

# 光学与紅外激射器的一些应用

C.H. 陶 恩 斯

目前的紅外与光学激射器方面的許多工作都是关于获得振蕩和将其特性与理論預期值相比。但是，在推向单色性的极限，获得极大的脉冲功率和較大輸出功率的連續激射振蕩器上，人們已有很大的兴趣。不久以后，人們將強調稳定性、精密控制、可調性及新頻率范围。这些发展將使物理学家們感到基本兴趣，一些激动人心的实验將成为可能。現將一些这样的实验和这些实验所需的激射器特性論述于下。我認为提到的五种实验都相当重要，但它們仅仅是一些代表，其困难与特征均大不相同，某些实验还涉及一个整个的实验領域。

## 实 驗 之 一

首先考虑人类与另一种可能定居于許多光年以外的某个星球上的文明生物間的通信問題。以微波进行这种通信的可能性已有論述<sup>(1)-(3)</sup>，并在以射电望远鏡探测也許正在試圖与我們建立通信关系的可能存在的傳播上作了一些努力。事实表明，我們現在距离发展光学区内或近于这一区域的激射振蕩器或其它的装置并不太远。这些装置可以探测出相距若干光年的两个星球間发出的光信号。我們只需适当地肯定用于这种通信的激射器的现实性，以便严肃地考虑使用現有的探测技术以搜寻这些信号。有关星际通信的許多問題都需要詳細考虑。本文只談可能性的某些指征。这一題目，已由什沃兹 (Schwartz) 与陶恩斯作过較为全面的論述<sup>(4)</sup>。

考虑一台激射器，它发射接近波长 $\lambda = 5000$ 埃，帶寬在 1 兆周/秒或 $3 \times 10^{-5}$ 厘米<sup>-1</sup>內的恒定功率。这一激射器以发射的相干光可使用发散透鏡將它相干地且大致均匀地照明一面直径为D的很大透鏡的整个表面。这一大透鏡則可产生角展約为 $\lambda/D$ 的高度定向光束。因此，任何相干激射振蕩器光束的定向度均可随意增大，直到受到我們現在能建造的最好望远鏡的分辨本領的限制为止。一台 200 吋透鏡的极限角定向度在 5000埃处約为 $10^{-7}$ 弧度，在地球大气之上可以有利地使用。由于大气的折射，大气以下的定向度限于約 $5 \times 10^{-6}$ 弧度。

探测星际距离的激射器光束牽涉到两类問題：(1) 产生可以探测的足够光子密度；(2) 区别激射器光与假定的文明生物所居星球发出的光。与200吋透鏡同用的10千瓦連續波激射器功率所产生的光束，肉眼可在0.1光年的距离处看見，在10光年处可用200吋望远鏡在約1分鐘內摄影。10光年的距离意义重大，因为在这一距离內有好些特征与太阳相同的星球。一台10千瓦的激射器系統附上在地球表面可能具备最大定向度的5吋透鏡，可在10光年处用200吋望远鏡在約1½小时內以摄影的方法探测到。

現在来考虑对星球背景的区别。这是一个稍較困难的問題。如以太阳为典型，激射器必須赶上可見区中太阳的亮度，約 $10^{21}$ 瓦/主体/厘米<sup>-1</sup>。这一数值在夫琅和費 (Fraunhofer) 綫中减少十倍多一些，这可能是适于激射器傳播的区域。激射器可获得的极端定向度与单色度

可使它們在其很窄的頻率帶寬範圍內亮度超過星球。一台1兆周/秒帶寬的10千瓦激射器與200吋透鏡同用，會產生 $3 \times 10^{22}$ 瓦/主體/厘米<sup>2</sup>，或300倍於太陽的強度。二十五台這樣的10千瓦激射器以5吋透鏡發射出的平行光束將較太陽亮三倍。

現有的定向光柵在光學區的分辨力近於 $0.01$ 厘米<sup>-1</sup>。(5) 以這樣的分辨力與大型望遠鏡相結合已經可以探測到從幾十光年距離以內的星球向我們發出的激射器信號。也許應當對於譜線寬度異常窄或有強度變化的光譜作極高分辨力的星球光譜搜索。

讀者應注意，對激射器信號說來， $0.01$ 厘米<sup>-1</sup>的分辨力依然是相當粗略的；例如，它把激射器信號對星球背景的比率減少到上述數字的300倍。因此，人們應當考慮最終研製出以激射器作本机振盪器的極窄譜帶的光學或紅外探測器光電管可以探測出本机振盪器與信號間的差拍，並可以在極窄的頻率帶寬中進行靈敏探測，因而加強其對星球連續光譜的差別。

激射器的發展對星際通信應當是重要的這一事實現在也許很清楚了。這些發展包括高功率穩定振盪器，不受溫度影響的高光學功率的光學系統及窄帶探測器。

## 實 驗 之 二

激射技術也許會使射頻或微波範圍的頻率倍加而進入可見與紫外區。應當知道，物理學家們從未直接測量過紅外或光學輻射的頻率。他們先測量這一區域的波長，然後再從準確至 $1/10^6$ 的光速知識來計算頻率。頻率倍增至可見區會使這些頻率被直接計算，因而以時間標準來測量。我們的長度標準現在是按可見光的波長規定的。因而，測量頻率就可以立即確定光速，其精度高至確定長度的精度。

測量光學區域頻率的精度高於 $1/10^8$ （現在確定長度的精度）事實上將把長度與時間和光速如此牢固地聯系到一起，以致將長度和時間標準分離不再適合。可以較長度更為精確地測量和規定的時間可用作基本規定單位，然後以光速乘以作為長度標準的某一時間間隔，就從中推出長度。

怎樣才有希望倍頻至紅外與光學區呢？將激射器相干光聚焦，無需太多的困難就可獲得近於 $10^6$ 伏/厘米的光學區域場強。要在原子或分子能級中產生重大的非線性，這一數值不僅足夠，而且有余，因為這時的斯塔克(Stark)耦合能量 $|E\mu|$ 約為 $100$ 厘米<sup>-1</sup>此處的 $E$ 為電場， $\mu$ 為原子偶極矩矩陣元。要從微波與近紅外區間的激射器獲得這樣大的場強不是那麼容易，但選擇間隔很近的原子或分子共振也許甚至可以造成非線性，其大足可倍頻與分頻。

有各種各樣細節不同的方法可將非線性用於倍頻中。概括說來，人所熟知，這些方法都來自射頻區，但詳細而論，它們都有待於在紅外和光頻區中作出。為了明確起見，讓我們想象一種稍高於振盪閾值的光頻區激射振盪器。假定第二台激射振盪器具有相當大的功率，其頻率約為第一台頻率之半，其輻射集中於第一台激射器諧振器中的某種介質內。這時，適當類型的小非線性就會將兩種頻率耦合，而使低頻激射器在兩倍的頻率處推動高頻激射器。高頻激射器的輸出則在另一類似激射器中放大，這一加倍過程重複進行。要想成功地完成從微波頻率到光頻的高精度倍增裝置需要很多機智，還需要碰上一些好運氣。光學或近紅外區單倍增過程最初的一次實驗，其本身就很有興趣。

## 實 驗 之 三

微波與近紅外間的大光譜區基本上沒有高分辨光譜學。例如，近於 $200$ 微米的波長， $10^3$

的分辨大概就是現有技术的极限，因为在这一波长处缺少热辐射。激光器终究会使这一区域从头至尾均有很高分辨的光譜，可見与紫外区也是如此。在頻率高达可見光处，激光振荡器在分辨力方面的改进不能极大地增加光譜工作的可能性。此处，在通常情况下，多普勒綫寬将有用的分辨限制在約  $10^6$  处，以現有的技术，可在光学与紫外区中获得这一分辨。因此，普通技术几乎已可以分辨这一区域中最窄的原子或分子譜綫。但在远紅外区，却远未到达多普勒加寬所固定的极限，激光技术就可以有用地将分辨力增加二或三个数量級。

想象在近于 100 微米区中的一台可調激光振荡器。即使在易于探测的最小功率（例如，約  $10^{-10}$  瓦）处，这样一种振荡器都会比任何譜綫的单色度高許多。它会成为高分辨分光計的心臟，只需要振荡器与寬帶热探测器即可。

在整个 10 至 500 微米波长的較少作过工作的区域内，发展广泛可調的激光振荡器需要一段長時間。在这一頻率区迄今尚无激光振荡器运转，但将来一定会有。也許需要許多不同的振荡器，每台振荡器在一个小范围内調諧，或者甚至保持恒定頻，而將譜綫掠过振荡器頻率。适当調諧范围的可能性似乎还是有的。利用溫度变化的方法，已將紅宝石光激光振荡器調諧約  $20 \text{ 厘米}^{-1}$  (6)。这一总頻率范围，較迄今为止任何类型的振荡器所获得的都大，即使如此，頻率的部份变化也不大。已有的磁場也可以調諧原子譜綫，因而激光器也可以調諧至  $20 \text{ 厘米}^{-1}$ ，这是在 100 微米波长处总頻率范围 ( $100 \text{ 厘米}^{-1}$ ) 的一个重要的部分。

## 实 驗 之 四

使用光学或紅外激光器几乎可以立即获得很高分辨的喇曼光譜学。喇曼光譜通常需要高强度的照明，但对頻率的要求却不很严格。紅宝石激光器已获得用于喇曼工作的足够强度，而其譜寬甚窄，因而喇曼頻移可以精确确定。紅宝石激光器頻率的溫度变化不便于喇曼光譜的摄影探测，但却并不排除多少使用一些一般的喇曼技术。

用激光器还可以进行一种更加迷人和具有較高分辨力的喇曼技术。这牵涉到用快速光电探测器探测喇曼散射光与原有頻率光的混合物。这两种不同的頻率会拍到一起而产生差頻，如果頻差不太大，可用通常的电子技术探测和量出。这就会在例如旋轉頻率或布里淵 (Brillouin) 双重綫方面作出很高分辨力与高精度的喇曼工作。

考虑光学区激光振荡器所发出的极單色和定向的光束。对此处考虑的實驗說来，頻率慢移并不重要。如果光束为气体所散射，則將因多普勒效应而加寬，頻寬均方为

$$\Delta\nu = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right) (\nu/c) \left[ 4 (\nu_0^2 + \nu_0\nu) \sin^2\theta/2 + \nu^2 \right]^{1/2}$$

式中的  $\nu$  为分子速度均方值， $\nu_0$  为入射頻率， $\theta$  为散射角， $\nu$  为喇曼頻移。由于通常  $\nu \ll \nu_0$ ，而我們又对小角  $\theta$  感兴趣，这一方程縮减为

$$\Delta\nu = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right) (\nu/c) \nu, \text{ 因为 } \theta \ll \nu/\nu_0 \text{ 与 } \Delta\nu = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right) (\nu/c) \nu_0 \theta$$

因为  $1 \gg \theta \gg \nu/\nu_0$ 。

我們提出的这种實驗計劃会收集到以某一小角  $\theta$  作喇曼散射的光，并將它与某些原来未

被散射光束加上任何在同一角度內的瑞利 (Rayleigh) 散射光混合。这些光可全部送入光电管, 光电管电流內的合成頻譜以某种灵敏的頻譜分析器 (例如可調放大器) 分析。在某些相应于喇曼旋轉頻率的頻率处, 应当探测到过剩功率。对最高分辨說来, 散射气体的压力会减至碰撞加寬不太大于多普勒加寬  $\Delta\nu$  点处。进入光电管的总光量应当足够, 使散粒噪音超过其它类型的噪音。分析表明, 在这些条件下, 喇曼旋轉位移可在有利的气体中, 以接近于通常的微波吸收光譜学可能获得的頻率分辨力探测到。材料的声波产生的布里淵双重綫与較喇曼旋轉散射强得多的散射有关, 因而較易探测。

## 实 驗 之 五

由于紅外与光学激射器所产生的輻射具有显著的单色性, 因而可望用于許多与极精密的測量或两种长度或頻率比較有关的許多实验中。例証之一就是高度改进的迈克耳逊—莫雷型实验<sup>(7)</sup>。

光激射振荡器的頻率  $\nu$  視平行板諧振器的諧振頻率  $\nu_c$  与分子系統的頻率  $\nu_m$  而定;

$$\nu = \frac{\nu_m Q_m + \nu_c Q_c}{Q_m + Q_c}.$$

本式直接由戈登 (Gordon) 宰格 (Zeiger) 与陶恩斯的第 (33) 式推出。此处  $Q_c$  为产生振的諧振腔中諧振器的質量因数,  $Q_m$  为分子系統的質量因数, 亦即  $Q_m = 2/\Delta\nu_m$ , 式中的  $\Delta\nu_m$  为分子諧振半最大值处的半寬度。从本式可以看出, 如果  $Q_m \gg Q_c$ ,  $\nu$  主要为  $\nu_m$  确定, 如  $Q_m \ll Q_c$  时, 則主要由  $\nu_c$  确定。在后一种情况中, 对  $L$  的小变化說来, 振蕩頻率近于直接与板間隔  $L$  成正比。

现在来考虑可以确定  $\nu$  的精度。激射振荡器的頻寬  $\delta\nu$  易于以适当改变前述发展<sup>(8)</sup> 来获得

$$2\delta\nu = \frac{8\pi h\nu}{P} \left( \frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_c + \Delta\nu_m} \right)^2,$$

式中的  $P$  为振荡器的功率,  $\Delta\nu_c$  为在腔諧振半最大值处的半寬度,  $\Delta\nu_m$  为分子諧振半最大值处的半寬度。由于已假定  $Q_m \ll Q_c$ ,  $\Delta\nu_c \ll \Delta\nu_m$ , 因而

$$2\delta\nu \approx (8\pi h\nu/P) (\Delta\nu_c)^2.$$

但是, 振蕩器的頻展并不等于可以确定普通頻率的准确度。后者随用于測量的時間  $t$  的增加而增加, 理論相对誤差由下式給出

$$\epsilon = (\Delta\nu/\nu) \left( \frac{h\nu}{\rho t} \right)^{1/2}.$$

此处,  $\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_c \Delta\nu_m}{\Delta\nu_c + \Delta\nu_m}.$

即使 $\Delta\nu$ 、 $P$ 与 $t$ 等参数相当保守的值也可以测量激光器频率限度以内的极小误差。所以， $\Delta\nu/\nu=10^{-6}$ 时， $P=1/50$ 瓦， $t=1$ 秒， $\epsilon\approx 10^{-15}$ 。

迈克耳逊——莫雷实验可用比较两台独立振荡的光激光器频率的方式进行。这两台激光器的光可加以混合，并在光电管中探测到。差频则可以标准电子技术准确确定。如果一台激光器相对另一台旋转，测出二者频率差的变化，这两台激光器有效光路的任何变化都可以探测出。因而与迈克耳逊莫雷实验的等价。与地球轨道速度有关的洛伦兹—斐兹杰惹(Lorentz-Fitzgerald)收缩约为板间隔的 $10^{-8}$ 。因此，比较两台激光器的频率至 $\epsilon=10^{-15}$ 的相对精度，就可以确定这种收缩至 $1/10^7$ ，约较从前的技术侧得的精度大四个数量级。在实践中是否能获得高达 $10^{-15}$ 的精度还不能肯定，因为有温度变化、声振动或其它的问题。然而，这类实验的现有精度是很可能用光激光器来进行极为显著的改进。

仔细检验在比较两种光激光振荡器频率所可能获得的短期与长期精度的极限本身就很有趣。它也会表示此处提出的这种实验可望获得的准确度。

### 参 考 文 献

1. G.Cocconi and P.Morrison, Nature 184, 844 (1959)
2. E.M.Purcell, talk at PGMTT of the IRE, June 1959.
3. O.Struve, K.T.Compton Lecture, MIT, November 1959.
4. R.N.Schwartz and C.H.Townes, Nature, to be published. \*
5. G.R.Harrison, J.E.Archer, and J.Camus, J.Opt. Soc. Am. 42, 706 (1952).
6. I.Abella and H.Z.Cummins, J.Appl. Phys., to be Published.
7. Quantum Electronics, edited by C.H.Townes Columbia University Press, New York, 1960, P. 581.
8. J.P.Gordon, H.J.Zeiger, and C.H. Townes, Phys. Rev. 99, 1264 (1955).

譯自 Advances in Quantum Electronics, edited by J.R.Singer, Columbia University Press, New York, 1961,  
P. 3. 王克武, 王之江校

\*本文已发表，并經譯印，譯文見光机所“活頁資料”第4期(1963. 2. 4)。