

铷蒸气及其杂质铯的光泵受激辐射

秦莉娟 王祖赓 林远齐 马龙生

(华东师范大学物理系)

摘要: 本文报道在高纯铷及其所含杂质铯的蒸气中获得二者的光泵受激辐射的实验结果;分析了相应的光谱并对有关机制作了讨论;证实了在低原子浓度下探测受激辐射的可能性,并估计了用受激辐射信号检测杂质的可能性。

Optically pumped stimulated radiation in rubidium vapor with impurity cesium

Qing Lijuan, Wang Zugeng, Lin Yuanqi, Ma Longsheng

(Department of Physics, East China Normal University)

Abstract: From both rubidium and its trace impurity cesium the optically pumped stimulated radiation is obtained. The observed spectra are analyzed, and their related mechanism is discussed. The possibility of the stimulated radiation at the low atomic density is demonstrated, and the possibility of impurity examination by means of stimulated radiation signals is estimated.

一、引言

在高浓度下的铷蒸气和铯蒸气的受激电子喇曼散射,数年前已分别将样品放入热管炉中作过研究^[1,2]。在本工作中,我们用氮分子泵浦的染料激光器(其输出波段范围为 4150 \AA 到 4600 \AA)光泵仅含有微量杂质的高纯铷蒸气,获得了铷和铯的一系列受激辐射。经光谱标识,它们分别对应于铷原子 $6P-6S$ 和 $6P-4D$ 的受激辐射; $6S-5P$ 和 $4D-5P$ 的激串级受激辐射;铯原子 $7P-7S$ 和 $7P-5D$ 的受激辐射; $7S-6P$ 和 $5D-6P$ 的串级受激辐射。另外,我们还在 55°C 和 190°C 的较低温度下,分别测得了铷和杂质铯的受激辐射信号。

二、实验

实验装置如图1所示。以氮分子激光泵浦的染料激光作为样品的泵浦光,通过光束变换系统,将泵浦辐射会聚于热管炉中心。

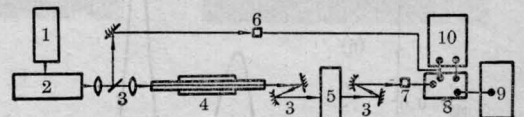


图1 实验装置

1—氮分子激光器; 2—染料激光器; 3—成像装置; 4—热管炉; 5—光栅单色仪; 6—采样触发探测器; 7—信号探测器; 8—信号处理系统; 9—记录器; 10—示波器

收稿日期: 1984年4月16日。

当采用染料 Stibene 和 4-MU 时, 在本实验装置中, 可分别在 4200 \AA 和 4500 \AA 这二个波段区域内, 得到大于 $20 \mu\text{J}$ 能量的脉冲调谐激光输出。热管长 70 cm , 内径 2.5 cm , 内装有数层不锈钢丝网, 加热区长 25 cm , 用自动控温仪控制加热温度。泵浦光入射窗口为石英, 出射窗口为 CaF_2 晶体。所用铷金属是英国 Kochlight Laboratories 股份有限公司的产品, 用量为 10 g 重纯度为 99.9% , 因此其中杂质含量很低, 含铯杂质应在千分之一以下。从热管炉 CaF_2 窗口轴向出射的光泵受激辐射信号, 经锗片滤除了 $1.8 \mu\text{m}$ 以下的红外辐射及泵浦光, 由 PbS 探测器接收, 经过采样峰值保持放大后, 用记录仪记录受激辐射的激发光谱。以光电二极管从泵浦脉冲光中取得同步信号来触发采样峰值保持系统和观察示波器。用光栅单色仪对受激辐射信号进行仔细的光谱分析并由上述探测器和信号处理系统探测和记录各受激辐射谱线的激发光谱和受激发射信号的发射光谱。

三、实验结果和讨论

1. 铷的光泵受激辐射和串级受激辐射

当氮分子激光泵浦的染料激光输出波长调谐到 4202 \AA 及 4216 \AA 附近时, 带有锗滤光片的 PbS 探测器在热管前向可探测到定

向强红外辐射, 其峰值能量约为 50 nJ , 此时蒸气温度为 400°C 左右。在本装置中红外辐射的发散度与泵浦激光的发散度相当, 约为 10 mrad 。

图 2 左半部示出了所对应的红外受激辐射的激发光谱, 在 23715 cm^{-1} 和 23793 cm^{-1} 处红外受激辐射出现峰值, 这二个泵浦频率正好对应于铷原子基态 $5S$ 到激发态 $6P_{3/2}$ 和 $6P_{1/2}$ 的跃迁频率。将得到的红外受激辐射引入光栅单色仪进行光谱成分分析, 测得它们的波长为 2.25 、 2.29 、 2.73 、 $2.79 \mu\text{m}$, 它们分别对应于 $6P_{3/2}-4D_{5/2, 3/2}$ 、 $6P_{1/2}-4D_{3/2}$ 、 $6P_{3/2}-6S$ 和 $6P_{1/2}-6S$ 跃迁; 在短波区又测得了 1.32 、 1.37 、 1.47 和 $1.53 \mu\text{m}$ 这四条受激辐射线, 它们分别对应于 $6S-5P_{1/2}$ 、 $6S-5P_{3/2}$ 、 $4D_{3/2}-5P_{1/2}$ 和 $4D-5P_{3/2}$ 跃迁。图 3 为铷原子的有关能级图, 图中示出了泵浦跃迁和所获得的各有关受激辐射跃迁。可见, 由于铷蒸气对泵浦光的单光子吸收, 使 $6P$ 能级获得大量粒子布居, 而形成 $6P$ 对 $6S$ 、 $6P$ 对 $4D$ 能级的粒子数反转, 从而产生受激辐射。在此过程后, 又形成 $6S$ 对 $5P$ 、 $4D$ 对 $5P$ 能级的粒子数反转, 产生相应的串级受激辐射。图 4 是当泵浦光频率分别共振激发 $6P_{3/2}$ 和 $6P_{1/2}$ 能级时, 由单色仪扫描所得的受激辐射光谱。

当泵浦频率偏离共振值时, 各受激辐射谱线强度下降, 图 5 是记录到的各受激辐射

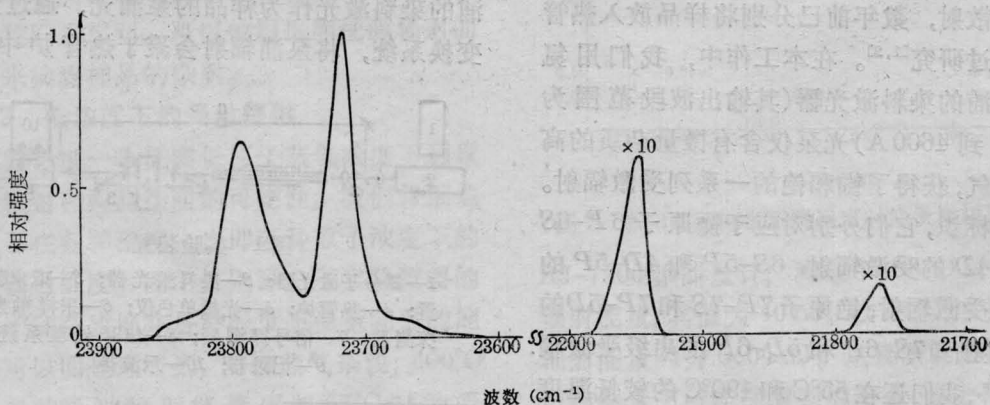


图 2 含杂质铯的铷金属蒸气的红外受激辐射 ($1.8 \sim 3.1 \mu\text{m}$) 激发光谱

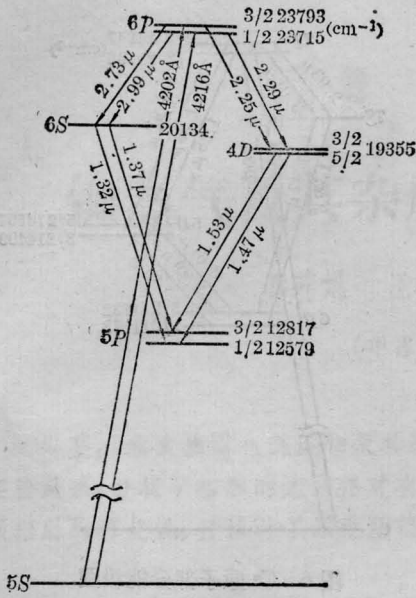


图3 Rb原子部分能级图

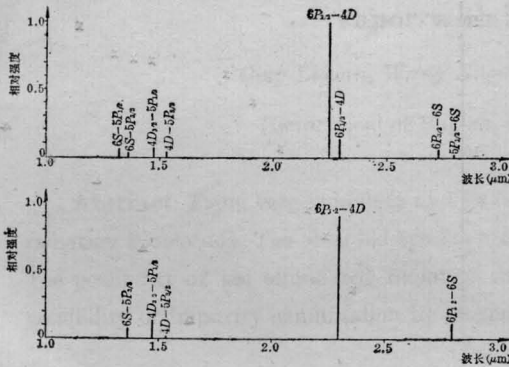


图4 近共振激发铷原子6P能级时的红外受激辐射及串级受激辐射光谱

(上) 激发 $6P_{3/2}$ 时的红外受激辐射光谱
(下) 激发 $6P_{1/2}$ 时的红外受激辐射光谱

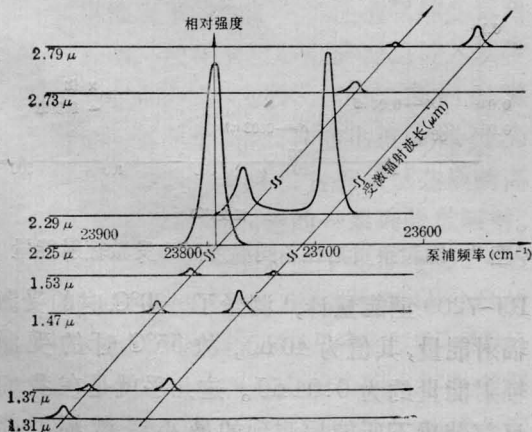


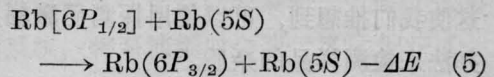
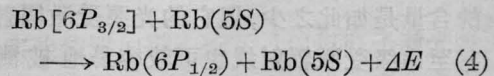
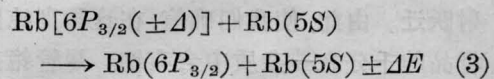
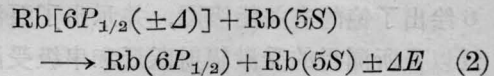
图5 铷原子各有关红外受激辐射和串级受激辐射跃迁的激发光谱

谱线的激发光谱图。

按照极化率和吸收理论, 吸收系数可推得由下式表示:

$$\beta = \frac{8\pi r_e c f_{gi} N \omega_p^2 T_i}{(\Omega_{ig} - \omega_p)^2} \approx \frac{2\pi r_e c f_{gi} N T_i}{(\Omega_{ig} - \omega_p)^2} \quad (1)$$

式中, Ω_{ig} 是共振频率, f_{gi} 是跃迁振子强度, T_i 是跃迁线宽, N 为原子密度, ω_p 为泵浦频率。上式表明, 吸收系数与频率失谐的平方成反比, 并可由实验条件和有关参数估算出单光子吸收系数。在我们的实验中, 如图5所示, 即使频率失谐达 $20 \sim 25 \text{ cm}^{-1}$, 上能级仍可有较多粒子布居而产生受激辐射。图中所示的大部分跃迁在失谐 15 cm^{-1} 左右时, 都还可以测得受激辐射, 因此, 这并不能单纯地归结为粒子的吸收布居。由图4和图5可以看到一个最明显的实验事实, 即虽然 $6P_{3/2}$ 与 $6P_{1/2}$ 二个能级相隔达 78 cm^{-1} , 但当激发 $6P_{3/2}$ 能级时, 不仅可获得 $6P_{3/2}-4D$ 、 $6P_{3/2}-6S$ 的受激辐射, 还可测得 $6P_{1/2}-4D$ 和 $6P_{1/2}-6S$ 的受激辐射。所以, 除了吸收效应外, 在无缓冲气体的情况下, 还可存在下列碰撞机制使能级获得布居:



式中, Δ 为频率失谐量。

上述这些非共振碰撞转移布居过程在一些碱金属的非共振荧光实验研究中已进行过讨论^[3,4], 在我们的工作中, (2)、(3)和(4)这三个过程又在非共振受激辐射实验中得到证实。在观察受激辐射时没有看到过程(5), 但这并不意味着此过程不存在, 而是在本工作中由过程(5)使 $6P_{3/2}$ 能级获得的布居, 不足以产生使我们能检测到的一定强度的受激辐

射。

对比图 5 与图 2 还可以看出, 图 2 所示的总的激发光谱并非是图 5 所示各跃迁激发光谱的迭加。两个峰的两翼更宽了, 在两峰之间的区域也仍有较强的受激辐射输出。这意味着除了图 5 所示的一系列确定能级间的受激辐射外, 还存在其它受激辐射, 这就是当泵浦离共振时所产生的较为明显的受激电子喇曼散射^[1]。

2. 杂质铯的光泵受激辐射和串级辐射

当氮分子激光泵浦的染料激光输出波长调谐到 21947 cm^{-1} 和 21766 cm^{-1} 附近时, 带有锗滤光片的 PbS 探测器在热管前向又可探测到定向强红外辐射, 其峰值能量约比泵浦 Rb 时所测得的峰值能量小一个数量级, 如图 1 右半部所示。上述二个泵浦频率恰与铯的 $6S-7P_{3/2}$ 和 $6S-7P_{1/2}$ 跃迁频率相当, 经光栅单色仪分析, 此时由热管出射的定向辐射的光谱成分为 $2.93\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.36\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.38\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.47\text{ }\mu\text{m}$, 这些辐射分别对应于 $7P_{3/2}-7S$ 、 $7P_{1/2}-7S$ 、 $7P_{3/2}-5D_{5/2}$ (及 $7S-6P_{1/2}$)、 $7P_{1/2}-5D_{3/2}$ 和 $7S-6P_{3/2}$ 。图 6 绘出了铯的有关能级图, 并示出了泵浦跃迁以及所测得的受激辐射跃迁和串级受激辐射跃迁。由此, 使我们确信, 在这种高纯度铷样品的千分之一杂质中含有铯。尽管铯杂质的含量是如此之少, 但它的光泵受激辐射线, 甚至串级受激辐射线也可较容易地被测定。这使我们推想到, 可以使用探测受激辐射的办法来检测样品的杂质。

3. 低浓度下的受激辐射

为了进一步证实低原子蒸气浓度下测量受激辐射和检测杂质的可能性, 我们仔细地测量了在各种温度, 也即各种原子浓度下的受激辐射强度。图 7 分别画出了实验测得的铷原子和杂质铯在各种温度下受激辐射的能量。可以明显地看到, 对铷蒸气来说, 400°C 左右时的受激辐射能量比起 55°C 时的受激辐射能量来要高三个数量级。我们用

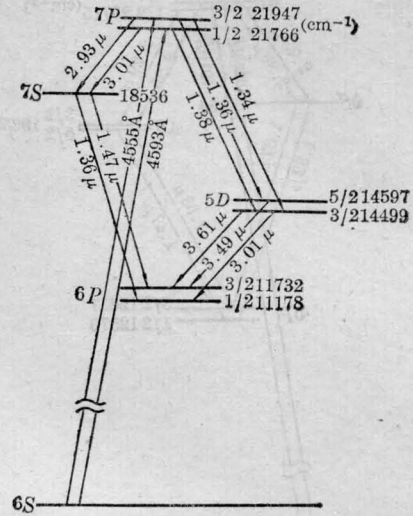


图 6 Cs 原子部分能级图

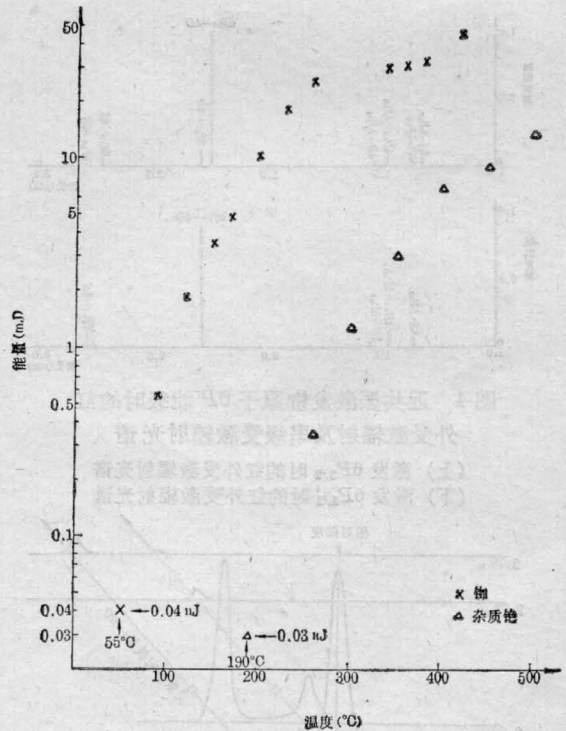


图 7 铷和杂质铯在不同温度时的受激辐射能量

RJ-7200 型能量计, 测量了 400°C 时的受激辐射能量, 其值为 40 nJ , 故 55°C 时的受激辐射能量约为 0.04 nJ 。这几乎就是在我们目前装置下所能探测到的最小受激辐射能 (下转第 112 页)

发现有抑制癌细胞生长的作用, 并且证明该类正常 RNA 可以被癌细胞摄取, 而引起酶活力改变, 使癌细胞向正常细胞逆转的变化。而我们的实验与众不同的则使用肝癌腹水型癌细胞, 经额定的激光能量作用后, 同样也应该认为可被肝癌细胞所摄取。

对于正常细胞向癌的转化^[9], 在部分生物化学反应中, 使一个磷酸基转为带离子的蛋白质复合物, 穿透细胞膜进入正常细胞, 然后产生一系列反应。E. Racker 等在小鼠的肿瘤中观察到某些肿瘤细胞有所谓钠离子-钾离子三磷酸腺苷酶, 它连接着一个磷酸基的亚单位, 但在正常小鼠中则没有。他又发现这种添加的磷酸基是经过一系列反应的最后产物, 即蛋白激酶 $F \rightarrow$ 蛋白激酶 $L \rightarrow$ 蛋白激酶 $S \rightarrow$ 蛋白激酶 $m \rightarrow \text{Na}^+ - \text{K}^+$ 三磷酸腺苷酶, 这过程是通过磷酸化作用, 而此过程起催化激活作用的是一种酶。

这种催化激活过程, 不同于正常细胞的磷酸化作用, 因在正常作用中, 磷酸基是连接

在蛋白分子的丝氨酸上, 但上述反应, 是所有四种蛋白激酶的活性形式。都有一个磷酸基连接在酪氨酸上。

3. 由此可以设想特定参量的激光作用于癌细胞的 RNA 后, 使癌的遗传基因受到干扰或者破坏, 阻止癌细胞的分裂繁殖, 而发生逆转或改变它的原有特征。在我们实验中 3250 Å 及 4416 Å 在能量 8 J 的作用后, 使腹水癌不发生。而 3371 及 4880~5145 Å, 前者能量 6 J, 后者 9 J, 分别出现腹水癌。但两者确有差异。后者最终结果全部变为腹腔内的实体瘤, 这样的结果很有趣, 进一步探讨它的发生机理是非常有意义的工作, 当然也是很复杂而艰巨的, 有待进一步的研究和探讨。

参 考 文 献

- [1] R. Beukers, W. Berends; *Biochem. Biophys. Acta*, 1960, **41**, 550.
- [2] Kay E. R. M. *et al.*; *Amer. Chem. Soc.*, 1953, No. 75, 4041.
- [3] Spector M.; *Amer. Sciences News*, 1981, No. 27, 1.

(上接第 98 页)

量。此时 (55°C), 可计算得铷的原子浓度低于 $2.5 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 。

对于杂质铯来说, 当温度为 190°C 时, 其受激辐射能量已达本实验装置的能量最小检测量。考虑到铯仅仅是纯度为 99.9% 的铷金属样品中的杂质成分之一, 因而可估算得 190°C 时的杂质铯的原子浓度为 $10^{11} / \text{cm}^3$ 。

我们曾在低原子浓度下测量了所检测定向辐射的发散角, 其数值约为 11 mrad, 比同一装置所测得的泵浦光的发散角略大。

值得提出的是, 由于实验条件限制, 以上所有测量均是在泵浦光能量为数十微焦耳的情况下进行的。实验表明, 这一泵浦能量还远未达到饱和能量。另外安放样品的热管仅由

机械泵抽空到 10^{-2} Torr, 光束变换系统也非最佳状态。所以, 我们认为如以更高能量去泵浦样品, 且改进其它有关实验条件, 那么必将在更低的温度和原子浓度下测量到受激辐射以及通过受激辐射的探测来检测高纯度样品中的杂质。

参 考 文 献

- [1] P. Niay *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **29**, 369.
- [2] D. Cottor, D. C. Hanna; *Opt. and Quant. Electr.*, 1977, **9**, 509.
- [3] J. Piter, L. Kranse; *Canadian Journal of Physics*, 1968, **46**, 125.
- [4] 张道中等; 《物理》, 1979, **8**, No. 5, 394.
- [5] A. N. Nesmeyanov; *Vapor Pressures of Chemical Elements*, (Moscow, 1961).