

文章编号: 0253-2239(2010)09-2684-06

外腔反馈光对内腔中光子态密度的影响

胡险峰

(四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 研究了外腔反馈对内腔有效长度和内腔中光子态密度的影响,并对自混合干涉可能产生的作用进行了分析讨论。研究表明,外腔反馈光不仅改变法布里-珀罗腔前端面反射率,也会引起等效腔长不连续变化,导致腔内光子态密度不连续变化。因此,外腔反馈光使量子效率发生连续及不连续改变,导致介质增益系数和饱和光强也出现连续及不连续改变。而且强外腔反馈引起复合腔模式的变化不会使自混合干涉信号出现阶跃变化,同时外腔反馈光对载流子寿命影响很小,显著减小了载流子辐射复合寿命,提高辐射复合效率,削弱非辐射复合效率。

关键词 光学测量;激光二极管;光子态密度;自混合干涉;量子效率;斜率效率

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2684

Effect of External Cavity's Feedback Light on State Density of Photon in Internal Cavity

Hu Xianfeng

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Effects of external cavity's feedback light on length of internal cavity and the photon state density in internal cavity are investigated, and effects of self mixing interference are discussed in detail. The results demonstrate that, external cavity's feedback light not only changes front facet reflectivity of Fabry-Perot cavity, but also cause discontinuous variation of equivalent length of internal cavity, and then photon state density in internal cavity also discontinuously varies. So that, the external feedback light makes quantum efficiency continuously and discontinuously vary. Also gain coefficient and saturated light intensity vary continuously and discontinuously. Also self-mixing interference signal does not change discontinuously with the complex cavity modes produced by external cavity's feedback light, and effect of external cavity's feedback light on charge carrier lifetime is very small. External cavity's feedback light evidently reduces radiative recombination lifetime of charge carrier, raises radiative recombination efficiency and weakens non-radiative recombination efficiency.

Key words optical measurement; laser diode; photon state density; self-mixing interference; quantum efficiency; slope efficiency

1 引言

由于自混合干涉现象潜在的应用前景,其基本现象和应用技术得到广泛研究。其基本现象,如类似传统的双光束干涉,类似锯齿波形的干涉信号波形,激光光频随外腔反馈而变化,干涉信号幅度随外腔反馈变化等,均有许多实验观察和理论分析^[1~8]。其应用研究涉及位移、振动、速度和长度测量等,提出了各种处理分析自混合干涉信号的方法^[9~12]。然而,自混合干涉的一些物理现象,如倍频的自混合干涉信号,自混合干涉信号随外腔长度变化,外腔反

馈对静态光强、斜率效率、阈值电流以及干涉信号幅度的影响等,仍然没有很好的解释。理论描述的基本出发点是考虑反馈光对载流子浓度的影响,以及对内腔端面反射率的影响。本文从外腔反馈对内腔有效长度和内腔中光子态密度的影响,对自混合干涉可能产生的作用进行分析讨论。

2 内腔的有效腔长和光子态密度

在有外腔反馈的情况下,法布里-珀罗腔中满足选模条件的纵模 k_z 与外腔反馈强度和

收稿日期: 2009-09-13; 收到修改稿日期: 2009-12-16

作者简介: 胡险峰(1962—),副教授,主要从事基础物理实验教学方面的研究。E-mail: ruihui@vip.sina.com

关, k_z 的取值为^[13]

$$k_z = \frac{2\pi}{\lambda_z} = \frac{2\pi l_z - \varphi}{2nL_i} \quad (1)$$

式中 λ_z 为纵模波长, l_z 为纵模的模式指数, n 为内腔介质折射率, L_i 为内腔长度, $\varphi = -\arctan[C\sin \delta_{rk}/(1 - C\cos \delta_{rk})]$, 为内腔前端面等效反射比的幅角, $\delta_{rk} = 2k_z L_r$, 为外腔反射面相邻反射的相位差, L_r 为外腔长度, $C = r_r \gamma(1 - r_i^2)/r_i$, 为外腔反馈系数, γ 为外腔耦合系数. r_i 为内腔端面的反射比, r_r 为外腔反射面的反射比.

随着外腔长度增加和反馈系数增大, (1) 式的解增多. 通过数值计算和图解, 可以得到 (1) 式的解数 M_r , 即外腔作用下一个内腔模分裂后的模数. 改变外腔反馈强度和长度, M_r 随外腔反馈系数和外腔长度乘积 CL_r/nL_i 阶跃变化, 变化趋势与 CL_r/nL_i 成正比, nL_i 为内腔光学长度, 如图 1 所示. 这些分裂出来的模, 称之为内外复合腔模, 数值计算和图解表明其间隔不均匀, 外腔长度越短, 反馈系数越大时, 内外复合腔模分布出现显著偏聚. 内外复合腔模在波矢空间的分布范围小于内腔模间隔, 也小于内腔模式线宽^[13].

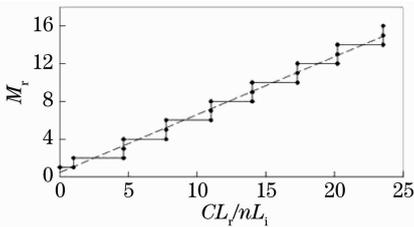


图 1 复合腔模数随 CL_r/nL_i 的变化

Fig. 1 Variations of mode number in complex cavity with CL_r/nL_i

M_r 随 CL_r/nL_i 不连续变化, 当 CL_r/nL_i 增加到一定值时, M_r 增加 1, M_r 变化 1 对应 CL_r/nL_i 变化间隔不均匀; 在 CL_r/nL_i 取某些值时, CL_r/nL_i 微小变化就会引起 M_r 变化 2.

当 $CL_r/nL_i < 0.995$ 时, $M_r = 1$, 外腔反馈未产生新的模式;

当 $0.995 < CL_r/nL_i < 4.62$ 时, $M_r = 2$; 在 $4.62798 < CL_r/nL_i < 4.62799$ 的狭小区域内, M_r 从 2 经过 3 变到 4;

当 $4.63 < CL_r/nL_i < 7.77$ 时, $M_r = 4$. 当 $L_r/nL_i \approx 32, C > 0.5$ 时, 即外腔长度较小, 外腔反馈较大时, M_r 的台阶宽度随 CL_r/nL_i 的变化明显偏离图 1 中的情况.

在 $M_r = 2$ 的台阶上, 外腔长度微小变化, CL_r/nL_i

可以基本不变, 而 M_r 则随外腔长度变化出现振荡, L_r 变化一个波长, M_r 振荡 4 次, 比自混合干涉信号随外腔长度变化快一倍. 如 $CL_r/nL_i \approx 2.81$, 随外腔长度变化, M_r 在 1~3 之间振荡, 其平均值等于 2, 如图 2 所示. 在 $M_r = 4$ 的台阶上, M_r 在 3~5 之间振荡.

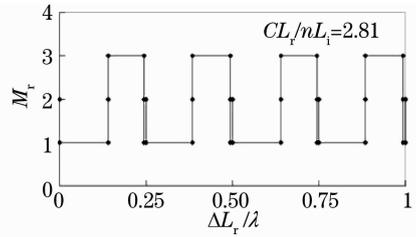


图 2 复合腔模数随外腔长度变化

Fig. 2 Variations of mode number in complex cavity with length of external cavity

若将复合腔模粗略地看成均匀分布在内腔纵模之间, 则复合腔模的平均模间距近似写为

$$\overline{\Delta k_{zr}} \approx \frac{\pi}{nL_i M_r} \quad (2)$$

与无外腔反馈时纵模的模间隔 $\Delta k_{zi} = \pi/nL_i$ 相比较, 由于外腔反馈内腔的有效腔长为 $L_{ieff} = L_i M_r$, 所以, 外腔反馈不仅改变了内腔端面的有效反射率^[13], 也会改变内腔的有效长度, 当外腔反馈或腔长增加到一定值时, 内腔的有效长度则出现不连续增大, 也会随外腔微小变化而出现振荡.

若外腔反馈仅影响纵模 k_z , 对两个横模没有影响, 由于外腔反馈内腔中光子的状态数^[14]

$$N_r = M_r N_i \quad (3)$$

式中 $N_i = 8n^3 k^3 V/3\pi^2$ 为内腔模式的状态数, V 为内腔体积, k 为光波矢的模. 当 $CL_r/nL_i < 0.995$ 时, $N_r = N_i$; 当 $0.995 < CL_r/nL_i < 4.62$ 时, N_r 在 N_i 到 $3N_i$ 之间振荡, $\overline{N_r} = 2N_i$. 由光子态密度与光子状态数的关系^[14], 有外腔反馈时内腔中光子态密度

$$\rho_s(k) = \rho_{si}(k) M_r \quad (4)$$

式中 $\rho_{si}(k) = 8n^3 k^2/\pi^2$ 为内腔模式的态密度. (1) 式表明光频随外腔反馈而变化, 所以, (4) 式中 k 是反馈系数和外腔长度的函数. 将 (1) 式代入 (4) 式, 可得

$$\rho_s(k) = \rho_s(k_i) M_r [1 + f(\varphi)] \quad (5)$$

式中 $f(\varphi) = (\varphi/2nL_i k_i)^2 - \varphi k_{zi}/nL_i k_i^2$. 由于 φ 很小, $f(\varphi)$ 为一小量. k_i 为无外腔反馈时波矢的模, k_{zi} 为无外腔反馈时光波矢的纵模分量, $\rho_s(k_i)$ 为无外腔反馈时内腔中光子态密度. 在外腔长度和反馈系数增大使 $M_r > 1$ 时, 内腔中的光子密度会有静态的增加, 而且会随外腔微小变化出现振荡.

3 量子效率、介质增益系数和饱和光强

3.1 量子效率

由载流子自发辐射速率和受激辐射速率^[14],可以得到载流子辐射复合寿命的倒数

$$\frac{1}{\tau_r} = B[S(k) + \rho_s(k)]. \quad (6)$$

式中 $S(k)$ 为光子密度, B 为载流子与光子的相互作用系数。考虑到内腔中载流子不同复合机制之间的竞争,假设总复合速率不变,注入电流不变,则载流子寿命不变,辐射复合速率增大,非辐射复合速率则减小。辐射复合量子效率

$$\eta_i = \tau/\tau_r = \tau B[S(k) + \rho_s(k)]. \quad (7)$$

假若有外腔反馈时腔内的光子密度简单地写为 $S(k) = \beta^2 S(k_i)$, 其中 $\beta^2 = 1 + C^2 - 2C \cos \delta_{rK}$ ^[13], $S(k_i)$ 为无外腔反馈时内腔中光子密度。由(5)式和(7)式可以得到,辐射复合量子效率

$$\eta_i = \eta_{i0} \frac{M_r[1 + f(\varphi)] + f_i \beta^2}{1 + f_i}. \quad (8)$$

式中 $\eta_{i0} = \tau B \rho_s(k_i) (1 + f_i)$, 为无外腔反馈时的辐射复合量子效率, $f_i = S(k_i)/\rho_s(k_i)$, 为无外腔反馈时光子在内腔态上的布居数。

3.2 介质增益系数

介质增益系数^[15]

$$g_K = \eta_K (J - J_{th}). \quad (9)$$

式中 $\eta_K = \eta_i \Gamma_m L_i / e V_s v$ 为单位电流强度光增益系数, $J_{th} = e V_s v / \tau$ 为阈值电流强度, J 为注入电流强度, η_i 为量子效率, Γ_m 为内腔光限制因子, s 为载流子浓度, v 为介质中光速, s_{th} 为阈值载流子浓度, τ 为载流子寿命。由(8)式,单位电流强度光增益系数为

$$\eta_K = \eta_{K0} \frac{M_r[1 + f(\varphi)] + f_i \beta^2}{1 + f_i}. \quad (10)$$

式中 $\eta_{K0} = \Gamma_m L_i \eta_{i0} / e V_s v$, 为无外腔反馈时单位电流强度光增益系数。

在载流子寿命不变的情况下,阈值电流强度 $J_{th} = e V_s v / \tau$ 不随外腔反馈变化。由(9)、(10)式,外腔反馈引起的介质增益系数变化为

$$\Delta g_K = \Delta g_{K0} - g_{K1} \cos \delta_{rK}. \quad (11)$$

其静态分量

$$\Delta g_{K0} = g_{K0} \frac{M_r[1 + f(\varphi)] - 1 + f_i C^2}{1 + f_i}, \quad (12)$$

动态分量

$$\Delta g_{K1} = g_{K0} \frac{2Cf_i}{1 + f_i}. \quad (13)$$

式中 $g_{K0} = \eta_{K0} (J - J_{th})$ 为无外腔反馈时介质增益系数。

3.3 饱和光强

饱和光强 $I_{sK} = \hbar \omega v s / \eta_i$, 由(8)式,有外腔反馈时饱和光强为

$$I_{sK} = \frac{1 + f_i}{M_r[1 + f(\varphi)] + f_i \beta^2} I_{s0K}. \quad (14)$$

式中 $I_{s0K} = \hbar \omega v s / \eta_{i0}$ 为无外腔反馈时的饱和光强。由(14)式可得无反馈光时有和反馈光时饱和光强之比 $\epsilon''_{iK} = I_{s0K} / I_{sK}$, 则无反馈光时出光强度与有反馈光时饱和光强之比 ϵ'_{iK} 为

$$\epsilon'_{iK} = \epsilon'_{iK0} - \epsilon'_{iK1} \cos \delta_{rK}. \quad (15)$$

其静态分量

$$\epsilon'_{iK0} = \epsilon_{iK} \frac{M_r[1 + f(\varphi)] + f_i(1 + C^2)}{1 + f_i}, \quad (16)$$

动态分量

$$\epsilon'_{iK1} = \epsilon_{iK} \frac{2Cf_i}{1 + f_i}. \quad (17)$$

式中 $\epsilon_{iK} = I_{iK} / I_{s0K}$ 为无反馈光时出光强度与饱和光强之比。

3.4 增益之比

将(11)式和(15)式,以及有外腔反馈时法布里-珀罗腔单程出光强度^[16],代入大信号增益公式^[15],考虑单程增益 $G_s \gg 1$ 的情况,取大信号增益的 0 阶和 1 阶近似,有反馈光和无反馈光的增益之比^[16],可改写为

$$G_{mK} \approx G_{mK0} + G_{mK1} \cos \delta_{rK}. \quad (18)$$

其静态分量

$$G_{mK0} = \left[\frac{1 + \epsilon_{iK} + \Delta g_{K0}}{1 + \epsilon'_{iK0} I_1(\varphi_K)} \right]^m, \quad (19)$$

动态分量

$$G_{mK1} = m G_{mK0} \times \left[\frac{\epsilon'_{iK0} M_1(\varphi_K) + \epsilon'_{iK1} I_1(\varphi_K)}{1 + \epsilon'_{iK0} I_1(\varphi_K)} - \frac{\Delta g_{K1}}{1 + \epsilon_{iK} + \Delta g_{K0}} \right], \quad (20)$$

式中 m 为光在内腔中反射次数, $I_1(\varphi_K)$ 和 $M_1(\varphi_K)$ 分别为有外腔反馈时法布里-珀罗腔后端面出射的第 K 个纵模的单程相对光强的静态和动态分量^[16]。无反腔反馈时, $\Delta g_{K0} = 0$, $\Delta g_{K1} = 0$, $\epsilon'_{iK0} = \epsilon_{iK}$, $\epsilon'_{iK1} = 0$, $I_1(\varphi_K) = 1$, $M_1(\varphi_K) = 0$, 代入(19)、(20)式, $G_{mK0} = 1$, $G_{mK1} = 0$, 由(18)式,则 $G_{mK} = 1$ 。

由上文可知,辐射复合量子效率、单位电流强度光增益系数、介质增益系数、饱和光强和介质增益,除了随外腔反馈系数 C , 外腔长度 L_r 连续变化外,均与外腔作用下一个内腔模分裂后的模数 M_r 和无外腔反馈时光子在内腔态上的布居数 f_i 有关。而 M_r 随外腔反馈系数和外腔长度乘积 CL_r/nL_i 阶跃

变化, f_i 与激光二极管的工作状态有关。当激光二极管处于激光辐射状态时, f_i 应当是一个很大的量。且 M_r 对辐射复合量子效率、单位电流强度光增益系数、介质增益系数、饱和光强和介质增益的影响可以忽略, f_i 也不出现在这些物理量中, 即复合腔模式的出现不会改变这些物理量。

4 实验测量

用 TDS3052B 示波器观察测量自混合干涉信号和静态光信号, 多模激光二极管内腔长度可以由自混合信号的幅度随外腔静态长度变化的周期或光谱测量纵模间隔来确定^[1~4,16]。外腔长度可由混合干涉测量长度^[5~8]来确定, 外腔长度难确定的是激光二极管谐振腔端面到聚光镜表面的距离。通过改变激光二极管工作电流, 从自混合干涉信号的相位移动, 测量得到 AlGaInP 可见光激光二极管的光频随工作电流的变化率约 -12.1 GHz/mA 。由于该变化率很小, 采用条纹计数法配合条纹细分来读取条纹移动, 并让工作电流变化范围为 5 mA 。测量得到谐振腔端面到聚光镜表面的光学长度约 8.5 mm , 聚光镜表面到外腔反射面的距离用米尺测量。实验上要准确确定外腔反馈系数 C 比较困难, 主要是难以确定外腔耦合系数。实验中外腔反射面为球面, 若反射束单位面积光强与外腔长度的平方成反比, 则反馈系数 $C \propto L_r^{-2}$, 因而 $CL_r/nL_i \propto L_r^{-1}$, 因此, 以外腔长度的倒数来反映参数 CL_r/nL_i 的变化。实验时逐渐减小外腔长度, 自混合干涉信号的波形未发生显著变化, 只是在外腔长度减小后幅度增大, 有微弱的肩峰出现。实验测量得到激光二极管后端面外的光电二极管 PD 的光电流与工作电流的关系如图 3 所示。由此计算出斜率效率的相对变化和阈值电流的相对变化, 如图 4 所示。实验测量的环境温度为 $14 \text{ }^\circ\text{C}$, 阈值电流约 23.3 mA 。由图 4 得到, 阈值电流最大减小约 0.3% , 而斜率效率最大增加则达 50% , 未出现阶跃特征。

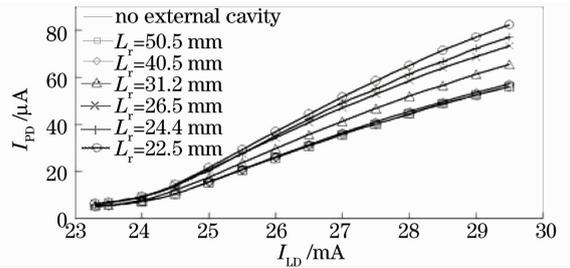


图 3 PD 光电流随工作电流和外腔长度的变化

Fig. 3 Variations of PD light current with operating current and length of external cavity

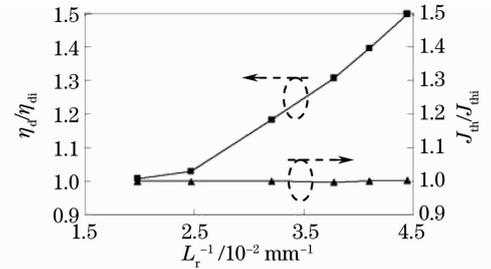


图 4 斜率效率、阈值电流随外腔长度变化

Fig. 4 Variations of slope efficiency and threshold current with length of external cavity

有外腔反馈和无外腔反馈的静态光强之比随 L_r^{-1} 和工作电流的变化, 如图 5 所示, 由图 5(a)可以看出, 随 L_r^{-1} 增大, 静态光强增大。且随工作电流增加, 外腔反馈导致静态光强的相对变化, 先是出现增加, 然后增加变缓或基本上不变。如: $L_r \approx 31.2 \text{ mm}$ 时, 工作电流从阈值电流到 24.5 mA , 有反馈和无反馈的静态光强之比从约 1.05 增加到约 1.15 , 再增加工作电流, 这个比值基本不变。由图 5(b)可以看出, 随 L_r^{-1} 增大, 静态光强增加, 未出现静态光强增加减缓或跃变的情况, 工作电流超过 24 mA 后, 静态光强随 L_r^{-1} 的增大接近相同, 图 5(b)中工作电流大于 25 mA 的几条曲线几乎并在一起, L_r^{-1} 从 $2.5 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 增加到 $4.5 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$, 有反馈和无反馈的静态光强之比从约 1.03 增加到约 1.43 。

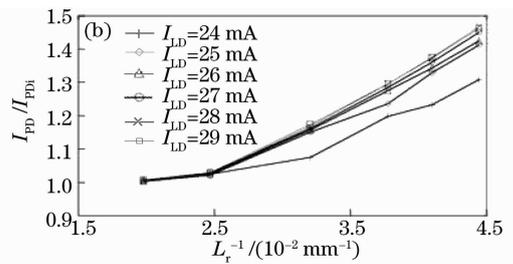
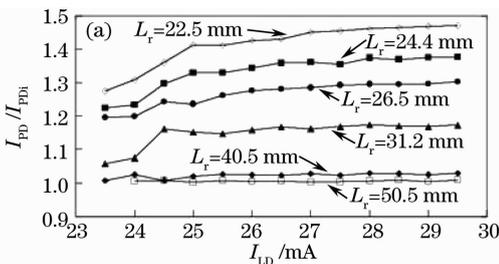
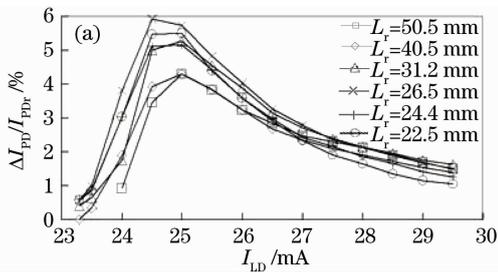


图 5 静态光强随外腔长度和工作电流变化

Fig. 5 Variations of static light intensity with length of external cavity and operating current

自混合干涉信号的幅度与有外腔反馈时静态光强的比值随 L_r^{-1} 和工作电流的变化,如图 6 所示,由图 6(a)可知,在工作电流约小于 25 mA 时,随工作电流增加自混合干涉信号的幅度上升, $L_r \approx 26.5$ mm 时上升更明显。当工作电流约大于 25 mA 时,随工作电流增加自混合干涉信号的幅度下降, $L_r \approx 26.5$ mm 时下降更缓慢, $L_r \approx 22.5$ mm 时下降更快。由图 6(b)可以看出,随 L_r^{-1} 增加,在 L_r^{-1} 增



大到 $3.8 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 前,工作电流较小时如 24, 25 和 26 mA,自混合干涉信号幅度增加,工作电流略高于阈值电流为 24 mA 时,增加更明显;工作电流为 27, 28 和 29 mA 时,增加则相对要小些,开始段还有些下降。在 L_r^{-1} 增大到 $3.8 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 之后,自混合干涉信号幅度则出现减小,这时工作电流大,减少的趋势更确定些。

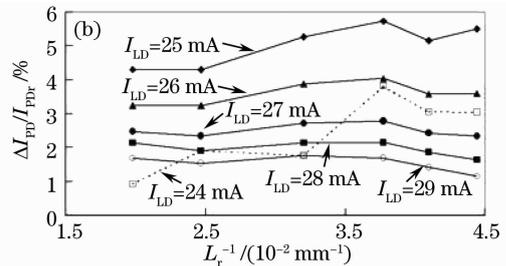


图 6 自混合干涉信号随外腔长度和工作电流变化

Fig. 6 Variations of self-mixing interference signal with length of external cavity and operating current

由文献[13]图 8 中的数据,以图中标记的相对出光强度作为反映反馈光强度的外腔反馈参数 C' , 得到相对斜率效率和相对阈值电流强度与外腔反馈参数 C' 的关系,如图 7 所示。实验测量的环境温度为 28°C , 阈值电流约 31.9 mA。由图 7 得到, 阈值电流最大减小约 9%, 而斜率效率最大增加则为 44%, 外腔反馈增强斜率效率的增加变缓, 没有明显的阶跃特征, 文献[13]图 9 中自混合干涉信号的波形也没有发生变化。

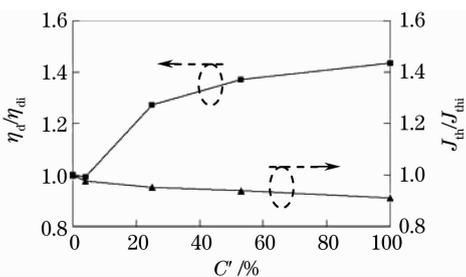


图 7 斜率效率、阈值电流随外腔反馈参数变化

Fig. 7 Variations of slope efficiency and threshold current with feedback parameter of external cavity

5 讨 论

图 4 和图 7 中阈值电流虽然随外腔反馈变化, 但相比斜率效率的变化则小得多, 说明外腔反馈提高了辐射复合速率, 但不能等量减小非辐射复合速率, 载流子寿命有所变化, 但相对变化比较小, 所以前面假设载流子寿命不变基本上合理。外腔反馈减小了辐射复合寿命, 提高辐射复合效率, 削弱非辐射

复合效率。

上述实验测量未测量到斜率效率跃变的情况, 可能的原因有两个: 1) 随 CL_r/nL_i 增加自混合干涉信号的波形没有发生变化, 因而判断仅仅观察到 $CL_r/nL_i < 1$ 的情况, $M_r = 1$, 光子态密度不变, 斜率效率仅仅是随外腔反馈连续变化; 2) 因为无外腔反馈时激光二极管已处于激光辐射状态, 这时光子布居数 f_i 是一个很大的量, M_r 的变化相对要小很多, 对辐射复合量子效率的影响很小, 有反馈光和无反馈光的增益之比, 以及前面给出的各物理量均与 M_r 无关。

随工作电流增加, 介质增益增大, 出光强度增大, 大信号增益则会出现衰减, 因而实验上会观察到外腔反馈导致静态光强的相对增加, 随工作电流增加先是出现增加, 然后增加变缓或基本上不变, 即工作电流大时外腔反馈使静态光强的增加相对减缓, 图 5 中工作电流大于 25 mA 的四条曲线几乎并在一起。自混合干涉信号的幅度随工作电流增加也出现相似的变化, 先是出现迅速增加, 然后增加变缓, 直至出现增加减小, 如图 6 所示。外腔反馈也会导致介质增益增大和饱和光强减小, 因而使大信号增益出现衰减。但是, 外腔反馈使增益出现衰减的情况在工作电流比较大时才明显, 这时随外腔反馈增加, 自混合干涉信号的幅度, 先是出现增加, 然后增加变缓, 直至出现减小。外腔反馈引起自混合干涉信号幅度的变化比工作电流变化引起的小, 外腔反馈对增益的衰减作用相对要小。外腔反馈对静态光

强的影响和对自混合干涉信号的影响有些不同,随外腔反馈增加静态光强没有出现增强减缓如图 5 所示。由于反馈光等效于减弱内腔前端面的透射出去的光,增加后端面外接收到的光强,在实验的反馈水平虽然前端面返回的光增强引起一定增益衰减,对自混合干涉信号的增益减小,对静态光强则没有产生影响。这与工作电流增加静态光强增加,而自混合干涉信号会出现减小的情况类似。

在阈值电流之下,激光二极管处于荧光辐射状态,在室温下荧光光子的能量远大于热运动能 $k_b T$, f_i 是很小的量。实验上会观察到在略低于激光二极管阈值电流时,逐渐增加外腔反馈,自混合干涉信号出现,说明由于外腔反馈激光二极管由荧光辐射进入激光辐射,激光辐射状态布居数 f_i 增大,就观察不到外腔反馈引起模数增加对自混合干涉信号的影响。在非理想的激光辐射时,光子会简并在某些光子态上,光子布居数 f_i 是很大的量,而外腔反馈分裂出的复合腔模式分布在内腔模式的模式线宽以内,一个内腔模分裂增加的模式数远小于光子在该内腔模上的布居数 f_i ,强外腔反馈引起复合腔模式的变化不会使自混合干涉信号出现阶跃变化,强外腔反馈引起多个复合腔模的自混合干涉。

6 结 论

外腔反馈不仅改变法布里-珀罗腔前端面的反射比,也会引起等效腔长变化,从而引起内腔中光子的态密度变化。外腔反馈引起量子效率发生连续及不连续改变,从而导致介质增益系数和饱和光强也出现连续及不连续改变。由于激光态时光子的布居数很大,而态密度的不连续变化相对较小,因而实验上测量不到态密度的不连续变化引起斜率效率阶跃变化。外腔反馈导致斜率效率变化比导致阈值电流变化更加显著,外腔反馈对载流子寿命影响很小,对载流子辐射复合寿命影响较大。由于激光态光子高度简并,强外腔反馈引起复合腔模式的变化不会使自混合干涉信号出现阶跃变化。

参 考 文 献

- 1 R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(3): 347~355
- 2 H. W. Jentink, F. F. M. de Mul, H. E. Suichies *et al.*. Small

- laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a diode laser[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(2): 379~385
- 3 W. M. Wang, W. J. O. Boyle, K. T. V. Grattan *et al.*. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(9): 1551~1558
- 4 Yu Yanguang, Ye Huiying, Yao Jianquan. Analysis for the self-mixing interference effects in a laser diode at high optical feedback levels[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**(2): 117~122
- 5 W. M. Wang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer *et al.*. Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1577~1587
- 6 R. C. Addy, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan. Effects of external reflector alignment in sensing applications of optical feedback in laser diode [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(12): 2672~2676
- 7 Liang Lü, Huaqiao Gui, Jianping Xie *et al.*. Effect of external cavity length on self-mixing signals in a multi-longitudinal-mode Fabry-Perot laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(4): 568~571
- 8 P. J. de Groot, G. M. Gallatin, S. H. Macomber. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 4475~4480
- 9 M. Norgia, G. Giuliani, S. Donati. Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing interferometry in a closed loop [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2007, **56**(5): 1894~1900
- 10 John R. Tucker, Aleksandar D. Rakic, Christopher J. O'Brien *et al.*. Effect of multiple transverse modes in self-mixing sensors based on vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(4): 611~619
- 11 Xu Jun, Zhao Tianpeng, He Deyong *et al.*. Improvement of laser ranging precision using the self-mixing effect in a single-mode VCSEL[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(12): 28~74
- 徐 军, 赵天鹏, 何德勇 等. 单模 VCSEL 激光自混合测距精度的提高[J]. *光电工程*, 2006, **33**(12): 28~74
- 12 Hu Xianfeng. Reconstruction of vibration signal from laser diode self-mixing interference signal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1498~1502
- 胡险峰. 从激光二极管自混合干涉信号重建振动信号[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1498~1502
- 13 Hu Xianfeng. Calculation analysis and experiment observation on laser diode self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1111~1116
- 胡险峰. 激光二极管自混合干涉的计算分析和实验观察[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1111~1116
- 14 Du Baoxun. *Semiconductor Laser Principle*[M]. Second edition, Beijing: Enginery Industry Press, 2004, **2**: 18
- 杜宝勋. *半导体激光器原理*[M]. 第 2 版, 北京: 兵器工业出版社, 2004, **2**: 18
- 15 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. *Laser Principle* [M]. Fifth edition, Beijing: National Defence Industry Press, 2004, 332
- 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. *激光原理*[M]. 第 5 版, 北京: 国防工业出版社, 2004, 332
- 16 Hu Xianfeng. Analysis and observation on self-mixing interference of multi-longitudinal mode laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 433~439
- 胡险峰. 多纵模激光二极管自混合干涉的观察和分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 433~439