

微波量子 放大器及振荡器

J. R. 辛 格

科 学 出 版 社

59

27

73.459

7

微波量子放大器及振荡器

J. R. 辛 格 著

凌君达 林福成 译
郑一飞 蔡希洁

范 果 健 校

科 学 出 版 社

1 9 6 3

J. R. SINGER

MASERS

John Wiley and Sons, Inc.

1959

內 容 簡 介

本书共分七章。介绍了感应发射和吸收,微波量子振荡器,固体物质中的电子顺磁共振,二能级固体微波量子放大器及量子振荡器,三能级腔式微波量子放大器,以及行波式微波量子放大器等。分析和讨论了有关的理论问题。各章末均附有英、俄文原始参考文献。书末附有近期参考文献。

本书适合于大专水平的读者,是一本学习微波量子放大器及振荡器的入门参考书。

微波量子放大器及振荡器

J. R. 辛 格 著

凌君达 林福成 译
郑一飞 蔡希洁

范 果 健 校

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可證出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

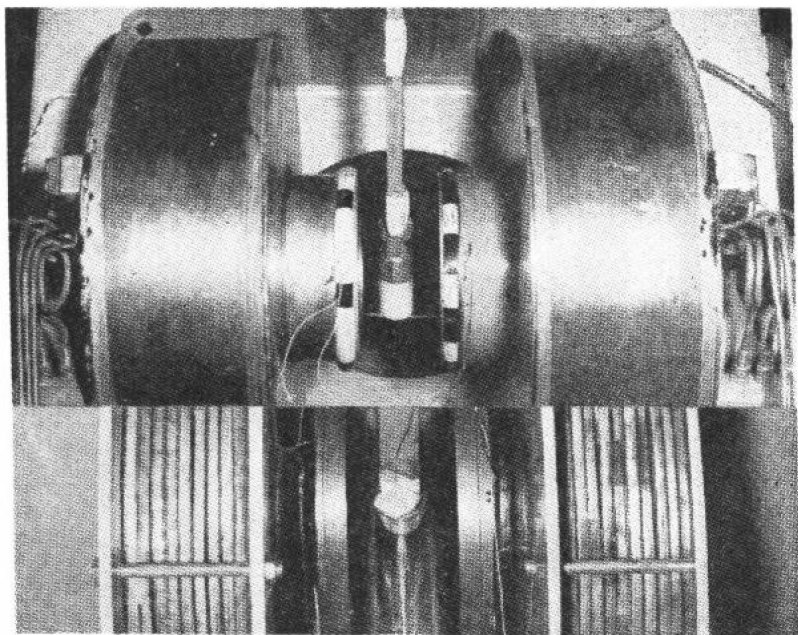
*

1963 年 6 月第 一 版 书号: 2740 字数: 119,000

1963 年 6 月第一次印刷 开本: 850×1168 1/32

(京) 0001—5,000 印张: 4 7/8 插页: 1

定价: 0.85 元



卷头插图：在作者的实验室里的两台实验微波量子放大器。照片上部是在 15.2 厘米 (6 吋) 电磁铁之间的绝热快速通过二能级微波量子放大器用的一个镀银玻璃腔。照片下部表示在 28 厘米 (11 吋) 电磁铁之间的一个三能级微波量子放大器。紧挨着三能级腔的上方是一块方解石晶体 (用于二能级实验)，再上方是用来作三能级微波量子放大器实验的淡红色红宝石晶体。

譯 者 序

本書介紹的微波量子放大器及微波量子振盪器是量子電子學研究的主要內容之一。量子電子學或稱量子無線電物理學是在波譜學、光譜學、無線電電子學的基础上發展出來的一門新的邊緣學科。內容正在不斷豐富。大體上可以這樣說：它是研究和應用電磁波與物質的微观系統相互作用的共振現象，並從而研製出相應的受激發射器件（簡稱量子器件）的一門學科。上面說的電磁波包括射頻無線電波、微波、紅外線、可見光等甚至於可能包括波長更短的波段；微观系統是指分子、原子、離子內部的電子以及在固體內部的電子等等；共振現象是指能級間的感應躍遷如核磁共振、電子自旋順磁共振、分子的振動與轉動的共振吸收與發射等等。由於量子電子學利用了受激發射的特點，有可能用微波量子放大器及微波量子振盪器來解決無線電電子學中過去沒有很好地解決的兩個關鍵問題：極微弱無線電訊號的放大和頻率的極高穩定度；前者與無線電導航、定位、射電天文、宇宙通訊等方面有關，後者則與多卜勒導航、空間制導、脈碼通訊、導彈軌道參數測量及發射時間的精確控制等方面有關。近年來研製成的光量子振盪器，由於它發出的光具有頻率的單色性、高度的相干性和方向性，因此蘊藏着廣闊的應用前景。從亞毫米波直到可見光甚至可能到波長更短的波段，這些在無線電電子學上還是空白波段。要填補這些空白波段，用量子電子學的方法，提供了比較有效的途徑。隨着量子電子學的發展，近代國防武器的性能及通訊效率將得到提高。從基本理論方面來看，量子器件對驗證愛因斯坦相對論及精確測定長度和頻率方面可能作出貢獻。

本書是根據 J. R. Singer: «Masers» 1959 年版本翻譯的，又根據 1961 年 В. С. Зуев, Н. В. Карлов, Т. А. Шмаонов 的俄

譯本《Мазеры》——Квантовые усилители и генераторы 作了校訂，并补充了注解及俄文参考文献。由于量子电子学这门年輕的学科发展得十分迅速，微波量子放大器及振蕩器的新进展未包括在本书內。为了弥补这一缺点，在本书后面补充了一些近期的书籍及文献供有兴趣的讀者进一步学习参考。

本书原名《Masers》，是英文 Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation 字头的縮写。原义为微波受激发射放大。在英文文献中称量子振蕩器也用这个字。本书描述的量子器件包括两部分：即放大器及振蕩器，所以书名譯为微波量子放大器及振蕩器。在正文里，則根据描述的具体器件相应地譯为微波量子放大器或微波量子振蕩器。

为了便于讀者查閱有关参考文献，避免譯名的不統一，引起混淆，所有外国人名一律仍用外文。

对于初学微波量子器件的讀者來說，本书是一本入門的参考书。

本书由凌君达(第一、五章，附录)，林福成(第二章)，蔡希洁(第三章)，郑一飞(第四、六、七章)合譯。由范果健校訂。限于我們的水平难免有不恰当甚至錯誤的地方，請讀者批評指正。

俄 譯 本 序

“分子放大器和振蕩器”，“量子(或量子力学)放大器和振蕩器”以至于“Мазер”这些术语仅仅还是在 1954 年才首次出现在科学文献上。分子放大器和振蕩器的术语是 Басов 和 Прохоров (苏联科学院列别捷夫物理研究所) 提出的。他们还首先提出了借助于“激活的”分子束产生和放大无线电波的新方法。术语 Мазер 是英文名称：“Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation”的第一个字母组合成“Maser”的译音，它是美国物理学家 Gordon, Zeiger 和 Townes (美国哥伦比亚大学) 提出的。苏联和美国各自独立地，几乎同时在同一原理的基础上，做出了氨分子束振蕩器。请苏联读者注意 J. R. Singer 的专论的俄译本同样也被译者称为 Мазеры，除了很少的例外，这个术语常常使用在所有正文中，虽然这个名称也保留在非俄文版的书中，但是在翻译时，我们认为在各处按照意思，用“量子振蕩器”或者相应地用“量子放大器”这些词来代替这个术语是适当的。

在无线电技术和物理学的边缘产生的新方向发展上，在广泛使用量子力学方法以及广泛使用目前已称为量子无线电物理方法的发展上，首批量子振蕩器和放大器(利用氨分子束的)的创制给了巨大的推动力。

量子顺磁放大器的使用，使得地面上，在厘米波和分米波的长的波段中，获得较普通接收机灵敏度提高 100 倍的效果。灵敏度这样极大的提高，在雷达、无线电导航、射电天文学、宇宙通讯以及一系列其它科学技术领域开辟了巨大的可能性。从另一方面说，

1) Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, ЖЭТФ, 27, 431 (1954); ДАН СССР, 101, 47 (1955); Disc. Farad. Soc., 19, 99 (1955); УФН, 57, 485 (1955); ЖЭТФ, 30, 560 (1956).

高精度度的分子和原子頻率标准在計时学中將創造完全新的条件。天文学家有了自己的时鐘，而这种鐘的運轉与天体的运动无关，因而現在已經发现并且开始研究地球自轉的不均匀性，分子振蕩器高的相对稳定度使得能够开始通过实验来验证广义相对論关于时鐘的運轉和重力場依賴关系的結論。

在量子无綫电物理学发展的現有水平上，出現了利用量子系統的感应輻射产生和放大亚毫米波以及紅外波¹⁾的可能性，这种可能性引起了人們巨大的兴趣。首次証明这种波段展寬在原則上的可能性的理論工作成为这个发展方向的推动力^{2,3,4)}。

应当指出：本书是世界文献中第一批两本專門講述量子放大器和振蕩器的专論之一⁵⁾。按作者自己的話說，作者的目的是給予学科緒論性的叙述，他力求以明显的方式，用最一般的形式提供所講述的材料，因此，在书中沒有严格的物理現象的数学分析，而量子放大器和振蕩器的作用正是建立在这些現象的基础上。作者基本上仅仅限于定性的結論，而书中所有的定量計算都是簡單的例証。实验仪器的描述更是表面的。作者認為：这样的叙述無論如何也不能滿足专家或者是詳細掌握学科的讀者的要求，因此，书中所有最本質的地方都提供了相应的原始文献。

从英文版出版到現在的期間，可以想到無論是在理論方面，还是在实验上都获得了許多新的結果，因此在編譯者的附注中，在相应的地方，提供了若干新的原始文献。由于量子无綫电物理学的迅速发展，这些工作的数量是十分巨大的，因此在将来無論什么时候也不应希望会把所有做过的工作都完整的反映出来。要熟悉講述量子放大器和振蕩器以及参量放大器的文献，1959年10月前

1) Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов, УФН, 72, 161 (1960).

2) А. М. Прохоров, ЖЭТФ, 34, 1658 (1958).

3) A. L. Schawlow, C. H. Townes, Phys. Rev., 112, 1940 (1958).

4) Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов, ЖЭТФ, 37, 587 (1959).

5) 实际上和本书同时出版了澳大利亚作者 Г. Троуп (G. Troup, Masers, London, 1959) 的小册子，該书也已譯成俄文，并将近期出版——俄譯本注。已出版——譯者注。

发表的关于这些问题的书刊简介目录可以帮助读者¹⁾。本书由三人翻译：

В. С. Зуев (第二、三章和附录)

Н. В. Карлов (第一、六、七章)

Т. А. Шмаонов (第四、五章)

Ф. Бункин

1) Trans. I.R.E., MTT-8, №2, 222 (1960).

原 序

本书的题目为微波量子放大器和振荡器，即以感应发射效应原理工作的放大器。这个领域起源于 C. H. Townes 在哥伦比亚大学的工作，他和 J. P. Gordon, H. J. Zeiger 共同提出，并且设计和研制了第一台量子振荡器¹⁾。这是一个氨分子系统，限于十分低的工作功率。此后，1956 年哈佛大学的 Bloembergen 建议在分子放大器中，使用顺磁固体这种想法大大地增进了微波量子放大器研制的可能性，因此引起各大学及工业部门研究室在这方面进行了极为活跃的研究和设计的计划。

本书的目的是对这个题目作一引论。我是从经典力学和量子力学两方面的观点来讨论这原理的，虽然力图简化，但难于确定做到的程度。本书简短地描述了氨分子束微波量子振荡器，并从理论上讨论了磁性原子束系统²⁾，后者主要是为了作为一种启发。有一段讨论了关于光激励的频率标准。所以包括了这一课题是由于这器件的潜在重要性。

二能级微波量子放大器提供了获得亚毫米波相干源的可能性，它占有一章的篇幅。按历史发展讨论了三能级腔式微波量子放大器。列举了一些有数值的例子，使读者可以获得实际工作的良好概念。最后一章讨论了行波式微波量子放大器的原理和实验结果。附录对于设计微波量子放大器是相当有用的：因为它扼要地讨论了两种有用的技术(等频曲线和多重激励方法)。

幸运得很，微波量子放大器的研制进展得非常迅速。唯一的缺点是由于印刷需要时间，使得消息不可避免地落后于发展几个月。因为本书只是作为引论而并不求其完整；我也不准备作任何

1) 见俄译本序——俄译本注。

2) 作者把磁性原子理解为磁矩不等于零的原子——俄译本注。

付印前的修訂。

尽可能地将参考文献目录列出来，虽然它离完整还差很远。我希望没有一个对发展微波量子振荡器和微波量子放大器有过贡献的人感到被忽视¹⁾。为了适合引論的性质，使这书的份量小一些，所以很多有趣的現象只能作简单的討論。

全书都用高斯单位，这实际上是与这领域內所发表的文章所用的单位是一致的，将它轉化为 MKS 制是不方便的，因为在与其它資料对比时将发生困难。严格地說，本书的許多部分应当用磁場 B 代替 H ，但是为了和一般实用一致，我还是用了 H ，并以奥斯特为单位。

有时給出計算，是为了在說明中增加具体的例子，所以得到的結果只以数量級表示。因为在这领域中理論与实验的符合很少优于百分之五，一般应滿足于近似的結果。

J. R. 辛格 (Singer)

1959 年 5 月 11 日。

加里福尼亚大学，貝克萊。

1) 截止 1959 年 10 月的有关微波量子放大器和振荡器以及順磁器件的論文目录发表在 Trans. I.R.E., MTT-8, №2, 222 (1960)——俄譯本注。

目 录

譯者序	vii
俄譯本序	ix
原序	xiii
第一章 引言	1
第二章 感应发射和吸收	7
2.1. 引言	7
2.2. 他激振子	7
2.3. 感应发射	8
2.4. 吸收	9
2.5. 爱因斯坦关系式	9
2.6. 量子力学微扰处理	12
2.7. 偏振辐射	15
2.8. 负温度	18
2.9. 放大	19
2.10. 摘要	20
第三章 气体微波量子器件(量子分子振荡器及放大器)	22
3.1. 引言	22
3.2. 氨分子束量子振荡器; 聚焦	22
3.3. 氨分子束量子振荡器; 振荡条件	24
3.4. 氨分子束量子振荡器; 输出功率	27
3.5. 氨分子束量子振荡器; 腔的设计	29
3.6. 氨分子束量子振荡器; 线宽和稳定度	30
3.7. 氨分子束量子振荡器; 无规噪声	33
3.8. 磁偶极子及其它气体量子振荡器	34
3.9. 光激励频率标准	37
第四章 固体物质中的电子顺磁共振(EPR)	41
4.1. 引言	41

4.2. 实验观察	43
4.3. 电子顺磁共振的经典描述	46
4.4. 弛豫时间	51
4.5. 线宽	54
4.6. 晶格电场	57
4.7. 自旋哈密顿量	60
第五章 二能级固体微波量子放大器及量子振荡器	71
5.1. 引言	71
5.2. 180° 脉冲反转	73
5.3. 绝热快通过 (AFP) 的磁反转	78
5.4. 突然倒转场方法	83
5.5. 振荡和放大	85
第六章 三能级腔式微波量子放大器	88
6.1. 引言	88
6.2. 理论; 反转	89
6.3. 输出功率	91
6.4. 适用的晶体	94
6.5. 激励功率	98
6.6. 增益和带宽	99
6.7. 微波量子放大器的噪声	105
6.8. 实验设备	112
第七章 行波式微波量子放大器	121
7.1. 引言	121
7.2. 设计	122
7.3. 慢波结构	125
7.4. 实验结果	128
附录 A 三能级微波量子放大器的自旋粒子方程	130
附录 B 三能级微波量子放大器的激励方法	132
附录 C 用等频曲线确定晶体的工作点	135
附录 D 微波量子放大器和参量放大器	138
符号和缩写表	139
常用物理常数的数值	140

参考文献(附于各章末)

一般参考文献	141
近期参考文献	142

第一章 引 言

微波量子放大器或微波量子振荡器 (Maser) 是一种以感应发射为基础工作的装置。虽然它的基本工作原理已为所有的二十世纪的物理学家所熟知。为了实际获得放大作用还需要很多关于特殊材料和特殊技术的知识。这些知识在几年前微波量子器件第一次出现之前, 一直都没有获得。下面简短地描述基本原理, 以后还要更详细的讨论。

原子和分子一般是处于一定的能级或能量状态中, 对于一个孤立的原子要改变它的状态, 必须从电磁波中吸收一个光子或者放出一个光子。这个条件是由能量守恒和动量守恒原理得出来的。假定起初原子是在上面的能级, 当原子“看到”一个具有适当的频率和适当的方向的电磁波时, 它将被感应或受激发射一个光子, 而落到一个适当的较低的能级上。电磁波非但不因刺激而损失能量; 它反而获得了被发射出来的光子的能量。因为光波永远和物质相互作用着, 这样的过程不断的在我们周围发生。与此同时物质也得到能量; 原子吸收了光子而被激发。因而, 自然界的光子就没有净放大过程。

在一个量子放大器中, 相对于发射过程, 必须取消或者减少吸收过程。把分子都集合在较高的能级上就可以做到这一点。然而这是不容易得到的; 本书的大部分篇幅是专描述如何获得高能态分子系统的方法。

光波与无线电波除了频率不同以外是完全相同的, 注意到这点是很重要的。光波在频率上比微波要高几十万倍的数量级。所以, 感应发射和吸收的规律可以同等地应用在这两种类型的波上。这就是得到放大的感应发射原理(用微波)。

Gordon、Zeiger 和 Townes^[1] 做成第一个工作系统, 他们造出

“Maser” 这个字代表了“微波受激发射放大”。利用的物质是氨分子束，以静电场将它的较高能态的分子自较低能态分离出来。激发态的分子通过具有适当频率的微波谐振腔（约 24,000 兆赫或波长 1.25 厘米），并且能在这频率获得振荡或放大。因为工作频率是基于氨分子的本性，是不可能调的。所以氨分子束量子振荡器的主要用途是作为“时钟”或频率标准。在这方面它是现有的最精确的标准。虽然功率输出只有毫微瓦，但作为频率标准是足够的。

当人们了解了以量子放大器来作微波放大器的可能性之后，就有人建议和试验其他一些方法。其中最重要的和最成功的是以顺磁晶体为激活元件（active element）的固体微波量子放大器¹⁾，顺磁原子很象微小的旋转磁铁。浸入液氮中可达很低温度，此时磁性原子与热振动相对地隔绝，这隔绝的效应是使得原子停留在某一能态的时间延长了。需用低温是晶体结构本性所要求的。

当一个顺磁晶体放在磁场中，磁性原子只能假定采取一定容许的能态。在正常的平衡条件下，处于低能态的原子比高能态的原子多。要获得量子放大作用，必须使这种状态反转。已经建议了四种使能级粒子分布反转的方法。这些是：Bloembergen 建议的三能级方法²⁾，Bloch 的绝热快通过过程，Hahn 的 180° 脉冲反转，Pound 与 Purcell 的场的突然反转等。在这些方法中，三能级方法是最有现实意义的，因为它可以使量子放大器连续工作。其他的方法是脉冲式的。第五章，第六章将较详细的讨论这些反转系统。这里提到只是作一介绍。

一旦能得到在能级上粒子数的反转，可以在某一频率上发生放大或振荡。而此频率是由磁场数值和包含晶体的谐振回路的谐振频率所决定的。频率的上限是由在亚毫米波段内很难获得足够高 Q 的微波结构所限定的。从这一点显示出量子放大器在扩展可

1) 在俄文文献中，常把固体量子放大器称为顺磁放大器。在某些情况下，我们同样也使用这个术语——俄译本注。

2) 三能级的方法是由 Н. Г. Басов 和 А. М. Прохоров 首先提出的（见本章文献[2]）——俄译本注。

用的無線电波段方面将起重要的作用。

在二能級工作和在三能級工作的固体微波量子放大器都已制成，它們所用的頻率為 300 兆赫到 10,000 兆赫，帶寬為數兆赫時得到的增益為 1000 倍 (30 分貝)，由實驗決定的這種放大器的噪声為 2°K 的數量級^[3]。

量子放大器件的特性是相當特殊的。它是一個突出的低噪声放大器，有可能將以前在噪声背景中消失了的信號檢波出來。理論和實驗的觀察都顯示出，相對於現有的網絡，微波量子放大器噪声的影響可以忽略不計。使放大器工作在溫度接近 0°K ，可以減少熱噪声。事實上，固体微波量子放大器不是在室溫工作的，這是優點也同時是一缺點。其他的放大器都不在液氮溫度工作，略加思索就可以說明。電子管需要從加熱的燈絲上獲得電子流，晶體管要在 300°K 工作才能使電子進入導帶。因為微波量子放大器只有自發發射過程所產生的極少量的噪声，而冷卻裝置又屏蔽了放大器，使它与熱噪声隔離開，所以整個系統幾乎是無噪声的。

另一方面，不論是在家庭或電子儀器商店都不會有液氮這種商品，所有的固体微波量子放大器都要很費功夫才能裝置起來。在許多情況，這種耗費是值得的，低噪声放大是科學研究工作中的基本要求。另外微波量子放大器工作在液氫或液氮溫度也是可以實現的，雖然這樣會犧牲一些帶寬或增益^[4]。

噪声系數的測量有時有點誤差。最近人們已經對參量放大器發生了興趣，它也能作低噪声放大。然而目前參量放大器還不能接近量子放大器的噪声溫度，主要的原因是它的工作溫度比量子放大器高。這樣它們和其他的網絡一樣受到熱噪声擾動的影響。放大器工作在極低溫度可以在低噪声的環境中進行觀測。

下面是發明微波量子放大器的簡史，雖然認為是確實的，但十分可能，有些文獻遺漏了。微波量子振蕩器的輪廓性建議是由 A. H. Nethercot 代表 C. H. Townes 在 1951 年 5 月在依里諾大學的一次亞毫米波會議上提出的。隨後在哥倫比亞輻射實驗室 1951 年 12 月 31 日的季度進展報告中，又有氣體束器件的建議的