

γ 激光——未来新一代的激光器

李 士

激光技术是二十世纪六十年代最重要的科学技术成就之一。它的诞生使人们深化了对于光的认识,并使光学同其它技术学科发生了联系,开拓了光学应用极其广阔的前景。

历史的回顾

早在五十年代初期美国物理学家汤斯(C. Townes)构思了利用二能态分子制造激光器的想法,拟出了设计方案,并在哥伦比亚大学辐射实验室的报告会上作了介绍,但没能引起反响。直到1954年第一台微波激射器研制成功后,才受到人们的重视。尔后出现了“激射器热”,各国物理学家争先对其它波段也进行了尝试,大家不约而同地集中在如何制造毫米和亚毫米波段工作的激射器上,但是事情并不简单,困难一个接一个,一次次地失败,直到1957年物理学家们不得不决定改变正常步骤,越过毫米和亚毫米波段,直接研究制造红外和紫外波段工作的激射器的可能性。这样到了1958年美国物理学家汤斯和肖洛(A. Schawlow)提出了有可能制成光学激射器,即激光器,并提出了理论分析和设计方案。与此同时苏联物理学家巴索夫等人也先后提出了激光器的设计方案。从而导致1960年7月美国物理学家梅曼(Maiman)发明了第一台脉冲红宝石激光器,1961年连续波氦氛激光器又问世,从此以后激光技术得到迅速发展。正因如此,汤斯和巴索夫等人共同获得了1964年诺贝尔物理学奖,奖励他们的出色工作及对科学技术发展的巨大贡献。

γ 激光的提出

我们知道,光是整个电磁辐射谱的一个组成部分。电磁辐射谱包括长波,短波,微波,红外,可见光,紫外, X 射线, γ 射线等多个波段。目前,人们已经十分重视对物质结构每一层次的研究,因它能对生产和科学技术发展带来很大的推动力。同样,对电磁辐射每一波段的开发和利用也一定会对生产和科学技术发展起到推动作用。如无线电波段的利用带来了通讯,广播和电视;微波波段带来了雷达,并促进了波谱学的发展;从红外到紫外波段带来了激光,使许多以往光学技术办不到的事情,现在能办到了。过去能办到的,引用激光之后,效果和精度得到成倍甚至几十倍,几百倍的提

高; X 射线波段带来了透视,探伤,并促进了晶体学的发展。而激光技术的产生和发展又给我们提供了进一步启示。即对同一个电磁波段,利用程度的不同,差别也是很大的。激光出现以前和以后,对从红外到紫外的光波波段利用的程度就大不一样。这就对人们又提出了一个问题,目前激光器的波段只能达到红外至紫外波段,能不能制造其它波段的激光器呢?即波长更短,输出功率更高的激光器。这是因为波长更短的激光器,例如比真空紫外波段短100倍的激光器($\lambda \leq 1-10 \text{ \AA}$)能研制成功,会大大推进科学技术的发展。从激光技术的初期发展阶段,人们并没有放弃这一想法。早在1961年就有物理学家提出利用穆斯堡尔跃迁来实现比可见光波长更短的 γ 激光(Gasers)的可能性。

γ 激光器的构思和疑难

众所周知,一台激光器一般包括三大部分,即工作介质,共振腔和激发源。工作介质经激发后,处于粒子数反转状态。何谓反转状态即处于上能级的原子(分子)数多于下能级,目的是要使受激辐射胜过它的逆过程——受激吸收,形成激光输出;共振腔的作用是强化沿特定量子状态的受激辐射过程,并提高光子的简并度;激发源的作用是提供工作介质以能量,补充激光输出波其它方面的能量消耗,以实现工作介质粒子数的反转。

在 γ 激光的设计构思中,抽运的激发源可能是其它强子流或高通量的中子源;工作介质是穆斯堡尔同质异能态的核;共振腔有人建议用抛光金属表面以掠射角入射作为 γ 激光的反射镜,或用单晶中的布喇格衍射作为反射镜。

建议中的 γ 激光有两种工作方式,即长寿命穆斯堡尔同质异能态 γ 激光和短寿命的穆斯堡尔同质异能态 γ 激光。

对于长寿命(≥ 1 秒)的穆斯堡尔同质异能态 γ 激光方式,早期人们曾设想使用几天到几个月的长寿命同质异能态,但是我们知道假设 Γ_0 是同质异能态的自然能级宽度, Γ 是由于各种因素使能级增宽后实际测量的能级宽度,则有效的共振吸收截面为 $\sigma_0 \cdot \Gamma_0 / \Gamma$, 用长寿命的同质异能态的困难是穆斯堡尔能级宽度太宽,这主要由许多因素造成的,如同质异能移位、

电四极相互作用、磁超精细相互作用、原子核之间的磁偶极相互作用、温度效应和红移等等。这些因素中有些可以避免,如温度和红移效应,只要在尽可能低的温度下工作,原则上可以避免。磁超精细相互作用和磁偶极相互作用,可以采用核磁共振原理,施加经过特别选择的射频场,来抑制这方面展宽因素。而对于来自电-磁相互作用的同质异能移位和电四极相互作用,是穆斯堡尔效应方法本身不可避免的。不解决这些问题,要使用长寿命穆斯堡尔同质异能态作为相干的 γ 辐射源去实现 γ 激光是相当困难的。

对于短寿命的穆斯堡尔同质异能态 γ 激光工作方式,与上述方法相比,其主要优点是不用制备无位错晶体,而能级增宽也不是主要因素。但由于能级的自发衰变,在极短的时间内(小于能级寿命)实现粒子数的反转需要极高的抽运功率。如果用原子核俘获中子形成同质异能态,中子抽运则需极高的中子通量,而高通量中子会使 γ 激光工作物质有过热的严重危险。因此,使用这种方式的第一步必须搞清楚满足这些要求的可能性及改进抽运技术的方案。从原则上讲有可能使用某些材料所具有的参数与 γ 激光粒子数反转的要求协调,同时又能避免有害的发热。然而在 $T \leq \tau_0$ 时间内,它所需要的中子累积通量约 $10^{19} \sim 10^{20}/\text{cm}^2$, τ_0 越小,所需的抽运功率越大(因抽运功率与 τ_0 成反比),而且如此高的中子通量只有在核爆炸时才能达到。为了降低抽运所需的中子通量,物理学家们提出了两种方案:

一种称为移植法。移植法的基本物理思想是希望中子辐射俘获后,将因反冲而从原子核表面逸出的穆斯堡尔受激核收集起来。例如对分散体系($100\text{m}^2/\text{g}$)的辐照而言,一立方厘米中有 $10^{19} \sim 10^{20}$ 个核会由于中子俘获后的反冲能而迅速从表面逸出,快速收集逸出的穆斯堡尔原子是可能的,用收集到的大量激发核(约 10^{15} 个)的能量足以产生受激 γ 发射。

还有一种方法称为两步抽运法。它的基本原理是在含有质量数为 A 的稳定同位素的固体靶中,存在着中子俘获而形成质量数为 $(A+1)$ 的同种元素受激

核能级上,随后发射一个 γ 共振量子,然后又回到基态,于是该共振量子进入晶体,在晶体中含有处于基态的同种穆斯堡尔同位素核,假如发生穆斯堡尔效应,则 γ 量子被共振吸收。两步脉冲中子抽运使所要求的中子通量密度降低1—2个数量级,此外还可使激光工作介质的发热减至最小。这是一种较为有希望的方法。

对于 γ 激光中的共振腔设计就更加困难了,因为这种共振腔必须能提供正反馈,从而增强 Q 因子(反转的比抽运功率),改进单色性,控制束流的发散度,确定发射的模式结构,使抽运功率降为最小。目前还没有找到 γ 激光更合适的反射镜。

如果要研制比真空紫外波段短100倍的激光器($\lambda = 1 \sim 10 \text{ \AA}$),除了利用原子核能级间跃迁的 γ 激光之外,还有几种可能的相干光源,如利用原子的内电子壳层能级间跃迁的X射线激光等,它与 γ 激光相比,X射线激光实现起来会更加困难,这主要与抽运功率有关,在这里就不详述了。

γ 激光的前景

γ 激光作为一种非常有希望的十分复杂的高技术,目前尚处于理论上的探讨阶段,这是因为有许多技术问题尚需解决,它需要各个领域的科学工作者共同努力,协同作战。特别需要加强基础理论研究,尤其要重视光学,光谱学这样一些学科,同时要善于吸取和运用物理学的各种新成就。到目前为止已有许多种设计和方案。可以预见在一个不太长的时间内,人们一定会得到波长更短的 γ 激光。

γ 激光的未来应用可能会非常广泛,就其波长范围来说($\lambda = 1 \sim 10 \text{ \AA}$),会大大推进某些科学技术的发展。例如,利用 γ 激光能显示生物大分子的全息照像,提供高分辨率的微裂缝探测,高反差照像机,加工小于几个微米的电子元件等,将会出现一个新兴的激光工业部门。此外,利用 γ 激光还可以进行新的物理实验,激光将更广泛渗透到各个科学领域,会形成一些边缘学科,如激光生物学、激光化学,也必将会引起自然科学的一次变革。

我国超导研究出现新突破

今年初,北京有色金属研究总院采用熔融织构生长法(MTG)成功制备出高临界电流密度的钡铜氧化物超导体。经过中科院物理所连续四次复测,临界电流密度达到每平方厘米23800安培(77K,2特斯拉)。这样高电流密度的高温超导体至今未见国际上有报道。该测试采用直流持续电流四引线法进行,失超判据为每厘米1微伏,磁场方向垂直于测试电流方向。当外磁场增加到7特斯拉时,临界电流密度仍能

达到每平方厘米8600安培。由于通入电流过大,电流引线接点常在样品失超前就已烧毁。如果解决了接点问题,样品的临界电流密度还有望提高。熔融织构生长法制备的超导体具有许多特点:其体密度接近理论密度,基本上消除了粉末烧结超导体存在的弱连接问题;有显著的择优取向性,电流可以沿着导电性较好的a-b面流动;材料内部存在晶体缺陷,除了弥散分布的211相和氧化铜相,在123超导相内部发现大量的孪晶、位错、位错环及层错。这些缺陷可能作为磁通钉扎中心,有利于提高超导体的临界电流密度。

(任洪涛、肖玲、贺庆)