

# 现代电子工程

第一册

《国防电子工程》编辑部 编

73  
348  
1:1

# 现代电子工程

## 第一册

《国防电子工程》编辑部 编

科学出版社

## 内 容 简 介

《现代电子工程》是一套电子工程的中级科普读物,全面系统地介绍现代电子工程各个领域的基本知识,深入浅出,通俗易懂。本书为第一册,包括第一章至第九章,即总论;通信;雷达;电子对抗;导航;电子计算机;计算机网络;数据处理;显示技术。

本书适于具有高中文化程度的电子工程爱好者、科技工作者、技术管理人员和大专院校师生阅读。

## 现 代 电 子 工 程

### 第 一 册

《国防电子工程》编辑部 编  
责任编辑 陈 忠

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984 年 5 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1984 年 5 月 第 一 次 印 刷 印张: 24 1/4

印数: 0001—11,600 字数: 555,000

统一书号: 15031·362

本社书号: 3512·15-7

定价: 3.00 元

# 目 录

|                               |     |    |
|-------------------------------|-----|----|
| <b>第一章 总论</b> .....           | 魏鸣一 | 1  |
| § 1-1 量子电子学方兴未艾 .....         |     | 2  |
| § 1-2 七十年代电子科学技术的重大突破 .....   |     | 6  |
| § 1-3 数字信息时代 .....            |     | 9  |
| § 1-4 工程中的新问题 .....           |     | 17 |
| 一、如何评价一项工程的优劣 .....           |     | 18 |
| 二、研究设计性工程的管理 .....            |     | 20 |
| 三、如何确定工程中互相关联的许多研制课题的投资 ..... |     | 21 |
| 四、课题管理 .....                  |     | 22 |
| <b>第二章 通信</b> .....           | 孔宪正 | 26 |
| § 2-1 概述 .....                |     | 26 |
| 一、通信的定义及分类 .....              |     | 26 |
| 二、通信、指挥与控制系统 .....            |     | 27 |
| 三、通信系统的组成 .....               |     | 30 |
| § 2-2 信号与信道的一般特征 .....        |     | 34 |
| 一、信号的特征 .....                 |     | 34 |
| 二、信道的特征 .....                 |     | 36 |
| § 2-3 信道调制解调原理 .....          |     | 40 |
| § 2-4 模拟信号数字化原理 .....         |     | 50 |
| 一、脉冲编码调制 .....                |     | 50 |
| 二、增量调制 .....                  |     | 54 |
| 三、差分脉冲编码调制 .....              |     | 56 |
| § 2-5 信道复用原理 .....            |     | 58 |
| 一、频分复用 .....                  |     | 58 |
| 二、时分复用 .....                  |     | 60 |

37796

• i •

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| 三、码分复用 .....            | 68              |
| § 2-6 实际的传输信道 .....     | 72              |
| 一、同轴电缆信道 .....          | 74              |
| 二、微波接力信道 .....          | 75              |
| 三、卫星接力信道 .....          | 80              |
| 四、超短波信道 .....           | 88              |
| 五、其他信道 .....            | 90              |
| § 2-7 交换原理 .....        | 92              |
| 一、电话交换机原理 .....         | 93              |
| 二、交换网 .....             | 99              |
| 三、交换机信号 .....           | 101             |
| 四、数据交换 .....            | 102             |
| 五、数字化交换机 .....          | 103             |
| <b>第三章 雷达</b> .....     | <b>喻家声等 107</b> |
| § 3-1 雷达原理 .....        | 107             |
| 一、雷达的出现 .....           | 107             |
| 二、雷达定位的原理和方法 .....      | 108             |
| 三、雷达的工作波段 .....         | 115             |
| § 3-2 雷达组成 .....        | 118             |
| 一、天馈系统 .....            | 118             |
| 二、发射系统 .....            | 127             |
| 三、接收机 .....             | 132             |
| 四、显示器 .....             | 139             |
| 五、天线波束控制系统 .....        | 141             |
| § 3-3 雷达性能 .....        | 142             |
| 一、战术性能 .....            | 142             |
| 二、技术性能 .....            | 146             |
| § 3-4 雷达体制 .....        | 148             |
| 一、脉冲雷达与连续波雷达 .....      | 149             |
| 二、主动雷达、被动雷达、半主动雷达 ..... | 151             |
| 三、动目标显示雷达与脉冲多普勒雷达 ..... | 153             |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 四、圆锥扫描雷达与单脉冲雷达 .....                | 154 |
| 五、脉冲压缩雷达 .....                      | 156 |
| 六、合成孔径雷达 .....                      | 157 |
| 七、三坐标雷达 .....                       | 158 |
| 八、相控阵雷达 .....                       | 161 |
| § 3-5 雷达分类及用途 .....                 | 162 |
| 一、军用地面雷达 .....                      | 163 |
| 二、弹载雷达 .....                        | 169 |
| 三、军用星载雷达 .....                      | 172 |
| 四、军用机载雷达 .....                      | 177 |
| 五、舰载雷达 .....                        | 186 |
| 六、战术雷达 .....                        | 187 |
| 七、航空雷达 .....                        | 190 |
| 八、航海雷达 .....                        | 190 |
| 九、气象雷达 .....                        | 192 |
| 十、天文雷达 .....                        | 196 |
| 十一、测地雷达 .....                       | 198 |
| 十二、航天雷达 .....                       | 199 |
| § 3-6 雷达新体制、新技术及发展动向 .....          | 201 |
| 一、双波束雷达与频率分集雷达 .....                | 201 |
| 二、固态相控阵雷达与圆顶相控阵雷达 .....             | 202 |
| 三、多基地雷达与其他雷达 .....                  | 205 |
| 四、雷达新技术及发展动向 .....                  | 211 |
| <b>第四章 电子对抗</b> 刘佛华 张梦庚 王继堂 俞永福 李钟凤 | 216 |
| § 4-1 电子对抗在现代战争中的地位和作用 .....        | 217 |
| § 4-2 雷达侦察 .....                    | 220 |
| 一、概述 .....                          | 220 |
| 二、雷达侦察作用距离 .....                    | 229 |
| 三、对雷达的方位侦察 .....                    | 234 |
| 四、对雷达频率的侦察 .....                    | 240 |
| 五、无源定位 .....                        | 247 |

|                              |                |
|------------------------------|----------------|
| 六、雷达侦察的发展趋势 .....            | 251            |
| § 4-3 雷达干扰 .....             | 253            |
| 一、概述 .....                   | 253            |
| 二、干扰方程 .....                 | 262            |
| 三、对雷达接收显示系统的干扰 .....         | 263            |
| 四、对雷达自动跟踪系统的干扰 .....         | 267            |
| 五、消极干扰 .....                 | 274            |
| 六、雷达干扰的发展趋势 .....            | 278            |
| <b>第五章 导航 .....</b>          | <b>于志才 282</b> |
| § 5-1 概述 .....               | 282            |
| 一、无线电导航原理与技术基础 .....         | 283            |
| 二、导航方法 .....                 | 295            |
| 三、无线电导航的发展简史 .....           | 300            |
| 四、选用最合适无线电导航系统的准则 .....      | 303            |
| 五、无线电导航系统的分类 .....           | 306            |
| 六、八十年代航空航海对无线电导航的要求 .....    | 308            |
| § 5-2 地面基准无线电导航系统 .....      | 308            |
| 一、无线电测向系统 .....              | 309            |
| 二、伏尔系统 .....                 | 314            |
| 三、塔康系统 .....                 | 319            |
| 四、康索尔系统 .....                | 326            |
| 五、台卡系统 .....                 | 330            |
| 六、地面导航雷达 .....               | 340            |
| 七、罗兰-A 系统 .....              | 343            |
| 八、罗兰-C 系统 .....              | 355            |
| 九、奥米加系统 .....                | 370            |
| 十、飞机着陆引导系统 .....             | 385            |
| 十一、地面基准各种无线电导航系统性能综合比较 ..... | 391            |
| 十二、其他无线电导航(或定位)系统 .....      | 391            |
| § 5-3 用户基准无线电导航系统 .....      | 397            |
| 一、机载导航雷达 .....               | 397            |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 二、多普勒导航雷达 .....             | 402 |
| 三、船用导航雷达 .....              | 408 |
| 四、联合战术信息分配系统的相对导航能力 .....   | 412 |
| § 5-4 卫星基准无线电导航系统 .....     | 414 |
| 一、概述 .....                  | 414 |
| 二、卫星导航工作原理 .....            | 416 |
| 三、海军卫星导航系统 .....            | 419 |
| 四、导航星/全球定位系统 .....          | 426 |
| § 5-5 无线电导航技术的发展 .....      | 430 |
| 一、无线电导航技术发展中的矛盾 .....       | 430 |
| 二、无线电导航技术的发展方向 .....        | 434 |
| 三、现代主要无线电导航系统的评述 .....      | 438 |
| 四、无线电导航技术发展的特点 .....        | 441 |
| <b>第六章 电子计算机</b> .....喻家声等  | 445 |
| § 6-1 概述 .....              | 445 |
| § 6-2 电子数字计算机的基本原理与组成 ..... | 447 |
| 一、基本原理与结构 .....             | 447 |
| 二、数制和码制 .....               | 452 |
| 三、脉冲技术和逻辑电路 .....           | 468 |
| 四、逻辑代数 .....                | 473 |
| 五、逻辑部件 .....                | 478 |
| 六、中央处理机 .....               | 482 |
| 七、存储器 .....                 | 488 |
| § 6-3 电子数字计算机外部设备与软件 .....  | 505 |
| 一、外部设备 .....                | 505 |
| 二、软件 .....                  | 515 |
| § 6-4 电子模拟计算机与混和计算机 .....   | 523 |
| 一、电子模拟计算机 .....             | 523 |
| 二、混和计算机 .....               | 526 |
| § 6-5 电子计算机的性能评审 .....      | 527 |
| 一、电子计算机的主要性能指标 .....        | 528 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 二、电子计算机的综合指标 .....            | 529 |
| § 6-6 电子计算机在现代社会中的作用与应用 ..... | 530 |
| 一、管理现代化的重要手段 .....            | 530 |
| 二、科学技术现代化的主要支柱 .....          | 530 |
| 三、国防现代化的强大武器 .....            | 532 |
| 四、工业现代化的必要工具 .....            | 533 |
| 五、农业现代化的得力助手 .....            | 533 |
| § 6-7 电子计算机的发展趋势 .....        | 534 |
| 一、巨型计算机 .....                 | 534 |
| 二、微型计算机 .....                 | 537 |
| 三、计算机网络 .....                 | 538 |
| 四、智能模拟 .....                  | 539 |
| 五、下一代计算机的发展趋向 .....           | 541 |
| <b>第七章 计算机网络</b> .....王行刚     | 544 |
| § 7-1 概述 .....                | 544 |
| 一、多计算机系统的发展 .....             | 545 |
| 二、计算机网络与人类社会 .....            | 547 |
| 三、计算机网络基础 .....               | 548 |
| 四、支持计算机网络的技术 .....            | 552 |
| § 7-2 网络构形 .....              | 554 |
| 一、计算机-终端网络 .....              | 555 |
| 二、计算机-计算机网络 .....             | 557 |
| 三、典型网络 .....                  | 559 |
| § 7-3 网络节点 .....              | 562 |
| 一、主计算机节点 .....                | 562 |
| 二、终端设备节点 .....                | 575 |
| 三、通信处理机节点 .....               | 577 |
| § 7-4 数据链路 .....              | 582 |
| 一、信道分类 .....                  | 582 |
| 二、线路终接设备 .....                | 585 |
| 三、链路特性 .....                  | 588 |

|                                  |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| § 7-5 网络协议 .....                 | 594                |
| 一、网络节点功能分层 .....                 | 594                |
| 二、网络协议分层 .....                   | 596                |
| 三、信息格式与信息的流动 .....               | 600                |
| 四、数据链路协议 .....                   | 602                |
| § 7-6 网络性能 .....                 | 605                |
| 一、平均吞吐率 .....                    | 605                |
| 二、响应时间 .....                     | 606                |
| 三、可靠性 .....                      | 608                |
| 四、辅助操作 .....                     | 611                |
| § 7-7 计算机网络的兴起与发展趋向 .....        | 613                |
| 一、计算机网络的兴起 .....                 | 613                |
| 二、计算机网络的发展趋向 .....               | 621                |
| <b>第八章 数据处理 .....</b>            | <b>蔡希尧 629</b>     |
| § 8-1 概述 .....                   | 629                |
| 一、什么是数据处理 .....                  | 629                |
| 二、数据处理的工作过程和系统的组成 .....          | 630                |
| § 8-2 数据处理中的设备和技术 .....          | 633                |
| 一、用于数据处理的计算机 .....               | 633                |
| 二、数据的收集和传输 .....                 | 635                |
| 三、数据的输入和输出 .....                 | 639                |
| 四、数据处理的管理技术 .....                | 641                |
| § 8-3 数据处理系统的分析、设计、发展趋势与应用 ..... | 644                |
| 一、数据处理系统的分析与设计 .....             | 644                |
| 二、发展趋势 .....                     | 647                |
| 三、应用举例 .....                     | 649                |
| <b>第九章 显示技术 .....</b>            | <b>苏水林 王志宝 655</b> |
| § 9-1 概述 .....                   | 655                |
| § 9-2 管面显示 .....                 | 660                |
| 一、阴极射线管 .....                    | 660                |
| 二、字符和线条的产生 .....                 | 666                |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 三、显示数据处理器 .....         | 669 |
| 四、显示数据输入装置 .....        | 670 |
| 五、管面显示整机 .....          | 672 |
| § 9-3 大屏幕显示 .....       | 678 |
| 一、特点、分类与指标 .....        | 678 |
| 二、各类平板显示 .....          | 683 |
| 三、机电笔绘大屏幕显示 .....       | 691 |
| 四、胶片投射大屏幕显示 .....       | 696 |
| 五、热塑料光阀和油膜光阀大屏幕显示 ..... | 702 |
| 六、晶体光阀大屏幕显示 .....       | 708 |
| 七、金属膜光阀大屏幕显示 .....      | 715 |
| 八、液晶光阀大屏幕显示 .....       | 718 |
| 九、激光大屏幕显示 .....         | 720 |
| 十、变色片大屏幕显示 .....        | 736 |
| 十一、投射电视 .....           | 743 |
| § 9-4 显示系统 .....        | 751 |
| 一、显示系统的总体结构 .....       | 751 |
| 二、显示系统的软件 .....         | 753 |
| 三、国外显示系统应用举例 .....      | 755 |
| § 9-5 立体显示 .....        | 761 |
| 一、整体照相 .....            | 761 |
| 二、透镜板立体图片 .....         | 762 |
| 三、偏振光式立体电影 .....        | 763 |
| 四、几种立体电视方案 .....        | 764 |
| 五、全息显示和它的前景 .....       | 765 |

# 第一章 总 论

电子科学技术用于复杂的工程项目，还是这二十来年的事。五十年代后期，美国建成了民航和半自动防空电子工程。随着人造地球卫星的迅速发展，以及电子计算机在实时、事后处理和联线工作中的发挥作用，地面跟踪控制网络日益自动化。国防工程上的需要是对电子科学技术的重大促进，这时算法语言已经初步问世，光受激发射有了重大突破，量子电子学开始大发展，半导体电子技术则进入了微波和集成的领域。六十年代初期，地球与金星间实现了距离为八千六百万公里的双向通信。电子计算机从1946年发明后第一次用于弹道计算时起至今不过短短三十余年，已成为电子工程系统的核心。1946年，美国仅有7%左右的计算机联结成网，此后十年逐步发展到50%。时至今日，计算机已扩展到国防和国民经济的几乎所有方面，无处没有电子工程在工作。过去，仅在国防或国家规模才有力量实现大型电子工程；现在，则由于计算机的成本日益降低，电子技术为更多的人所掌握，它已广泛进入民用和商用领域。六十年代初期，自动化生产控制受到中心计算机费用高和可靠性差的限制，并没有很大进展；但是，随着微处理机和小型机的商品化，现在分级和分布式处理已经成为自动化技术大发展的浩瀚洪流。

一个工程系统的标志是组织起来，即多种技术兼筹并用，多个点站联结成网。科学技术的新成就，是建立新系统的源泉。也就是说，近代电子工程建立在大量基础科研和新技术研究之上。本书共二十五章，除个别章以外，主要是介绍若干

国防电子工程技术。本章的论述，仅涉及七十年代以来发展迅速和有所突破的新兴技术。其中有些还只是近三、四年来的事，虽然其势波澜壮阔，但尚未取得满意的成效。然而，科学技术进步过程中的重重险阻，从来都是一一被攻破，人们的认识在此基础上又上升到一个新的高度，总结新的理论，并为下一个突破准备了条件。

## § 1-1 量子电子学方兴未艾

1954年，人们就曾在氨分子储能条件下，发现了微波在受激辐射状态下可被放大的现象。随后不久，人们又发现了光也同样如此。当活跃的固体、液体或气体置于两个反射镜之间而受激时，光波可被来回反射，成为振荡。这时，光量子与物体的原子互相作用，会产生放大的光束。

其实，光波是电磁波谱的一部分，只不过是波长更短而已。麦克斯韦在1864年提出，振荡的电场可以辐射到空间中去，并推导出他的著名方程式。但一直到他死后八年，也就是1887年，赫兹才用实验证明了电磁波可被反射、折射或极化，以实践证实了麦克斯韦大师的不朽创见。不过，光波的这种现象却先于此而发现。

二十年来，固体、液体、气体及化学激光器，都有迅速发展。根据不同功率、不同使用条件的需要，各种激光器也各自有其用途。但是，目前人们对一般激光器所更关心的是高效率和高功率。例如，对固体激光器而言，需要很高的激发能，功率才能达到它的振荡门限。因此，固体的连续波激光由于效率太低而在应用方面受到限制；反之，脉冲式的大功率激光则较易实现。

不论激光研究工作者或亚毫米波研究工作者，都很注意

远红外波段。激光已能达到 130 微米波长左右,但功率、效率还很低。微波电子管只能达到 1 毫米波长左右,效率也很低。目前,受到各方面重视的电子迴旋分子谐振放大器,在 1 毫米波长时已能产生 100 瓦以上的连续波功率,这是一种逐步缩短波长并与激光会师的很有希望的器件。

所有的电磁波产生器,例如振荡器,其特征是依靠自由电子的作用。在近代理论中,电子具有电荷、质量、自旋等特性。在一个轨道上的自旋速度是不变的,电子是同性相斥、异性相吸的。不仅如此,鲍利不相容原理指出,在一个原子核的外围轨道上,不可能同时有旋转方向相同的两个自旋电子。波尔假说则认为,任何原子都有许多能级,电子吸收了能量就可被激发到高能级,而电子失掉能量时则跃迁到低能级。这就与传统理论认为电子都具有连续能量状态大不相同。

例如红宝石,就是在氧化铝结晶中以铬原子在每 5,000 个铝原子中代换一个。铬原子被激发到高能级时正与绿光和紫光的光子相当,于是红宝石受白光照射时,铬原子吸收绿和紫光,而发出红与蓝光,此即红宝石一般发可见光的原因。在受激辐射放大器中,所谓泵充能,实际上即迫使材料吸收能量以重新分配能级,由近于平衡的条件变化至较高能级。例如,在固体激光器中以光波充能造成能级变换,在气体激光器中使气体经过电场而产生能级变换,或者以磁场影响电子在轨道上的自旋方向以产生变换,等等。氦氖激光器有四个能级。光能使氦原子从第一能级即基级大量激发至第四级,在第四级与氖原子碰撞,氖原子跃迁而降至第三级,随后降至第二级、第一级。由第四级降至第三级时,是产生受激辐射给出能量的主要状态。

单一频率的振荡器,称为单色性极强的振荡器。就激光而言,单色性强虽好,但做到单一频率并不容易。所谓单色性强

还并不是单一频率，而是在一个相当窄的频带中发出了相干光。频带越增宽，相干性越低，单色性就很差了。激光与过去的其他光源相比，单色性要好得多，相干性也好得多；然而，相干性并不是激光的绝对特性。早期的激光器常在几个不同频率上产生振荡，其相干长度就受到约束。

相干性是与时间发生关系的。一个光源发出的光如果经由两条不同路径而到达一点，而且两条路径的长度很接近时，就会发生干涉现象。但如路径很长或两径之差较大，则看不到干涉现象。因为路径一长，光在长时间中已不能保持原有相位。

单色波的幅度永为常数，相位与时间成线性关系。但实际上的光源并非绝对单色，故在谱宽  $\Delta B$  中，相位与幅度都有不规则的变化。而相关时间  $\Delta t = \frac{1}{\Delta \nu}$ ，在这个时间内，波是相干的。 $\Delta \nu$  越小， $\Delta t$  越长。相关函数可以用傅里叶积分式表示

$$r(x_1, x_2, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^T V[x_1(t + \tau)] V^*(x_2, \tau) dt$$

而归一化相关函数为：

$$\frac{r(x_1, x_2, \tau)}{\sqrt{r(x_1, x_1, 0)} \cdot \sqrt{r(x_2, x_2, 0)}}$$

其中  $r$  为位置在  $x_1$  及在  $x_2$  的互相关函数， $x_1$  与  $x_2$  间的时延为  $\tau$ 。两个完全相同的波，归一化函数为 1。两者毫不相关，则归一化相关函数为 0。一般定义“接近相关”的归一化相关函数值为 0.88 以上，此即塞特-泽奈理论。

若一氦氖激光器有较宽的谱宽，即  $5-10^4$  赫，则在  $0.2-10^{-4}$  秒之间，相干长度约为  $5 \times 10^{10}-10^{14}$  波长。所以，相关

函数值是很低的。相干长度长,用无线电技术上的习惯来说,是振荡频谱不纯。但是人们却找到了它的另外一条出路,即全息照相技术、长度计量技术和光谱研究等得到大发展。

光激射放大技术的发展已二十多年了,非常引人注目。几乎时隔不久,就会有人把它应用到又一个新用途或新领域。近几年中,自由电子激光受到广泛注意。能不能更上一层楼,不用特殊激光介质而产生光激射放大呢?

利用强相对论电子注在磁场作用下的受激辐射,产生光辐射增益,是一些科学家在近年观察到的。例如,几年前在美国斯坦福大学高能物理实验室,利用超导条件下的周期横向磁场,观察到磁场中相对论自由电子产生红外辐射,并且在 10.6 微米时有放大作用。周期磁场是螺旋线形超导体,强度 2,400 高斯,场是横向的,小功率二氧化碳( $\text{CO}_2$ )激光沿轴向穿过磁场,并在两端反射镜之间来回反射。同时,同高能物理实验室的超导直线加速器产生 24 兆电子伏的电子注,和二氧化碳激光一起被引导通过磁场,则电子注在磁场中被迫以螺旋运动前进。二者相互作用,光子和自由电子互相碰撞,而产生光的受激放大。测量到由自由电子辐射产生的光受激发射功率为 4,000 瓦。而在 24 兆电子伏时测得其自发辐射功率为  $4 \times 10^{-6}$  瓦,故比自发辐射功率放大至  $10^9$  倍。

由于周期场中发出的受激辐射有可能连续调谐其波长,并给出很高功率。人们认为可望从紫外一直调到红外,效率则比过去激光的产生方法提高三倍。随着强电子注加速器的出现,这方面工作已大量开展,既在红外波长做,也在亚毫米波长做。美国空军的一项研究计划是在减小尺寸、重量方面做工作。

激光能够做到波长可调,能够出大功率,这就有可能出现一种极受世人重视的生产核燃料的方法。因为可将激光频率

调到拟分离的铀原子频率上,然后用它轰击出需要的同位素。即用强激光从稳定的铀<sup>238</sup>(U238)同位素中,分离出较活跃的铀<sup>235</sup>(U235),称为激光同位素分离技术,用以制造浓缩铀。

一般铀矿所含能裂变的同位素铀<sup>235</sup>成份只占0.7%。而用做反应堆燃料的铀所含铀<sup>235</sup>应为3%。用于原子弹则至少应为50%。若使用气体扩散法要做到很高浓度,就需多次分离。次数多寡取决于来料浓度。一般约需分离上千次或更多。所以电力消耗大,投资也大。用强激光制造浓缩铀,从理论上讲可以一次就完成几乎全部铀<sup>235</sup>的分离,至多也不过很少几级分离就可以产生出来。这在小型微量试验中已经成功,但投入工业使用则还有具体问题有待解决,特别是目前的红外激光产生器功率还不够大。据工业界人士估计,建设一个激光浓缩铀厂比建设一个同样产量的气体扩散浓缩铀厂,可节省投资到四分之一至八分之一。其所用电力则仅为气体扩散法的5%,效率比现有的其他方法都高得多。正因如此,强相对论电子注受激辐射就更受到极大的重视,这与激光分离同位素和产生核聚变的前途紧密相关。

## § 1-2 七十年代电子科学技术的重大突破

电子回旋激射放大器的原理虽在1958年就提出来了,但真正能用于毫米波及亚毫米波,产生千瓦以上连续大功率则是七十年代的事。这种放大器,苏联叫做迴旋管,已经比较成熟,能够使用。目前已有各式各样迴旋管样管的报导。许多学者认为,这种弱相对论电子注迴旋激射放大器的理论与实践,已达到普通微波电子器件的水平。但强相对论电子注迴旋激射放大器用于微波,则尚在多方探索之中。实验表明,强相对论电子注的迴旋激射放大器在微波、毫米波能产生极大