,  $m_e^L = 0.55m_0$ ,  $m_e^X = 0.85m_0$ , 轻重空穴有效质量分别为  $m_{hh} = 0.0852m_0$ ,  $m_{hh} = 0.45m_0$ ,  $N_0(T_L) = 2.5093 \times 10^{19} \left( \frac{T_L}{300} \right)^{\frac{3}{2}} \text{cm}^{-3}$ ,  $\xi(T_L = 300\text{K}) = 3.175$ , 其它常数取值为普朗克常数  $h$ ,  $\hbar = \frac{h}{2\pi} =$

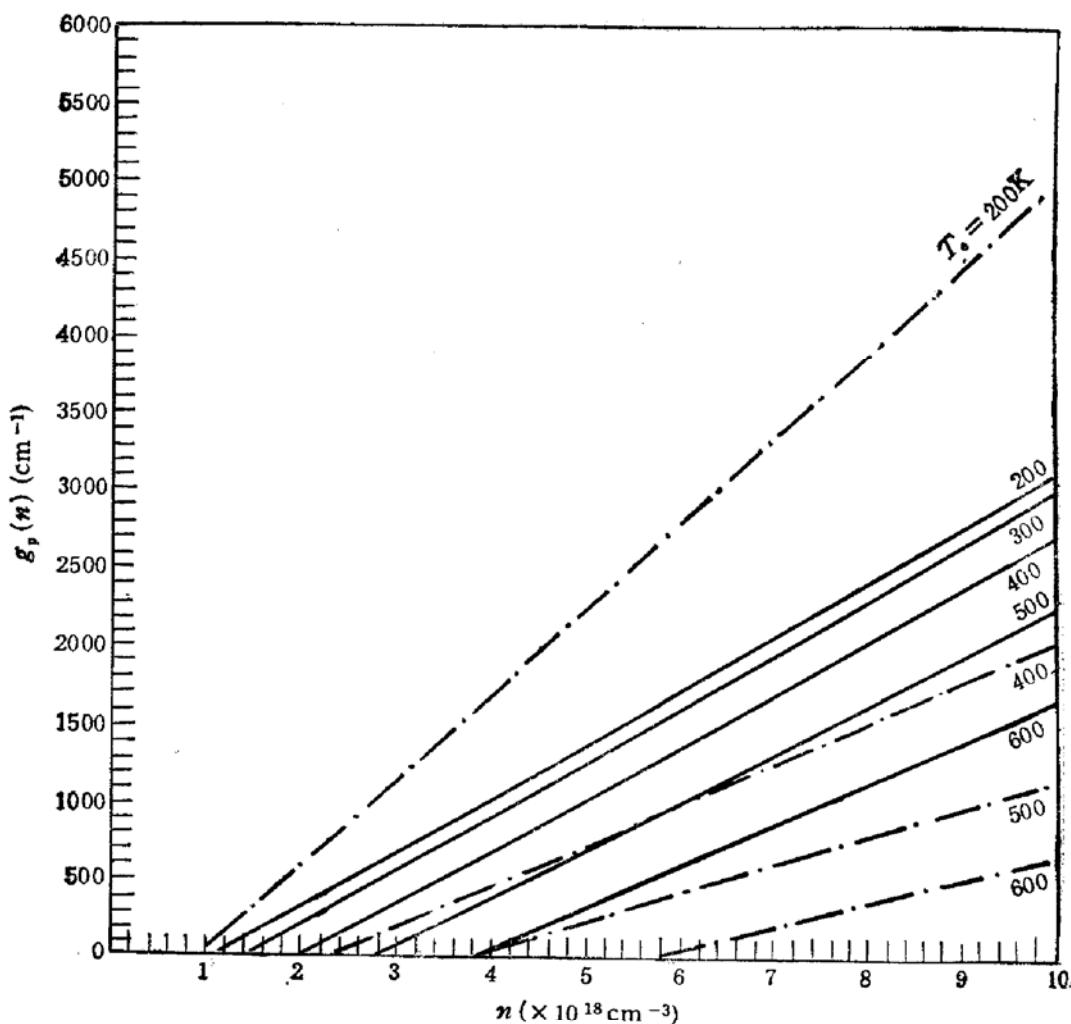


图 1 GaAs 中不同电子温度  $T_e$  下, 光增益峰值  $g_p$  随载流子浓度  $n$  的变化

——  $T_L = T_e = 300\text{K}$     - - -  $T_L = T_e = T_e$

$6.5822 \times 10^{-16}$ eVs, 玻兹曼常数  $k_B = 8.6171 \times 10^{-5}$ eV/K, 电子电荷  $q_e = 1.60219 \times 10^{-19}$ As, 真空电子质量、光速、电容率分别为  $m_0 = 5.685777 \times 10^{-14}$ eV·s<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>,  $c_0 = 2.997925 \times 10^{10}$ cm/s,  $\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-14}$ As/Vcm, 费米能级展开系数<sup>[4,5]</sup>  $s_1 = 0.353553$ ,  $s_2 = -4.95009 \times 10^{-5}$ ,  $s_3 = 1.48386 \times 10^{-4}$ ,  $s_4 = -4.42563 \times 10^{-6}$ . 对于所讨论的体激光器, 主要涉及有源层内的光电子行为, 对其周围各层的作用仅作间接处理(如光限制因子  $\Gamma$ , 注入电流  $I$ , 光子腔寿命  $\tau_{ph}$  等).

**3.1 增益峰值** 变温调制中所调变的温度虽然可以是晶格、空穴和电子整体的均匀温度, 但其响应太慢, 且器件可能被烧毁, 也不可能使晶格的温度保持在室温不变, 而使空穴和电子的温度一起随微波加热变化, 因其有效质量相差太大, 响应不一, 唯一可行的是保持晶格和空穴的温度在室温不变, 只有电子随微波场载波的包络振幅变温. 计算结果用线性关系(12)拟合表示的光增益峰值  $g_p$  随  $n$  的变化如图 1 所示,  $a$  和  $n_e$  只与  $T_e$  有关.

$$\left(\frac{\partial a}{\partial T_e}\right)_{n_0} = \frac{da}{dT_e}, \quad \left(\frac{\partial n_e}{\partial T_e}\right)_{n_0} = \frac{dn_e}{dT_e} \quad (23)$$

而且都可用二次多项式很好地拟合

$$a = a(T_e) = a_2 T_e^2 + a_1 T_e + a_0 \quad (24)$$

$$n_e = n_e(T_e) = e_2 T_e^2 + e_1 T_e + e_0 \quad (25)$$

但系数的数值不同, 如图 2 和表 1 所示, 可见光增益峰值  $g_p$  对电子温度  $T_e$  的敏感性因不同变温情况而异, 电子单独变温比均匀变温敏感性差.

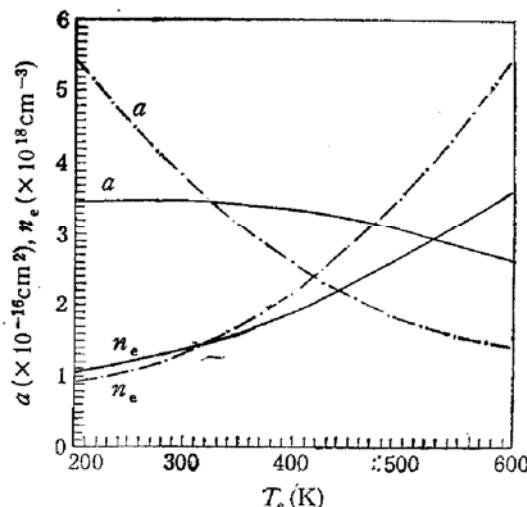


图 2 GaAs 中受激复合截面  $a$  和透明载流子浓度  $n_e$  随电子温度  $T_e$  的变化

——  $T_L = T_p = 300$ K    - - -  $T_L = T_p = T_e$

表 1

情况	$a(T_e)$ (cm <sup>2</sup> )			$n_e(T_e)$ (cm <sup>-3</sup> )		
	$(10^{-21} \text{cm}^2 \text{K}^{-2})$	$(10^{-18} \text{cm}^2 \text{K}^{-1})$	$(10^{-16} \text{cm}^2)$	$(10^{13} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-2})$	$(10^{15} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-1})$	$(10^{18} \text{cm}^{-3})$
$T_p = T_L = 300$ K (- - -)	-0.737411	0.383136	2.98906	1.09957	-2.32987	1.07827
$T_p = T_L = T_e$ (- - - -)	2.06264	-2.64995	9.91223	2.47186	-8.40823	1.60745

**3.2 自发辐射复合系数和寿命时间** 由自发辐射复合率(3)导出的自发辐射复合系数  $B_{\text{eff}}$  和自发辐射复合寿命时间  $\tau_{\text{sp}}$  都随注入电子浓度  $n$  和电子温度  $T_e$  变化如图 3 所示。表明自发辐射复合过程不是简单的单分子过程或双分子过程，但其变化范围皆在其平均值

$$\bar{B}_{\text{eff}} \approx 1 \times 10^{-10} \text{ cm}^2, \quad \bar{\tau}_{\text{sp}} \approx 3.86 \times 10^{-9} \text{ s} \quad (26)$$

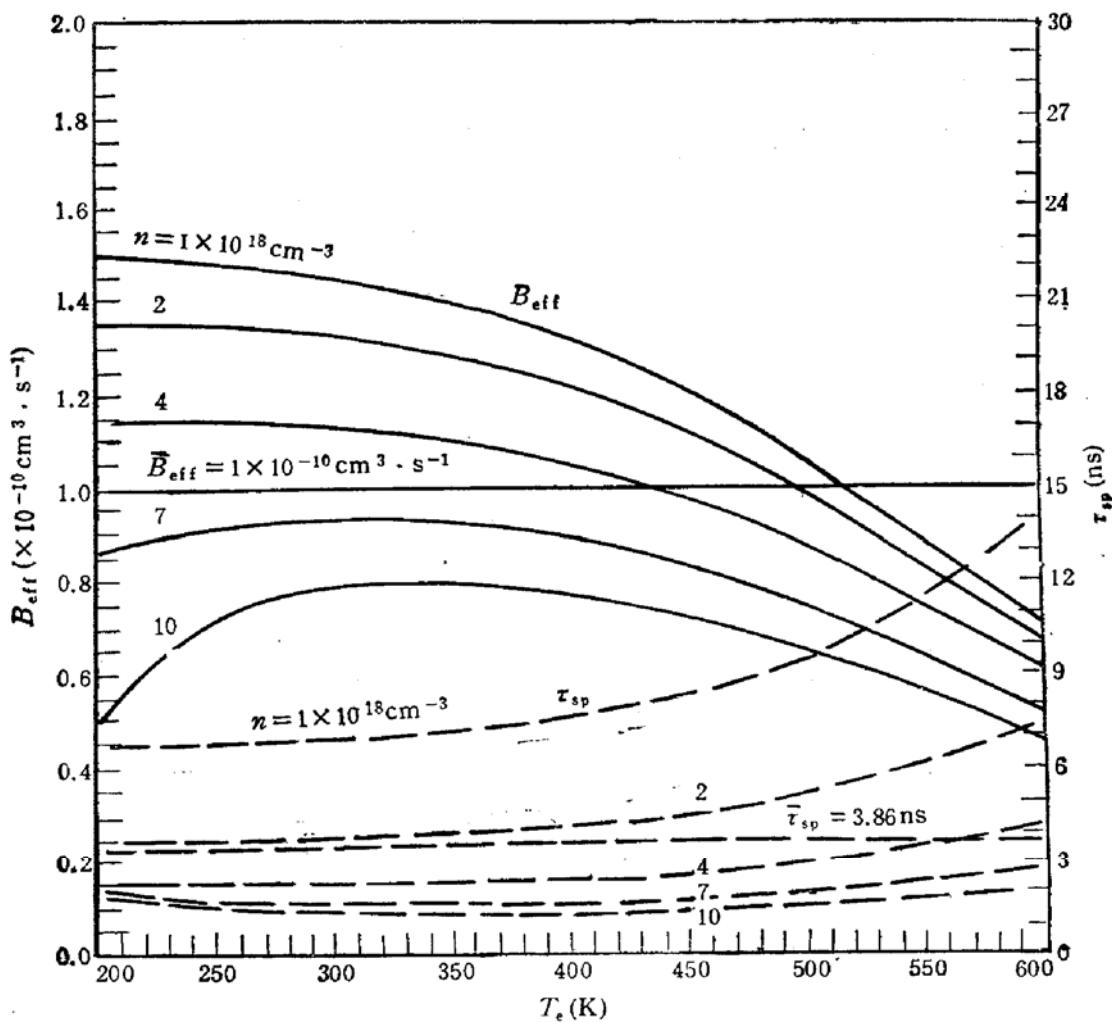


图 3  $T_L = T_p = 300 \text{ K}$  的 GaAs 中不同载流子浓度  $n$  下，自发辐射复合系数  $B_{\text{eff}}$  和自发辐射复合寿命  $\tau_{\text{sp}}$  随电子温度  $T_e$  的变化 图中粗线分别为其平均值

附近。故在研究半导体激光器在阈值以上的行为时，由于载流子浓度因激射后的受激复合过程而保持在阈值附近，故可采用双分子近似或甚至单分子近似，即

$$B_{\text{eff}}(n, T_e) \approx \bar{B}_{\text{eff}}, \quad \text{或} \quad \tau_{\text{sp}}(n, T_e) \approx \bar{\tau}_{\text{sp}} \quad (27)$$

### 3.3 静态增益峰值和电子浓度随电流的变化

(13), (14)中采用

$$\tau_{\text{sp}} = 3.86 \times 10^{-9} \text{ s}, \quad \tau_{\text{ph}} = 2.428 \times 10^{-12} \text{ s} \quad (28)$$

得出静态增益峰值  $g_p$  和电子浓度  $n_0$  及其对电子温度  $T_e$  的变化率  $\left(\frac{\partial g_p}{\partial T_e}\right)_{n_0}$  和  $\frac{dn_0}{dT_e}$  随

偏置电流  $I_b$  的变化都在同一转折点达到饱和，如图 4 所示。这转折点的电流即阈值电流

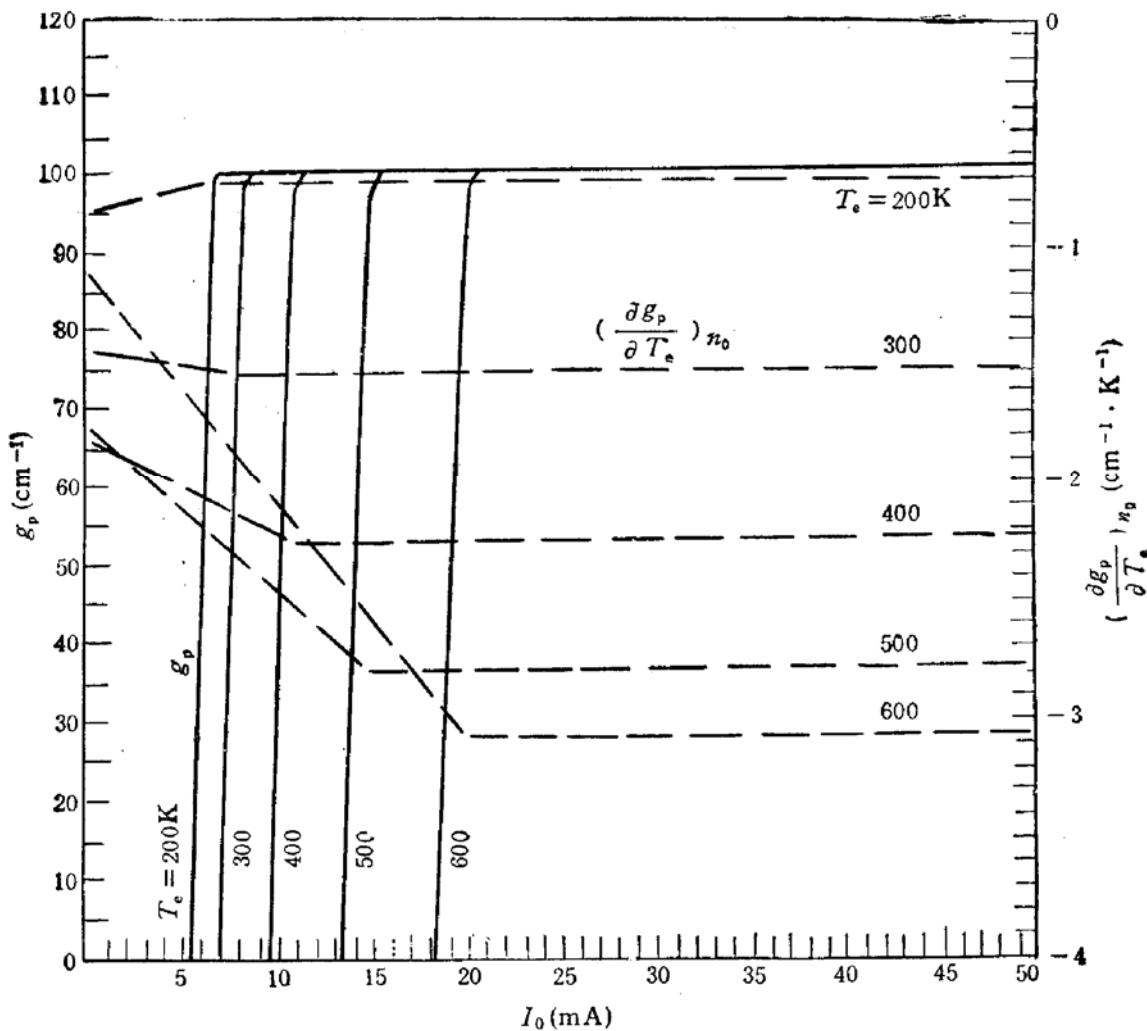


图4  $T_L = T_p = 300\text{ K}$  的 GaAs 中, 光增益峰值  $g_p$  及其对电子温度  $T_e$  的偏导数  $\frac{\partial g_p}{\partial T_e}$  随偏流  $I_0$  的变化。

$I_0 = I_{th}(T_e)$  与  $T_e$  有关,  $g_p$  的饱和值是由  $\alpha_T$  决定的[见(19)], 故基本上与  $T_e$  无关, 但由于  $T_e$  增加时,  $\alpha(T_e)$  下降,  $n_e(T_e)$  上升(图2), 由阈值条件(19)所决定的阈值电子浓度  $n_e(T_e)$  将上升, 与它接近的静态电子浓度  $n_0$  的饱和值也上升, 故  $\frac{dn_0}{dT_e} > 0$  且上升

(图5), 如保持  $n_0$  不变, 则  $g_p$  必须下降, 故  $\left(\frac{\partial g_p}{\partial T_e}\right)_{n_0} < 0$  且阈值后达到随  $T_e$  不同而异的饱和值。这也可由(21)及(23)看出,  $\left(\frac{\partial g_p}{\partial T_e}\right)_{n_0}$  是决定微波场加热电子变温小讯号调制行为的关键物理量。

**3.4 静态光子数密度随电流的变化**  $s_0$  在阈值前几乎是0, 达阈值后随  $I_0$  增加而线性增加, 因而有可能实现较大讯号的线性电流调制。由于  $I_{th}$  随  $T_e$  增加而增加,  $s_0$  曲线随  $T_e$  增加向右平移, 导致同一  $I_0$  的  $s_0$  减小, 故  $\frac{ds_0}{dT_e} \leq 0$ 。如图6所示, 同一  $I_0$  的  $s_0$  随  $T_e$  的变化(——·—)是亚线性的, 故大讯号电子变温调制将是严重非线性的, 线性电子变温

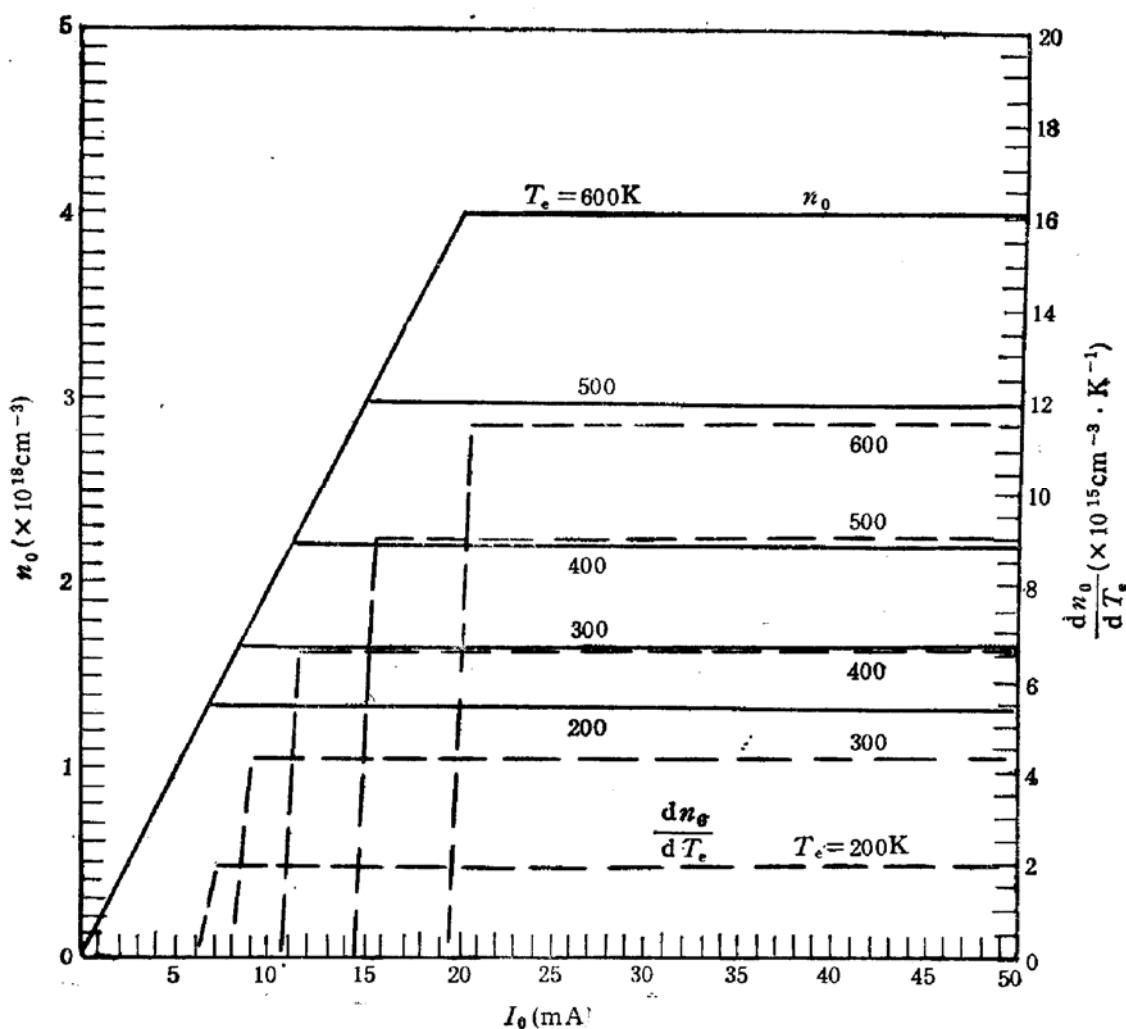


图 5  $T_L = T_p = 300\text{K}$  的 GaAs 中, 不同电子温度  $T_e$  下静态电子浓度  $n_0$   
及其对电子温度的导数  $\frac{dn_0}{dT_e}$  随偏流  $I_0$  的变化

调制只能在小讯号条件下才是可能的。

**3.5 两种调制方式的区别** 从物理上看, 电流调制是一种恒温过程, 主要工作在阈值以上, 调制过程中不但阈值光增益峰值  $g_{p,\text{th}}$  保持不变, 阈值电子浓度  $n_c$  也不变, 电子浓度  $n$  只能在  $n_c$  附近随调制电流作微小变化, 并有较宽的线性调制范围。与此相反, 电子变温调制是一种变温过程, 不能都工作在阈值以上, 因为即使在偏置电子温度  $T_{e_0}$  和偏流  $I_0$  时是工作在阈值以上, 但一旦  $T_e$  增加到  $T_{e_0} + \Delta T_e$ , 阈值电子浓度  $n_c(T_{e_0} + \Delta T_e)$  增加, 原来的  $n_0 \approx n_c(T_{e_0})$  已在新的阈值以下,  $g_p$  将突降如图 4 所示。 $s_0$  必须降至与新的阈值与同一  $I_0$  相应的较低  $s_0$  值, 如图 6 所示。实质上电子变温调制过程就是依靠这一增益开关效应来实现的。但这一过程也将成为限制这种调制方式的速率的机制, 这将另文讨论。

## 4 结论

本文从理论上探讨了电子温度单独变化对半导体激光器的光增益峰值和静态激射过

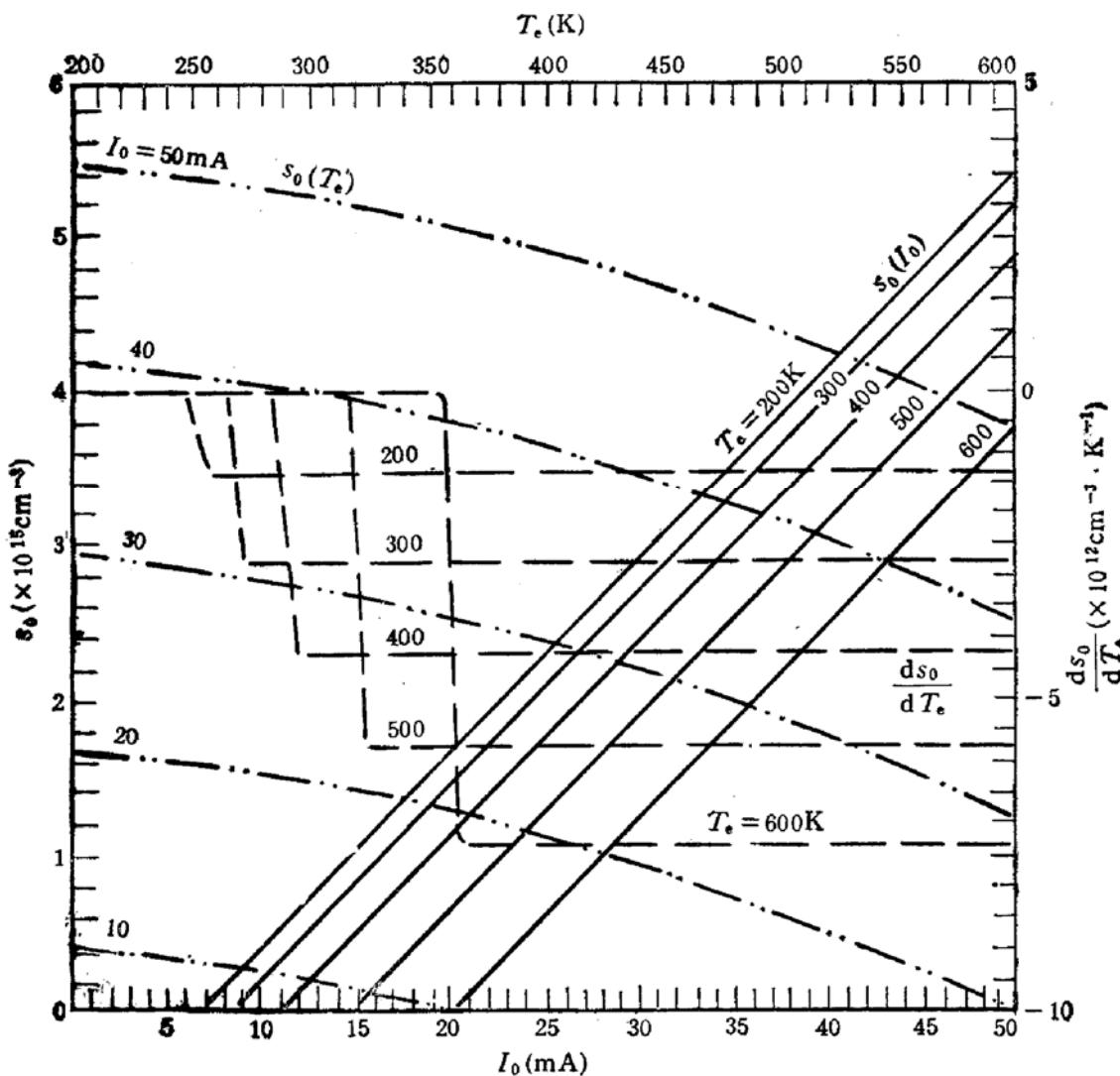


图 6  $T_L = T_p = 300\text{K}$  的 GaAs 中, 不同电子温度  $T_e$  下静态光子密度  $s_0$  及其对电子温度的导数  $\frac{ds_0}{dT_e}$  随偏流  $I_0$  的变化

图中还给出不同偏流下  $s_0$  随  $T_e$  的变化(———)

程的影响, 结果表明

(a) 在微波场作用下, 仅电子被加热升温, 导致光增益下降, 但光增益峰值对电子温度的敏感性比均匀变温情况小。

(b) 微波场加热电子变温调制过程与电流调制过程的根本不同点是在电子变温调制中, 阈值光增益峰值虽仍不变, 但阈值电子浓度却随调制温度升降而升降, 因此, 在电子温度突升时将出现增益突降的增益开关效应, 导致激射光子数猝减。相反地, 在电流调制这一恒温过程中, 阈值光增益峰值和阈值电子浓度皆一直保持不变, 而不存在上述形式的增益开关效应。

**致谢** 多伦多大学 Prof. J. M. Xu 和 Mr. C.Y. Wu 对作者在该大学讲学期间所进行的这项研究工作曾给予很大支持与帮助, 谨此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] V. B. Gorfinkel and I. I. Filatov, Sov. Phys. Semicond., 1990, **24**:466; S. A. Gurevich, I. I. Filatov and B. M. Gorfinkel, Joint Soviet-American Workshop on the Physics of Semicond. Laser, (1991), 67; V. B. Gorfinkel, B. M. Gorbovsky and I. I. Filatov, Interna. J. Infrared and Millimeter Waves, 1991, **12**:649.
- [2] Chang-Zhi Guo, Semiconductor Quantum Well Lasers, 半导体超晶格/量子阱物理与光电子器件讲习班教程第二部分, 1991.1广州; 多伦多大学研究生讲义, 1992.3, 多伦多.
- [3] R. H. Yan, S. W. Corzine, L. A. Coldren and I. Suemune, IEEE J. Quantum Electron., 1990, **QE-26**:213.
- [4] H. C. Casey and Jr., M. B. Panish, Heterostructure Lasers, Part A, Academic Press, 1978.
- [5] W. B. Joyce and R. W. Dixon, Appl. Phys. Lett., 1977, **31**:354.

## Gain Switching in Semiconductor Laser under Microwave Field Heating Electron Temperature Modulation

Guo Changzhi

(Dept. of Physics, Peking University, Beijing 100871,  
Semiconductor Institute Regoin, National Integrated optoelectronics Laboratory)

Chen Shuilian

(Dept. of Appl. Math., Tsing-Hua University, Beijing 100084)

**Abstract** Variation of optical gain in semiconductor laser with electron temperature varied by microwave field heating while temperatures of the holes and lattice are kept constant at room temperature has been treated theoretically. and compared with the result of the electron, hole and lattice temperatures varying simultaneously. By which, the effect of electron heating temperature on the static behavior of semiconductor laser has been analyzed and the fundamental difference between electron heating modulation and the ordinary current modulation has been distinguished physically.

**EEACC:** 4270 4320J