

综合评述

美帝海军研究局的激光发展计划

编者按：美帝海军研究局是美帝重要的激光研究部门之一，从事激光活动较早，研制历史较长，涉及范围也较广，以后又以大能量与大功率激光器为其工作重点。本文简略介绍该局在这一领域的活动概况，材料较为全面、完整，具有一定的代表性，可供有关同志批判地参考。在译载中，本刊曾略作删改。

美帝海军研究局在开初 20 年中，在物理学方面有三个最重要的发展：核科学的成长；固体物理学的发展（晶体管和模拟装置可作为标志）以及微波喷射器和激光器的发展。海军研究局对这三个领域中的基础研究都给予重大支持，而对有关激光的活动，则尤其支持。

通常，海军研究局的工作是支持所选择的各研究计划，这些计划则由各大学和工业研究实验室的科学家指导。这些单个计划的总和，构成了一个有生气的计划。但对激光则不然，他们已制定了一个严加管理的计划以便尽速实现激光的一般应用和国防部的特殊应用。该计划由海军研究局物理学分部的主任艾萨克森 (F. B. Isakson) 管理。他组织了一个科学家小组，以便指导工作，及时了解工作进展，并在发生新的情况时更改计划。这个小组由华盛顿局本部和各分局的人组成。因此广大地区的情况能提供给该计划，并能集中各种经验。这些人共同确定整个计划。此外，他们每一个人又负责研究一个特殊的方面。美帝海军研究局激光小组现由下述人员组成：

艾萨克森 (F. B. Isakson)，海军研究局

物理学分部 (计划主任)

伯恩 (F. T. Byrne)，海军研究局物理学分部 (科学主任)

尼古累 (V. O. Nicolai)，海军研究局物理学分部 (晶体材料)

贝林格 (R. E. Behringer)，帕萨迪纳分局 (基础物理)

奎耳 (F. W. Quelle)，波斯顿分局 (玻璃激光材料、二极管和喇曼型激光器)

罗 (I. Rowe)，波斯顿分局纽约支局 (化学、液体和有机激光器)

怀特 (L. A. White)，兰加哥分局 (激光技术和光学部件)

温伯格 (E. H. Weinberg)，帕萨迪纳分局旧金山支局 (泵浦光源)

索耳斯 (J. Soules)，新墨西哥州立大学 (激光物理学总顾问)

虽然上述计划完全由海军研究局经管，但其资金来源和服务对象却是远景研究计划局。该计划局还支持国防部各单位所经管的其它激光发展项目。分给海军研究局的最终任务是发展高功率、大能量激光技术，而国防部的其它部门则多半从事低能量应用，如通讯之类的工作。

美帝海军研究局的激光计划始于1961年末，是在防御分析研究所的一个特殊研究小组(由国防部的高级顾问组成)举行的会议中确定的。该小组分析了激光技术的现状后向国防部指出，集中力量制造高功率、大能量激光装置的时机已成熟。海军研究局被选为完成上述任务的最优单位，其原因在于它有极完整的研究处理记录，而且与微波喷射器和激光器的发明和发展的连系都非常密切。

激光器的由来和特性

简短回顾早期的工作时，我们应明白，激光器是这样一种装置，它所产生的光的单色性、方向性以及辐射能量密度比任何其他辐射源(包括太阳在内)都高许多倍。虽然激光器辐射的总能量远比太阳小，但它把能量集中在小面积和狭窄波长间隔内的能力却强得惊人，以至可认为其有效温度比太阳都高很多。欲得这一结果，可将适当喷射材料中的大部分原子或分子提高至比通常为高的能态，然后诱导这些原子或分子，使全部过剩能量实际上同时释放出来。欲提高其单色性和方向性，可将喷射物质放在光学共振腔中。这个腔由一对反射镜组成，其中一面是半透明的，因而能让辐射通过。喷射工作物质的形式可以由晶体或玻璃做成的固体棒，也可由一管气体或液体组成。把原子或分子提高到高能态的过程叫做“泵浦”。

激光器的工作原理首先由哥伦比亚大学的陶恩斯和贝耳电话实验室的萧洛宣布。当第一台激光器完成后，Iaser一字中的字母“I”代表的是可见光。但是，现在制成的激光器则可发射紫外或红外和可见光。然而，激光器是从早期的微波喷射器导出的。微波激光器的工作原理与激光器相同，但却工作在电磁波谱的微波区。第一台运转的微波喷射

器利用氨气流。一组特殊形状的电极仅仅允许那些高能态分子进入微波共振腔。受激的氨分子一旦进入共振腔，就放出其过剩能量，产生一个23.87千兆周的微波辐射。这种微波喷射器由陶恩斯等人于1954年设计并建成。追溯得更远一些，激光和微波喷射器的基本物理概念是陶恩斯在1951年想到的，那时他在哥伦比亚大学辐射实验室从事微波波谱学方面的工作。当时他的工作根据研究合同，由海军研究局、陆军和空军共同资助。

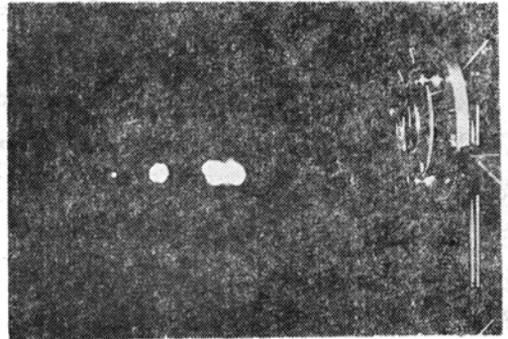


图 照片中的白斑是高度离化的气体，它的温度大于 $10,000,000^{\circ}\text{K}$ 。这是海军研究实验室的高功率激光产生的。该室有一个广泛的等离子体物理研究计划。

初期应用

海军部门在很短的时间内应用了这些重要的概念。微波喷射器首先应用于海军研究实验室的50呎射电望远镜，作为超灵敏低噪声接收器。因此能检测来自行量和恒量的极其微弱的无线电信号。微波波谱学和微波喷射器的其它应用是设计并制造原子钟和氢微波喷射器，它们可作为超精确的频标，用于导航。这些发展是海军研究局电子学分部的主任肖斯塔克(A. Shostak)完成的。

最大可能的量度

由于海军研究局的工作与激光器和微波喷射器的初期历史以及有关的科学工作都有

密切的联系，所以远景研究计划局要求它承担一个庞大的计划，使激光器达到完美的实用水平。当时，梅曼根据陶恩斯和萧洛的原理，已作成红宝石激光器，并且论证了他们所予言的单色性和相干性的确能够达到。随后用大红宝石和强氙闪光灯进行的工作，使单个脉冲的能量达到 50 焦耳，脉冲宽度是几个毫秒数量级。跟着出现了 Q 突变技术。它允许光泵的工作时间比较长，因而使几乎全部原子都升到高度激发态，然后迅速诱导激光器，使所有的能量在十亿分之几秒这样短的时间内全部释放出来。这种极快的光发射速度意味着，在这极短的时间间隔内，很多兆瓦数量级的功率被辐射出来。但辐射能量的总值却很小，比一个焦耳还小。由于对多数实际应用来说能量越大就较好，故海军研究局的任务是发展高功率、大能量的激光器，同时防止光束扩散，使其直径小于理论值（即衍射极限）。换言之，我们希望得到有最大可能亮度的光源。为了达到这个目的，就必须确定阻碍大能量释放的原因何在，并设法克服它们。

1962 年初，红宝石晶体是最成功的激光工作物质。用少量钕离子作激活剂的光学玻璃似乎也有希望。利用氦氖混合物的气体激光器有极好的单色性和相干性，但输出功率很低。因为气体每单位容积内含有的原子数目本来就较低，用这种装置获得高功率似乎是不可能的，故当时未加考虑。其它几种晶体也发现能产生激光，但其功率水平仍较低。因此就决定集中力量发展以红宝石或玻璃作工作物质的激光器。

1962 年，艾萨克森召集有希望的合同户开一次投标会议，这个会议的消息在工业界引起极大的兴奋，有 60 多个公司派去了一个或几个代表。随后即收到很多对海军研究局

所需的高亮度激光器进行短期设计概念研究的方案。在海军研究和武器实验室、国家标准局、林肯实验室和防御分析研究所的顾问的协助下，该局的激光小组评价了这些方案。为了鼓励广泛的建议，该小组接受了绪方案中的若干种。研究了设计概念之后，该局颁发了四个制造高能量、高功率激光器的合同。与此同时，还颁发了其它一些合同，目的在于发展先进的材料，以及生长优质红宝石晶体和改善玻璃光学性质的新技术。该局所颁发的四个合同中的第一个的要求是制造作为实验室工具的短脉冲高亮度激光器；第二个的要求是证明激光放大器能平行而且同相地运转，因而它们的能量能相干地相加；第三个的要求是制造脉冲宽度和脉冲形状都可调，并且无无规能量尖峰的激光器；第四个要求制造能发射高能量单脉冲的高增益玻璃激光器。

第一个计划已圆满完成，结果收到一台输出为 30 焦耳的短脉冲激光器。这台激光器用一根红宝石棒做为振荡器，其后串接了三根红宝石棒作为放大器。虽然这个能量比指定的小，但却远比以往从短脉冲 Q 开关激光器所得到的大。这台激光器一直在作改进，虽不断更换改善了的红宝石棒，但至今在本质上还是同它的雏型一样。它至今还在运转，而且仍然是具有这种能量水平的最可靠的系统中的一个。

第二个计划要求，严格控制两台独立的激光放大器的位相，以便最有效的组合它们。精确设计的伺服系统用来控制位相。但后来发现，实现这种控制比事先预想的要困难得多。在执行合同的期间，位相控制已实现，但很失望这两台激光放大器的组合输出异常低。

第三个计划是用尼古累发明的反馈系统

来控制脉冲的形状和宽度。合同户精心计算了反馈电路的细节后,改进了尼古累的方法,并指出,脉冲是可以控制的,但能量输出仍比所希望的低。

第四个计划要求很长的含铍离子的优质玻璃棒激光器。这种棒以伯思发明的所谓“雪崩方式”工作。已经发现,当大量的能量通过这种棒时,玻璃棒容易损坏。

能量输出的障碍

在所有这几个计划中,限制能量输出的障碍何在?用干涉分析法以及其它一些精密的光学测量方法进行观测后,立刻发现,这种障碍在于用以产生和放大激光辐射的红宝石和玻璃工作物质的质量都比较差。“比较”一辞在这里有重要的含义,因为实际上这些工作物质跟以前制出的任何材料相比,其质量都极高。用维涅耳法,红宝石已生长成12吋长的单晶。将氧化铝和氧化铬这些成分研成粉末,慢慢筛入炽热的氢氧火焰中,熔化并冷凝成晶体。这种方法最初用于生产做钟表轴承的人造宝石。看起来这种晶体的确很晶莹清澈美丽。这些晶体用作低功率低能量激光器很适合,但是微量的杂质以及对于理想结晶的微小偏离,都使得这些晶体无法满足这一计划的严格要求。用作激光工作物质的玻璃也有类似的情况。近百年来,极优质的玻璃不断在发展。然而,就连最大的望远镜,其玻璃的厚度也只有几吋。对于更大的激光器,困难更大,这是因为光必须通过6呎或更长的玻璃,而所发生的散射、吸收和畸变又必须绝对的小。

工作物质计划

因此,有人承担了改善工作物质的主要计划。尼古累负责更完备的晶体的生长任务。

欲作为高能激光器的工作物质,它必须有相当长的荧光寿命,以便积蓄能量;它必须有适当波长的宽吸收带,以便有效地进行泵浦;这种晶体必须坚牢;并且能承受高能量密度以及由此而产生的高温;它对于辐射波长必须透明,不允许存在散射,吸收和畸变;它必须能做成足够大的尺寸。这是一组使望人而生畏的规格。尼古累赞成研究氧化镁、氧化铈、铝酸镧、氧化钇、钛酸锶、锆酸钡、氧化钍以及其它材料。他特别探索了激活离子位于反转对称位置,因而具有长荧光寿命的晶体结构。虽然这些工作物质中的一部分的确产生了激射作用,但论其综合性质,则没有一种能比得上原来的工作物质——红宝石。

因此,较大的努力化在使红宝石晶体完善化方面。首先,维涅耳法在控制方面进行了较大的改善。其次,接近完善的红宝石已用熔融拼料的方法生长成功。这种方法是用助熔剂代替火焰,并且,在控制压力和温度的条件下使晶体在熔剂中生长。但这些生成的晶体很小,并含有很多的包含物杂质,以致无法使用。第四种方法是在1,750°C的温度下汽化三氯化铝和三氯化铬,并使这些气氛冷凝在子晶上。用这种方法已获得了极好的高度化学纯的红宝石。最近“恰克拉斯基法”已告成功。这种方法是使拼料在耐火金属坩埚内约2,100°C的高温下熔化,并从熔质中拉出晶体。几年来,在研究温度控制、应用大气气氛,控制处理过程的各种方法的同时,在此法上下了许多工夫,使之臻于完善。现在可用的红宝石已有很高度的晶体完整性。用这种方法已制成直径为 $\frac{5}{8}$ 吋、长22吋的晶体。对晶体结构缺陷的测量得知位错密度已减少,其减小因数为10,000。抗张强度增加了一倍,并且由于含有较少的杂质,热导率增加了。光束发散度减小20倍,相应的增加了

激光亮度。伴随着上述这些好处的同时，由于恰克拉斯基型晶体这种高质量材料的大量生产，其价格较维涅耳型晶体便宜。现在，这些熔融生长的红宝石可以实现较高能激光器。

同晶体计划相联系的，选定了奎耳 (F. W. Quelle) 研制较好的激光玻璃工作物质。三家美帝主要的光学玻璃公司参与了这项工作。数以千计的不同组分的玻璃已熔炼出来，并进行了试验。已发现高纯度的混合原料并付诸使用。为保证获得均匀的无条纹的玻璃，这种玻璃是在一个大炉子里以连续熔炼法制成。为了避免污物混入玻璃，在一个大白金坩埚内熔化，后来发现用白金坩埚制造的玻璃，当遭受大能量密度时有破裂的趋势。显然，白金被氧化成气体，转变成气泡，使玻璃中产生金属杂质。这种金属杂质作为一种局部辐射吸收中心存在于玻璃中。最有效的努力是制造消除这种缺陷的玻璃。现在，将坩埚用中性气氛保护起来以防氧化。同时，已选用了排除了杂质的陶瓷坩埚，因此避免了于熔化玻璃中的不良作用。作为上述这些努力的结果，无比透明以及自吸收极小的大玻璃棒已付诸应用。这些棒的尺寸直径为2吋、长约7呎。这种类型的棒能量输出比以往已达到的都要大。但是不是象海军研究局所希望得到的那种短脉冲。值得注意的是这些普通玻璃原料虽很便宜，但在制造中所耗费的人力、物力较多，因此一根大型优质棒就得值10,000美元。

能 量 泵 浦

只是工作物质好并不意味着能满足要求，还必须有一个强而有效的泵浦源。这个泵浦源对激光工作物质的吸收带是匹配的。温伯格 (E. H. Weinberg) 承担了改善光源

的任务。原始的泵浦是一个充氙气的闪光灯，它在几个毫秒内发射出很强的白光。把某些气体加入氙气内使光谱与激光工作物质的吸收带接近匹配，企图改善其效率。这一结果没有能在大灯上应用，因为氙与其他气体都是同样的热，故实际发出与纯氙气同类的光谱。但是这一技术对低功率器件是有益的。另外一些设想涉及气体爆发的振感辐射、气体内的敏化荧光，而灯外利用荧光转换物质吸收有害的紫外辐射转换成有益的光等均曾加以研究。对于等离子体类型的光源已进行研究。对核泵光源、阴极发光以及其它可能的泵光也曾进行了探索。目前，较先进的可采用的是同轴型灯。这种灯的横截面如同一个汽车轮胎，环状夹层中充以氙气，中孔内置以激光棒，外部表面用白色陶质制成，借以将差不多全部灯光反射到激光棒上。这种灯的效率相当高，并且适用于上述的大玻璃棒。根据灯的使用者反映的情况，紧密的结合实验上的结果确定灯制品改善方向，这样，性能与可靠性上一些显著的改进将会很快的放进设备中。

对于现有闪光灯局部离化等离子体的基本辐射过程的理论分析工作已着手进行。此外，灯的测量过程标准化已在着手进行，这将导致工艺方面有意义的进展。

可漂白滤光器

在激光计划中，从一开始就明确了对Q突变技术的研究，开发新的途径，以改进当时有的Q突变技术——旋转棱镜，克耳盒。由怀特制定了研究这一课题的计划。两个合同是关于这个工作的。一个是研究做成薄膜的涂于一块光学平面基底上的维多利亚B蓝色染料。这种染料薄膜对于光是自同步、稳定的短时间、价廉的被动式Q突变元件。合

同户还论证了将这种有机染料在红宝石腔中用作非破坏、被动式可逆漂白Q开关的作用。溶于甲醇的隐花青用作Q突变是一种最成功的染料。另一家合同户观察到掺铈玻璃的滤光作用，并且论证了作为光泵Q突变的实用价值。

用漂白剂实现Q突变的意义在现在的激光技术中是很明显的。这种元件使红宝石激光有高度的相干性、单模以及获得最短脉冲宽度的可能性。而且于掺铈玻璃的激光输出中也能获得最短脉冲宽度的锁模，其脉冲宽度小于毫微秒。

其他激光器

迄今所提到的激光器所用的工作物质其形状均为细而长的棒。现在已研制了不同类型的激光器，如把工作物质制成大直径但较薄的盘状物，然后再串联起来。通过这种工作物质的一面泵浦，光从另一面发射或反射。光学基本定律指出：辐射光束的发散度与辐射源的直径成反比。而这些圆盘状物质将给出很强的锐利光束。

另外一种变型是用激光泵浦产生激光。在这种情况下用若干小的通用激光器即可产生大输出的优质激光。其目的就是为了得到一个较高效率的泵浦系统。

与上述类型的激光器完全不同的是使用液体、塑料有机工作物质、无机液体工作物质，还有化学激光器。这类激光器的开发工作是在罗的指导下进行的。这种激光器不需要大而完整的晶体，也不需要高纯度的玻璃棒，同时造价便宜，容易制备。液体不易遭到损坏，并可以循环流动使它冷却。用不同化学方法可以获得许多激光辐射波长。液体和塑料激光器用通常的闪光灯做泵源。然而，化学激光器的能量是靠腔内产生化学

反应本身提供的。这种装置将排除大的闪光灯以及大电源的需要，大大增加效率和降低激光器系统的成本。但迄今所达到的能量水平很低，不久的将来有望制备出改善的工作物质。

半导体和喇曼型激光也已在奎耳的领导下进行了研究。

在晴朗的白天

“在晴朗的白天，你永远可以看到！”在民歌里有着这么一句话。但是，对于激光来说果真如此吗？如上面所讨论过的在玻璃中的光学不均匀性，在大气中也有类似的性质。大气不是一个静止的物质，并且大气的不均匀性时起时伏的在不停的变化着。大气中的这种运动是由于星星的闪光的影响，狭窄的激光光束在大距离上发送便遭到发散和破坏。例如激光在真空中传播，于一哩的距离处其光束直径为6吋（译注：约为15.3公分），而在大气中于相等的距离处其光束的直径约为一码（译注：约为91.4公分）。大气的不稳定性造成对激光连续波信号的振幅和频率明显的调制作用。此外，在大气中象所有其他物质一样，由于空气的破坏，将不能发送出极高强度的光束。这种击穿现象已探明仅仅发生在聚焦高强度脉冲激光条件下。由激光所产生的等离子体类似在高电压下产生的放电闪光。

在装置设计上的问题是光学元件遭到高强度激光破坏的倾向。方解石是偏振棱镜一种常用元件。把一个特殊的透镜和棱镜用粘合剂胶成组合体。这两种元件甚致在较低强度激光作用下也是容易损坏的；此外还有反射镜膜、玻璃和石英透镜。因此，在怀特的指导下制订了创造新的、不受损坏的光学元件技术的计划。

海军研究实验室早期即已参加此一计划。分配给研究室的资金用来研制新型激光玻璃、探索生长晶体的新方法、研究激光光学系统和传播以及增加等离子体泵浦的效率。

基础物理学

由于先进系统、新型工作物质以及改善泵浦源和大气传播等问题的要求，产生了新的课题。而对这些课题的解决已超出了现在所掌握的知识范围。这些疑难问题属于基础光学和物理学的范畴。为了从基本研究中获得新知识，用来解决这些疑难问题，基础物理的研究计划已经制订。贝林格负责这一工作，并由索耳斯协助，作为顾问。约有25个计划已由大学和工业研究室着手执行。计划中要研究的题目有如离子之间的能量转移、固体荧光光谱、喇曼效应、配位场、不规则色散以及非线性相互作用等。由这些研究所获得的知识将立即被用于新的和改善的设计中。

新趋向

早在1962年海军研究局开始激光发展计划时，由气体激光提供高能的可能性似乎很渺茫。可是几年以后，情形开始改变。离子化氩气的激光器已创建成功，在有用的波长处产生几瓦的输出功率，而氮-氦类型的气体激光器输出功率仅几毫瓦。以后又出现了氮激光器，发射短而锐利的高功率。在过去的几年内成功的研制出二氧化碳激光器。这种激光器内含有二氧化碳、氮和氦的混合气体。在这种混合气体中的受激辐射是由于激励处于振动状态的 CO_2 气体所致。最初，这种激光器仅产生几瓦的输出功率，但是现在的功率已达到上千瓦的水平，并且是连续运

转的。把它的能量聚焦在一些材料上的效应令人惊奇。石棉、耐火砖、钢和玻璃在它的作用下全部燃烧或熔化。鉴于这些特性，海军研究局现在所承担着的研制高功率雷达放大器的任务就是基于这种类型的激光器。有三个合同从事这项工作，并且研制新的高分辨率的雷达有较大的实现希望。二氧化碳激光器的另一个优点是有可能比建立相等输出功率的固体激光器的成本低。

合同与会议

在过去四年中，海军研究局在大能量、大功率激光器发展的各个阶段均极卖力气，以推进这一技术。在这段时期内，与许多实验室与机构签订了约100个合同，进行理论与实验研究。其中有65个合同，目前仍在进行工作。为使如此大的合同计划保持平衡，需要有高度的管理技巧与组织能力。这些工作，大部分由该局物理学分部负责人艾萨克森负责。

合同并不是促进科学与技术的唯一办法。传播和增加知识的一种不多花钱而又有效的办法是定期将有关科工作人员召集到一起，交换情报，促进彼此间的讨论。如果会议报告能够出版，则其他人员也可以受益。海军研究局主办了四次国际性的微波激射器与激光器会议。会议由罗组织，物理学分部的艾萨克森与电子学分部的肖斯塔克协助。第一次会议于1959年于纽约召开，有160个人参加；第二次于1961年在加利福尼亚州的贝克莱召开，到会者约300人；第三次于1963年在法国巴黎召开，与会人员1,200人。参加会议的人越来越多，表明这一课题日益重要。第四次国际会议仅局限于量子电子学的物理会议，于1965年6月在波多黎各的圣胡安召开。

除这些普通会议以外，海军研究局激光组还召开了一系列的小型专门会议。罗组织了一次关于“有机激光器”的会议；温伯格组织了一次关于“闪光灯”的会议；贝林格和索耳斯组织了一次“激光物理研究”会议；奎耳组织了一次“喇曼激光器”会议。还支持了“化学激光器”会议。

人们常常提出这样的问题：“基础研究对海军有什么用处？”本文叙述的工作就是一个有效的答复。研究微波波谱学时看不到什么实际应用，但以后却由此发展出一门全新的

技术。微波激射器与激光器现在为舰队服务，还将以不断增长的效力继续为它服务。频率控制、时间标准、导航辅助、惯性制导、雷达、微型机械加工、外科、直升飞机空速测量、飞机信息显示、测绘系统及卫星通讯等，仅仅是少数几种已成功或正在发展中的应用。微波激射器与激光器的应用与日俱增，基础研究可为其应用带来极大的好处。

摘译自 Rowe I., *Naval Res. Rev.*, 1966 (Dec.), 19, № 12, 1~13

高功率激光器的性能、限制和前途

提要：许多新的、想象的应用导致了高功率激光器的发展，这种功率已超过激光工作物质只能承受几次脉冲发射的能力，明显需要的补救措施，是弄清楚如何提高破坏阈值，以及如何改进不会降低激光器寿命的参数。本文讨论在激光系统中如何才能得到高的功率，并评价有关激光器性能的资料，以便确定损坏的主要原因和如何改进它们。这一分析的主要部分是测量的详细论述和对发光度的解释。

第一台激光器的公布^[1]和 Q 开关方式的成功运转^[2]，打开了大量应用设想的大门，其中很多需要产生特别高强度的输出光束。这就导致了高功率激光器的发展，其输出功率超过了激光工作物质只能承受几次脉冲发射的能力。这种情况显然是不令人满意的。高功率激光器仍然在流行，但一考虑到成本，预算编制者就感到沮丧。

活动的两条途径是显而易见的：一条是研究损坏机理以及它们和工作物质的特性的关系，以便弄清楚如何提高破坏阈值；另一条是重新评价应用要求，以便确定依靠增进不会减短激光器寿命的参数来达到所要求的目的并满足这些需要时，激光器的什么性能是主要的。工作物质的研究，有几个研究小组在积极进行，并已取得一些有益的结果。除去杂质（已经知道是损坏发生的中心）

并改进工作物质的制备技术后，Na 玻璃和红宝石的破坏阈值都提高了。审查几种较重要的应用后表明，在某些情况下（例如，测距和等离子体诊断中），真正需要的是发光度（单位面积单位立体角内的功率），因为这是直接确定激光器在给定的距离上能够给出的强度的参数。然而，在另外一些情况下，如在照相和破坏研究等情况下，在比 Q 开关脉冲长得多的时间内发送能量是合乎要求的。

在这篇文章中，讨论了在激光器系统中如何获得高功率，同时评价了有关高功率激光性能的有用资料，以便从实验上确定损坏的主要原因，并进一步确定可采取什么方法来维持令人满意的运转寿命。

Q 开关

获得最高可能激光输出功率的操作方