

# 用激射延迟法研究 DH 激光器的复合性质

张存善 谢京涛

(河北大学物理系, 保定)

1986年10月20日收到

利用激射延迟方法, 对  $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  DH 激光器的复合机制进行了分析和测量。得出了只有同时考虑双分子过程辐射复合和非辐射复合两种复合机理, 才能对 DH 激光器的激射延迟性质进行较全面研究的结论。并由此可提供一种测定辐射复合系数和少数载流子寿命的方法。

**主题词:** 半导体激光器激射延迟, 双分子过程辐射复合, 非辐射复合, 有效辐射复合系数

## 一、引言

半导体激光器的辐射复合系数和非辐射复合寿命是其重要的内部参数, 它不仅决定了激光器的阈值、量子效率, 也对张弛振荡、自脉动等瞬态特性有很大的影响。为了确定载流子寿命和辐射复合系数, 人们进行了大量的工作。其中大部分是利用激射延迟关系测量这些参量。他们许多是假定载流子寿命不随注入载流子变化的前提下, 进行理论分析和实验测量的。这种方法虽然在实验和计算上简单易行, 但只能得到一个复合速率的平均效果, 它不能将辐射复合和非辐射复合区别开, 因此不能细致地研究其复合性质。另一些文章注意到了这一问题, 其中 R. W. Dixon 对于未掺杂的有源区内的非辐射复合与双分子复合过程进行了详尽的理论分析<sup>[1]</sup>, 但没有明确提出利用这种理论测量载流子寿命的有效方法。此外, 对于复合过程的测量还有几种方法: 利用双脉冲电流叠加注入测量微分载流子寿命的方法<sup>[2]</sup>; 利用超短脉冲激光激励的荧光延迟测量法<sup>[3]</sup>; 以及利用短脉冲激光取样的电荧光延迟测量法<sup>[4]</sup>。这几种方法都能较为细致地测量有源区的复合特性, 但都比较复杂, 因此在一般研究中仍采用激射延迟方法。

本文试图对 P 型补偿型  $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  DH 激光器的复合性质进行理论分析和相应的实验测量, 由此提出一种测量辐射复合系数和复合寿命的方法。

## 二、理论分析

在  $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  DH 激光器的 P 型有源区中, 实行了补偿型重掺杂, 构成了近似抛物带-指数尾型能带, 因此在激光器激射前, 有源区的辐射复合主要是导带中的电子

和价带中的空穴的双分子过程复合, 其净复合速率为:

$$R_s = B^*(nP - n_0P_0), \quad (1)$$

$R_s$  为自发辐射复合速率;  $B^*$  为有效自发辐射复合系数;  $n$ 、 $P$  分别为导带电子和价带空穴的密度;  $n_0$ 、 $P_0$  分别为无电流注入时的导带电子和价带空穴密度, 在室温下有  $nP \gg n_0P_0$ , 因此:  $R_s \approx B^*nP$ .

对于非辐射复合速率, 一般为定域性复合, 其复合速率  $R_n \propto n$ , 所以总的复合速率可表示为:

$$R = R_s + R_n = \frac{n}{\tau_n} + B^*nP, \quad (2)$$

其中  $\tau_n$  是非辐射复合寿命.

在注入电流  $I$  的情况下, 并认为在达到阈值之前不考虑受激辐射和再吸收的影响, 则速率方程为:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{qV} - \left( \frac{n}{\tau_n} + B^*nP \right), \quad (3)$$

其中  $q$  为电子电量,  $V$  为有源区的体积, 在电中性条件  $n - n_0 = P - P_0$  下, 则  $P = n + P_0 - n_0 \approx n + P_0$ , 有:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{qV} - \left( \frac{1}{\tau_e} n + B^*n^2 \right), \quad (4)$$

$$\tau_e^{-1} = \tau_n^{-1} + B^*P_0. \quad (5)$$

其中  $\tau_e$  为小信号注入下的非平衡电子寿命. 设导带电子的微分寿命<sup>(1)</sup>为:

$$\tau = \left( \frac{\partial R}{\partial n} \right)^{-1} = \frac{1}{\tau_e^{-1} + 2B^*n}, \quad (6)$$

在注入稳定电流  $I$  情况下, 由(4)式可得:

$$\frac{I}{qV} = \frac{n}{\tau_e} + B^*n^2, \quad (7)$$

由(6)、(7)式可得:

$$\tau = \frac{\tau_e}{\sqrt{\beta I + 1}}, \quad (8)$$

$$\beta = 4B^*\tau_e^2/qV. \quad (9)$$

这里  $\beta$  值是由反映有源区内复合特性的参数决定的, 具有[安培]<sup>-1</sup>的量纲, (8)式给出在稳定注入电流  $I$  下的导带电子微分寿命.

在阶跃电流注入下, 解方程(4)式, 并代入(8)式, 可求出:

$$\tau_d = \tau \ln \frac{(\tau_e - \tau)(\tau_{th} + \tau)}{(\tau_e + \tau)(\tau_{th} - \tau)}. \quad (10)$$

$\tau_d$  为激射延迟时间;  $\tau$  为若无激射影响, 以注入电流  $I$  稳态工作时的导带电子微分寿命,  $\tau_{th}$  为以阈值电流稳态工作时的电子微分寿命,  $\tau$ 、 $\tau_{th}$  都由(8)式给出.

在存在偏置电流  $I_D$  时, 相当于以未注入阶跃电流时的微分寿命  $\tau_D$  代替  $\tau_e$ ,  $\tau_D$  是在偏置电流下无阶跃电流注入时的微分寿命, 与  $I_D$  的关系同样由(8)式决定. 因此在偏置电流  $I_D$  下的阶跃电流  $I$  与激射延迟时间的关系由下式给出:

$$t_d = \tau \ln \frac{(\tau_D - \tau)(\tau_{th} + \tau)}{(\tau_D + \tau)(\tau_{th} - \tau)}. \quad (11)$$

如设：

$$f(x) = \sqrt{\beta x + 1}, \quad (12)$$

则有：

$$t_d = \frac{\tau_e}{f(I + I_D)} \ln \frac{[f(I + I_D) - f(I_D)][f(I + I_D) + f(I_{th})]}{[f(I + I_D) + f(I_D)][f(I + I_D) - f(I_{th})]}. \quad (13)$$

这一结果与 R. W. Dixon 导出的结果相似<sup>[1]</sup>。由此可看出在一定偏置电流下， $t_d - I$  关系只依赖于  $\tau_e$  和  $\beta$  值。当  $\beta \rightarrow 0$  时，由(8)式有  $\tau = \tau_e$  — 常数，这就是小信号近似的单分子复合过程，取(13)式的极限，有：

$$t_d = \tau_e \ln \frac{I}{I + I_D - I_{th}}. \quad (14)$$

在  $\beta$  值很大时，可以认为  $f(x) = \sqrt{\beta x}$ ，则有：

$$t_d = \sqrt{\frac{qV}{4B^*}} \ln \frac{(\sqrt{I + I_D} - \sqrt{I_D})(\sqrt{I + I_D} + \sqrt{I_{th}})}{(\sqrt{I + I_D} + \sqrt{I_D})(\sqrt{I + I_D} - \sqrt{I_{th}})}. \quad (15)$$

这就是只考虑双分子复合过程的结果。因此可看出， $\beta$  值的大小反映了在有源区复合过程中，双分子过程复合所占的比重。

### 三、实验测量与数据处理

在 R. W. Dixon 的文章中，曾提出了对双分子复合模型的激射延迟关系的检测方法<sup>[1]</sup>，即在近阈值和超强电流注入的两个极限范围内测量  $t_d \sim \ln(I/(I - I_{th}))$  曲线的斜率。但因超辐射、注入电流的前沿，探测器响应时间等因素的影响，在这两个范围的准确测量是不易进行的。同时由于  $\beta$  值较大时，不同  $\beta$  值的  $t_d \sim \ln(I/(I - I_{th}))$  曲线趋于重合，因此如果只通过激射延迟的测量确定不了  $\tau_e$  和  $\beta$  值。在我们的工作中，采用了小信号荧光响应的辅助测量的方法先确定  $\tau_e$ ，再用激射延迟的测量来确定  $\beta$  值。

我们对 GaAs-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As DH 质子轰击条形激光器进行了测量。以 39# 器件为例，取该器件有源层厚度为 0.3 μm，条宽为 12 μm，P 型有源区载流子密度为  $P_0 = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。测试系统见文献[5]中图 2，注入脉冲宽度为 10 ns 和 27.5 ns 前沿为 1 ns 的脉冲电流，探测器选用 Si-APD，脉冲信号由取样示波器显示，并用 X-Y 函数记录仪记录。

#### 〈A〉小电流注入下荧光响应的测量

在小电流注入下，即注入电子密度远小于初始空穴密度  $P_0$  时，可以认为少数载流子寿命  $\tau_e$  为一常量，又因在荧光情况下，荧光光强与电子密度成正比，所以对注入阶跃脉冲小信号电流的荧光响应为：

$$S = S_0(1 - e^{-t/\tau_e}). \quad (16)$$

荧光光强微分变化与时间的关系为：

$$\dot{S} = -\tau_e \left[ \ln \frac{dS}{dt} + C \right]. \quad (17)$$

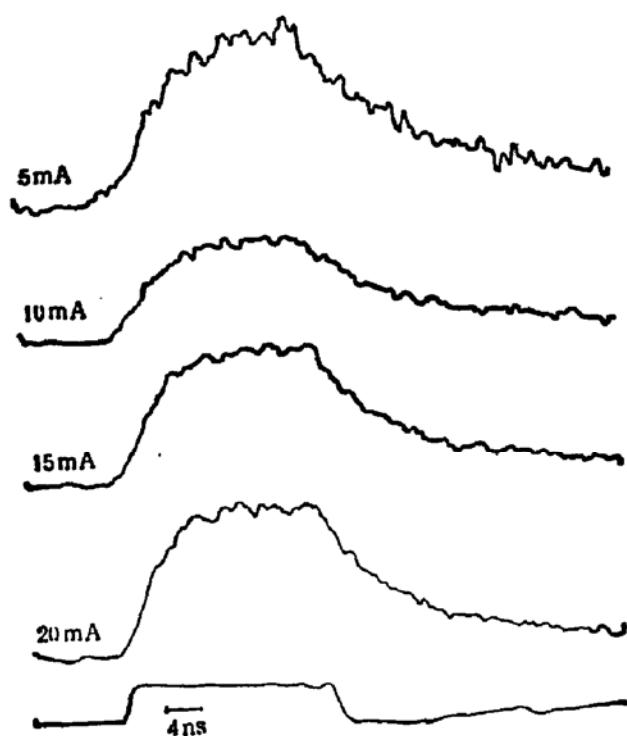


图 1 小电流脉冲注入下, 39#激光器的荧光响应。最下图为注入电流曲线

其中  $S$  为相对光强,  $S_0$  为稳定注入时的光强,  $C - \ln \frac{\tau_e}{S_0}$  为常量。

图 1 为 5mA, 10mA, 15mA 和 20mA 阶跃电流注入后荧光响应曲线。该器件的阈值在 60mA 左右, 在  $t - \ln(ds/dt)$  坐标下作图发现, 对于 15mA 和 20mA 电注注入下的

$t - \ln(ds/dt)$  曲线的线性较差, 而在 5mA 和 10mA 情况下有较好的线性, 即电流注入基本符合小信号电流注入条件。图 2 为  $I = 5\text{mA}$  阶跃电流注入下的荧光响应曲线, 由这一曲线的斜率可得到电子寿命  $\tau_e = 6.3\text{ns}$ 。

### (B) 激射延迟特性的测量

通过激射延迟特性的测量, 可得出  $I_D$ ,  $I$ ,  $I_{th}$  和  $\tau_e$  值, 再取(A)部分求出的  $\tau_e$  值, 但是由(13)式可以看出, 方程仍为  $\beta$  值的超越方程, 无法直接求解。因此在数据处理中, 我们采用调整  $\beta$  值使之满足实验所得的  $\tau_e - I$  关系来确定  $\beta$  值。

在数据处理中, 设:

$$K(I, I_D, I_{th}, \beta) = \frac{1}{f(I - I_D)} \ln \frac{[f(I + I_D) - f(I_D)][f(I + I_D) + f(I_{th})]}{[f(I + I_D) + f(I_D)][f(I + I_D) - f(I_{th})]}, \quad (18)$$

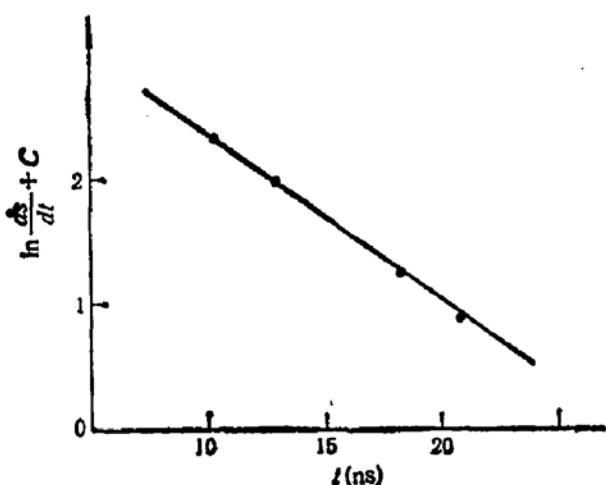


图 2 在  $I_D = 0$ ,  $I = 5\text{mA}$  下,  $t - \ln(ds/dt)$  的关系, 从曲线斜率得出  $\tau_e = 6.3\text{ns}$

则(13)式变为：

$$\tau_d = \tau_e K + t_0. \quad (19)$$

其中  $t_0$  是由基准时间偏离注入电流初始时间以及电流脉冲前沿上升时间而引入的时间常数。

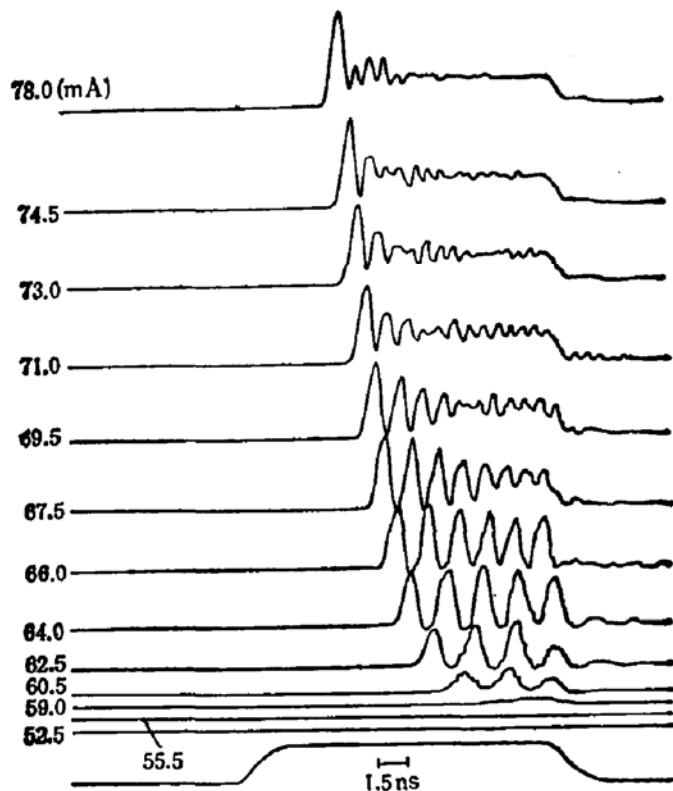


图 3 39# 激光器激射延迟响应曲线 ( $I_D = 0$ ).  
最下图为注入电流曲线

图 3 为在无偏置电流  $I_D = 0$  时注入脉冲电流和相应激光脉冲的波形，该器件阈值电流为 59mA。由图 3 可以得到不同注入电流下的激射延迟时间。在给定  $\beta$  值情况下，由(18)式可将测试得到的  $\tau_d - I$  关系转变为  $\tau_d - K$  关系。再用最小二乘法得到  $\tau_d - K$  曲线的斜率。对于不同的  $\beta$  值，其斜率的值不同，调整  $\beta$  值，使该斜率等于〈A〉部分得到的  $\tau_e$  值，此时  $\beta$  值就是该器件的  $\beta$  参量。表 1 是在偏置电流  $I_D = 0$  而且  $\beta$  以  $10A^{-1}$  步进时， $\beta$  与  $\tau_d - K$  曲线的斜率  $\tau_e$  的对应关系。和〈A〉部分得出的  $\tau_e = 6.3ns$  相比较， $\beta$  值

表 1 在  $I_D = 0$  时， $\beta$  值与  $\tau_e$  值的关系，由  $\tau_e = 6.3ns$  可确定  $\beta$  值在  $180A^{-1}$  至  $210A^{-1}$  之间

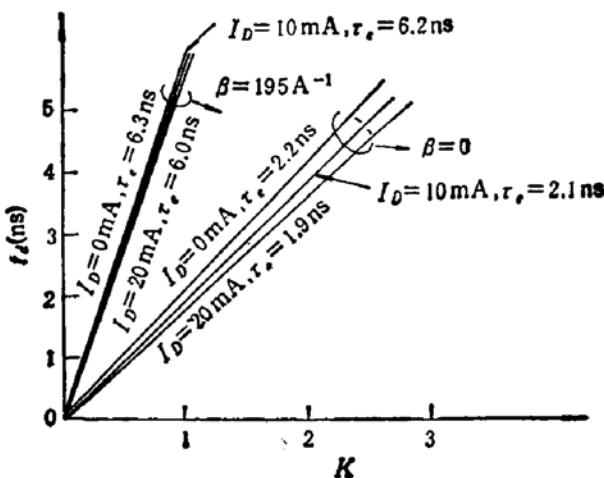
$\beta(A^{-1})$	160	170	180	190	200
$\tau_e(ns)$	5.8	6.0	6.1	6.2	6.4
$\beta(A^{-1})$	210	220	230	240	250
$\tau_e(ns)$	6.5	6.6	6.8	6.9	7.0

应在  $180A^{-1}$  和  $210A^{-1}$  之间。利用器件的设计参数，由(9)式计算出辐射复合系数约在  $1.4 \times 10^{-10}cm^3/s$  至  $1.5 \times 10^{-10}cm^3/s$  之间。这一结果与 F. Stern 的理论计算结果一致<sup>[4]</sup>，但略大于 R. Olshansky 的测量结果<sup>[2]</sup>。如果  $\beta$  取  $195A^{-1}$ ，对于不同的偏置电流的条件

表 2 在  $\beta = 195 \text{ A}^{-1}$  时,由实验得到不同偏置电流下的电子寿命,及测量的阈值电流

$I_D(\text{mA})$	0	10	20
$I_{th}(\text{mA})$	59	61	62
$\tau_e(\text{ns})$	6.3	6.2	6.0

下,测量注入阶跃电流与激射延迟时间的关系。再由(13)式计算  $\tau_e$ 。其注入偏置电流、阈值电流和相应的电子寿命的对应关系如表 2 所示。可以看出随偏置电流的增大, 阈值电流增大而电子寿命略微减小。但电子寿命  $\tau_e$  的相对改变量远小于小信号近似的单分子过程模型得出的改变量<sup>[9]</sup>。它可归结于偏置电流产生的热效应的影响。我们对于用单分子过程模型 ( $\beta = 0$ ) 和双分子过程模型 ( $\beta = 195 \text{ A}^{-1}$ ) 的不同偏置电流下的  $t_d-K$  曲线进行比较, 可以看出对于不同偏置电流下可以近似取相同的  $\beta$  和  $\tau_e$  值。图 4 表示  $\beta$  取  $195 \text{ A}^{-1}$  和 0 时的  $t_d-K$  关系曲线。

图 4  $\beta$  值取  $195 \text{ A}^{-1}$  和 0 时, 对于不同偏置电流的  $t_d-K$  关系曲线

#### 四、结 论

通过理论分析和实验测量, 说明在 DH 激光器中双分子复合过程起着重要的作用。它和单分子复合过程共同决定了注入电流和激射延迟时间的关系。在这一前提下, 我们给出了注入电流和激射延迟时间关系的解析式, 并利用这一关系, 通过小电流荧光响应的辅助测量和激射延迟时间的测量, 确定了电子寿命  $\tau_e$  和与辐射复合有关的参数  $\beta$  值, 进而可近似估算出有效辐射复合系数等重要参量。从实验的结果中可以看出利用双分子过程复合模型, 能较好地把不同偏置电流下的激射延迟特性统一起来, 同时本文也提供了一个测量 DH 激光器电子寿命和辐射复合系数的有效方法。

#### 参 考 文 献

- [1] R. W. Dixon and W. B. Joyce, *J. Appl. Phys.*, **50**, 4591(1979).
- [2] R. Olshansky, C. B. Su, J. Manning and W. Powazinik, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20**, 838(1984).

- [3] C. H. Henry and B. F. Levine, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-19, 905(1983).  
[4] N. A. Olsson and C. L. Tang, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18, 971(1982).  
[5] 王守武, 赵礼庆, 张存善, 邓生贵, 半导体学报, 3, 113(1982).  
[6] F. Stern, *J. Appl. Phys.*, 47, 5382(1976).

## Study of Recombination Property in DH Lasers with Lasing Delay Method

Zhang Cunshan and Xie Jingtao

(Department of Physics, Hebei University, Baoding)

### Abstract

In GaAs-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As DH lasers, an analysis of recombination property by measurement of lasing delay is presented. It shows that only considering both bimolecular radiative recombination and non-radiative recombination can we obtain a more comprehensive conclusion on lasing delay character. A method is proposed to determine the coefficient of radiative recombination and the lifetime of minority carriers.

**KEY WORDS:** Semiconductor laser, Lasing delay, Bimolecular radiative recombination, Nonradiative recombination, Effective radiative recombination coefficient