

## 从二极管激光器获得最短光脉冲的最佳泵浦条件\*

单 振 国

(中国科学院上海光机所)

Optimum pump condition for obtaining shortest  
light pulses from laser diodes

Shan Zhenguo

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

**提要:** 用龙格-库塔法求解二极管激光器(LD)的光子和电子速率方程。结果表明,利用增益开关原理,从LD所能得到的最短光脉冲是由器件参数,如自发辐射因子、腔长、灾难性破坏阈值、增益饱和和效应等决定的。通常用户只能在一定的泵浦条件下,才能获得这个最短光脉冲,但是,如果考虑到延迟时间对产生超短光脉冲的影响,并采取本文提出的相应措施,便可容易地获得由器件参数所决定的最短光脉冲。

**关键词:** 半导体激光器,超短光脉冲,泵浦条件

## 一、引 言

高速光通信系统、光纤和高速探测器的检测都要求能从LD获得超短光脉冲。H. Ito等人研究了射频调制AlGaAs激光器ps光脉冲的产生<sup>[1]</sup>, S. Tarucha等人研究了LD在偏置为阈值以上时,对大信号正弦波调制电流的响应<sup>[2]</sup>, M. S. Demoken等人研究了在某些近似条件下耦合速率方程的数值解,并推导出光脉冲宽度的分析表达式<sup>[3]</sup>。

本文将给出LD光子和电子耦合速率方程数值解的详细结果,特别强调光脉冲和电脉冲之间的延迟时间对获得最短光脉冲的影响。因为在实际上,要求背景光很弱,本文的讨论局限在直流偏置小于阈值的范围内。结果表明,利用增益开关原理从LD获得的

最短光脉冲,是由器件参数决定的,如自发辐射因子、腔长、腔面反射率、灾难性破坏阈值、增益饱和等。一般说来,用户只有在一定的条件下,才能从一个给定器件获得这个最短的光脉冲。但是,如果用户考虑到电脉冲和光脉冲之间的延迟时间对光脉冲宽度的影响,采取本文提出的一些措施,则可以比较容易地获得由器件参数所决定的最短光脉冲。

## 二、速率方程和龙格-库塔法

二极管激光器的单模速率方程为:

$$dN_e/dt = j/ed - A(N_e - N_0)N_{ph} - N_e/\tau_s \quad (1)$$

稿收日期: 1988年5月3日。

\* 本研究是在意大利Trieste的国际理论物理中心(IGTP)的“在意大利实验室训练和研究计划”的支持下,在意大利通讯研究中心(CSELIT)完成的。

$$\frac{dN_{ph}}{dt} = A(N_e - N_0)N_{ph} - N_{ph}/\tau_{ph} + \gamma N_e/\tau_s \quad (2)$$

其中  $A$  (cm/s) 是比例常数,  $d$  是复合区厚度;  $\gamma$  是光子自发辐射为激光模的几率;  $N_e$  是增益系数开始变为注入载流子  $N_e$  的线性函数时的最小电子密度值。

将(1)和(2)式中的各个量归一化:

$$x = t/\tau_s \quad (3)$$

$$y = A\tau_s N_{ph} \quad (4)$$

$$z = A\tau_{ph} N_e \quad (5)$$

$$n_0 = A\tau_{ph} N_0 \quad (6)$$

$$J = A\tau_s \tau_{ph} (j/ed) \quad (7)$$

$$W = \tau_s/\tau_{ph} \quad (8)$$

结果, (1)和(2)变为

$$dz/dx = J - y(z - n_0) - z \quad (9)$$

$$dy/dx = W[y(z - n_0 - 1) + \gamma z] \quad (10)$$

计算中, 取

$$n_0 = 0.1, J_{th} = 1.1, W = 1170,$$

$$\gamma = 10^{-4}, \tau_s = 2\text{ns}, \tau_{ph} = \tau_s/W。$$

用龙格-库塔四级演算公式求解速率方程, 这些演算公式为<sup>[4]</sup>:

$$k(0, 0) = hF(x, y, z) \quad (11a)$$

$$k(1, 0) = hG(x, y, z) \quad (11b)$$

$$k(0, 1) = hF(x+0.5, y+0.5k(0, 0), z+0.5k(1, 0)) \quad (11c)$$

$$k(1, 1) = hG(x+0.5, y+0.5k(0, 0), z+0.5k(1, 0)) \quad (11d)$$

$$k(0, 2) = hF(x+0.5, y+0.5k(0, 1), z+0.5k(1, 1)) \quad (11e)$$

$$k(1, 2) = hG(x+0.5, y+0.5k(0, 1), z+0.5k(1, 1)) \quad (11f)$$

$$k(0, 3) = hF(x+0.5, y+k(0, 2), z+k(1, 2)) \quad (11g)$$

$$k(1, 3) = hG(x+0.5, y+k(0, 2), z+k(1, 2)) \quad (11h)$$

$$y(T_2+1) = y(T_2) + 1/6[k(0, 0) + 2k(0, 1) + 2k(0, 2) + k(0, 3)] \quad (12)$$

$$z(T_2+1) = z(T_2) + 1/6[k(1, 0) + 2k(1, 1) + 2k(1, 2) + k(1, 3)] \quad (13)$$

式中  $h$  是步长,  $T_2$  是步数。在计算时, 取  $h = 0.001$ 。

且

$$F(x, y, z) = W[y(z - n_0 - 1) + \gamma z] \quad (14)$$

$$G(x, y, z) = J - y(z - n_0) - z \quad (15)$$

龙格-库塔法被广泛用来解二极管激光器速率方程<sup>[1~3]</sup>。程序简单, 但不易检查。

### 三、计算结果

下面为不同泵浦条件下的计算结果。

#### 3.1 直流偏置加矩形脉冲

泵浦电流形状如图1所示。

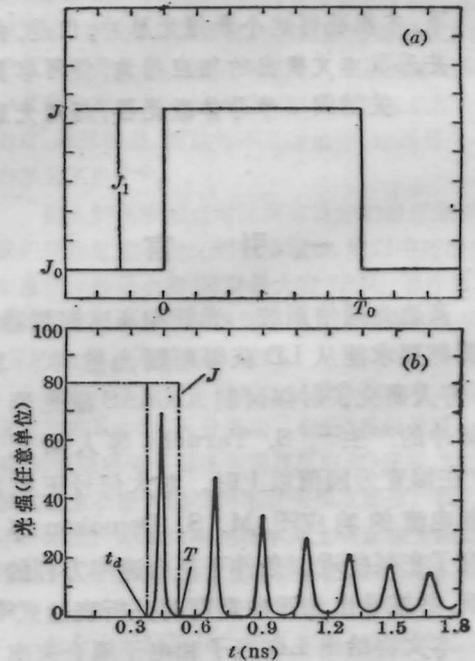


图1 直流偏置  $J_0$  加矩形脉冲  
(a) 总电流  $J = J_0 + J_1$ ; (b) 脉冲宽度  $T_0 = t_d + T$ ,  $T$  为张弛振荡第一个光脉冲的底宽

(1)  $J$  和  $T_0$  为常数, 改变  $J_0$ 。

计算时, 取

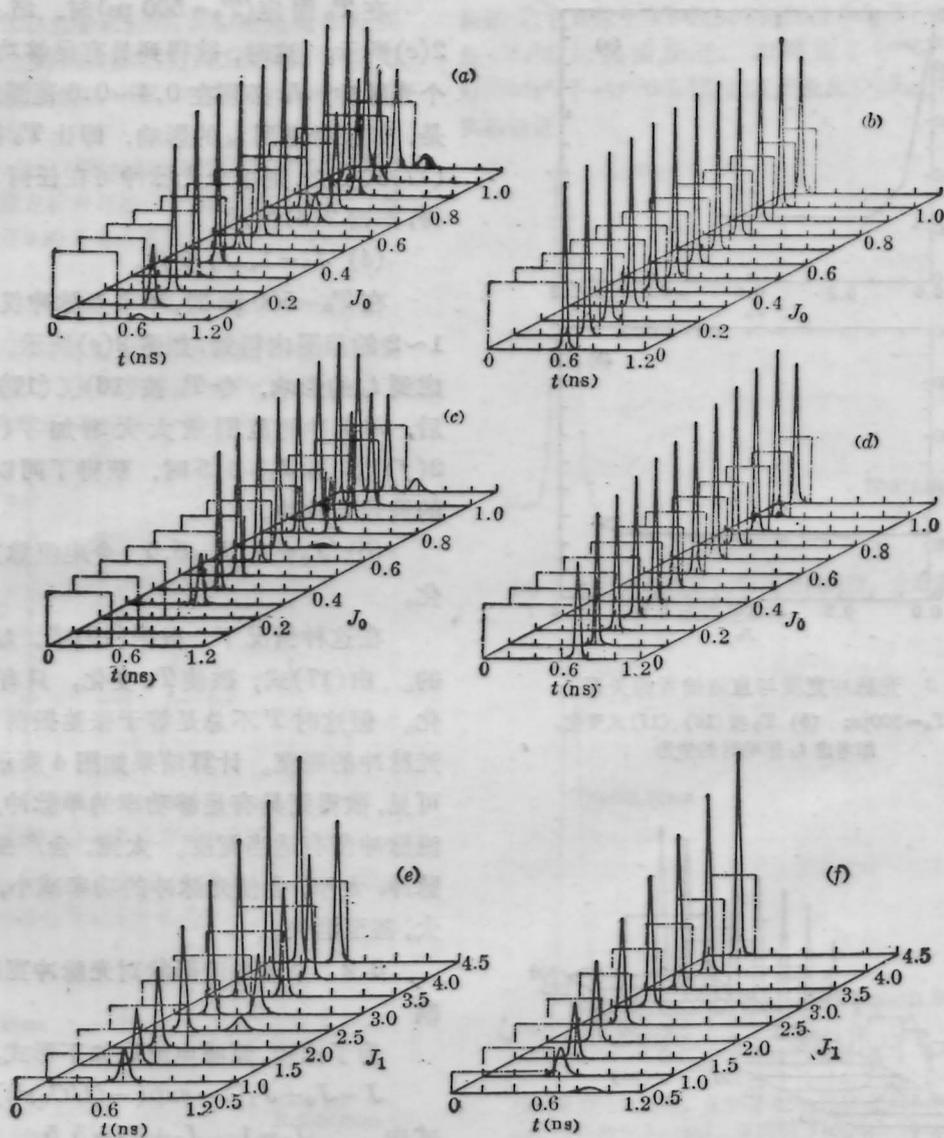


图2 直流偏置加矩形脉冲驱动 LD 时的计算结果  
虚线表示电流脉冲,实线表示光脉冲,纵坐标为任意单位光强(下同)

$$J = 5.5, T_0 = 500 \text{ ps},$$

结果如图 2(a)和图 3(a)所示。当  $J_0$  增加时,激光器经历三个状态:从截止到稳定单脉冲之间的转变区( $J_0$  从 0 到 0.2)、稳定的单脉冲区( $J_0$  从 0.3 到 0.6)和多脉冲区( $J_0 \geq 0.7$ )。对光通信等应用来说,唯一可利用的是稳定的单脉冲区,但这时所允许的  $J_0$  的范围太小。

(2)  $J = 5.5$ , 令  $T_0$  随  $J_0$  变化。

如果我们考虑电流脉冲和光脉冲之间的延迟时间  $t_d$  的影响,则可改善上述情况。

当  $J_0 \leq J_{th}$  时,  $t_d$  和  $J_0$  的关系可用下式表示<sup>[3]</sup>:

$$t_d = \tau_s \ln[(J - J_0)/(J - J_{th})] \quad (16)$$

电流脉冲宽度  $T_0$  可分为两部分(见图 1(b)):

$$T_0 = t_d + T \quad (17)$$

为保证只产生一个光脉冲,令  $T$  近似等

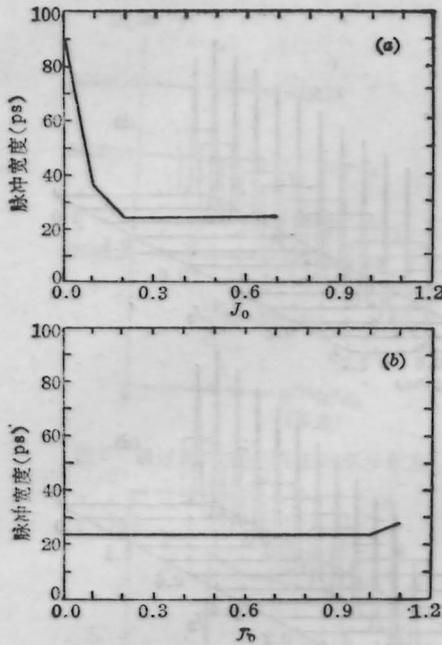


图3 光脉冲宽度与直流偏置的关系  
(a)  $T_0=500\text{ps}$ ; (b)  $T_0$ 按(16)、(17)式变化, 即考虑  $t_a$  影响时的情形

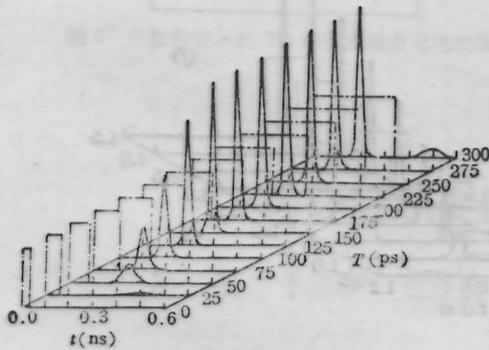


图4 直流偏置加脉宽变化的矩形电流脉冲驱动LD时的计算结果。虚线表示电流脉冲, 实线表示光脉冲

于张弛振荡第一个光脉冲的底宽,  $T=250\text{ps}$ 。

当  $J_0$  增加时,  $t_a$  减小。  $T_0$  按(17)式变化。此时计算结果示于图2(b)和图3(b)中。由图可见, 具有最短脉宽和相同功率的光脉冲, 可在整个  $J_0$  范围内得到。

(3) 电流脉冲振幅  $J_1$  为常数, 令  $J_0$  变化。

在  $T_0$  固定( $T_0=500\text{ps}$ )时, 结果如图2(c)所示。这时, 欲得到具有足够功率的单个光脉冲,  $J_0$  必须在  $0.4\sim 0.6$  范围内。但是, 如果考虑到  $t_a$  的影响, 即让  $T_0$  按(16)、(17)式变化, 则单个光脉冲可在任何  $J_0$  值获得, 如图2(d)所示。

(4)  $J_0=1, J_1$  变化。

在  $T_0=500\text{ps}$  时, 单个光脉冲仅在  $J_1=1\sim 2$  的范围内得到, 如图2(e)所示。但在考虑到  $t_a$  的影响, 令  $T_0$  按(16)、(17)式变化后, 单脉冲的范围就大大增加了(参见图2(f))。当  $J_1=4.5$  时, 获得了同以前一样的最短光脉冲。

(5)  $J_0=1, J=5.5$ , 令电流脉宽  $T_0$  变化。

在这种情况下, 根据(16)式,  $t_a$  是不变的。由(17)式, 欲使  $T_0$  变化, 只有令  $T$  变化。但这时  $T$  不总是等于张弛振荡第一个光脉冲的底宽。计算结果如图4所示。由图可见, 欲得到具有足够功率的单脉冲, 泵浦电流脉冲需有适当宽度。太宽, 会产生多个光脉冲; 太窄, 会使光脉冲的功率减小, 脉宽增大, 甚至消失。

### 3.2 泵浦电流形状对光脉冲宽度的影响

为了比较, 泵浦电流取如下形式:

$$J = J_0 + J_1[1 - \exp(-(t/C_0)^2)] \quad (18)$$

式中  $J_0=1, J_0+J_1=5.5$ 。

这时  $T_0$  为电流脉冲底宽。

改变  $C_0$ , 就可改变泵浦电流脉冲的上升时间, 如图5(a)中的虚线所示。我们看到, 具有相同宽度、相同功率的单个光脉冲, 可在

$$C_0 = 0.004 \sim 0.039$$

的范围内获得。当  $C_0 > 0.039$  时, 即泵浦电流变为类三角波时, 光峰值功率减小, 脉宽增加。仔细观察图5(a)时, 我们发现,  $C_0$  不同,  $t_a$  也不同。  $C_0=0.004$  时,  $t_a=150\text{ps}$ ; 当  $C_0$  增加  $0.005$  时,  $t_a$  约增加  $25\text{ps}$ 。光脉冲的底宽  $T$  约为  $100\text{ps}$ 。因此, (17)式可改写为

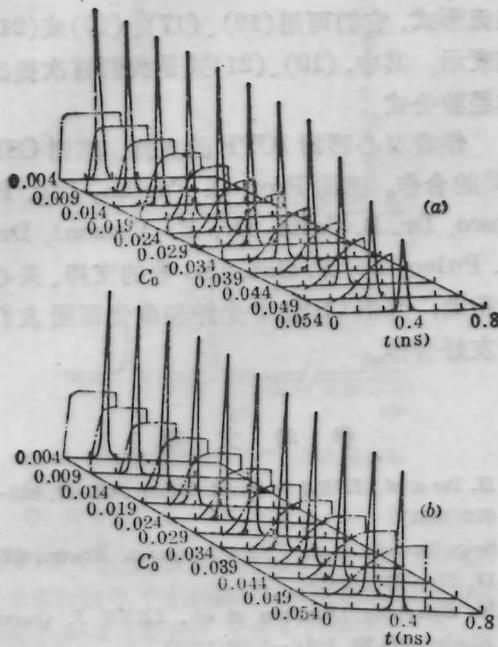


图5 用前沿变化的脉冲驱动 LD 时的计算结果  
(a)  $T_0=500$  ps; (b)  $T_0$  按(19)式变化时的情形

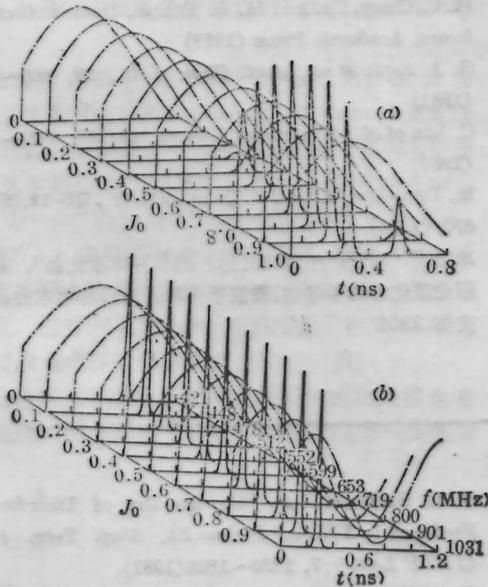


图6 用直流偏置加正弦波电流驱动 LD 时的计算结果

(a)  $f=800$  MHz; (b)  $f$  按(21b)式变化, 即考虑延迟时的情形

$$T_0 = t_{d_0} + \Delta t_d + T$$

$$= 150 + 25 \times [(C_0 - 0.004) / 0.005] + 100 \quad (19)$$

式中  $\Delta t_d$  是  $C_0$  变化时所引起的延迟时间变化。若令  $T_0$  按(19)式变化, 即考虑  $t_d$  的影响, 则在整个  $C_0$  范围内, 都可获得最短的光脉冲, 如图 5(b) 所示。

### 3.3 直流偏置加正弦波

取泵浦电流的形式为

$$J = J_0 + J_1 \sin(2\pi ft) \quad (20)$$

式中  $J_0 + J_1 = 5.5$ 。

当  $f = 800$  MHz

时, 计算结果示于图 6(a)。由图可见, 仅当  $J_0 = 0.8$  时, 才能得到最短的光脉冲。仔细观察图 6(a) 发现, 当  $J_0 = 0.8$  时, 延迟时间  $t_{d_0}$  约为 350 ps, 当  $J_0$  变化 0.1 时, 延迟时间变化  $\Delta t_d$  约为 35 ps。因此, 可建立另外一个经验公式:

$$t_d = t_{d_0} + \Delta t_d$$

$$= 350 + 35 \times [(0.8 - J_0) / 0.1] \quad (21a)$$

图 6(a) 还表明, 在  $J_0 = 0.8$  时(此时, 光脉冲宽度最小),  $t_{d_0}$  约等于调制电流周期的 1/4。假设欲得到最短的光脉冲, 在任何  $J_0$  值时的延迟时间都应等于调制电流周期的 1/4。为此, (21a) 式可改为

$$\frac{1}{4f} = \frac{1}{4f_0} + 35 \times [(0.8 - J_0) / 0.1] \quad (21b)$$

式中  $f_0 = 800$  MHz。

将(21b)式中的  $f$  代入(20)式, 所得到的新结果示于图 6(b)。可见, 如果调制频率按(21b)式变化, 即考虑  $t_d$  的影响, 则不管  $J_0$  值如何变化, 总能得到最短的光脉冲。

## 四、讨 论

我们用龙格-库塔法解 LD 光子和电子的单模速率方程, 特别强调了电流脉冲和光脉冲之间的延迟时间对从 LD 获得 ps 光脉冲的影响。方程(1)和(2)中的各项系数对所产生的光脉冲宽度有着决定性的影响。一般说来, 这些系数都和器件参数有关, 如  $\gamma$  反映

着器件的导引机构,  $\tau_{ph}$  与器件腔长  $L$  (本计算, 设  $L=200 \mu\text{m}$ )、腔面反射率有关等。所选取的  $j$  值越大, 光脉冲越窄, 但  $j$  的取值受到器件的破坏阈值  $W_p$  所限 (本计算, 假设  $W_p$  为 5 倍阈值时的功率)。因此, 利用增益开关原理, 从 LD 获得的最短光脉冲, 是由器件参数决定的。关于这一结论, 将另行讨论<sup>[9]</sup>。

本文着重指出, 通常用户只能在一定条件下才能从给定器件获得最短的光脉冲, 如一定的直流偏置、电流脉宽、上升时间或频率。但是, 如果考虑到延迟时间对产生 ps 光脉冲的影响, 则不管采用什么电流波形, 都能比较容易地从该器件获得由器件参数决定的最短光脉冲。

虽然, 我们采用的是单模速率方程, 但计算结果与实验<sup>[6]</sup>符合得很好。例如, 在

$$L=200 \mu\text{m}, J=5.5$$

的情况下, 我们得到的最短光脉冲的宽度约为 25 ps, 与文献[6]基本一致。又如, 当  $T_0$  或  $f$  固定时, 用矩形电流脉冲驱动 LD 比用正弦波驱动所获得的最短光脉冲的稳定性要高, 与文献[7]的结论一致。M. Danielsen 指出<sup>[8]</sup>, 为从 LD 获得最短的光脉冲, 详细的电流波形是无关紧要的, 只要由电流注入的载流子满足某些要求。在本工作中, 我们明确地显示了这些要求是什么。对不同的泵浦

电流形式, 它们可用(16)、(17)、(19)或(21)式表示。其中, (19)、(21)式是我们首次提出的经验公式。

作者衷心感谢 ICTP 的支持, 感谢 CSELT 的合作。感谢 Prof. G. Furlan, Ing. F. Tosco, Dr. B. Costa, Dr. E. Vezzoni, Dr. M. Puleo, Dr. P. Gambini 等的支持、关心和帮助, 感谢 CSELT 光纤和激光部朋友们的友好合作。

### 参 考 文 献

- 1 H. Ito *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**, 663~670(1981)
- 2 Seigo Tarucha *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**, 810~816(1981)
- 3 M. Suleyman Demokan *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**, 1016~1022(1984)
- 4 Carl-erik Froberg, "Introduction to Numerical Analysis", Second edition, p. 268(1979)
- 5 H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers*, Academic Press (1978)
- 6 G. J. Aspin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 860~861(1981)
- 7 C. Lin *et al.*, *Electronics Letters*, **16**(15), 600~602(1980)
- 8 M. Danielsen, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-12**, 657~670(1976)
- 9 单振国, "用于产生超短光脉冲的半导体激光器", 第 5 届全国化合物半导体、微波器件和光电器件学术会议论文集, 1988

(上接第 196 页)

包络。图 2 还表明, 在两波纹段之间有一  $\sigma$  的相移。

### 参 考 文 献

- 1 M. Nokamura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 224(1973)
- 2 V. L. Bratman *et al.*, "Free Electron Laser with Distributed Feedback," in *Relativistic HF Electronics*, edited by A. V. Gaponov-Grekhov (Inst. Appl. Phys., Gorky, U S S R., 1981), pp. 237~262; also

- V. L. Bratman *et al.*, "On the Use of Distributed Feedback in FEL's," *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. (JETP Lett.)*, **7**, 1320~1323(1981)
- 3 V. L. Bratman *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**, 282(1983)
- 4 M. C. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **48**(13), 817(1986)
- 5 A. W. Fliflet, *NRL Memorandum Report 5812*, August 1986
- 6 K. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering* (McGraw-Hill, Inc., New York, 1966), p. 327