

用于激光等离子体诊断的主被动 锁模染料激光系统*

滕永禄

(中国科学院上海光机所)

R. 费德西耶夫

(加拿大国家研究院物理部)

R. 西格尔

(西德马-普学会量子光学研究所)

提要: 本文叙述了作为激光等离子体微微秒照相脉冲光源用的染料激光系统。它采用主-被动锁模相结合的染料激光脉冲与碘激光脉冲同步工作。染料激光脉冲相对于碘激光脉冲的到达时间可以预先选择,同步精度为200微微秒。在靶照射实验中,两个脉冲的同步成功率为76%。

Active-passively mode-locked dye laser for diagnosis of laser-produced plasma

Teng Yunlu

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

R. Fedosejevs

(Division of Physics, National Research Council of Canada)

R. Sigel

(Max-Planck-Institut für Quantenoptik, West Germany)

Abstract: A dye laser system used as a pulsed light source for picosecond photography of laser-produced plasma is described. The dye laser pulse has been synchronized with the iodine laser pulse by a combination of active-passive mode-locking. The arrival time of the dye laser pulse relative to the iodine laser pulse can be preselected with a jitter of 200 ps. Successful synchronization between the two pulse was obtained in 76% of all the shots taken.

收稿日期: 1981年9月11日。

* 本项工作是在西德量子光学研究所进行的。

概 述

氙灯泵浦的染料激光器的被动锁模是产生微微秒脉冲的一种可靠方法^[1,2]。它可以产生微微秒宽度的脉冲,每个脉冲的能量为几十微焦耳。用这种脉冲探测激光等离子体的行为,具有极高的时间分辨率。染料激光脉冲系列的快速建立时间可以很容易地使脉冲系列与所研究的快速现象同步,其同步精度可以用一个主动调制器同时控制染料激光器谐振腔中脉冲的发展来加以改进。

实验装置示于图1,染料通过长为20厘米、内径5毫米、带有布儒斯特角的玻璃管循环。两支氙灯泵浦,双椭圆聚光腔。每支氙灯由1微法拉的电容器供电,充电电压最大为20千伏,灯光波形半宽度为2微秒。谐振腔是由一凹面反射镜($r=3$ 米)和一带劈角的平面反射镜,反射率分别为100%及50%组成。腔长为1.25米,取决于加到主动调制器上的电信号的频率。被动锁模的饱和染料溶液(通常为DODCI或TQDCI)置于1毫米厚的染料盒内,与凹面反射镜直接光学接触。激光波长用介质偏光膜元件调谐。通常染料激光器采用若丹明6G的甲醇溶液(有时采用若丹明B的乙醇溶液,视所需波长而定)。浓度为 2×10^{-4} 克分子/升,一般锁模染料的浓度为 5×10^{-5} 克分子/升。增益介

质的饱和和锁模染料吸收的饱和,这两种效应结合起来,就使得脉冲每通过一次谐振腔,就变窄一次。同时,因增益饱和而造成的脉冲强度的调制,使得诸如自相位调制这类非线性效应不象固体激光器那样导致脉冲的加宽。其结果就产生了一个非常可靠的脉冲系列,而每个脉冲的宽度在整个脉冲系列中都是很窄的。这一过程与固体激光器的被动锁模过程成为明显的对照。后者锁模染料具有很短的弛豫时间,典型的为几个微微秒,在谐振腔中脉冲建立期间,将导致大部分微微秒噪声尖峰很强的放大。典型强度为50兆瓦/厘米²,而且为了在主脉冲与背景噪声之间获得较高的对比度,必须在腔内多次往复才行。由于固体激光器的饱和能量要比使染料饱和的能量大得多,典型值为3焦耳/厘米²,因而,不存在能维持在饱和吸收体的有效范围内的脉冲振幅的自调制。为了在有效强度范围内,脉冲能多次通过谐振腔,脉冲建立时间必须相当长,典型值为10~30微秒。由于每次泵浦能量的起伏及初始辐射噪声的统计偏差,到达峰值的建立时间有几个微秒的抖动,这样大的抖动时间,使得被动锁模的固体激光器与其它系统的精确同步是相当困难的。

主动锁模是产生短脉冲的另一种常用技术^[3,4]。利用这种技术可以可靠地产生60~100微微秒宽度的短脉冲^[5,6]。然而这样的脉冲宽度与用于激光等离子体相互作用实验的光探测脉冲的要求相比要宽得多。但是主动调制有其优点,即可使两个不同的激光振荡器同步,其同步精度与所产生的脉冲宽度本身相当。

将主动和被动锁模两种方法用于单一的染料激光振荡器中,可以获得微微秒脉冲,该脉冲可以与另外一个主动锁模的激光脉冲精确地同步。在这种情况下,主动调制器不需要很强。因为它的主要作用是在脉冲建立初期产生一个初始脉冲,这一初始脉冲,在激光振

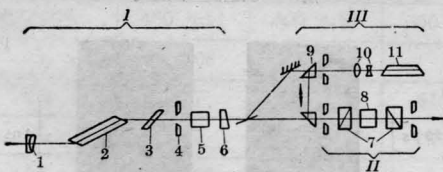


图1 主-被动锁模染料激光器(I), 开关(II)和调整系统(III)

- 1—含有饱和吸收染料的反射镜, $R=100\%$, $r=3$ 米;
- 2—流动的若丹明6G玻璃管;
- 3—介质偏振膜;
- 4—光阑;
- 5—主动锁模器;
- 6—带劈角的平面反射镜, $R=50\%$;
- 7—格兰-泰勒偏振棱镜;
- 8—普克尔盒;
- 9—棱镜;
- 10—扩束镜;
- 11—He-Ne激光器

荡器的非线性峰值强度期间，用普通的被动锁模技术，即可将该脉冲压缩。因此，脉冲的同步，可从主动调制器中获得，脉冲的压缩可用饱和吸收体获得。

腔长的调整

谐振腔长必须根据加到主动调制器上的频率来精确调整。其中方法之一是改变腔长以获得最大的输出能量。这种方法受到激光输出的起伏所限制，很难调准。我们采用了另外一种方法，即同时显示锁模激光脉冲系列与 RF 调制信号之间的拍频（参看图 2）。这是由于锁模脉冲系列本身是一周期信号，其包迹由泵浦波形决定，其频率与腔长和调制频率有关。这种方法简单可靠。

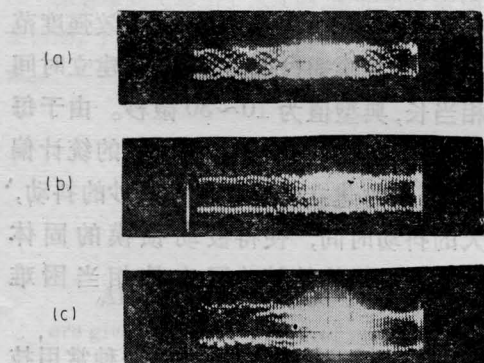


图 2 利用染料激光脉冲系列与 RF 调制信号之间的拍频来调整腔长(100 毫微秒/格)

- (a) 短于最佳腔长；
- (b) 最佳腔长；
- (c) 大于最佳腔长

为此，可使染料激光器在弱的主动调制和较强的被动锁模条件下进行。调整腔长使之得到零拍频。根据最大调制深度，用误差试验法，进一步调整腔长，以便在最小泵浦能量下，得到较长的可靠的脉冲系列。当偏离最佳位置 ± 1 毫米时，均有灵敏反应，这时，腔长调整即告完成。象这样的腔长调整，仅当调制频率变化或更换染料激光谐振腔内的某些元件时，才是必要的。

输出特性

由于在拍摄等离子体图象的相机前，使用了一块窄带干涉滤光片 ($\lambda_0 = 6050 \text{ \AA}$) 以抑制等离子体的自发光，所以染料激光输出需调谐。调谐元件为介质偏光膜。使用若丹明 6G 时，波长调谐范围为 $5900 \sim 6100 \text{ \AA}$ 。利用 2 米光栅光谱仪和光学多道分析仪测量了输出中心波长为 6050 \AA ，谱线宽度 $\Delta\lambda \approx 30 \text{ \AA}$ 。用 S_4 阴极的 XA1002 真空光电二极管及 Tektronix 7834 示波器拍得的脉冲系列及选脉冲的照片示于图 3。脉冲宽度的测量是用 IMACON 675 象转换管条纹相机进行的，其条纹照片示于图 4。一般来说，脉冲宽度与许多参量有关，诸如波长、泵浦能量、波长调谐元件的类型等。用最佳的 DODCI 浓度可使脉冲宽度达最小。从条纹照片测量可知，脉宽 ≤ 10 微微秒。从清晰的

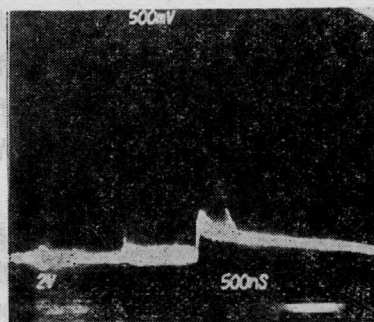


图 3 主-被动锁模染料激光器输出脉冲与选脉冲信号

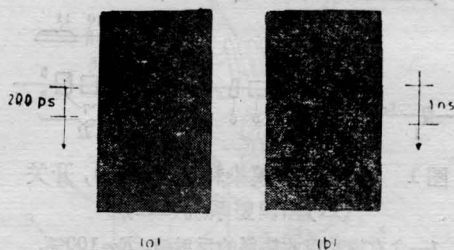


图 4 脉冲宽度的条纹照片

- (a) 仅被动锁模的染料激光脉冲，DODCI: 2.5×10^{-5} 克分子/升，脉宽 $\tau \approx 15$ 微微秒；
- (b) 主-被动锁模染料激光脉冲 $\tau \leq 10$ 微微秒

阴影照片可以看出,这样的时间分辨率,对于激光等离子体相互作用来说是相当满意的。

电-光 调制

为了使染料激光与碘激光同步并避免与声-光调制有关联的谐振频率问题,以采用电光调制为宜。致于为获得适当的调制深度所需的高电压,可用高灵敏度的电光晶体及 RF 谐振电路来加以解决。

将一对匹配的 KD*P 晶体, 45°Z 向切割, 如图 5 所示。然后, 彼此转 90°, 以使得在不加电压时, 两块晶体的双折射相互抵消, 而与温度无关。光束沿晶体的中心传播, 与 X 和 Y 轴成 45° 角, 电矢量方向与 Z 轴成 45° 角, 所加的调制电场与 Z 轴平行。

为获得半波相位延迟, 即偏振方向旋转 90°, 所需的电压由下式给出^[7, 8]:

$$V_{\lambda/2} = \left[\frac{\lambda}{n_0^3 T_{63}} \right] \frac{d}{L}$$

式中 d 为晶体的宽度。方括号中的数值被认为纵向普克尔盒的半波电压, 它表明横向普克尔盒灵敏度的大小取决于晶体的长度与厚度之比。实验中所用的晶体厚度为 5 毫米, 长度为 20 毫米, 它可以给出在灵敏度方面四倍的改进。

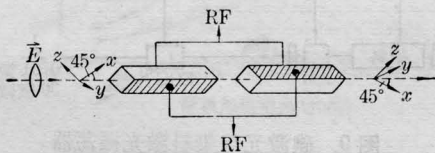


图 5 45°Z 切割 KD*P 横向电-光晶体
电极与 Z 轴垂直, 光束沿与 Z 轴成 90°、与 X 和 Y 成 45° 的方向传播

如图 6 所示, 一个铁氧体可调谐线圈跨接在晶体的两个电极上, 调谐线圈的电感量令其在 60 兆赫下谐振。自 50 欧姆同轴电缆馈送来的电驱动信号跨接到四匝绕组的 1/2-1 匝上。

染料激光器以主被动锁模方式运行, 施

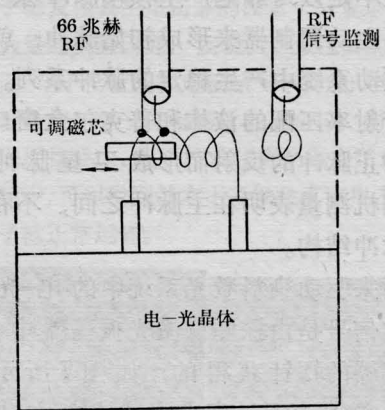


图 6 RF 驱动信号与电-光晶体的耦合

加不同的调制电平, 频率自 59 兆赫至 67 兆赫内变化。因为晶体置于腔的一端, 因此, 每一往返后的有效的调制深度为单程测量值的两倍。对于实际使用的输出为 10 瓦的 HP320B 可调谐放大器, 测量到的单程调制系数为 $\theta_m = 0.35$, 因此, 有效的调制深度为 0.7。

染料激光脉冲相对于所加的电调制信号峰值的出现时间的起伏, 可以做如下估计, 即假定脉冲的形成分为两个阶段进行。第一个阶段包含仅在主动调制器作用下弱光脉冲的初始线性增长, 第二阶段包含一俟到达饱和和能量通量密度后, 光脉冲的非线性增长。这时在压缩脉冲方面, 饱和吸收体起主导作用。在脉冲增长的第一阶段结束时, 主动调制器的同步作用结束, 尾部脉冲出现时间的抖动大小, 应当是脉冲增长的线性阶段结束时的脉冲宽度的很小一部分, 即在被动锁模起主导作用之前, 染料激光初始脉冲作了近 100 次往返。在线性增长阶段结束时, 脉冲宽度为 $\tau_p = 0.6$ 毫微秒 (FWHM)。由此可以预料, 尾部脉冲出现时间的抖动仅为这个初始脉冲宽度的一小部分。输出脉冲对输入 RF 驱动信号时间的抖动测量表明, 其大小为 ± 140 微微秒。这样一个抖动时间与在线性增长阶段结束时所预计的脉冲宽度相吻合。

当腔长变大时(如大于 1 米), 单是被动

锁模是不足以可靠地产生锁模脉冲系列的，但是用主动调制器来形成初始脉冲，可以在主被动系统中产生稳定的脉冲系列。

折射率匹配的液体和普克尔盒窗口的增透可防止脉冲的反射而形成卫星脉冲。用条纹相机测量表明在主脉冲之间，不存在这种亚脉冲结构。

用来驱动染料激光系统中的电-光调制器的电信号是由探测碘激光振荡器中的声-光调制器的探针获得的，如图7所示。将He-Ne激光束通过声光调制晶体后，用硅光二极管检测出零级调制信号，即可得到60兆赫的RF信号，该信号在相位上与碘激光脉冲直接相关，而与声-光调制晶体的谐振频率的热漂移无关。然后将光二极管信号放大，如图8所示。先用一个宽带前置放大器，然后通过两级调谐放大器，最后得到峰-峰为150伏的信号，将其加到染料激光器电-光调制晶体的谐振电路上。

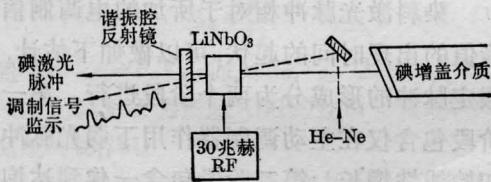


图7 对于碘激光谐振腔中的LiNbO₃声-光晶体的调制监测系统

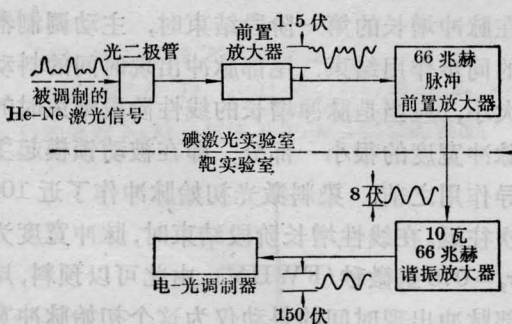


图8 RF信号放大系统方块图

在运行期间，RF调制信号的强度可以用2匝的线圈置于靠近晶体谐振线圈的带有屏蔽的罩子里作监测。然后将该信号加到50欧姆输入的示波器上以观察信号的幅度。

探测激光脉冲与主激光脉冲的同步

染料激光脉冲与碘激光脉冲的同步机构方块图示于图9。首先，两个系统的闪光灯在一适当的时间触发，以使两个脉冲系列同时出现，然后，两个谐振腔的主动调制器来自公用的RF振荡器的电信号驱动。染料激光谐振腔的腔长为碘激光谐振腔腔长之半，且用加于碘激光调制器两倍频率的电信号驱动。其结果是在两个谐振腔中的脉冲，在相位上被锁定。最后一级同步包括单一脉冲的选择。激光触发火花隙用来使电光闸门脉冲工作，以选出单一的碘激光脉冲。将碘激光单脉冲分出一部分，用真空光二极管检测。然后使另一电光闸门脉冲工作，以选出染料激光的单脉冲。因此，电-光闸门可以使脉冲的同步控制到染料激光谐振腔往返时间的整数倍。同时，调整加到染料激光调制器上的电信号的相位，以控制激光脉冲的精确同步。

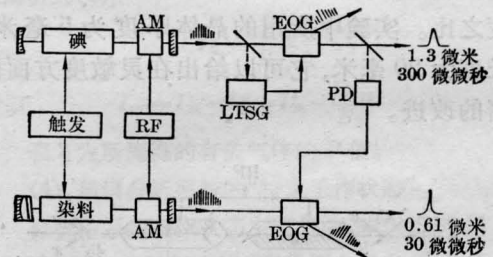


图9 碘激光与染料激光振荡器同步机构方块图

AM—主动调制器；EOG—电光闸门；LTSG—激光触发火花隙；PD—光二极管；RF—高频振荡器与放大器

两个脉冲的精确同步，需采用一个能精确测量脉冲间隔的监测系统。该系统示于图10。监测方法有两种，一种方法是对于大多数应用来说，采用光电二极管及宽带示波器就可以了，但对于精确的时间监测来说，常采用第二种方法，即用条纹照相机同时记录两

放大器中的热漂移以及加到调制器上的调制波形的变化所造成的。

用于激光等离子体相互作用 作用的阴影照相

本文所述的染料激光系统已用于 Asterix III 碘激光等离子体相互作用的一系列实验中的阴影照相，所得结果已刊印在 [10, 11]。这里仅就几张典型的阴影照片加以简单说明。

实验中碘激光系统输出能量为 100 焦耳，脉冲宽度为 300 微微秒。通常的焦斑直径为 400 微米，相应的功率强度为 2×10^{14} 瓦/厘米²。图 13(a)~(c) 示出了塑料薄条靶照射实验所拍得的阴影照片。薄条靶宽为 500~1000 微米，厚 2~20 微米。(a) 是在照射前拍得的作为比较用的照片，它表明了相互作用几何学。(b) 是在碘激光脉冲最大值之后 0.54 毫微秒拍得的，显示出被照射的前面上的等离子体云。(c) 是 6.4 毫微秒之后，由于向前面空间快速膨胀，等离子体消失了，由于等离子体所施加的反弹力矩，被照射的薄膜材料向后侧空间运动，同时以很慢的速度开始膨胀。在照射区之外，薄膜条也明显地得到一些加热，也开始很慢地向外膨胀；在视场边缘上的扰动表明，这时靶架也卷入了相互作用。

在单次照射时，从条纹阴影照片可以得到薄膜加速的时间历史。作为一个例子示于图 13(d)。对于这一结果的讨论参看 [10]。

最后，我们曾用该系统研究了在有机玻璃中激光驱动的冲击波。图 13(e) 表明相互作用几何学；图中的暗带是由于靶的前表面的凹面形成的。图 13(f) 表明在激光脉冲结束了很久之后，还在衰落的冲击波；在永久性破坏区之后，喷口还残留着。在有机玻璃里以声速传播的一个弱冲击波，沿着靶的整个前表面被释放出来。在较高的激光强度

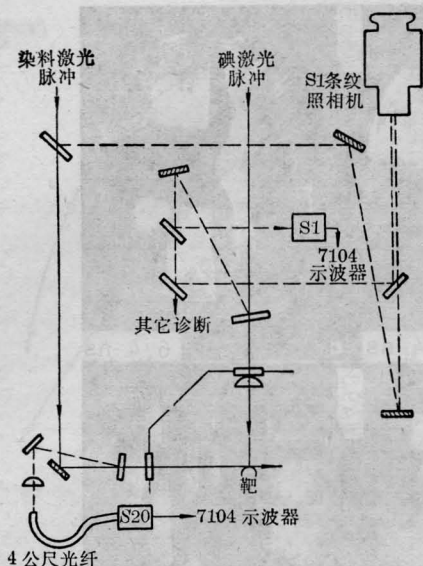


图 10 用于监测碘激光与染料激光脉冲同步的光二极管与条纹照相机系统的方块图

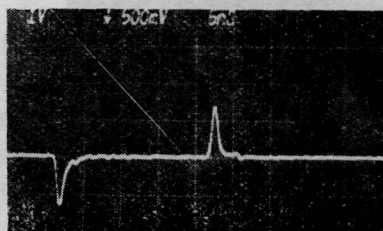


图 11 用来监测两个脉冲相对时间的示波照片
碘激光为负脉冲；染料激光为正脉冲

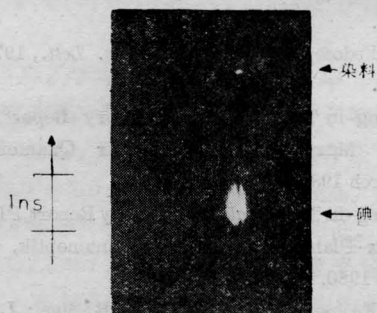


图 12 两个脉冲相对时间的条纹照片

个激光脉冲。图 11 与图 12 分别为上述两种方法的监测结果。详细的调整步骤及各种触发信号时间分配，请参阅 [9]。

实验所测得的染料激光脉冲与碘激光脉冲的同步精度为 200 微微秒。比理论分析所得到的值稍大一些，其原因是由于 RF 调谐

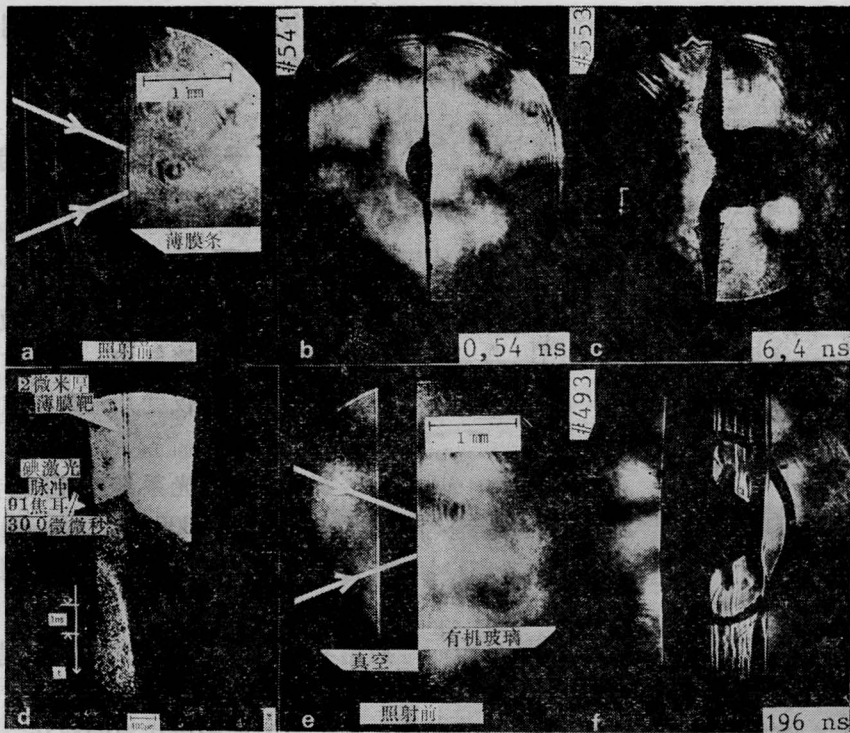


图 13

(a)-(c)-激光照射塑料薄膜条的阴影照片; (d)-同一靶的条纹阴影照片; (e)、(f)-激光照射固体有机玻璃靶的阴影照片, 所给出的时间均以碘激光脉冲峰值为零点

3×10^{15} 瓦/厘米²下, 用这种方法所观察到的击穿现象参看[11]。在 151 次靶照射实验中, 其中 111 次照射获得了清晰的照片, 即成功率为 76%。系统工作完好。

参 考 文 献

[1] W. Schmid, F. P. Schafer; *Phys. Lett.*, 1968, **26-A**, 558.
 [2] D. J. Bradley; in "Ultrashort Light Pulses, Picosecond Techniques and Applications", ed. S. L. Shapiro, Springer-Verlag, Berlin, 1977.
 [3] D. J. Kuizenga, A. E. Siegman; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1970, **QE-6**, 694; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1970, **QE-6**, 709.
 [4] I. V. Tomov et al.; *Rev. Sci. Instrum.*, 1979, **50**,

9.

[5] D. J. Kuizenga; *Opt. Commun.*, 1977, **22**, 156.
 [6] R. Fedosejevs et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, 985.
 [7] B. H. Ripin et al.; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **39**, 611.
 [8] R. Fedosejevs et al.; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **39**, 932.
 [9] Yung-lu Teng et al.; Laboratory Report, PLF 43, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, March 1981.
 [10] Yung-lu Teng et al.; Laboratory Report, PLF 41, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, October 1980.
 [11] R. Fedosejevs, Yung-lu Teng, R. Sigel; *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**, No. 6, 4186~4188.