

## 綜合評述

# 量子电子学\*

A. M. 普罗霍洛夫

可以认为,量子电子学是从1954年底到1955年年初开始确立,也就是在这个时期奠定了量子电子学的理论基础,並制成了第一台仪器——分子振盪器。1917年爱因斯坦預言的感应輻射現象是整个量子电子学領域的基础,真如我們所指出过的,量子电子学誕生得太迟了。

那些原因阻碍了早在1930—1940年期间建立量子仪器呢?为了弄清楚这点,讓我們简单地回顾一下作为量子电子学基础的原理。很早以前爱因斯坦已提到感应輻射現象。显然,处于激发状态的原子可以用二种輻射(量子)方式釋放自己的能量。一种是当原子自生輻射能量时的自发輻射方式。在量子力学建立以前,自发輻射現象用經典理論进行描述:把原子看作为具摩擦的輻射振子,其振幅随時間减少。所有一般光源(熾热灯,气体放电灯等等)由于自发輻射而发生光綫。这表明在光学光谱学方面的科学家早就熟知自发輻射現象。

第二种原子釋放自己能量的方式是感应輻射。爱因斯坦曾指出了这种現象是为了場与原子之間的热力学平衡。原子感应輻射現象乃是当原子和場的外量子相互作用时,激发原子的輻射。这时得到二个量子:一个是外量子,另一个是原子本身发出的量子;这二个量子是一样的,他們的頻率方向是重叠的。1927年迪拉克(Dirac)首先指出这是感应輻射很重要的属性,根据这点才能建立量子仪器。

要观察感应輻射,第一应有激发原子,第二必需使感应輻射的几率比自发輻射的几率大。假如原子处于热平衡,光学能級就不集居。在一般的条件下,当原子激发时,由于自发輻射,原子跃迁到低能級。当光能只是一般的密度时,感应輻射的几率很小。因此在光谱学範圍内,是不需要考虑感应輻射,显然,把这种現象当作理論家的“艺术作品”来进行研究,所建立的理論也仅为理論家所需要。

很明显,假如具有的都是激发状态的原子,这样的原子系統将放大輻射,无需怀疑,有些科学家早在1940年前就知道了这种現象,但是,誰也沒有指出可建立光振盪器。可能使人惊奇的是,在1940年前光量子振盪器原则上是可以建立的。但需要一定的先决条件。在第二次世界大战結束以后,当无线电波谱学开始蓬勃发展时,就出现了光量子振盪器,也就是說,从事无线电波谱学的科学家們奠定了量子电子学的基础<sup>[1,2]</sup>。怎样来介釋这种現象呢?当时有許多有利的情况是从事光学光谱学的科学家們所沒有的。

首先,由于在无线电波段激发能級具有大的集居数,对处于热平衡的系統來說,必然会

\* 1964年12月11日授給貝尔奖金时所宣讀的报告。

注意感应辐射。实际上，假如低能级的粒子数等于  $n_1$ ，激发能级的粒子数为  $n_2$  则吸收系数为

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu (n_1 B_{12} - n_2 B_{21}) \quad (1)$$

式中  $B_{12}$  值为吸收几率， $B_{21}$  为感应发射几率。假如能级是非简并的，则  $B_{12} = B_{21}$ ，公式(1)可写为

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu (n_1 - n_2) B_{12} \quad (2)$$

对光学波段来说，在一般热平衡条件下，可以假设  $n_2$  为 0，仍具有高的精确度，这时，吸收系数为

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu n_1 B_{12} \quad (3)$$

因而，对光学波段来说，吸收系数只与低能级的集居数有关。

对无线电波段来说，通常是  $h\nu \ll KT$ ，在这种情况下

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{h\nu}{KT}} \approx n_1 \left(1 - \frac{h\nu}{KT}\right)$$

这时  $\alpha$  值为

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu n_1 B_{12} \frac{h\nu}{KT} \quad (4)$$

从公式(4)表明，由于感应辐射，吸收系数值比不估计感应辐射小  $KT/h\nu$  倍。因而感应辐射应包括无线电波谱学方面的整个工作。为了放大吸收系数，需降低温度，为了减少高能级的集居数，以至减少感应辐射的影响。从公式(2)导出，对不处于热平衡的系统而言，当  $n_2 > n_1$  时，吸收系数为负值，就是说这样的系统能够加强辐射，也就是说对无线电波段而言，实际上物理学早已公认这类系统。

假如通过不均匀的磁场或电场，放出分子(原子)束，则不同状态的分子进行分类。特别有可能得到只处于高能状态的分子束。另一方面，从事微波波谱学方面的物理学家曾考虑用分子束来增大无线电波谱仪的分辨力。为了放大分子束的光谱线强度，应该有低能状态的分子，及高能状态的分子，换句话说，进行分类。假如分类后的分子将处于高能状态，则这样的系统将是强烈的。

由无线电技术熟知，能增强振荡的任何系统都可使其发生振荡。为此需要反馈。已很好地详细地研究了无线电波段一般振荡器的理论。为了描述这些振荡器，需知道负电阻或导电率，即具有负损耗的元件。具有负吸收系数的介质是发生量子振荡器时的元件。因此量子振荡器的自激发条件应该类似于一般“经典的”振荡器条件。在无线电波段中根据一般的振荡器类推，对量子振荡器而言，振荡将接近谱波的，实际上这是发生过的。

最后，象所有正弦振动的其他振荡器那样共振系统是量子振荡器的重要元件。但对无线电波段来说应很好详细研究共振系统，对微波激射器，在无线电波段采用了共振器。因此，最重要的元件——空腔式共振器——同样也要很好地熟知其在无线电波谱学中的工作情况。

然后，从事于无线电波谱学研究的人们已研制成一批微波激射器个别的元件，并把他们综合，以得到微波激射器。最早的二篇文章<sup>[1,2]</sup>（一篇在苏联出版，另一篇在美国出版）是单独地分别发表的，这二篇文章直接关系到运用分子束的高分辨率的无线电波谱学的建立。以上所说的不应使人惊奇，相反这完全符合规律的。

这最早的二篇文章表明了量子电子学发展的开端，初步的成就促使其进一步的发展。早在1955年，就有一个新的获得负吸收<sup>[3]</sup>的激励方法。这种方法对建立新型量子仪器方面得到了进一步的发展和采用。在电子顺磁共振现象<sup>[4,5]</sup>的基础上，为了在无线电波段中建立量子放大器，激励方法也不例外地得到了发展和采用。

在无线电波段中创立了微波激射器以后，很快地将在光学波段建立量子振荡器。但是未能做到，它们在经过5—6年以后才建立起来。怎样来解释呢？这里有二大困难。第一个困难是那时没有光学波段共振器，和第二个困难没能提出在光学波段得到反转集居数的方法和具体的系统。

先是停留在共振器问题。众所周知，无线电技术是从掌握了长波开始了自己的发展，采用自感线圈和集中电容形式的共振器。在这种情况下，共振器的大小要比波长小很多。当进入短波时，开始采用电容共振器，即封闭腔。这些共振器的大小可与长波相比较，显然，用这些共振器不可能发展到很短的短波范围，其中包括光学波段范围。

在1958年曾提出一种称为开式共振器，以便在短波范围内创立量子振荡器<sup>[6]</sup>。在文章<sup>[7]</sup>中较详细地分析了这样的光激射器共振器，实际上，这就是法布里—珀罗标准具，但是，无线电技术的途径可以提出这样的系统作为共振器。后来，与平面镜一样开始运用球面镜。现在开式共振器已广泛地运用于光激射器。其尺寸比波长大得多，也曾提出在亚毫米（远红外）波段<sup>[6]</sup>，在红外和光学波段<sup>[7-10]</sup>中获得负吸收系统。这些工作促进了进一步发展较短波和光学波段方面的工作。可是只有在1960年才创立了第一台光激射器<sup>[11]</sup>，用闪光灯激励的红宝石作工作物质。

在掌握光学波段以后，开始考虑掌握X射线波段。这里产生的一些困难，对光学波段也同样存在。应该建议一些新型的共振器，能指示于可以用来得到负吸收的系统。然显X射线激射器尚未创立，我们也想尝试这个任务，但碰到的困难是很大的。事实上，在X射线范围内，激发能级的寿命是很短的。可以认为，只有寿命来确定线宽。这时的吸收系数可以很简单的形式表明：

$$\alpha = \frac{\lambda^2}{4\pi} (n_1 - n_2), \quad (5)$$

式中 $\lambda$ ——波长， $n_1$ 和 $n_2$ ——相应于低和高能级的粒子数密度。由公式表明，吸收系数很快随波长的缩小而下降。这是极不利的情况。事实上，对振荡器的工作， $\alpha$ 值应为厘米<sup>-1</sup>的数量级。假如 $\lambda=1$ 埃，则在高能级的粒子数密度应不小于 $10^{17}$ 厘米<sup>-3</sup>。高能级的寿命为 $10^{-16}$ 秒。然后我们应在一秒钟内扔下 $10^{33}$ 粒子数/厘米<sup>3</sup>。对这样的任务，存在显著的困难。但即使在X射线范围内建立不起激射器，量子电子学的成就仍是很巨大的。

现在光激射器和微波激射器的工作的波段是很大的，假如不久以前远红外波段未曾掌握，

那現在很快就能掌握實際上可以用微波激射器和光激射器得到從最低的無線電頻率到紫外的輻射。整個量子振盪器的工作在於，在負吸收的介質中，由於場的密度大，感應輻射的幾率控制了自發躍遷或無輻射躍遷。不僅如此，例如，現在可以從紅寶石振盪器中得到這樣的能量密度，使多量子過程的幾率成為可比較的，或者超過一個量子過程的幾率。這是一種新的質的飛躍，它使各種類型導致有利的結果，首先可以估計出紅寶石光激射器在一個平方厘米內可給出最大的功率值。該功率等於  $10^{11}$  瓦特/厘米<sup>2</sup> [12]。在此功率的情況下，同時吸收三個紅光量子投到導帶區的電子的上的幾率是很大的，停止了場進一步地發展。對三個量子過程，損耗的增長與能量密度的立方成比例，即與場的關係很大。

激射光線的強電場可使分子電離，離解，以及擊穿固體。多量子過程不是經常帶來不利的（例如，阻止光激射器給的最大功率）；它們可以對進一步發展量子電子學開闢完全新的可能性。這個有意義的，原則上新方向是關係到建立利用雙量子躍遷的量子振盪器。1963年在蘇聯 [13] 而不是在美國 [14, 15] 已指出建立這樣的振盪器的可能性。這樣的振盪器的想法在於，假如在具有能量差  $h\nu$  的二個能級之間存在反轉了的集居數，則在  $\nu_1$  和  $\nu_2$  二種頻率上就可能振盪。故

$$\nu_1 + \nu_2 = \nu \quad (6)$$

其中  $\nu_1$  和  $\nu_2$  頻率可以重疊，但一般來說，他們是任意的，只是闡明了公式 (6) 的關係。

如上所述，這樣的振盪器的工作與雙量子的躍遷有關，假如場的密度很大，則躍遷的幾率很大。對這樣的振盪器的自激發，應借助別的振盪器在  $\nu_1$  或  $\nu_2$  頻率中建立很大的起始能量密度，只有在這樣的振盪器自激發以後，可以取消外場。在這裡我們可以找到類似的無線電波段上的一般電子管振盪器，假如在振盪器上開始以一定大小的外力來影響，在某些條件下，振盪器可自激發。

這樣的振盪器有二種特點：它能比一般的光激射器保證場密度有較快的增長，並在保持公式 (6) 關係的條件下，有可能得到任何頻率。

要建立在給定的輻射頻率上工作的振盪器，尚需進一步擴大光激射器的應用範圍。

### 參 攷 文 獻

- [1] Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, ЖЭТФ 27, 431 (1954)
- [2] J. V. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, Phys. Rev. 95, 282 (1954)
- [3] Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, ЖЭТФ 28, 249 (1955)
- [4] N. Bloembergen, Phys. Rev. 104, 324 (1956)
- [5] H. E. D. Scovil, G. Feher, H. Seidel, Phys. Rev. 105, 762 (1957)
- [6] А. М. Прохоров, ЖЭТФ 34, 1658 (1958)
- [7] A. L. Shawlow, C. H. Townes, Phys. Rev. 112, 1940 (1958)
- [8] Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов, ЖЭТФ 37, 589 (1959)
- [9] A. Javan, Phys. Rev. Letts. 3, 87 (1959)
- [10] Ф. А. Бугаева, В. А. Фабрикант, О среде с отрицательным коэффициентом поглощения, в сб. памяти Г. С. Ландсберга «Исследования по экспериментальной и теоретической физике». М., Изд-во АН. СССР, 1959, стр. 62
- [11] T. H. Maiman, Brit. Comm. and Electr. 1, 674 (1960)
- [12] Ф. В. Бункин, А. М. Прохоров, ЖЭТФ, № 4 (1965)

[13] A. M. Прохоров, А. С. Селиваненко, Авторское свидетельство от 24 декабря 1963 г. № 872303

[14] P. P. Sorokin, N. Braslau, IBM. Journ. 8, 177(1964)

[15] R. L. Garwin, IBM Journ. 8, 338 (1964)

譯自 УФН, Том 85, вып. 4 (Апр. 1965) 599—604

胡靜芬譯, 沃新能校

## 空間光通訊展望

B. C. 包沃茲

我們先考慮一個論題，到目前為止，很少有工程師涉及過它，這便是光的光子結構概念。任何光源產生的並不是連續的輻射，而是巨大數量的、分立的光能量“包”。這種包稱為光子。與每個光子相關的能量隨波長的增加而減少，因此，我們可以斷言，紫外光子的能量比較紅外光子的大。所以，對於給定的功率，紅外光源產生的光子比紫外光源多，這叫做光子能量效應。

這種推理同樣可以一絲不差的用於微波波源，它產生的光子甚至比紅外光源還多。給定時間內產生的光子數目很重要，因為這最終將決定信息傳遞的速率。顯然，微波源具備這種優點。

### 發射器孔徑的限制

如果要想儘可能地提高發射器波束的功率密度（如果需要作長距離應用，這種要求是必然的），則發射器孔徑的面積必須減至最小。但這個“最小面積”究竟有多小呢？夫琅和費的衍射理論作了回答：波束的角寬度 $\theta$ 正比於 $\lambda/\alpha$ ，其中 $\lambda$ 是輻射的波長，而 $\alpha$ 是發射器孔徑的寬度。無論是工作在大約1厘米波長的工程師或光學波段的物理學家，都很熟悉這種限制。因此，我們得到結論（這也是問題的疑難之處），對於給定的波束角寬度，微波發射器孔徑的大小，約為其對應的光學發射器的一千倍，這便需要一個龐大的裝備。若考慮到所有空間工作元件在重量上的嚴格控制，便能明顯的看出光激射器具有很大的優點。

### 參量和系統元件的選擇

我們將考慮輻射背景、系統元件和最佳波長的選擇，並試圖根據現有的知識來證明每一種選擇的正確性。下文各段中，儘可能給出定量的估算，使對所作的選擇有一具體了解。

### 背景問題

任何通訊系統都存在“背景噪聲”。噪聲通常是由外部和內部噪聲源產生的，所收到的信號的“質量”與噪聲有關，並稱為信噪比(S/N)。幸運的是，一種可能的內部噪聲來源（發射器的）在所論的情況下是很小的。光激射器的重要特性之一，是在其光束中產生的低“噪聲”與其