

# 脉冲放电金属蒸气激光\*

姚志欣<sup>†</sup> 潘佰良

(浙江大学物理系 杭州 310027)

**摘要** 评述了脉冲放电激励的金属蒸气激光的发展历史和现状,根据激光发射过程,分别阐述了自终止跃迁激光和碰撞辐射复合激光的机理.报道了作者课题组最近在相关领域研究中取得的新进展,包括共振-亚稳跃迁激光和复合激光的交替振荡现象、不同介质多谱线激光同时振荡现象以及碱土金属卤化物多谱线激光的实现和新发现的 M-M 跃迁激光.

**关键词** 脉冲放电激励,金属蒸气激光,共振-亚稳跃迁,M-M 跃迁激光

## PULSED DISCHARGE METAL VAPOR LASERS

YAO Zhi-Xin<sup>†</sup> PAN Bai-Liang

(Physics Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** The history and current status of metal vapor lasers excited by pulsed discharge are reviewed. The lasing mechanisms different of self-terminating and resonance-metastable transitions and collision radiation recombination are explained according to the laser emission process. We report our new results in metal vapor laser development including the observation of simultaneous laser oscillations in different lasing media with different mechanisms, multi-line laser action in alkaline-earth metal halides, and a new type of metal vapor laser known as M-M transition lasers.

**Key words** pulsed discharge excitation, metal vapor laser, resonance-metastable transition, M-M transition

### 1 引言

众所周知,历史上第一台激光器是 1960 年研制成功的闪光灯泵浦的红宝石激光器,是一种直到现在仍然继续使用的固体激光器件.但开始阶段的激光研究,更多的却是采用较为方便的气体放电激励方式,工作物质则选用结构最为简单的单原子分子气体介质,具体说就是放电激励的惰性气体激光.其中最典型的代表器件便是至今同样仍然广泛使用的氦氖激光器,它也是在 1960 年就研制成功的激光器件.随后相继从氩、氪、氙等惰性气体中也获得了激光.基于激励方式同样方便、工作物质结构同样简单的基本原则,惰性气体激光的自然延伸便是金属蒸气激光.还有一个重要的促进因素是为了提高激光效率,这是由于惰性气体原子外层电子的满壳层结构,它们的激发态都位于基态以上很高的位置,原则上不可能获得高量子效率的激光.现在普遍认为,金属蒸气激光是被限定发生在元素的单原子(或单离子)的能级跃迁中的现象,通常这些元素在正常情

况下都不是气相状态.这类激光器除了元素周期表上所有的金属元素外,还包括诸如砷、硒、碲等通常不归属于金属的元素.有一点要强调的是,根据约定俗成,当金属蒸气作为激光工作物质考虑时,指的仅仅是单质的原子状态或离子状态,并不包括双原子分子或多原子分子状态,更不用说化合物分子了,后几类通常被纳入分子激光范畴.迄今为止,已经在多达 42 种元素的原子和离子能级跃迁中,获得了 700 多条“金属蒸气”激光谱线<sup>[1]</sup>.

本文所说的脉冲放电金属蒸气激光指的是以下两类只能以脉冲方式运转的金属蒸气激光系统:第一类激光系统是由于激光下能级相对于基态是亚稳态,激光跃迁本身将造成粒子数在激光下能级的堆积,因而使得激光上下能级的粒子数反转被破坏,激光将自动终止,只有当激光下能级的堵塞效应被消

\* 国家自然科学基金(批准号:19974037,10004008,69478002,69778009)资助项目

2002-02-24 收到初稿,2002-06-26 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: Yaozx@zjuem.edu.cn

除之后,激光才能再次发生,习惯上称作自终止跃迁(self-terminating transition)激光器<sup>[2]</sup>;第二类激光系统则是由于激光只能发生在放电激励脉冲完全结束后等离子体复合的余辉期,粒子数反转和激光是由于金属低价正离子和余辉电子的三体碰撞复合而形成的.因为不存在持续的激励,所以激光也必然自动终止,只有当再次放电生成新的金属高价正离子和电子等离子体后,激光才有可能再次发生,习惯上称作碰撞辐射复合(collision radiation recombination)激光器.

毫无疑问,最具功效的金属蒸气激光器是铜蒸气激光器.早在90年代中期,美国洛伦兹·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)就组合了多台铜蒸气激光器,每台平均功率大于1kW,形成多束波长为0.578/0.511 $\mu\text{m}$ 的黄绿激光组合运转,每天24小时日以继夜地用于铀材料的同位素分离<sup>[3]</sup>.国内铜蒸气激光器的功率指标要低一个数量级,每台平均功率100W左右<sup>[4]</sup>.在1996年脉冲金属蒸气激光国际会议论文集的前言中,会议主席兼论文集编辑就曾预言:采用先进技术,源于同位素浓集而发展起来的铜蒸气激光器将成为下个世纪(21世纪)最为关键的工业激光器.

## 2 自终止跃迁机制和 R - M 跃迁激光

自终止跃迁机制激光器是由美国人 Silfvast 在1965年首先发现的,他当时正在犹它大学(Utah University)攻读博士学位,在 Fowles 教授的激光装置上进行相关实验,首次获得了波长为722.9nm的红色铅原子激光. Fowles 教授和他确认该激光具有当时未知的新机制:激光发生在第一激发态与基态组分(ground configuration)中的一个子能级的跃迁上,由于基态组分中的每个子能级都有相同的宇称,所以这样的激光下能级原则上不存在进一步辐射跃迁的可能,断定该类激光只能以脉冲方式运转<sup>[5]</sup>.

1966年,美国 TRG 公司的 Walter 等人首次将这类激光下能级与基态具有相同宇称的新型激光器件归属于自终止跃迁激光机制,报道了更为典型的铜蒸气激光器<sup>[6]</sup>.他们认为,铜蒸气激光器有望成为可见光波段中功率最大、效率最高的激光器件,从那时起到现在的36年进程,已经充分证实了他们当初的判断.值得指出的是,他们当时输出的激光平均功率仅仅20mW,只相当于现在器件功率的五万分之一!

在那篇堪称经典的文章中, Walter 等人不仅首次报道了铜蒸气激光器,而且在详尽理论分析的基础上,给出了这类高效脉冲激光器的工作物质(金属蒸气)必须满足的5条判据,其中最基本的是头两条判据:激光上能级是共振(Resonance)态,最好它与基态之间有最强的辐射跃迁联系;激光下能级是亚稳(Metastable)态,它与基态之间没有电偶极关联.当激光下能级与基态有相同的宇称而激光上能级与基态有相反的宇称时,这两条基本判据就有可能得到满足.因此在玻恩(Born)近似得以适用的放电激励条件下,共振能级相对于亚稳能级将得到优势的激励,从而实现粒子数反转并获得激光.作为例证,他们给出了当时从铜、锰、铅、钙等4种元素的蒸气中已经得到的16条脉冲放电激光谱线,从而表明了5条判据(尤其是两条基本判据)的准确性.在文章最后一节的讨论中,他们根据5条判据,对15种元素预言了24条可能的脉冲激光谱线,详细给出了相应的波长、能级组态、跃迁速率以及运转所需要的温度,成为后继者探索自终止激光新谱线的指南,极大地推动了脉冲金属蒸气激光的进展.他们还特别针对铜蒸气激光器深刻地提出了若干令人困惑并引起极大兴趣的问题,对以后的发展产生持续深远的影响.这些问题主要有:

(1)铜蒸气激光中波长0.511 $\mu\text{m}$ 跃迁上能级的自发辐射寿命约800ns,为什么激光脉冲仅能维持20ns?

(2)是否可以采用具有较高蒸气压的铜化合物,使铜激光器的运转温度降到1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下并将整个激光器封离(sealed-off)?

从下面的叙述可以知道,在这篇经典文章发表36年后的今天,回顾铜蒸气激光器相关学科的发展历程并再次重温这篇文章时,不能不钦佩他们当时的真知灼见、远见卓识!

Walter 等人的这篇文章引发了研究金属蒸气激光的普遍热情,一方面是在深入认识激光机理的基础上,持续不断地提高铜蒸气激光器的功率和效率,另一方面是全面探索新的金属蒸气激光谱线.到1985年,铜蒸气激光器的单机平均功率已经提高到了200W以上,新发现的自终止跃迁激光谱线又有了10余条,其中9条谱线,包括平均功率水平达到10W量级的0.628 $\mu\text{m}$ 金蒸气激光和1.5 $\mu\text{m}$ 钡蒸气激光,都在 Walter 等预言的24条可能的脉冲激光谱线之中,但是还有15条谱线始终未能实现激光振荡.

我们课题组从 1980 年开始研究脉冲放电激励的金属蒸气激光,通过对一系列实验结果的深入分析,特别是经由计算机数值模拟激光过程揭示出来的微观物理量内在关联的启迪,我们逐渐认识到仅在脉冲放电初期的短暂时间内,电子能量较高,放电激励能够应用玻恩近似,共振能级相对于亚稳能级得到优势激励,从而获得粒子数反转实现激光;当电子能量随着放电进程快速降低后,玻恩近似不再适用,共振能级的激励迅速减少,而亚稳能级的激励急剧增加,在放电激励的中期和晚期,继续放电反而会起遏止激光的作用,数值模拟的结果进一步表明,不同阶段的放电激励引起上下能级粒子数的改变量较之激光跃迁造成的影响要大一个数量级以上,后者实际上并不影响激光的终止.因此,虽然此类器件由于共振-亚稳能级结构具有激光自终止机制,但实际上激光并不是自动终止的<sup>[7]</sup>.

这就很好地回答了 Walter 等人当初提出的第一个问题,正是由于在采用脉冲放电方式激励的条件下,满足玻恩近似的有效激励时间只能维持几十个纳秒,所以激光振荡也只能产生在这个期间之内,远短于激光通道几百个纳秒的自发跃迁寿命,而且与后者无关.图 1 给出的是我们课题组计算机数值模拟铅激光的结果<sup>[8]</sup>,放电激励脉冲开始时刻作为横坐标时间的零点, $N_3$  和  $N_2$  分别是激光上下能级的粒子数密度, $g_3$  和  $g_2$  分别是它们的统计权重,从图中可以看出,由于放电激励维持的粒子数反转仅约 50ns,而且反转的形成主要依赖上下能级统计权重的比值.

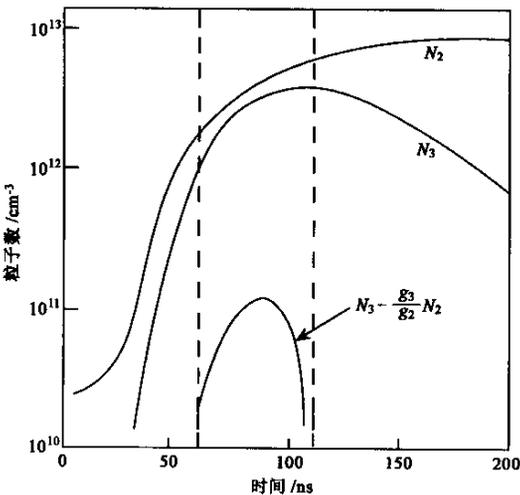


图 1 放电激励期间铅激光上下能级粒子数变化的数值计算结果

### 3 金属蒸气激光器高效运转的补充判据——G 判据

1985 年,我们在 Walter 5 条判据的基础上提出了自终止类型金属蒸气激光器高效运转的一个补充判据——G 判据:激光上下能级简并度的比值应该小于 1 ( $g_3/g_2 < 1$ )<sup>[8]</sup>.

用 G 判据作为补充,对 Walter 等预言的 24 条可能的激光谱线进行重新审核,结果表明:当时已经实现激光的 9 条谱线全都符合 G 判据;不满足 G 判据的 11 条谱线全都没有获得激光;在剩下 4 条符合 G 判据而尚未得到激光的谱线中,有 3 条属于紫外波段,在这个波段产生激光是比较困难的,还有 1 条 583nm 镱谱线虽然属于可见光,但它的正常运转要求 3400℃ 高温而难以进行必要的实验<sup>[8]</sup>.以此对当时所有的实验结果作出了相当圆满的解释.

Walter 等预言的 24 条可能的激光谱线中有 20 条是原子谱线,只有 4 条是离子谱线,随着研究的不断深入,人们大量地开展离子类的金属蒸气自终止型激光的探索和研究.离子类自终止型激光较之原子类自终止型激光的显著特征之一是由于有效核电荷的增加,其工作物质能级间距相应扩大,对应的激光波长趋向短波长方向,人们据此提出利用高阶金属离子之间的跃迁实现真空紫外乃至 X 射线激光的设想<sup>[1]</sup>.

1993 年,俄罗斯列别捷夫物理研究所的 Markova 等全面详尽地分析了一价金属离子的自终止类型激光,他们很明确地将其称作 R-M 跃迁激光.根据 Walter 的 5 条判据,对元素周期表上的 8 类 30 种元素,罗列出 212 条他们认为可能的一价金属离子 R-M 跃迁激光谱线,值得进行重点探索,并有待实验证实<sup>[9]</sup>.

实际得到的一价金属离子自终止激光谱线要比上面的预期少得多,1998 年,俄罗斯 Rostov 大学的 Sem 教授等对脉冲金属蒸气离子激光器作了全面的分析,列出了所有已知的一价金属离子 R-M 跃迁激光谱线,总共不过 7 种元素 17 条激光谱线<sup>[10]</sup>.惟有 1 条铅离子波长 1159nm 的激光谱线很特别,在上述 30 种元素中虽然考虑了铅离子,还列出了他们认为可能的 4 条激光谱线,但并不包含 1159nm 谱线.

我们用 G 判据对这 17 条已知的一价金属离子 R-M 跃迁激光进行鉴别,结果同样令人振奋,其中 16 条激光都符合或基本符合 ( $g_3/g_2 = 1$ ) G 判据,惟一明显不符合 G 判据的铅离子 1159nm 激光也得到

了合理的解释<sup>[11]</sup>。

#### 4 碰撞辐射复合激光器

碰撞辐射复合激光是原苏联 Rostov 大学 Latush 教授等首先发现的。他们在 1973 年首次报道通过铯、钙或钡等碱土金属蒸气中的脉冲放电, 获得一系列新颖的激光谱线, 并进行了初步的理论探讨, 之后分别在 1977 年和 1992 年做出了逐步深入的理论分析<sup>[12]</sup>, 最后在 1996 年的专集中也归纳出该类器件有效运转其工作物质必须遵循的 5 条判据<sup>[1]</sup>。

他们的基本考虑如下: 该类激光集中在元素周期表中的碱土金属类, 取决于它们特殊的电子组态和能级结构, 其原子的外壳层只有两个价电子, 高压脉冲放电条件下容易成为二价正离子, 脉冲放电过后, 二价正离子与电子碰撞并复合成一价正离子, 同时发射光子, 这就是碰撞辐射复合名称的由来。由于二价正离子与电子碰撞复合成一价正离子的能级布居不受选择定则的约束, 所以原则上按照各能级的统计权重分布。碱土金属一价正离子的能级结构特征在于可以明显地分成两个能群, 能群之间的间隔远大于能群内部相邻能级之间的间隔。随着余辉期电子温度的迅速下降, 当电子能量与能群内部相邻能级间隔相当时, 能级之间通过电子碰撞, 有很大的转移截面, 一价正离子的粒子数布居很快在能群内部达到玻尔兹曼(Boltzmann)分布, 粒子在每一能群中都将聚集在较低能级上, 而在较高能级上的粒子则被排空。这样, 在高能群中的低能级与低能群中的高能级之间就有可能获得粒子数反转并实现激光。正是由于能群之间的间隔较宽, 所以相应激光的波长较短, 典型的铯离子激光波长 430.5/416.2nm 为蓝紫色, 而钙离子激光波长 373.7/370.7nm 则在紫外区域。这些波段的激光为市场短缺, 尤其是它们的平均激光功率都已经达到或超过瓦级, 是目前脉冲重复频率 10kHz 量级且处于蓝-紫或紫外波段仅有的激光器件<sup>[10]</sup>, 可望成为可调谐激光器强有力的短波长泵浦源, 还可应用于激光荧光诊断、激光育种、塑料固化、油墨干燥以及半导体微电子装配等领域, 特别是波长为 430.5nm 的蓝紫色铯激光, 成为配合波长为 511nm 的绿色铜激光和波长为 628nm 的红色金激光, 组合成为彩色激光大屏幕显示三原色的最佳候选激光光源<sup>[13]</sup>。

碰撞辐射复合激光和 R-M 跃迁激光的明显差异之一在于激光上能级的布居途径, 前者从上而下,

后者自下而上, 截然不同。基于高能级的普遍激发, Latush 等曾经预言前者可能具备较之后者更高的电光转换效率, 但迄今并未实现。它们之间的明显差异还表现在相对于电流脉冲的时间特征上, 前者发生在电流脉冲完全结束之后的余辉阶段, 而后者仅能发生在脉冲放电初期的短暂时间内, 图 2 即是在示波器上同时显示的碰撞辐射复合激光脉冲、R-M 跃迁激光脉冲和放电电流脉冲的波形<sup>[14]</sup>, 其特征一望可知。

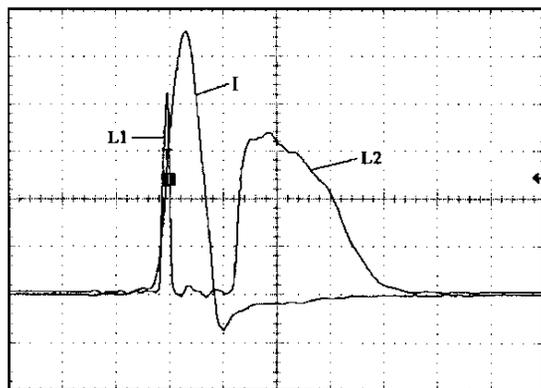


图 2 示波器上同时显示的电流脉冲 I、R-M 跃迁激光脉冲 L1 和碰撞辐射复合激光脉冲 L2 的波形

#### 5 不同机制或不同介质情况下, 各种脉冲激光的交替振荡

以碱土金属为主, 多种金属元素的一价正离子具备复合激光要求的能级特征。1998 年, 俄罗斯 Rostov 大学的 Sem 教授等在前述的同一篇文章中, 还列出了在脉冲放电激励条件下, 所有已知的一价金属离子的碰撞辐射复合激光谱线, 总共 12 种元素 44 条激光<sup>[13]</sup>。

Walter 等人 1966 年有关 R-M 跃迁激光的经典论著主要讨论的虽然是原子类激光, 但是在他们列举的 16 条脉冲放电激光谱线中, 还是包含有 2 条钙离子激光, 波长分别为 854.2/866.2nm; 在他们预言的 24 条可能的激光谱线中也包含有 4 条离子谱线, 并很快都得到证实, 其中 2 条铯离子激光, 波长分别为 1033/1091nm; 2 条钡离子激光, 波长分别为 614.1/649.6nm<sup>[16]</sup>。

我们从 1992 年获得立项研究金属蒸气碰撞辐射复合激光起, 始终关注的问题之一是当以碱土金属一价正离子为工作物质时, 能否同时实现 R-M 跃迁激光? 特别是以上几条已经实现振荡的 R-M 跃迁激光谱线。仔细分析碰撞辐射复合激光和 R-

M 跃迁激光对激励电流脉冲的要求,由于它们分别处于电流脉冲完全结束之后的余辉阶段或脉冲放电初期的短暂时间内,所以它们之间并不存在原则冲突,关键是要使脉冲电流上升快,下降也快,而且干净利落,不发生二次振荡.我们已经分别在铯蒸气和钙蒸气的高重复率脉冲放电中,获得两种不同机制、不同波长脉冲激光的交替振荡<sup>[14,15]</sup>.

进而考虑到铯和钙蒸气中的金属粒子呈原子状态时,同样也是 R - M 跃迁激光的候选介质.在 Walter 等人预言的 24 条可能的激光谱线中,就包含波长 6455nm 的铯原子激光和波长 5546 nm 的钙原子激光<sup>[6]</sup>,很快也为后来的实验证实.我们相继在铯蒸气和钙蒸气的高重复率脉冲放电中,获得同样是 R - M 跃迁激光机制,但却是不同的激光介质(原子或离子),从而也是不同波长脉冲激光的同时振荡<sup>[16]</sup>.

## 6 金属卤化物激光器

金属卤化物激光器是为了回答前面 Walter 等人文章<sup>[6]</sup>中提出的第二个问题而发展起来的,初期目的仅是为了降低铜蒸气激光器的运转温度,虽然可以采用各种化合物而不一定限定卤化物,但由于在激光诞生之前,人们已经在金属卤化物放电灯上积累了丰富的经验,所以很自然地首先从卤化物开始,并取得了比其他化合物更大的成功.

卤化铜激光器的激光功率在很长一段时期内没有得到有效的提高,原因在于普遍认为由于放电分解卤化物形成的卤素具有强负电性,吸附电子后成为负离子,致使电子密度下降,引起高压放电的不稳定性,使辉光放电转向弧光放电<sup>[2]</sup>.放电管口径越粗,轴线区域温度越高,局部过热产生的热电离不仅使放电进一步向轴线收缩,而且加剧放电不稳定性,所以口径总限制在 2.5cm 以内,激光平均功率也没有超过 20W 的.

情况的改变发生在 1989 年,前苏联 Elaev 等报道了激光平均功率高达 112W 的溴化亚铜激光器,放电管口径不仅放大到 8cm,而且采取封离式结构,关键是在缓冲气体氛中掺入了少量的氢气<sup>[17]</sup>.从传统的观念出发,特别是对从事过金属卤化物放电灯的研究者来说,在溴化亚铜激光放电管中掺入氢气几乎是不可思议的!因为对于金属卤化物放电灯,危害最大的杂质气体就是氢,所以以往总是千方百计利用各种消气剂消除氢气<sup>[18]</sup>.早期在对脉冲放

电激励方式下的实验工作曾经证实,在氯化亚铜激光器的缓冲气体氛中掺入少量氢气,激光输出平均功率下降了 20%<sup>[19]</sup>.然而从 1985 年开始,就有在溴化亚铜激光放电管中掺氢致使激光功率和效率倍增的报道<sup>[20]</sup>,特别是在 Elaev 等工作不断被证实之后<sup>[21]</sup>.关于氢在溴化亚铜激光器中机制的研究就没有停止过,但是据我们所知,迄今还没有令人满意的解释.

借鉴卤化铜替代金属铜作为铜激光器原材料的经验,我们采用卤化铯替代金属铯作为铯激光器原材料取得了成功,获得了包括波长为 6.45 $\mu\text{m}$  的铯原子 R - M 跃迁激光,波长为 1.03 $\mu\text{m}$ /1.09 $\mu\text{m}$  的铯离子 R - M 跃迁激光和波长为 416.2nm/430.5nm 的铯离子复合激光等多组铯激光振荡,激光放电管已经累计运转数十小时而没有出现损坏的迹象<sup>[22]</sup>.

## 7 M - M 跃迁激光

最近我们在分析、整理、鉴别高重复率放电脉冲激励铯蒸气激光的实验结果时,发现除了波长为 6.45 $\mu\text{m}$  的铯原子 R - M 跃迁激光,波长为 1.03 $\mu\text{m}$ /1.09 $\mu\text{m}$  的铯离子 R - M 跃迁激光和波长为 416.2nm/430.5nm 的铯离子复合激光等已知的多组脉冲激光外,还有一组共 4 条波长都在 3 $\mu\text{m}$  附近的铯原子激光谱线,其中有 3 条是从未报道过的新的激光谱线<sup>[23]</sup>.

因为是铯原子能级之间跃迁产生的激光,所以当然不属于等离子体复合激光,但是不仅其激光下能级相对于基态是亚稳态,而且其激光上能级相对于基态也是亚稳态,与先前关于 R - M 跃迁激光的命名相对比,我们建议将其命名为 M - M 跃迁激光.

实验及其分析都是相当初步的,仍然还有许多不清楚的地方,值得深入仔细研究.

## 参 考 文 献

- [1] Ivanov I G *et al.* Metal Vapour Ion Lasers. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.
- [2] 楼祺洪等.脉冲放电气体激光器,北京:科学出版社,1993 [Lou Q H *et al.* Pulsed Discharge Gas Lasers. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese)]
- [3] Little C E, Sabotinov N V. In: Pulsed Metal Vapour Lasers. NATO Series: Kluwer Academic Publishers, 1996
- [4] 于德利等.激光与光电子学进展,1997(9): [Yu D L *et al.* Laser & Optronics Progress. 1997(9): (in Chinese)]
- [5] Fowles G R, Silfvast W T. Appl. Phys. Lett., 1965 (12) 236
- [6] Walter T W *et al.* IEEE J Quant. Electron., 1966 (3) 474

- [ 7 ] 姚志欣等.量子电子学报,2000,17(5):467[ Yao Z X *et al.* Chinese J. Quantum Electron., 2000, 17(5):467(in Chinese)]
- [ 8 ] 姚志欣等.科学通报,1986,31(1):17[ Yao Z X *et al.* Science Bull., 1986, 31(1):17(in Chinese)]
- [ 9 ] Markova S N *et al.* SPIE, 1993, 2110:165
- [ 10 ] Sem M F *et al.* SPIE, 1998, 3403:120
- [ 11 ] 姚志欣等.物理学报,2002,51(9):2011[ Yao Z X *et al.* Acta Physica Sinica, 2002, 51(9):2011(in Chinese)]
- [ 12 ] Latush E L *et al.* Sov. J. Quant. Electro., 1973, 3(3):216; Zhukov V V, Latush E L *et al.* Sov. J. Quant. Electro., 1977, 7(6):704; Latush E L *et al.* Opt. Spectrosc., 1992, 72(5):672
- [ 13 ] Messenger H W. Laser Focus World, April, 1990:87
- [ 14 ] 方本民等.物理学报,2000,49(8):1652[ Fang B M *et al.* Acta Physica Sinica, 2000, 49(8):1652(in Chinese)]
- [ 15 ] 潘佰良,姚志欣等.光学学报,2001,21(2):161[ Pan B L, Yao Z X *et al.* Acta Optica Sinica, 2001, 21(2):161(in Chinese)]
- [ 16 ] 陈钢,姚志欣,潘佰良等.物理学报,2001,50(7):1294[ Chen G, Yao Z X, Pan B L *et al.* Acta Physica Sinica, 2001, 50(7):1294(in Chinese)];
- 潘佰良,陈钢,姚志欣等.物理学报,2001,50(7):1290[ Pan B L, Chen G, Yao Z X *et al.* Acta Physica Sinica, 2001, 50(7):1290(in Chinese)]
- [ 17 ] Elaev V F *et al.* Atom. Opt., 1989, 2(11):1045
- [ 18 ] 周卫忠编著.光源化学.北京:轻工业出版社,1987,138—149 [ Zhou W Z ed. Lamp-House Chemistry. Beijing:Light Industry Press, 1987, 138—149(in Chinese)]
- [ 19 ] Vetter A A *et al.* Appl. Phys. Lett., 1977, 30(8):405
- [ 20 ] Astedjov D N *et al.* Optics Commun., 1985, 56(4):279
- [ 21 ] Astedjov D N *et al.* IEEE J Quant. Electron., 1997, QE-33(5):705
- [ 22 ] 姚志欣,潘佰良等.中国激光,2002, A29(2):110[ Yao Z X, Pan B L *et al.* Chinese J. Lasers, 2002, A29(2):110(in Chinese)]
- [ 23 ] 姚志欣,潘佰良等.物理学报,2001,50(6):1070[ Yao Z X, Pan B L *et al.* Acta Physica Sinica, 2001, 50(6):1070(in Chinese)]
- [ 24 ] Madigan M *et al.* IEEE J. Quant. Electron., 1980, QE-16(12):1294

·物理新闻·

## 一种新的海洋波被发现

### ( A New Kind of Ocean Wave Has Been Discovered )

美国与墨西哥的地球物理学家 R. Bulter 和 C. Lomnit 博士最近在夏威夷 2 号观测台发现了一种新的海洋波,这个观测台是放置在夏威夷与加利福尼亚州之间的海底,它能观测与记录各种类型的海洋波.

通常海洋中存在着两种海洋波,一种是声波,在水中的声波其作用原理是与在空气中的声波一样,即由不断更替的膨胀压缩运动所形成的纵波,只是其速度是由波在水中传播的快慢决定.另一种是由地震引发的在地球表面附近传播的瑞利波,它一般是在地壳下的沉积层内沿着运动的水平与垂直方向传播的横波.

2000 年 6 月在太平洋海底约 10 公里处发生了一次里氏 6.2 级的地震,此后科学家们发现了一种新的海洋波,他们初步认定,这种新型的海洋波是声波与瑞利波的“耦合波”,它在海底附近的水中与海底下的沉积层间不断地交换着能量.这种耦合波的速度与声波一致,它在海底下的沉积层内形成膨胀压缩区域,同时在水平与垂直方向进行传播.这种新颖的耦合波所运载的能量要比通常观测到的海洋深处的海洋波的能量大很多.

( 云中客 摘自 Geophysical Research Letters, 24 May 2002 )

## 封面说明

封面是美国哈勃空间望远镜捕捉到的一银河系的环形的星群照片,该照片比这个银河系的任何现有的照片都清晰.整个星系大约 120 000 光年宽,比我们的银河系稍大.这光环主要由蓝色的小恒星组成,与黄色的核心形成鲜明对比.图片选自广州日报大洋网 2002 年 9 月 9 日.

( 大连水产学院基础部 白亚乡 )