

从微波到光

中国科学院
电子学研究所

59

73057
62
無線电电子学知识丛书

2

从 微 波 到 光

黃 宏 嘉 著

人 民 郵 電 出 版 社

内 容 提 要

本书是“无线电电子学知识丛书”之一。书中主要介绍微波的内容、特点和发展等方面的知识，分节讲述微波电子器件、波导管、空腔、微波元件和微波中的新技术，也谈到了光量子器件、准光和光技术的問題。

本书可供微波专业的管理人员、非微波专业的技术人员、初学微波的同志以及有一般无线电知识的学生和无线电爱好者阅读。

从 微 波 到 光

著 者：黄 宏 嘉

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四六条13号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店 北 京 发 行 所

經售者：各 地 新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1965 年 5 月北京第一版

印张 2 24/32 页数 44

1965 年 5 月北京第一次印刷

印刷字数 62,000 字

印数 1—9,200 册

统一书号：15045·总 1454—无 418

定价：(科 4) 0.30 元

編者的話

无綫电电子学是一門发展极为迅速的科学技术，在我国社会主义建設的很多方面都有广泛的应用。在今天，从事无綫电电子学的专业队伍正在不断扩大，各种工、农业生产和科学实验中要求学习和运用这一門技术的人也日益增多。为了使无綫电电子学更好地为我国社会主义建設服务，加强普及无綫电电子学知識已經是一件十分迫切的事情。为此，中国电子学会决定成立“无綫电电子学知識丛书”編輯委员会，組織編写这套丛书，分册介紹本学科的各项基本知識、实际应用和发展趋向。我們希望努力做到概念正确清楚，理論联系实际，讲述深入浅出。主要讀者对象是无綫电电子学方面的管理干部和初級技术人員，其他专业的电子技术人員，以及有一定基础的无綫电爱好者。

我們热烈希望广大讀者共同推动这一項工作，提出需要編写哪些书籍，并对已出版各书的内容和写法批評指正。来信請寄北京东四 6 条 13 号人民邮电出版社图书編輯室。

“无綫电电子学知識丛书”編輯委员会

前 言

“无綫电电子学知識丛书”編委会要我編写一本关于微波发展概况的小册子。1962年，电子学会組織过几次綜述性知識讲座。其中有我曾作过一次題为“微波的内容、应用和发展”的报告。1963年年末，我又曾为科学出版社編輯室的同志作过一次关于微波发展概况的介紹。这本小册子就是在这两次报告的基础上經過綜合、整理和补充而写成的。

談到微波的发展，就不能不涉及到“光”。因此，我就以“从微波到光”为題来叙述一下微波发展的輪廓。

这本小册子是为非微波专业和有一般无綫电知識的广大讀者（包括初学微波的同志）而写的。在很短的篇幅中，不容易写得很全面，只能重点地談几个問題，介紹一些关于微波的基本概念。虽然也談到光，但主要还是讲微波。如果讀者翻到最后一頁时，对微波发生了一些兴趣的話，那么，我写这本小册子的目的就达到了。

作 者

目 录

編者的話

前言

一、微波的特点和内容	1
二、微波和光的沟通	6
三、微波的产生	9
四、波导	17
五、空腔	32
六、微波元件	36
七、微波鉄氧体	45
八、参量电路	54
九、微波量子器件和光量子器件 (微波和光激射器)	60
十、准光与光技术	71
結束語	82

一、微波的特点和内容

和大家都很熟悉的无线电长波、中波及短波一样，微波也是一种电磁波。所谓“微”，显然是指微小的意思。因此，微波就是指波长很短（也就是频率很高）的电磁波。

长和短，高和低都是相对的概念。为了说清楚这个概念，最好举出实际的数字。这里，让我们拿微波同大家都熟悉的工业用电（市电）和无线电中波广播的频率与波长作一比较。

表 1.1 频率和波长的比较

	频 率	波 长
工 业 用 电	50 赫（每秒周数）	60,000,000 米(60,000 公里)
无线电中波广播	300—3000 千赫	1000—100 米
微 波	300—300,000 兆赫	1—0.001 米(或 1 米—1 毫米)

这个表清楚地说明了微波的含义，不必再作什么解释了。

微波既是一个频率很高的波段，同时也是一个频率很宽的波段。它所包括的频带比下面频率较低的所有波段的频带加在一起还要宽约一千倍。为方便起见，通常将微波划分为分米波、厘米波和毫米波等几个波段。从 10 分米到 1 分米（10 厘米）的波（频率为 300—3000 兆赫）叫分米波。从 10 厘米到 1 厘米的波（频率为 3000 兆赫到 30 千兆赫）叫厘米波。从 10 毫米（1 厘米）到 1 毫米的波（频率为 30 千兆赫—300 千兆赫）叫毫米波。

然而，仅仅用频率或波长范围来说明微波的特点还是不充分的。因为频率范围并不是微波所独有的特点，其它的波段也

都有它們自己的頻率范围。那么，究竟为什么单单要把微波从电磁波的頻譜中划分出来加以研究呢？为了回答这个问题，让我们再来談談微波在电子学方面的深刻意义*。

从电子学的观点来看，說微波的波长很短，不仅是和它以下各个波段相比較而說的，同时还意味着，它的波长和地球上很多物体的尺寸相比要小很多，或者在同一数量級。微波波长比物体尺寸大很多的情况虽然也有，但这种情形是比較少見的。

当波长远小于物体（如飞机、船只、火箭、建筑物等）的尺寸时，微波的特点就和几何光学很接近。利用这个特点，就能在微波波段制成方向性极高的天綫系統，如抛物面反射鏡。当波长和物体（如實驗室中的无綫电設備）的尺寸有相同的数量級时，微波的特点又与声波接近。因而，微波技术中所用的許多元件都可以在声学器件中找到相应的东西。例如，微波所用的波导有如声学中的传声筒，号角天綫有如喇叭，各种形式的空腔有如不同的乐器。

作为微波波长比外界尺寸大很多的例子，可以举出微波越过小物体边缘或通过小孔和縫隙所发生的繞射現象。这和光中的繞射現象也是相似的。

对于普通无綫电波來說，情形就不一样。这时，无綫电波的波长比物体尺寸大很多的情形是更多見的。和空間尺寸相近的情形是个別的。至于波长远小于物体尺寸的情形就更少見了。

微波在电子学上的另一个特点是微波的电磁振蕩周期（ $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 秒）很短，已經和电真空器件中电子在电极間飞

* 关于微波在物理学上的特点，以后在第七节中再来叙述。

越所經歷的時間（即渡越時間）具有相同的數量級。正是利用這個特性，才研制出一系列的新型微波電子管。

微波還有一些其它的特點，如分米和厘米波段以及毫米波段的幾個特殊波長（8 毫米，3 毫米）的電磁波并不由高空大氣游離層反射，而可以毫無阻礙地透過這些游離層。因此，對於人類來說，微波波段是電磁波頻譜中的一個宇宙“窗戶”，它給宇宙通信、導航、定位以及射電天文學的研究指出了廣闊的前途。

此外，微波在生物學和醫學等方面也有特點。因為這方面的研究還不很成熟，這裡就不多敘述了。

考慮微波問題時總的思路和較長波的不同點，主要是電磁場的概念更加重要了。在較長的無線電波段，只是在研究天線的輻射問題時才必須利用場的概念和方法，至於處理其它問題則主要是利用電路的概念和方法。然而，到了微波波段，如果不利用場的概念，那麼即使是微波技術中的最基本元件（波導、空腔），也將得不到解釋。因為微波問題主要是研究場的問題，所以微波設備的空間結構比較長波段的更為重要。此外，設計微波電子管時，一般總是同時考慮到電子管的外部電路（空腔、波導、輸入和輸出耦合元件等），不象通常的電子管那樣可以單獨分開來進行設計。然而，儘管“場”的概念在微波問題中顯得突出重要，但這並不意味着“路”的概念就沒有用了。事實上，許多微波問題（無論是波導傳輸，或是微波管），常常是從場的分析開始，然後歸結為路或傳輸線的問題來處理。這樣作不僅簡化了問題的分析，同時還對理解微波問題的物理意義帶來很大方便。

微波，作為一門學科來說，包含有微波理論和微波技術兩方面的內容。微波電動力學是微波技術的理論基礎，它是經典

电动力学和电磁波理論发展的最高峰。微波电动力学包括微波場論和微波电子学两部分，主要研究在微波波段电磁場的一般問題以及电磁場和运动电荷之間相互作用的一般規律。微波技术的主要内容是研究这一波段的电磁波的产生、放大、发射、接收、傳輸、控制和測量等方法。

微波这門学科具有技术科学的特色，它一方面以基础科学为基础，一方面又与生产实践有密切联系。微波理論一旦脫离了生产实践，就会失去它的生命力；反之，微波的科学实践如果离开了微波理論的指导，也很难走得远。

微波的发展和客观的实际需要密切联系着，它是无綫电电子学发展的必然結果。大家知道，掌握愈来愈短的波长（或愈来愈高的頻率），这是无綫电电子学发展的一个基本趋势。作为自然科学的探索工作，不断地掌握新的电磁頻譜本身就具有基本的意义。从实用的观点来看，提高頻率是若干技术部門，特别是通信技术的客观要求。原因是，人們不仅对通話路数的需要不断增长，而且对传递具有大信息容量的信号的需要也不断增长（人們不仅需要傳送电话，还需要传电视；有了黑白电视，又希望有彩色电视……。这些都含有更大的信息容量）。信息占有一定的頻帶寬度；如电话占几千赫，而电视則占几兆赫。因而，信息愈多，愈是要求更高的頻率来載运。提高頻率同时也是雷达技术的客观要求。这是因为，雷达发射机发出的电磁波必須是尖銳的定向波束，才能更好地分辨出被探测的物体的方向，并有可能接收到足够的从远方物体反射回来的信号功率。因为天綫尺寸必須比波长大若干倍，才有較好的方向性，所以只有利用波长短的电磁波（微波）才可能制出方向性高而尺寸又不过大的天綫系統。为了提高雷达的分辨率（以致不仅能够确定目标的方位和距离，还能够看到被探测物体的形

状)，所用的波长要短到毫米波。

說到微波的实际应用，現有的应用已經是非常多了，新的应用还不断在扩大。首先，微波在国防上最重要的应用是雷达和导弹控制。雷达是在第二次大战时期发展起来的一門技术，正是由于雷达的实际需要，才推动了微波技术的飞速发展。在国民經济中，微波的最重要应用是多路通信。微波多路通信的主要形式是中继通信，它是指工作在微波波段的一种无綫电通信系統。所以称为中继，是因为这种系統是一条由彼此相隔視綫距离（40—60公里）的一連串中继站所組成的綫路。另一种重要的多路通信方式是散射通信，它可以在几百甚至上千公里的远距离內（利用厘米波、分米波或米波）进行有效通信而不需要中继站。

除了雷达和多路通信以外，微波还用于航空和海运中的导航系統。近年来，还用于空間通信和跟踪。此外，微波在工业、工程和工艺学等方面也有着广泛的应用，例如利用微波来測量金属加工表面的光洁度。在科学研究中，微波技术也占有很重要的地位，例如，原子能研究中一种不可缺少的設備“加速器”就是微波技术高度发展的結果。

微波不仅是一門日新月异的尖端学科，它的应用正在不断扩大，同时，它和几乎所有近代尖端技术和学科都发生极其紧密的联系。随着这門学科的飞速发展，微波的一部分內容在和物理学的某些分支相結合的基础上，已經逐漸从原来的微波領域中划分出来，形成了若干新的科学分支，如微波波譜学、量子电子学、微波半导体电子学等。在近代自然科学中，微波发展的快慢对很多学科都起着重要的影响。

二、微波和光的沟通

大家知道，电磁波在自由空间中的传播速度大约等于每秒 3×10^8 米。这个数字最早是麦克斯韦从理论上推算出来的，随后又为赫兹在实验中所证实。引人注意的是，这个数字恰好等于光速（人们早就用实验方法测定过光速的准确值）。这件事实不应该看成是偶合，因为，从辩证唯物论的观点来看，自然界的

现象不是互不相关的，而是相互联系着的。现在我们知道，根据麦克斯韦的电磁波理论，光也是一种电磁波，不过它的波长很短，并且可以引起人们的视觉。

以后，人们做了许多实验，不仅证实了光是电磁波，而且还证明后来发现的伦琴射线（即X射线）和γ射线等都是电磁波。所有这些电磁波在本质上完全相同，只是在频率或波长上有差别。因而，可以按照它们的频率或波长排列起来。这种排列就称为电磁波谱，如图2.1所示。

从电磁波谱看出，在微波和可见光之间存在着表现为红外线的电磁波。比可见光频率更高（或波长更短）的电磁波是紫外线、伦琴射线和γ射线。红外

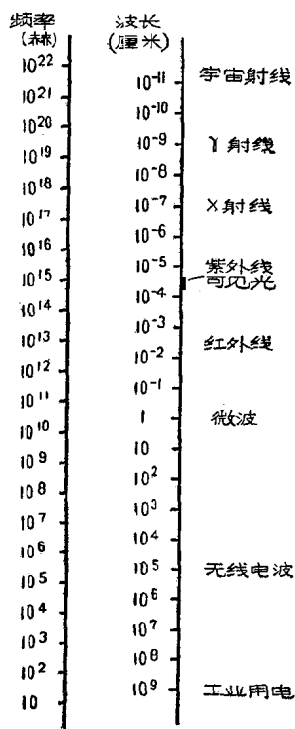


图 2.1 电磁波谱

綫、可見光和紫外綫这三部分也常常合称为热輻射。除了可見光以外，所有电磁波都是人眼所不能看到的。人眼能够看到的可見光的波長約在 7600 埃到 4000 埃之間*，只占电磁波譜中很小一部分。現在所知道的波長最短的电磁波是 γ 射綫，波長約在 0.1 埃以下。

在光和包括微波在內的无綫电波之間，除了頻率高低或波長長短的差別以外，在过去还有另一个十分重要的差別。这就是，利用各种电磁振荡器产生出来的无綫电波都具有較好的相干性（所謂相干性是指波的頻率相同、振动方向相同、相位相同或相位差保持恒定）；但过去利用熾热物体中大量分子和原子的运动状态发生变化而发射出的光則是非相干波（分子和原子的运动变化是无規的，因而它們发出的光具有不同的頻率、不同的振动方向和不同的相位关系）。正因为存在着这样一个差別，所以光波虽然在本质上和无綫电波并没有什么不同，但在过去它却不能被当作波長更短の无綫电波来加以利用。

現在，上面所說的光和无綫电波在相干性上的差別已經不存在了。1960年，利用量子电子学的方法（參看这本册子的第九节）第一次获得了相干光。在电子学的发展中，这真是一件帶有革命性意义的創举。人們說，这个創举簡直可以和現代的空間技术与原子能应用相媲美。

其实，利用量子电子学方法来产生的电磁波，最早并不是在可見光波段，而是在 1.25 厘米的微波波段（1954）。近三十年来微波的发展趋向之一是不断地提高振荡頻率或縮短波長。在这方面，人們主要采取两种途径：一种是在各种型式微波电

* “埃”是光学中慣用的单位。1 埃 = 10^{-8} 厘米。近年来，从微波技术的角度出发，也常常用兆赫或毫微米等单位来表示光的頻率或波長（可見光的頻率約在 300~750 兆赫或波長約在 760~400 毫微米之間）。

子管的原有基础上将管的尺寸尽可能縮小（同时改进工艺、材料和設計），另一种途径是利用量子电子学的方法来产生各种频率的电磁波。当人們从毫米波段开始进入亚毫米波段（波长短于1毫米）时，由于技术上的困难，进展的速度不得不迟緩了下来。从微波方面看，波长的“前綫”大約在1毫米的数量級。然而，人們一方面繼續將波长的这个“前綫”向前推进，另一方面却没有被它束縛着。如上面所說的，在1960年人們越过了微波和紅外綫之間的空隙而直接占領了光*。在科学发展上，这可以說是一次从量变到质变的飞跃。

目前，微波和紅外綫之間的未占領的空隙其波长范围大約是从1000到100微米。虽然占領这个空隙并不如想象那样簡單，还需要付出巨大的劳动，进行不懈的尝试（目前看来，在这一波段，量子电子学方法仍然是最有希望的），然而，人們从不怀疑，这个窄的空隙終于会被占領，微波和光終于会全部連通起来。

关于占領可見光以上的电磁波譜的問題，已經提上了研究的日程。已經有人研究如何利用产生光的方法（量子电子学的方法）来产生 γ 射綫。

可以确信，在不久的将来，人們将会占領整个的电磁波譜（长久以来，这一直是一个理想，这个理想很快就将变为现实）。那时，科学研究的領域将是无限广闊，人們將可以充分利用整个电磁波譜各个波段的独特性能（从工业用电、无綫电长波、中波、短波、超短波、微波、紅外綫、可見光、伦琴射綫，直到 γ 射綫），創造出各种非常有用的新設備和新系統。目前，自然科学的发展正处在这个新的变革的前夕。

* 为簡單起见，从現在起，如果不作另外的說明，我們所說的光就是指相干光。

三、微波的产生

在以上两节中，我們描述了微波和光的一个輪廓。現在讓我們来談談有关微波和光的若干具体問題。首先是：微波是怎样产生的？

大家知道，頻率很低（50赫）的工业用电是利用发电机来产生的，而一般說的无綫电波則是一直等到电子管发明后才被产生出来。普通电子管的基本工作原理是利用栅极、阴极間的电場变化来控制电子流的密度。这种原理也可以称为“密度調制”。

利用普通的电子管来产生电磁振蕩，是否有可能不断地提高振蕩頻率，一直高到微波波段呢？大家知道，电子管振蕩器的振蕩頻率 f 决定于和电极相接的諧振电路（由綫圈和电容器組成）的电感 L 和电容 C ：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.1)$$

为了提高頻率，自然應該减小电感和电容。但这是有限制的。因为，即使不再外接綫圈和电容器，普通电子管电极引綫的电感和电极間的电容也要成为限制頻率提高的因素。另一个困难的問題是，当頻率提高到微波波段时，由于电磁振蕩周期已經短到和电子在电子管电极間的渡越時間在相同的数量級，密度調制的工作方式已經失效了（电子流的密度来不及随着电极間电压的强弱而变化）。】

面对着提高頻率和引綫电感与极間电容以及电子渡越時間的影响的“矛盾”，最初，也曾有人认为用普通电子管来产生足以利用的微波功率是不可能的。然而，很多人并没有被困难束

縛住。事物总是在发现矛盾和解决矛盾的过程中向前发展的。上面所說的矛盾終於在新的科学实践中得到了解决。这里，人們采取了两种截然不同的途径。

一种途径是在原有的基础上来改进电子管的结构。为了避免引綫电感和极間电容的影响，人們用空腔諧振器来代替以往由綫圈和电容器組成的諧振电路，并且将电极制成圆盘形或圆柱形，以便和空腔諧振器相配合而成为后者的一部分。为了减小渡越時間的影响，可以适当縮短电极間的距离，并在电极上加上可以經受得住的較高的电压。这种类型的微波电子管（如玻璃灯塔管和金属陶瓷管）一般工作在微波范围内波长較长的分米波段。1963年文献的报导說，由于采用了新型结构、材料、新的装配与排气工艺，从而获得了比以往高得多的阴极发射，已經在8—12千兆赫波段制成了功率輸出为瓦級、頻率可在 $\pm 10\%$ 范围内調諧的三极管（12千兆赫时的效率为3%）。

另一方面，人們又发现了另一种和以上所說完全不同的新方法。这种方法的基本概念是，不去設法減短电子的渡越時間；恰恰相反，正是利用电子在电极間有較长渡越時間这一事实来控制电子的运动速度，从而产生高頻率的振蕩。这种新的工作原理就称为“速度調制”。利用这种原理，人們制成了一系列的新型微波电子管，包括速調管、磁控管和行波管，它們一直是微波管的主要型式。下面，讓我們来談談这些微波管的基本概念。

首先來說明速度調制的原理。从能量的观点来看，所有的微波电子管都是依靠运动电子和交变电磁場发生能量的相互轉換而工作的。無論放大管或振蕩管，它們的作用都是將外加直流电源的功率轉換为高頻功率。根据能量守恒定律，如果运动电子被交变电磁場加速，那么，由于速度 v 加大而电子的动能

$\frac{1}{2}mv^2$ (m 是电子质量) 也随着加大, 运动电子将从交变电磁场取得能量。反之, 如果运动电子被交变电磁场减速, 那么电子的动能由于速度降低而减小, 运动电子将把一部分能量交付给电磁场。由此可见, 为了将运动电子的动能 (这部分能是由直流电源供给的) 转换为交变电磁场的能量, 就必须使运动电子落到受交变电磁场减速的区域。」

但是, 如果从阴极发射出的电子群是均匀分布在电磁场中的, 那么, 虽然平均有一半电子落在减速场中, 微波电子管仍然不能工作, 因为有另一半电子落在加速场中, 因而交付给交变电磁场的能量等于从交变电磁场取得的能量, 即平均没有能量的交换。由此可见, 为了使微波电子管工作, 还必须使尽量多的电子集中在交变电磁场的减速区域。」

从以上讨论可以理解, 在微波电子管中必须完成两个物理过程: 第一个过程是使从阴极发射出的均匀电子注 (即一连串向前运动的电子) 聚集成为向前运动的“一团团”的电子群; 第二个过程是使所有的电子群落在交变电磁场的减速区域。用术语来说, 这两个过程分别称为“集聚”和“减速”。

上面叙述的就是微波电子管的速度调制原理。现在来分别叙述各种速度调制的微波管。

▲ **速调管** 图 3.1 示出了一个双腔速调管的基本结构。从左边阴极发射出的电子为栅极电压所聚焦 (在栅极上加有低的正电压); 栅极还同时起着控制电子注中电子数 (即电流密度) 的作用。顾名思义, 双腔速调管有两个腔 (空腔谐振器); 左边的是“输入腔”, 右边的是“输出腔”。腔上加有高的正电压。右端是一个收集极 (集电极), 它的功用是将飞过两个腔的电子收集起来从而完成电流的闭合回路。

双腔速调管通常是作为放大管用的。高频信号从左边的腔