

科技学术论文集

物理及其应用

2006

$E=mc^2$

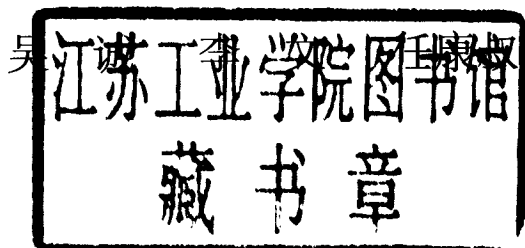
原子能出版社

科技学术论文集 (2006)

物 理 及 其 应 用

主 编：宫爱玲

副主编：郑红勤



原 子 能 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数

科技学术论文集. 2006 年/云南省科技学术交流中心

主编: 宫爱玲等编. —北京: 原子能出版社, 2006.7

ISBN 7-5022-3694-5

I. 科… II. ①云… ②宫… III. 科技学术—文集

IV. N53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 074154 号

科技学术论文集 2006 年

出版发行 原子能出版社 (地址: 北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 王裕新

责任校对 鲁玉琼

封面设计 杜 娜

责任印刷 杨厂生

印 刷 云南师范大学教育学院印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16

字 数 348.8 千字

印 张 13.625

版 次 2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5022-3694-5

经 销 全国新华书店

印 数 1—500 定 价 50.00 元

前言

没有今日的基础科学，就没有明日的科技应用，……可以想象，我们今天的基础科学将怎样地影响 21 世纪的科技发明。

-----李政道

物理学属于基础科学的范畴，与其它基础科学的不同在于它研究自然界中物质的最基本、最普遍的运动形式和规律，物理学所研究的这些运动，普遍地存在于其它复杂的、高级的运动形式中。物理学的研究与发展极大地推动着技术和社会生产力的进步，技术和生产力的进步又进一步促进了物理学的发展，并产生许多新的分支和应用领域。

本次研讨会由物理科学学术委员会主办，云南省科学技术交流中心承办，自筹备以来得到社会各界的大力支持。在此期间，收到论文 50 余篇，经优选与加工，编辑成《物理及其应用》一书，由原子能出版社出版并奉献给与会代表和相关作者。全书共收录论文 45 篇，内容涉及到物理学理论与发展、分子物理学、原子物理学、原子核物理学、物理电子学、光学、纳米技术、应用物理学与工程技术、物理教学研究与教学改革等，既有基础理论研究，又有应用研究，还涉及人才培养和教学改革问题。全书材料丰富、内容新颖、覆盖面广、信息量大，其中一部分论文属于国家自然科学基金重点基金项目、国家自然科学基金项目、省部级自然科学基金项目和教育部留学回国人员实验室建设和科研经费资助项目，论文的研究层次和研究水平都较高，从一个侧面反映了我国目前从事物理与应用研究学者的研究动态和研究成果，具有很好的实用价值和借鉴作用，必将对物理学及其应用技术的研究与发展，对物理教学研究与改革起到积极的促进作用。更加可喜的是论文作者中出现了一大批留学回国人员、年轻的博士和硕士，昭示了我们的事业兴旺发达、后继有人。

在本书的编辑过程中，广大论文作者、原子能出版社、云南省科技学术交流中心等单位的专家和工作人员为本书的出版做了大量的工作，付出了辛勤劳动。在此云南省科技学术交流中心谨向他们表示衷心的感谢。并希望从事物理及相关技术的专家学者对本书提出宝贵意见。

云南省科技学术交流中心

2006 年 7 月

目 录

· 综述 ·

爱因斯坦与统一场论.....	王 勇 谢敬新 (1)
一种新型的微波器件—微波功率模块 (MPM)	杨景华 王 勇 (5)
太赫兹技术发展评述.....	阮 望 王 勇 丁耀根 阮存军 (10)
高科技之光——同步辐射.....	李忻琪 (16)

· 理论研究及探讨 ·

用逃逸电子输运研究托卡马克等离子体中内部磁扰动.....	郑永真 骆翠贤 齐昌炜 丁玄同 邴文忠 (20)
MEH-PPV 中的链内激发态与链间激发态	孔 凡 袁仁宽 (26)
用磁通法快速确定等离子体位置的研究	袁保山 游天雪 杨青巍 (32)
论物质运动的耦合性及其基本理论	童景山 (36)
Pr:YIG 中分子场对 Pr^{3+} 离子磁矩的影响	夏 天 张国营 薛刘萍 殷春浩 (40)
The Relativistic Effect on Electron Acceleration in the Relativistic Overdense Plasma.....	Xingyu Jin Xijun Qiu Chunhua Shi Ruxin Li (44)
在非线性系统中的微观粒子的特性和非线性量子力学.....	庞小峰 (49)
一维半壁无限高势阱中束缚态粒子的能级和归一化波函数.....	尹建武 (54)
质心运动守恒条件下的位移计算问题	冷水根 杨国华 陈年凤 (58)
确定合力作用线位置的一种简便方法	冷水根 贺文彪 吴晓君 (61)
聚合物光学多稳态输出特性	冯军勤 周誉昌 郭天葵 吕 华 (64)
全气相碘化学激光器的理论模型	华卫红 袁圣付 王红岩 (70)
一类叠加势的 Klein-Gordon 方程束缚态的解析解.....	胡先权 殷 霖 (74)
粒子今论	陈理士 (78)
太阳将在六年后发生超新星爆发吗?	李淑玮 陈理士 (85)
亚光子粒群波理论与实验.....	张崇安 (89)
利用 Matlab 语言模拟混沌图的研究	蒋林华 刘水珍 (98)

· 实验研究及应用 ·

BEPCII 六极磁铁磁场测量	张继东 周巧根 刘涌涛 (108)
P 沟和 N 沟 MOS 场效应管的辐照研究	牟维兵 徐 曦 (115)
电子束聚焦的误差分析与研究	江洪建 盛 飞 周惠君 (120)
放射性气体 ^{127}Xe 反应堆辐照实验研究	伍怀龙 龚有进 郝樊华 刘晓亚 唐元明 (126)
室温下 II-VI 族纳米晶体在 Si 衬底上的化学自组装	
....徐岭 赵伟明 郑正 孙萍 李卫 马懿 张宇 马忠元 徐骏 黄信凡 陈坤基 (132)	
纳米多孔气凝胶绝热特性研究	
.....倪星元 李 洋 张志华 周 斌 沈 军 吴广明 (137)	
水的纳米结构的发现和它的特点及实验证实	庞小峰 (141)
煤的电子自旋共振与自由基	茹瑞鹏 宋 宁 焦 扬 钮应喜 魏雪松 殷春浩 (146)
ZrO ₂ 的顺磁共振谱	宋 宁 茹瑞鹏 张 雷 吕海萍 殷春浩 (150)
新以太介质在低温超导超流中的应用	陈有恒 (154)
激光能量对激光熔覆组织的影响	郑飞跃 (159)
SESAM 调 Q 的半导体泵浦 Yb:Lu ₂ SiO ₅ 激光器	
.....宋晏蓉 胡江海 苏良璧 徐 军 郭 凯 王勇刚 张志刚 (162)	
用光纤传感器测金属丝的杨氏模量	崔亦飞 周 伟 张 浩 (165)
PWM 大功率开关电源的原理与制作	李 川 郭江黔 (168)
伽利略斜面实验的分析	何述平 (174)
载波对消与微弱振动的微波遥测	钱 鉴 季晓勇 (178)
PET 及其在脑功能成像中的应用	师玉荣 (183)
化学气相沉积制备钨铼合金	马 捷 侯艳艳 张好东 王从曾 (185)

· 教学研究及教学改革 ·

大学物理的主体性教育思想	胡贤芬 (191)
物理实验教学课程体系的设置	李加兴 谭兴文 陈 洪 (195)
物理实验教学与学生创新能力培养	刘存业 谭兴文 陈卫伟 (199)
关于工科大学物理教学改革的几点建议	楼宇丽 伏云昌 李迅鹏 (202)
关于线电荷电场的研究	刘逸鹏 (206)
点光源模型的干涉演示	姜进军 (209)

· 综 述 ·

爱因斯坦与统一场论

王勇 谢敬新

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 爱因斯坦是 20 世纪最伟大的科学家,他坚信自然界中的一切相互作用都可统一成一种作用。统一场论已成为当今物理学研究的主要方向,被喻为科学皇冠上的钻石。本文介绍了爱因斯坦为发展统一场论而进行的长期而又孤独的探索过程,分析了统一场论未能取得最后成功的原因,并对爱因斯坦以后统一场论取得的新进展进行了描述。

关键词 爱因斯坦 统一场论 物理学

1 引言

爱因斯坦是历史上继牛顿之后最伟大的科学家。他是狭义相对论的重要发现者,他对量子论的创立做出了重大的贡献,而广义相对论,亦即现代引力论的建立,则应完全归功于他。从 1905 年划时代的论文《论动体的电动力学》,到 1916 年《广义相对论的基础》的发表,爱因斯坦在两个研究方向上奠定了 20 世纪物理学的基础。一是不变性原理的研究,最终创立了狭义相对论(1905 年)和广义相对论(1915 年)。二是统计理论的研究,其结果导致布朗运动理论(1905 年)、分子大小测定法、光量子假设(1905 年)、首次固体量子论(1907 年)、光的波粒二象性(1907 年)以及导致激光发现的 A、B 系数(1916 年)。最后,在 1925 年,他完成了另一项主要创造性工作,即独立于德布罗意的关于物质波粒二象性的假设。指明不变性原理和统计涨落这两个别出心裁的研究方向,乃是爱因斯坦“前不见古人,后不见来者”的杰作。在 1916 年之后,这两个方向合而为一,成为爱因斯坦探索统一场论的指南。

爱因斯坦从 20 世纪 20 年代起到他 1955 年去世的 30 多年里,一直致力于建立包括引力场和电磁场的统一场论的研究。虽然最后未能获得成功,但他的思想依然左右着基础物理的前沿。他不仅深刻地改变了我们对于空间、时间、运动、能量、光和力这些基本概念的理解,而且还继续以他的精神来激励我们:独立思考、无畏、不受拘束、富有创造力而执着地追求。

2 神圣的追求

在爱因斯坦看来,创立统一场论是发展相对论,特别是发展广义相对论的必然要求。在广义相对论创立之后,人们熟知的电磁场和引力场仍然统一不起来,这是爱因斯坦所不愿意看到

的。既然广义相对论用黎曼几何描述引力场取得了惊人的成就，那就一定能用一种新的几何把引力场和电磁场统一成一个整体。如果能做到的话，这将是一个巨大的进步。爱因斯坦对通过建立统一场论来发展广义相对论充满了坚定的信念，以致在后来把统一场论看成是相对论发展的第3阶段，并为此奋斗了30多年，一直到他生命的终点。

从孩提时代起，爱因斯坦便从对大自然那无限的热爱之中，深深地体会到了自然界的美丽、和谐与统一。他把对于世界统一图景的认识看成是美好的事业。爱因斯坦总是认为，在宇宙神秘面纱的后面，一定有什么东西在深深地隐藏着。当爱因斯坦逐渐掌握了科学知识，了解了大自然的规律后，他对这世界的和谐、统一更是深信不疑。斗转星移，春华秋实，昼作夜息，秩序井然，一切都那么和谐！有时他站在落日余辉中，出神地望着西天的那一轮夕阳、一抹彩云，他为大自然的神秘而感到惊奇。当他在宇宙奥秘中艰辛探索时，他从自然界的统一性中得到的是“壮丽”的感觉。他坚信，物理上真实的东西一定是逻辑上简单的东西。于是，追寻世界的统一性和简单性成了他毕生的事业。

3 孤独的探索

爱因斯坦在统一场论的探索过程中，度过了漫长而孤独的岁月，走过了艰难而曲折的坎坷道路。

其实，在统一场论的探索初期，爱因斯坦并不感到孤独，因为这时也有一些人在进行建立统一场论的尝试。1915年希尔伯特在米勒的非线性电动力学和爱因斯坦1913—1914年工作的基础上，提出一个统一场方案，它在形式上类似广义相对论，内容上则类似米勒的理论。1918年，韦耳提出另一种统一场方案，通过把通常的4维黎曼几何推广，将引力场和电磁场同样地几何化。在韦耳工作的影响下，1921年出现了一系列韦耳统一场的修正方案和爱丁顿的仿射统一场论。1922年，爱因斯坦就卡鲁查的5维场论发表了第一篇有关统一场论的论文，1923年他又转向爱丁顿的仿射场研究，并得出任何广义协变必要求电荷对称性的结论。但在1925年以后，爱因斯坦的想法有所变化，他觉得爱丁顿的方案可能在物理学上给不出更多的新东西，于是试图寻找到另一条出路，这条路径应具有较好的物理学根据。经过几年的努力之后，他在1929年发表了“关于统一场论”的新论文，他曾经以兴奋的心情告诉朋友说“大功告成了”，但事实上情况并没有他想象的那样乐观，这一理论遇到了很大的困难。

再以后，爱因斯坦又致力于推广卡鲁查理论的工作。卡鲁查的方法与其他人不同，他不是建立非黎曼几何，而是把黎曼几何从4维增加到5维。爱因斯坦认为卡鲁查的理论接近实在，专门写了评价这个理论的文章。在卡鲁查的理论由于第5维没有物理意义等困难失败之后，爱因斯坦仍想克服其困难加以推广。自1931年至1941年，爱因斯坦和他的合作者们在这方面作了多次努力，但都未能取得成功。

到了20世纪40年代初，爱因斯坦作了近20年的探索全部失败，但他没有灰心，仍进行新的尝试。1945年他发表了题为“相对论性引力论的一种推广”的论文。一年后他指出，这尝试在逻辑上是令人满意的，但又存在着物理检验上的困难。

爱因斯坦一次又一次地奋起，一次又一次地失败，到1954年，他致力于探索统一场论已有30年之久了。这期间，除参与量子力学完备性争论以及探索引力波和广义相对论运动方程以外，爱因斯坦几乎把他科学工作的全部精力都投入到统一场论的研究上来。然而，爱因斯坦

在独自探索着当时还没有条件解决的难题，远离了当时物理学研究的主流，加上他在量子力学的诠释上同当时占主导地位的哥本哈根学派针锋相对，使他晚年在物理学界非常孤立。然而，爱因斯坦毫不畏惧，毫不动摇地走自己认定的道路，一直到临终前一天，他还在病床上准备继续他的统一场论的数学计算。

4 统一场论无果的原因

在统一场论方面，爱因斯坦始终没能取得成功，这与当时的科学条件是分不开的。在当时人们仅知道两种场，即电磁场和引力场，其它两种场——强作用场和弱作用场并不明确，这是统一场论难以成功的客观原因。以后的事实表明，首先统一起来的并不是引力场和电磁场。爱因斯坦和他的合作者们从几何学的角度考虑统一场论，较多地考虑了事物的时空特性，忽略了物质的量子性，以及他对实验数据视而不见，这可能是未能取得成功的主观原因。

当爱因斯坦致力于建立“统一场论”，实际上是被他自己建立的理论掐死了，他描绘的引力场不可能与电磁场统一。爱因斯坦用3年时间建立了“狭义相对论”，用8年时间建立了“广义相对论”，但却花了30年时间而未能建立“统一场论”，说明他的引力理论存在一些问题。因为电磁场理论已经被实践证明为一种较完善的理论，而两者不能统一，问题只能出在他新提出的引力理论上，沿着这种思路走下去，结果必然碰壁。

爱因斯坦虽然也用几何化的方法来建立统一场论，但他却是企图首先将电磁场和引力场统一成一种几何场，然后再将其与物质粒子统一起来。因为他没有吸收量子场论的理论成果，企图首先将电磁场直接几何化，建立统一描述引力场和电磁场的所谓总场方程，所以他最终没能完成统一场论并不奇怪。

5 统一场论的新进展

在20世纪30年代和40年代，随着弱相互作用、强相互作用以及各种基本粒子的大量发现，统一场论的研究又热门起来了。50年代，海森伯不是从几何学角度，而是从量子场论的角度出发，提出了一种量子统一场论，想用统一的自旋场把各种基本粒子和它们的相互作用都囊括进去，但没有获得决定性的成功。1954年，杨振宁和米尔斯为统一场论开辟了道路。他们推广了韦耳的规范不变思想，提出了杨-米尔斯场即非阿贝尔规范场理论。这种理论与拓扑学中的纤维丛概念有着密切的联系，它虽然在数学上很完美，但在描述各种相互作用时却遇到了困难。三年后，施温格建议一种可能导致弱电统一理论的矢量介子理论。到20世纪60年代，电磁场理论已由20年代的非量子化的相对论性电动力学发展成量子化的量子电动力学（QED），为统一场论的建立奠定了理论基础。1961年，施温格的学生格拉肖发展了一种弱相互作用理论，它同电磁相互作用有惊人的相似之处，并采用四个生成元，即光子、 W^+ 、 W^- 粒子和中性流矢量玻色子。1967年，温伯格和萨拉姆分别独立地采用这四个生成元发展了一种弱、电统一理论。这种统一理论解决了杨-米尔斯理论的困难。70年代以来，不仅弱、电统一理论得到了一些实验的支持，而且描述强相互作用的量子色动力学（QCD）的出现也为统一强相互作用提供了可能性。在量子色动力学中，强相互作用也是非阿贝尔规范场，它存在于强子之间和之中，其规范粒子是胶子，强相互作用是胶子同色荷相耦合而成的。这样，弱、电、强三种相互作用的表现形式是一样的，它们都是规范场。在这个基础上，美国物理学家格拉肖和乔奇等人建立

起了统一描述弱、电、强三种相互作用的大统一理论。

关于四种相互作用的统一，人们发展了超对称、超引力和超弦理论，但这些理论还存在不少困难，在学术界争议也很大。不过，令人欣慰的是，西欧核子研究中心庞大的超同步质子加速器让正反质子对撞并湮没，在 1983 年 1 月首次报道产生了 W^+ 和 W^- 粒子，6 月又报道发现了 Z^0 粒子，这是 20 世纪物理学的最重大事件之一。这三种传播弱相互作用的粒子是温伯格-萨拉姆理论所预言的，它们的产生给弱电统一理论以决定性的支持。就在同一年，丁肇中小组三喷注事例的发现，证实了胶子的存在，从而有力地支持了量子色动力学和格拉肖、乔奇等人的大统一理论。人们可望在四种相互作用的统一方面取得突破，这将对物理学产生举足轻重的影响。

6 结束语

物质世界是统一的，但同时物质世界又是多样化的。统一场论的思想无疑是伟大的，也是正确的。但统一场论的实现未必就一定要按着一个固定不变的模式一直走下去。只要把几何化的引力场与量子化的其它场和物质粒子统一起来进行考虑，我们或许会看到新的希望。

令人欣慰的是，爱因斯坦孤军奋战大半辈子的宏伟目标，在今天已经成为物理学研究的主要方向。许多一流的物理学家为发展统一场论呕心沥血。尽管谁也不敢肯定这一研究一定会成功，但许多人都满怀希望不懈地奋斗着。爱因斯坦对统一性的坚定信念，他那种舍身追求真理、知难而进、敢于与传统观念斗争的精神激励和鞭策着后人不断奋进。物理学正酝酿着又一次伟大的综合——把弱作用场、电磁场、强作用场和引力场统一起来。物理学的每一次大的综合都是对已知理论和实践的大总结，它新的基础上以更简明的形式，更深刻、更本质、更全面地把握物理运动的特征和规律，这对于物理学的发展，对整个科学技术的进步和社会生产的发展都有巨大的推动作用。可以断言，统一场论的成功，将导致物理学一场更伟大的革命，人类的认识能力将达到前所未有的高度，而人类社会也将步入一个崭新的阶段。

一种新型的微波器件——微波功率模块 (MPM)

杨景华^{1,2} 王勇¹

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100080)

(2. 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要 本文详细介绍了微波功率模块 (MPM) 的背景、结构、优点、技术难点、应用以及发展趋势。微波功率模块是半导体器件和电真空器件相结合的产物,它具有高功率、高效率、宽频带、低噪声、小体积和价格的优点,广泛应用于雷达、电子对抗和通信等领域。

关键词 电真空器件 固态器件 微波功率模块 (MPM)

1 引言

微波电真空器件已有六十多年的发展历史,它在军事(如:雷达、制导、电子对抗、遥感、遥控、卫星通信等)和国民经济(如:可控热核反应、加速器、高能物理、散射和通信、广播电视、气象、医学、生物学、化学、工业加热等)等领域发挥了重要的作用。

20 世纪 80 年代初,由于固态器件的迅速发展,微波电真空器件受到了很大的冲击,某些固态器已经在频率比较低的范围内取代了部分中小功率微波电子管。然而,由于固态器件物理本质上的限制,它在高频、大功率、宽频带、高效率等方面存在着很大的局限性。

本文从电真空器件和固态器件在功率、效率、频率和带宽方面的比较开始,对 MPM 的基本概况、优点、技术难点、应用以及现状和发展趋势进行了详细的介绍。

2 MPM 的出现

2.1 电真空器件与固态器件的比较

2.1.2 在功率方面

固态器件的平均功率容量在 1GHz 时小于 100W, 10GHz 时小于 10W, 100GHz 时小于 1W; 而微波电真空器件平均功率容量是半导体器件的至少 1000 倍以上。现代高功率微波器件已经达到了 15GW 的输出功率。

2.1.2 在效率方面

对于固态器件来说,为了达到较大的功率,需要很多固态器件级联,因而降低了效率。目前固态放大器的效率在 P 波段约为 40%~50%, L 波段约为 30%, 在 S 波段仅为约 20%; 而对于微波电真空器件中的行波管,其效率甚至可达到 60% 以上^[1]。

2.1.3 在频率方面

电子的渡越时间是限制半导体器件频率的主要因素,所以为了在较高频率段工作,必须减小极间距离。固态放大器的频率已经达到了 KU 波段,但此时输出功率只有大约 40W,

而且带宽也比较窄^[2]。相比之下,而微波电真空器件的极间距离可以做到半导体器件的 1000 倍,因而可以做到较高的频率段。目前微波管的频率最高已达到了亚毫米波段,输出功率一般在 50W 以上。俄罗斯制成了 1500GHz 的返波管,8mm 波段的微波管已经完全实用化,8mm 雷达已在多个领域中使用,3mm 雷达也在美国海军研制成功。

2.1.4 在带宽方面

晶体管器件本身的频带宽度,有的可达 $50\%f_0$,因而用在固态雷达发射机上可以获得较大的带宽。比如,美国的Teledyne 公司 已经研制出了三个倍频程(2~18GHz)的固态放大器^[3]。但正如上面所说,此时随着频率的增加,输出功率逐渐降低(40W以下)。但真空微波器件中的行波管在达到适当功率(大于50W)时的带宽却是任何其它微波管无法比拟的。对螺旋线行波管而言,一个倍频程,如2~4GHz,4~8GHz,8~18GHz,18~40GHz已经非常普遍,两个倍频程(2~8GHz)的行波管也已生产,国外的实验室已经在试制三个倍频程(2~18GHz)的行波管了^[4]。

2.2 MPM的出现

任何事物总是一分为二的,与固态器件相比,电真空器件也同样存在着很大的不足。比如工作电压高(有的高达几百千伏),体积与重量大,寿命短(最高为几万小时),成本比较高,不适宜批量生产。而固态器件却具有低电压、小体积、低噪声和低成本的优点。例如,与普通的真空发射机比起来,固态发射机的可靠性高,工作寿命长,能瞬时开机和关机,稳定性高,瞬时带宽较宽等等。于是便有人想到能否可以把两者的优点结合起来,克服各自的缺点来形成一种新的器件。因此就有了微波功率模块(MPM)的概念。

3 MPM的概况^[5-9]

3.1 MPM 的组成

微波功率模块的组成框图如图 1 所示:

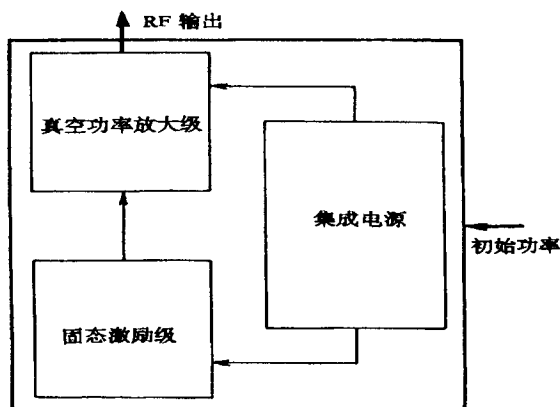


图 1 微波功率模块的组成

前级是高增益的固态放大器(SSA)(噪声低(小于7dB)、体积小),末级是低增益、大功率、高效率的行波管放大器(TWTA)(功率高、宽带、效率高),电源和放大器共同集成在同一个模块上,即集成功率源(IPC)(效率高、体积小且包括射频调制器、控制和逻辑功

能), 在SSA中还包括TWTA增益均衡器, 相位调制器以及温度补偿装置; 这样, 便把二者的优点结合起来, 实现了高功率、高效率、高带宽、低噪声、小体积和低价格, 从而在雷达发射机和通信的应用上具有很大的优势。

3.2 MPM的优点

3.2.1 具有比固态器件更高的功率和效率

MPM采用行波管来输出, 主要是用螺旋线行波管或耦合腔行波管。行波管可以工作在高电压大电流状态, 获得比固态放大器高得多的功率输出。行波管的散热能力也比固态放大器大得多。采用多级降压收集技术, 回收部分电子注的能量, 可极大地提高行波管的效率。例如要在6~18GHz达到100W的输出功率, 若用10W的固态功率放大器合成, 总效率只有15%, 单纯采用行波管, 与电源一起的总效率也只有30%, 而采用MPM, 总效率可达45%。现在的MPM在X波段, 连续波输出功率甚至超过了200W。

3.2.2 具有比行波管低得多的噪声

采用固态放大器作激励源, 一方面降低了行波管的增益要求, 有助于其效率的提高和体积重量的降低, 另一方面可极大地降低整个放大链的噪声系数。大功率行波管的噪声系数都在35dB以上。而在MPM中, 由于前级SSA的噪声系数只有几个dB, 末级TWT只需低增益, 于是使得MPM总噪声只有8dB左右。

3.2.3 频率、带宽以及效率都大于固态器件

由于行波管在高频率和宽带宽方面的优势, 使得MPM的频率和带宽远远大于固态器件。现在MPM的瞬时带宽可以达到一个半频程到两个频程, 甚至可以达到三个频程。在大于1.5倍频程时, 效率大于30%, 在窄带宽时, 要超过50%。随着近年来小型化技术的发展, 50~100W的低压毫米波行波管也达到了Ka和Q波段, 于是MPM可达到毫米波段, 目前的频率达到了46GHz。

3.2.4 体积重量比行波管小得多

对于一般的行波管放大器, 在输出连续波功率为40W, 效率为18%的情况下, 其体积为554.2 cm³。而对于MPM, 在输出功率为100W, 效率为45%时, 体积只有48.4 cm³。

3.2.5 可靠性高, 寿命长

固态激励源的引入, 降低了行波管的增益要求, 同样也降低了对电压的要求, 提高了可靠性, 另外也相应地缩小了管体的长度。在标准的工作模式下, 使用寿命一般可超过15000小时。

3.2.6 适合规模化生产, 降低了成本

由于MPM模块的组件体积小, 易于集成, 因此可以批量生产, 并可降低成本。

3.3 发展MPM的技术难点

3.3.1 行波管在小体积下的性能优化技术

对于小体积的行波管来说, 如何实现高质量高导流系数的电子枪和磁聚焦系统以及为提高效率进行降压收集极的优化是很关键的问题。目前, 可以利用克里斯廷高频系统作用码(CHRISTINE RF interaction codes)对微型螺旋线行波管进行三维模拟, 从而使其达到在功率、效率和带宽方面的优化。

3.3.2 高频谱纯度的高压电源设计

为了提高雷达在杂波谱中检测信号的能力, 需要有很高的频谱纯度, 因此如何设计高频谱纯度的高压电源是很重要的。

3.3.3 低损耗无源元器件的设计

为了降低整个电路的损耗,就要对温度反应敏感的元器件进行不断的改进或者重新设计以减小固态增益放大器和高效率功率源的功率损耗。

3.3.4 小体积 MPM 的散热技术

为了保证 MPM 在小体积和高的功率密度下的稳定性和可靠性,要做好冷却系统的设计,对目前采用的液冷和传导冷却系统不断改进和优化。

3.4 MPM 的应用^[5,7,11]

MPM 因其优越的综合性能和良好的通用性,不仅可广泛应用于雷达、电子对抗、导弹寻的、通信和空间系统军用装备,而且还可用于监控、导航、交通管理、气象和地球资源监测、测量等领域。

MPM 具有的高功率、宽带宽特性;使相控阵天线系统获得很高的 ERP (Effective Radiated Power),从而使雷达可探测非常小横截面积的目标(如战术反弹道导弹),使干扰系统能发射更大的干扰功率。MPM 的高效率、高可靠、高一致性,使相控阵雷达的合成总效率明显提高,体积重量降低,可靠性提高。比如一个 C 波段千瓦级雷达发射机,若用两支 TWT 合成,则任何一支管子失效,发射机功率下降 50%;若采用 MPM,由 48 块模块组成,同样一块模块失效,发射机性能仅下降 2%。

3.5 MPM 的现状和发展趋势^[8,10,12]

自从世界上第一个 MPM 样品被美国 Northrop Grumman Corp 研制成功以后,MPM 的性能有了很大的提高。目前,MPM 达到的频率范围为 2G ~ 46GHz,连续波输出功率超过了 200W,瞬时带宽超过了两个倍频程,其效率在窄带工作模式和宽带工作模式时分别大于 40%和大于 30%。现在研制和生产 MPM 的还有美国的 CPI 以及 Litter 公司等,其产品已在军用和民用方面有了广泛的应用。近几年,MPM 存在的巨大优势也引起了国内很多部门的关注,吸引很多专家进行这方面的研究,如国内的中电集团 12 所和中科院电子所均正进行 MPM 的研究。

未来的 MPM 应充分利用微波电真空器件技术和固态器件技术的发展,在现有的基础上实现更高功率,更高频率,更宽带宽的 MPM,以满足更多领域日益发展的需要。

4 结束语

微波功率模块是半导体器件和电真空器件相结合的产物,它不仅体积小、重量轻、成本低和适合批生产,而且还具有高功率、高效率、高频率、宽带宽、低噪声等优点。它在雷达、电子战、通信等方面的通用性更进一步展现了 MPM 的广阔的发展前景。

参考文献

- 1 rmstrong, C.M.. 60% efficient C-band TWT for the microwave power module[C]. International conference, 19-22 May 1997
- 2 Matthew C. Smith, Sr. Lawrence P. Dunleavy, Comparison of Solid State, MPM, and TWT Based Transmitters for Spaceborne Applications Southeastcon'98. Proceedings. IEEE, 1998 on 24-26 April 1998 Page(s): 256 259

- 3 J.A.Christensen, T.J.Grant, P.M.Lally, P.Puri, G.Dohler, S.Ludvik, MPM TECHNOLOGY DEVELOPMENTS: AN INDUSTRY PERSPECTIVE Microwave Symposium Digest, 1993., IEEE MTT-S International on 14-18 June 1993 Page (s): 115 - 118 vol.1
- 4 M.A. Basten, J. Duthie, J. Hutchins and C.M.Armstrong, Design and Development Of a 2-18 GHz MPM TWT Plasma Science, 20-24 June 1999 Page (s): 137
- 5 廖复疆, 李德章, 微波功率模块: 下一代武器系统的关键电子器件[J].真空电子技术, 1995, (3): 1-5.
- 6 何其文 固态器件、电真空器件的竞争及其产物-微波功率模块 [J].现代雷达, 1998, (2): 73-82
- 7 廖复疆, 大功率微波电子注器件及其发展, [J]真空电子技术, 1999;1: 1-7
- 8 Carter M. Armstrong Advances in Microwave Power Modules Vacuum Electronics, 2003 4th IEEE on 28-30 May 2003 Page (s): 5 - 1-3
- 9 Richard H. Abrams, Jr. THE MICROWAVE POWER MODULE: A 'SUPERCOMPONENT' FOR RADAR TRANSMITTERS Record of the 1994 IEEE National Radar Conference, Atlanta Georgia: IEEE, 1994. 1-6
- 10 T. A. Hargreaves, C. M. Armstrong, R. B. True, R. Watkins, M. L. Barsanti, A. Schram Ku-Band MPM Booster Helix TWT Design and Validation. Vacuum Electronics Conference, 2004. IVEC 2004. Fifth IEEE International
- 11 R. H. Abrams, Jr., and R K. Parker INTRODUCTION TO THE MPM-WHAT IT IS AND WHERE IT MIGHT FIT Microwave Symposium Digest, 1993., IEEE MTT-S International on 14-18 June 1993 Page (s): 107 - 110 vol.1
- 12 Kennedy, J.; Colombo, C.; Development of a low voltage power booster TWT for a Q-band MMPM, Electron Devices IEEE Transactions on Volume 48, Issue 1, Jan. 2001 Page (s): 180-182

太赫兹技术发展评述

阮望^{1,2} 王勇¹ 丁耀根¹ 阮存军¹

(1.中国科学院电子学研究所 北京 100080)

(2.中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要 THz 技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新技术。本文就 THz 波的产生、探测, THz 波的特点及其应用作了较为全面的评述, 介绍了目前 THz 技术在国内外研究进展, 以及未来的发展方向。

关键词 THz 产生 THz 探测 THz 时域光谱 THz 成像

1 引言

太赫兹波 (Terahertz Wave) 通常是指频率介于 300GHz ~ 10THz (波长 1mm ~ 33 μ m) 之间的电磁辐射, 在电磁波谱中位于微波和红外线之间。传统上 THz 波也被称为亚毫米波 (Sub-millimeter Wave) 或远红外线 (Far-Infrared), 它是电磁波谱中唯一没有获得较全面研究的波段, 因此常被称为电磁波的 THz 间隙^[1]。

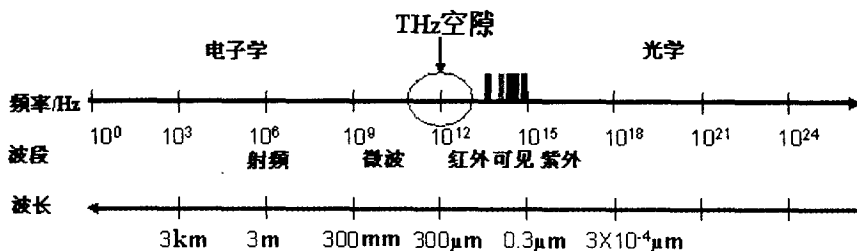


图1 THz 波段在电磁波谱中的位置示意图

近年来, 自由电子激光器和超快技术的发展为 THz 波的研究提供了有效功率源, 使 THz 技术得到了蓬勃发展。下面将 THz 波的产生、探测、特点及其应用作一个较为全面的评述, 并对目前 THz 技术在国内外的发展进行了介绍, 对其未来的发展方向进行了展望。

2 THz 波的产生

THz 波的产生是 THz 技术发展的关键环节。目前, THz 功率源主要有以下几种: 固态振荡器 (Solid State Oscillations)、量子级联激光器 (Quantum Cascade Lasers)、激光激发 THz 辐射源 (Laser Driven THz Emitters) 和基于自由电子的 THz 功率源 (Free Electron Based Sources) 等^[2, 3]。

2.1 固态振荡器

固态振荡器的频率位于 THz 区域的低端, 由于受到载流子在半导体节的漂移时间的限制,

输出功率随频率升高而急剧下降。在 400GHz 时, 它的输出功率为 0.1 ~ 1mW 的量级, 而当频率进一步提高时, 输出功率将随频率 f 的 $1/f^3$ 下降。但由于结构紧凑, 这种器件在安全检查等领域中得到了广泛的应用。

2.2 量子级联激光器 (QCL)

QCL 是最近才发明的光学激光器, 在过去的几年时间里得到了飞速的发展。QCL 在 THz 频率下能达到 mW 级以上的功率输出, 但它必须要在极低温度 (几十 K) 和极高磁场 ($\sim 1\text{T}$) 下才能工作。不能在室温下工作和很难调谐是 QCL 发展存在的问题。

2.3 激光激发 THz 辐射源

激光激发 THz 辐射源采用光波下变换的办法来产生 THz 辐射。具体有两种方案: 光导开关和光整流, 它们是目前实验研究中广泛采用的脉冲 THz 源。这种办法产生的输出功率低, 仅在数纳瓦到几百微瓦之间。

2.4 基于自由电子的 THz 功率源

基于自由电子的 THz 功率源主要有: 自由电子激光器和 THz 电真空器件 (其中包括速调管、行波管、返波振荡器、回旋管和电子回旋脉塞等)。

2.4.1 自由电子器件 (FEL)

采用 FEL 可产生覆盖 THz 频率范围的电磁辐射, 可产生很高的脉冲功率和能量, 但 FEL 需要用加速器驱动, 设备庞大, 造价昂贵, 仅适用于科学研究。

2.4.2 THz 电真空器件

为了使速调管、行波管、返波振荡器和回旋管等电真空器件能够达到微波波段的频率高端, 人们从上世纪中叶就已在开始研究。研究表明, 除回旋管以外, 其它器件均存在随着频率升高而带来的诸如高电流密度、金属壁损耗以及高电场和高磁场等问题。为此, 在频率高于 100GHz 时, 行波管基本不被考虑。

(1) THz 返波振荡器 (BWO)

BWO 是一种慢波结构, 电子螺旋通过一个皱形结构, 在轴向磁场下与返波的第一次空间谐波产生相互作用。能在 THz 频率下产生中等功率 (1 ~ 100mW) 的输出, 但要求的工作电压很高 (1 ~ 10kV) 和工作磁场很强 ($\approx 1\text{T}$)。

(2) THz 回旋管

日本福冈大学远红外发展研究中心研制的回旋管, 其工作频率达 889GHz。采用回旋管可获得大于瓦级的输出功率。

(3) THz 速调管

THz 速调管是一种新型的 THz 功率源。它不仅能在 THz 频段产生 mW 级的功率输出, 而且工作电压低 (通常只有几十至几百伏) 和不需要磁场。这些优点使它成了 THz 功率源领域的一个很热门的研究课题。目前, THz 速调管的研究已经取得了很大的进展, 人们不仅能够制造 THz 速调管谐振腔和高发射电流密度场致发射冷阴极, 而且还开发出了 THz 速调管的注-波相互作用模拟软件。然而, THz 速调管的研究毕竟还处于初始阶段, 尚有许多技术难题如谐振腔和场致发射冷阴极的测试、减少谐振腔内壁的功率损耗等还有待解决。