

无线电电子学科学技术报告会讲稿

(合订本)

1. 无线电电子学的发展水平和动态
2. 国外无线电元件小型化技术研制工作总况
3. 迅速发展中的量子电子学概况
4. 电子管元件的新发展
5. 信息论与电子学
6. 无线电波传播
7. 无线电元件的可靠性
8. 微波的元件应用与发展
9. 半导体元件的国际动态

中国电子学会

一九六二年

中国电子学学会举办

无綫电电子学科学技术报告会

第一讲 无綫电电子学的发展水平和动态

主讲人 中国科学院电子学研究所 呂保維

无綫电电子学是上世紀末在物理学的基础上发展起来的一門科学，已經有六十余年的历史。它是本世紀內发展最快的科学之一，对于国民經济和国防建設都有重大的作用。最近几年来，国际上无綫电电子学的内容和水平又推进到了一个新的阶段。这个阶段具有一些特別引人注意的特点：

跟着人造卫星、宇宙火箭等人类征服宇宙事业的迅速发展，无綫电电子学已經紧密地与高空大气层和宇宙空間的研究結合起来。从1957年苏联第一个人造地球卫星上天以后，各国电子界就爭先恐后地在空間研究方面进行努力，从各方面提高无綫电电子学的水平，以求更好地为空間通訊、探测和控制等技术服务〔1〕。正是由于近年来无綫电电子学的高度发展，使人們有可能对各类空間探测器进行超远距离的精密跟踪和精密控制。而对宇宙空間所进行的一系列的科学考察，反过来也丰富了无綫电电子学本身的内容。

由于尖端技术中电子装备的特殊要求，使电子元件器件必須能滿足极严格的技术条件：例如体积小，重量輕，功率大，噪声低，頻率高，作用快，稳定性可靠性好，耐振动，耐高温，耐輻射等等。在这些要求面前，电子学工作者从固体物理半导体物理等发展中得到了启发，在最近几年中，终于在物質微观系統里找到了出路，解决了其中一部分重要問題。人們已經从微观系統的量子现象中，获得了微波振荡和放大，制出了頻率異常稳定的分子钟和原子钟，得到了噪声极低的微波固体量子放大器，得到了单色相干的紅外和可见光的振荡〔2〕。在元件器件微小型化的道路上，已經开始发展的固体电路（电子功能块），也利用了固体內部的微观結構〔3〕。在可以預见到的将来，电子装备

不但体积和重量将大大减小，而且，由于利用了分子结构内部的高度稳定性，有可能大大提高电子设备的可靠性。

快速、可靠的计算和控制几乎是一切尖端技术部门的共同要求。这就促进了电子计算机和数据处理系统的迅速发展。更重要的是，近几年来，人们已经更紧密地把维诺（H·Wiener）在控制论中所阐述的概念，香农（C·E·Shannon）在信息论中所阐述的概念和计算技术联系起来，使电子计算机和数据处理系统得到了更广泛的应用；并且开始了各个方面来探求能部分地模拟生物的认识和知觉过程，特别是模拟人脑和人的中枢神经系统活动规律的高级自动控制系统〔4〕。许多关于逻辑机、学习机、图象识别机等等的理论和技术已经出现。维诺本人在最近（1961年3月）出版的控制论第二版中，也提出了“学习与自适应机”以及“脑电波与自动调节系统”两章新的内容。这方面工作的理论和实际意义，显然是不容忽视的。

与空间研究密切结合，把固体及物质微观系统的规律应用到电子学的领域中，计算技术的广泛应用并开始与生物生命现象的研究相结合，这是近年来无线电电子学发展的三个较显著的特点。从这里，人们也可以看到六十年代中无线电电子学所包含的广泛而深刻的内容。

正由于无线电电子学内容的丰富，要想全面完整地论述它的发展水平和动向是困难的，是我们力所不及的。我们在这篇综述性的短文里，只能作一些概要性的叙述。

一、

研究各个波段内的无线电波在各种自然条件下的传播规律，来提高无线电通讯、导航、定位、遥测和遥控等的作用距离和工作性能，并开辟无线电波的新用途，一直是无线电物理学的一个重要问题。因此，无线电波传播这门学科无论在国民经济或国防方面都有巨大的实用价值。无线电波在大气或其它媒质（如地和海水）中传播，密切地受它们的物理特性的影响，所以这两方面的研究必须密切结合。为了研究无线电波在空间传播的规律，必须掌握大气的一些物理特性，反过来，为了研究后者，用无线电波进行探测是一种重要的方法。对宇宙间许多辐射现象（例如太阳和其它射电源的辐射）进行研究，都会联系到无线电波在气体等离子体中的传播问题。所以，这一学科又具有基本的科学意义。随着火箭技术和星际航行的发展，研究无线电波在电离层和行星际空间的传

播規律就顯得特別重要。同時，火箭和人造地球衛星也給電波傳播提供了新的研究方法并已經獲得了許多新的資料。

無線電波在大氣中的傳播一般分為對流層傳播和電離層傳播兩個重要方面。

在對流層傳播方面，主要的研究方向是：研究對流層的不均勻結構，了解它們的形成和變化以及它們和氣象情況的關係；並進一步研究它們對無線電波傳播的影響，特別是對流層遠距離傳播的機理問題。和氣象學相結合，研究大氣波導的出現規律和原因，也值得予以重視。測量對流層不均勻結構的主要儀器之一是由飛機攜帶的折射率儀。

在電離層傳播方面，研究電離層的結構是重要課題之一。以往只能用從地面進行探測的方法，這些方法在今天依舊是十分重要的。但探空火箭和人造地球衛星提供了新的研究方法，並已發現了許多新的現象。蘇聯在地球物理年期間已能把單級探空火箭發射到470公里的高度，第一次直接測得了F₂層最大電子密度以上部分的電子密度的隨高分布，發現了在那部分電子密度隨高度的減小不如過去所想象的那樣快〔5〕。通過接收人造地球衛星的無線電訊號，也獲得了有關電離層結構的一些有用數據。由於導彈和人造地球衛星等的發展，使研究F₂層最大電子密度以上部分具有很大的實際意義。

研究電離層內各種不同尺度的不均勻結構及其運動，近年來有很多工作。這些不均勻結構的運動和變化會引起無線電訊號的衰落。較大尺度的不均勻結構對短波無線電定向有重要的影響。由流星余跡和湍流運動而產生的不均勻結構使電離層散射通信成為可能。結合不均勻結構研究電離層里風的系統對整個大氣物理的研究具有重大的意義。

低電離層（E層的底部和D層）的結構和它對於無線電波的吸收也是一項重要的研究工作。超短波電離層散射、長波和超長波的反射等都主要地發生在低電離層里。由於低電離層的電子密度小，分子密度大，用一般的電離層觀測設備很難測出回波，以致於人們對它的結構了解得很有限。近年來有人設置了一架頻率很低（50—1,100千赫）的掃頻觀測儀，使用了幾個兆瓦的峯值功率和一英里長的天綫，獲得了低電離層的回波，觀測記錄初步顯示出低電離層具有相當複雜的結構〔6〕。

研究電離層里的變化，首先是騷擾變化，是另一個重要的課題。騷擾問題必須和太陽活動、地磁等的研究密切結合。太陽的粒子輻射和地球外圍的輻射帶對電離層騷擾有重要的影響。除騷擾變化外，電離層的形成及其變化（所謂正規變化）的理論，尤其是有關F層的理論，尚有待於進一步的發展。

雷达天文方法是从地面探测电离层的一种新方法。有些国家曾通过接收月球的雷达回波来测量地球至月亮间的电子含量。1958年高登(Gordon)提出了用大功率雷达直接探测电离层里电子密度的建议[7]。在这以后美国康乃尔(Cornell)大学正在制造峰值功率为2.5兆瓦,频率为400兆赫的发射机,并正在Puerto Rico在地上挖直径达1,000呎的半球面天线,借以应用于这一目的。美国标准局则已使用了一个现成的大功率发射机测得了高度至700公里的电子密度的随高分布[8]。

在理论方面,用等离子体中电磁气体动力学和统计物理学的观点来发展磁离子理论,即电磁波在固定磁场作用下的等离子体中的传播理论是值得注意的。

关于地下通信问题,惠勒(Wheeler)建议利用低频率(如1.5千赫)可以进行地下通讯[9]。他认为在地面下(包括海面下*)1.25—12.5英里深处存在着一条自然波导,可作远距离通讯之用,这一看法是值得注意的。这种通讯方法如能实现,它在国防上的重要性是显而易见的。

总之,近年来电波传播的研究范围愈来愈广阔。由于它常常具有地区性和随时间变化的特点,在理论研究的同时,必须十分重视观测工作,只有积累了大量的观测资料,通过统计分析,才能和理论互相印证,寻找出各种自然条件下的传播规律。

天线的理论和技术是无线电电子学的另一个基本问题。在许多重要的电子设备中,天线的設計往往占着很重要地位。就天线的理论问题来说,它主要是在电动力学范畴内解决边值问题。这几年国外发表了许多有关的文章,从中可以看到:大型天线和超增益天线、宽频带天线、使用于高速飞行体上的天线、动态天线[10]、表面波天线、旁瓣的减小和天线综合问题等等,都已有不同程度的进展。

由于射电天文和探测空间高速飞行体的要求,近年来超远程雷达天线和射电天文天线发展得特别迅速。英国首先研制成直径为250英尺(76米)的巨型抛物面天线,安装在焦德雷耳班克天文台。但它的精密度较差,工作波长最短只能到30厘米。苏联和美国在这方面都在进行大量的工作,做出了各种不同形式和不同尺寸的天线。苏联的一个22米直径的抛物面射电望远镜,能工作到8毫米波段,是这一型天线中精密度最高的一个。

* 深海存在着声波波导,即声道已被实验证实。

和加大直径同时，这类天綫发展的另一个趋势是研究使大反射体不动，只旋轉輕便的輻射器，以达到搜索和跟踪的目的。这就是螺旋球天綫和表面波天綫的研究方向。

随着雷达技术中跟踪精确度要求的提高，国外对单脉冲雷达天綫进行了許多研究工作。其中卡塞格伦 (Cassegrain) 式天綫的研究結果，目前已实际应用反导弹系统里的目标跟踪雷达上[11][1]。

电扫描天綫的研究，这几年也做了很多工作，目前主要集中在解决扫描结构中关键性元件——移相器的问题，用铁氧体作为移相元件的无惯性电扫描天綫，已用在微波雷达上。最近，人們提出可利用可变电容二极管和行波管作为电扫描移相结构，也有人提出利用时间调制技术来得到电扫描的特性[13]，这些都是值得注意的方面。

值得指出天綫参数的时间调制技术不仅可以用来实现电扫描，并是一个更加广泛应用范围的重要发展方向。这种所谓动态天綫原理可以用来进行許多工作，减小旁瓣，以及改进天綫的其他性能[14]。

要求天綫具有宽頻带性能是实用中提出的日益迫切的要求，目前已研究成功带宽达10:1的等角天綫和对数周期天綫，其方向性系数为5—20分貝。

信息論不但是无綫电电子学中最重要的基本問題之一，而且是一門帶有普遍意义的科学。它作为一門独立的学科发展起来，虽然还只有十余年的历史，但已經引起科学界普遍的重視，出现了大量的科学著作。最近几年，無論在基本理論和实际应用方面都有很大的发展。

基本理論发展的一个方面是香农信息传输模型和一些基本定理的論証和推广。这方面的工作有时也称为数学信息論。苏联和其他国家概率論方面的数学家近年来对信息論表现出巨大的兴趣，做了很多重要的带有基本意义的工作。香农的最初模型是一个无記憶的固定参数通訊道的模型，香农在当时已經証明了一个基本的存在定理：当信息传播速度小于通路容量时，則存在着一种編譯碼方法，其中編碼序列的符号数愈多，則在接收端判断錯誤的概率愈小。但在当时，並沒有得到两者严格的数学关系式。并且对这个定理的逆定理也沒有論証。最近几年中，許多科学家，包括香农本人，已經在一般的复杂而有記憶的模型中証明了判断錯誤的概率随着碼数的增大而作指数遞減的数学关系[16][1]，同时也証明了它的逆定理[17][18]。

把香农的固定参数通訊道推广到随机参数通訊道，苏联学者在这方面做了一些开创

性的工作。这方面的理論虽然还不很成熟，但已引起很多人的注意。

把香农及其被推广了的基本編碼理論应用到工程实践中去，这当然是极重要的。最近几年中，关于提高編碼系統效率的研究，在香农——弗奴——哈夫曼最优編碼的基础上繼續有所改进，并在較为广泛条件下推广了哈夫曼的結果[19]。这些結果都是从提高通信效率减少多余度的观点出发，并假設通訊道是无干扰的。在抗干扰編碼方面，对糾錯編碼进行了許多研究工作。并已在工程技术中得到实际的应用。已經有一种碼子长度达128字的編譯碼器，其中64个是信息碼，64个是检查用的碼。这种編碼可以糾正任何一組在128个字碼中不多于7个的誤差。在电子计算机中，也正在采用誤差检测及誤差校正碼，使计算机本身具有誤差校正的能力以提高运算的可靠性。目前有一些新型计算机的設計中（如瑞典的SARA计算机，美国的IBM—7030计算机等）已經应用了这方面的技术。此外，研究导弹制导指令抗干扰編碼的結構，研究非二进制的糾錯編碼，以及序列編碼等也有一些工作。

信息論基本理論发展的另一个方面是发展和推广維諾的預測和过滤理論。維諾在1942年所做的、以后在1949年正式发表的奠基性的工作[20]，在最近几年中，各方面都有推广：从平稳过程推广到非平稳过程，从綫性的推广到非綫性的过滤器和預測器，从高斯过程发展到对非高斯过程的研究，以及从時間連續过程发展到对平稳和非平稳的时间离散过程的研究等等。

与預測过滤理論密切联系着的信号检测理論，近年来由于軍事电子学的要求，发展得特別迅速。一般說来，1958年以前，信号检测理論是沿着几个不同途径发展的。有的从后驗概率的观点出发，有的从相关函数的概念出发，有的从匹配滤波器的概念出发等等。1958年以后这些不同观点已結合成一套相当完整的信号检测的統計理論[21]，并已有效地把它应用在許多方面。根据这一理論，如果我們对要检测的統計过程，如雷达回波，具有一定的先驗知識，我們就能根据所容許的信息损失的衡量标准設計出一个最优的接收系統。如果噪声干扰是正态分布的，則从这种干扰中检测周期信号的最佳接收机是相关接收机。这样一个接收机本質上也是一个匹配滤波器。这种相关系統能用数字电子计算机来实现。1958年2月美国林肯實驗室用雷达得到四次金星回波[22]，1959年4月和9月斯丹福大学的无綫电科学實驗室得到太阳回波[23]，都应用了这些理論、实现了相关技术的結果。事实上，匹配滤波器或近似的匹配滤波器在雷达接收系統里都已当

作一項重要的新技术而进行着大量的工作。

上述关于信息的基本理論在宇宙通信、遙測遙控、以及超远程雷达等方面的应用是我們最初提到的无綫电电子学与空間技术密切結合的一个重要方面。苏联从宇宙飞船上将拍摄到的月球背面的照片传送到地面，就是应用了信息論的基本概念，使图象信息以极慢的速率传送。当传送速率非常小时，即使訊号的功率很小，也能进行远距离的接收。事实上，如果离开了信息論的研究和应用，就会使許多空間技术——通訊、探测、控制等失去迅速前进的活力。

叙述到这里，我們觉得值得注意的是，上述信息論两大方面的发展，即香农的理論和維諾的理論，十几年来多少是沿着不同的方法和沿着不同的道路前进的，因而有人把他們看成是两个不同的学派。但他們之間共同性的存在以及正在互相轉化也是十分明显的。近年来我們已經看到在一些重要的实际电子系統里，已經把編碼技术和过滤技术結合在一起，形成一个可靠的低訊杂比情况下的接收系統。維諾派的学者，在研究預測过滤系統时，目前愈来愈倾向于引用离散系統的概念和技术，并采用数字計算机技术。正由于信息論的发展还只有很短的历史，它的理論远沒有完整，把这两方面的理論更好地融会貫通，提出新概念和新见解，应该是信息論科学工作者的一項有意义的任务。

图象和声音的識別是信息論研究的另一方面^[24]。它的研究对象是很广的，包括字母和数字的識別，机器翻譯和語言識別等。在識別机中还需要应用学习机理論，邏輯計算技术，判决技术，以及对人的知觉和思維过程的模拟等等。因而它既是信息論的問題（信息的識別和加工），也牽涉到很多控制論的問題，同时也是电子学与生命现象的研究相結合的开始。近年来这方面出现了許多理論性的探討，并已做出了几架实验性的图象識別机^[25]。它的理論和实际意义都值得重視。在国防上，自动識別問題也是十分重要的。

这里就有十分必要提一提控制論的問題。自維諾于1948年提出了控制論的概念以后，許多部門（生物学、生理学、数学、自动学和电子学等）的科学工作者都对它表现出巨大的兴趣。从自动学和电子学的角度看，控制論是寻求高級自动控制机，寻求能部分模拟人脑和中枢神經系統活动规律的学习机和自适应机等等的理論基础。最近几年中，这方面的理論和技术的迅速发展是很值得注意的。在导弹制导等遙控設備中，利用信息反饋并利用計算机进行誤差分析是发展得較早的一个方面。高射炮火的雷达控制多少也是属于这一类型的工作。按照一定程度进行工作而又能在条件改变时自动修正的自

动化設備則已在各項工業中逐步採用。例如機床工具的數值控制，加工精確度可達0.0025毫米。具有自適應性能的自動駕駛設備在航空事業中已漸普遍。此外，有一批科學家正在考慮將生物學機理應用於研製電子元件和設備，並提出了“仿生電子學”的方向[26]。1960年9月還召開過第一次討論會。當然，這一類與模擬生物生命現象有關的較高級的問題，雖然已經有許多重要理論工作，但目前還處於探索性的階段。

網絡理論是各項電子綫路技術的理論基礎。近年來它繼續在網絡分析及網絡綜合兩大方向發展。許多研究工作致力於突破古典理論中的一些限制（綫性，集中參數，有限數目，無源及双向等），向非綫性網絡理論，分布參數及微波網絡理論和有源網絡理論方面發展。由於隧道二極管及量子放大器等利用負阻效應器件的出現，研究具有正負電阻的有源網絡理論也顯得很活躍。另一方面，由於計算技術的發展，促使網絡理論的複雜計算變成了工程上實用的圖表設計。

更值得指出的是網絡理論中的新分支，近年來參量放大器的出現刺激了變參量網絡理論的發展[27]。有人試把梅林、亨格爾變換用於時間可變參量網絡，但只能解決一部分問題[28]。看來，利用廣義函數和富氏分析方法，也許是解決這類問題的一條途徑。

信息論和網絡理論的結合，即所謂“信息網絡理論”也是近年來極有前途的新分支[29]。信息網絡理論是以網絡理論的觀點處理信息的變換與傳輸問題，可使信息論的結果與物理可實現的系統聯繫起來。其中包括信號理論、信息經過網絡後的分析以及信息網絡綜合等問題。用網絡觀點分析平穩及非平穩隨機過程的預測與過濾問題是信息網絡理論中有價值的成果之一[30]。

在近代許多尖端技術的電子綫路工作中，脈沖技術的掌握往往是一個重要的基本問題。從發展水平和動向看，毫微秒快速脈沖技術必須給予應有的注意。

最近幾年中，一方面原子核物理研究的進一步發展要求電子學幫助測量更短的時間間隔和觀察更窄的脈沖波形，另一方面甚多路通訊和高速計算機等研究工作的進展迫切地要求應用很高的重複頻率（數十甚至數百兆赫）的脈沖，而重複頻率的提高相應地要求縮短脈沖寬度。在這些客觀要求面前，目前正在發展0.1毫微秒級（包括低和高重複頻率）的脈沖技術，而毫微秒級的脈沖技術則正在逐步鞏固之中。

微波毫微秒脈沖技術的發展也是值得注意的，因為利用它可以比較容易得多地獲得很高重複頻率的極窄脈沖。微波邏輯電路所用的鐘脈沖的重複頻率已高達685兆赫，這是

直流脉冲技术所不可能达到的。微波脉冲給超高速微波电子计算机的发展提供了极大的可能性[31]。

可以估計，随着社会經濟和科学技术的进一步发展，传递和处理大量信息的工作将愈来愈多，这就要求电子设备能具有更快速的性能。为了满足这一要求，一方面有必要研究更短波长的无线电波，利用毫米波、次毫米波、直至光波，而另一方面則无疑地将要求利用更窄的和更高重复频率的脉冲。

微波技术中的研究方向主要是微波传输和微波网络問題。

电波在有限边界中传输的問題在波长愈短时意义愈大。在一般的微波波段所利用的导波机构虽已是較成熟的工程問題，但是在波长更短的毫米波和次毫米波时衰耗小、波型純的有效的传输方法則仍在大力研究中。近年来用于H₀₁型毫米波多路通信的圆形波导和有关元件的研究得到了較大的进展。介質膜波导的理論已比較完善，螺旋波导理論中的主要問題也已經解决。在这一課題中还发展了不均匀多模波导理論[32]，长波导綫传输的統計理論和強耦合理論等[33]。

近年来开式波导的研究也极为广泛。微带式波导系由敷貼于介質兩面的金属帶和金属板所組成，衰減特性和矩形波导相似，但結構简单、体积小重量輕、便于利用印刷法制作，看来是发展較大的一种，国防設備中尤宜予以注意[34]。其它还有圆形介質棒，介質鏡象綫，涂介質的单导綫等研究，它們各有一定的优点，但也有很多限制，还没有被广泛地应用。

值得注意的是微波网络的发展，这是电子设备日趋高速化和复杂化的必然要求之一。看来許多信息的理处和加工工作，以前在視頻頻率进行的，今后有可能而且有必要移到射頻頻率来进行。近年来发展起来的微波计算机便是一个例子。这样，微波技术的任务便不只是解决传输問題而且还要解决网络問題。例如滤波电路、邏輯电路、編碼电路等，都需要用特殊形式的波导結構和組合来解决。这种微波网络的分析 and 綜合問題是网络理論和微波技术发展相結合的重要方向。

随着更短波长的无线电波的利用，迫切地要求解决新的微波传输方法。

二、

电子元件和器件是各項电子装备的基础，是电子系統工作質量問題的核心。各国电

子学界对于元件和器件的研制总是给予最优先的重视。在这一部分里，我们将简要地叙述与这方面发展有关的一些科学的动向。由于电真空及元件方面另有专文，为了避免重复，我们将只涉及其中有关的一些较基本问题。

近代电子元件和器件的发展是直接和愈来愈短的无线电新波段的掌握，与各类电子设备的一些特殊要求密切结合着的。

从几十年来无线电电子学的发展历史可以看出，掌握波长愈来愈短的新波段对扩展无线电电子学的应用具有重大意义。在过去十几年中，人们已把无线电波的掌握扩展到了毫米波。有关毫米波的产生、放大、测量等技术正在蓬勃发展。最近时期，人们还找到了红外光和可见光波段电磁波的产生和放大的方法，这就为无线电技术开拓了更为广阔的前景。

在现阶段掌握毫米波的过程中，微波电子管的研制仍有很大的积极作用。根据美国雷声公司和法国CSF公司的联合研制计划[35]，他们将在1962年研制成输出功率为30毫瓦的1毫米的几种微波管，并将在1965年使1毫米管子的输出功率达到300瓦。已经在生产的反射式速调管和返波管的最短波长为3毫米，平均功率输出为1—20毫瓦。正在研制的2毫米O—型返波管，已得到50瓦峰值功率的输出。

在电真空器件的研制中，阴极和电子光学是两个重要的基本问题。

阴极是电子发射源，它的好坏对电子管性能有直接的影响。过去对氧化物阴极有广泛的研究和应用，这方面仍有许多工作要做，如改进它在强流脉冲方面的性能，以及克服电火花现象等。目前在钨钨阴极和稀土阴极方面有很多研究工作，已引起很大的重视[36][37]。国际间正在对冷阴极的研究予以较大的注意[38]。一种是用氧化镁作涂层的。一种是用碳化硅制成P—N结以产生隧道发射。这两种都可以在较低的电压下工作。虽然现在已获得的总电流的水平并不高，可是从一些已观察到的现象判断，改进和提高的潜力是很大的。在阴极研究中，值得注意的是同位素的应用。目前已用它来研究研磨工艺、蒸发和扩散等现象。此外，用质谱计和投射仪来研究固体表面的各种现象，对阴极的基本研究也很重要。对长寿命管的深入研究指出，关键问题之一是保证管内的高度真空，以免除阴极的中毒和保证电子的正确运动。目前由于电离计吸气现象的利用，人们已可获得 10^{-12} 毫米汞柱或更高的真空度。钛泵的出现，使得需要连续抽气的大功率器件获得了有效的设备。为了获得和保持高度真空，还应该研究气体在固体上的吸附

作用，研究气体在絕緣体或金属中的扩散等基本問題。

电子光学是研究电子在不同的电场磁场中运动规律的学科，因而是許多电真空器件設計的基础。从理論上看，給出一定边界条件（电极形状，电压或磁场强度）可以求出电子运动的軌迹；或者反过来，从給定的电子軌迹出发，可以求出电磁场的分布形状。在許多实际問題中，作为理論求解的补助，通常用电阻网、电解槽和快速自动軌迹仪等設備来进行模拟，这些是目前实验电子光学的重要方法。

为了掌握比毫米波更短的波段，一般认为在现有电真空器件原理的基础上发展是相当困难的，因而必須探寻新的原理和新的方法。

近年来，等离子体的研究已引起人們的注意。其中一个方面就是研究等离子体振荡以产生毫米波和次毫米波。在游离气体的等离子体中的电子在它自己的中心平均位置附近振动，这种振动的等离子体諧振頻率是与其中的电子浓度的平方根成正比。两者的关系式表明，如果将电子浓度提高到每立方厘米 10^{15} 个，則諧振頻率就是300千兆赫（波长为1毫米）。目前大于上述数值的电子浓度已經做出来了，估計到次毫米波所需要的电子浓度也是可以办得到的。产生所需要的电子浓度是研究等离子体振荡的一个基本問題。此外，等离子体振荡的激发，以及如何把这种振荡的能量耦合出来是目前正在大力研究而尚未解决的問題〔39〕。

人們之所以重視作为物质第四态的等离子体的研究，不仅是为了获得頻率极高的等离子体振荡。利用高温等离子体是探索热核控制的方法。利用等离子体热电偶将热能不通过机械运轉直接变为电能的研究，在几个国家里也已經做了許多工作。此外，研究等离子体的喷射，設計等离子体发动机与离子火箭等都是当代科学研究的重大任务。从电子学工作者的任务看来，由較早的气体导电发展起来的，包括等离子体在內的气体电子学，目前正在逐步成为电子学的一个重要分支，应该給予足够的重視。

电磁波能量的产生和放大从54—55年以后，已經在古典的利用阴极发射的自由电子的动能与电磁场交换能量的方法之外，从根本原理上找到了一条新的途径，这就是利用物质微观系統作为交换能量的机构。由电磁波对束縛电子的作用，使处于不連續能量状态（能級）的束縛电子引起能級的跃迁，从而将內能轉变为电磁能。这是近几年来发展起来的量子电子学的基本內容。这門新学科是在微波波譜学的基础上发展起来的。在波譜学中，根据物质吸收一定頻率的电磁波的现象，已經掌握了有关原子内部电子运动

的許多知識。在这个基礎上，1955年蘇聯科學家巴索夫和普羅霍洛夫首先提出了三能級量子放大的概念。57年58年美國蘇聯分別做出了第一個固體順磁量子放大器，從而奠定了這門新學科的基礎。人們迅速地理解到這門新學科的意義，大量的研究工作開展了起來，據估計，美國已有100個左右的研究單位正在進行這方面的工作。

已經研製成功的量子器件可以分為三類：量子振盪器（或稱分子束振盪器），微波固體量子放大器，和紅外及光量子放大器。這些器件的出現，將分別解決無線電電子學中的三個重要問題：高穩定度的頻率標準，極低噪聲的接收放大和掌握短至可見光波波長的新波段。

高穩定度的頻率標準在導彈的制導和超遠程雷達等尖端技術中是一項迫切的要求。目前已製成的分子束振盪器的頻率長時間穩定度一般為 10^{-10} ，數小時內的穩定度有的可達 10^{-11} 。根據目前的发展，這還決不是一個極限。已經研製成的原子鐘一般用在實驗室里，體積都很龐大。但重量只有18.3公斤可以放在導彈上的氮分子鐘已經研製出來[40]。體積重量小，壽命長，這是目前研製改進的方向。

固體量子放大器的噪聲系數極低，由於應用了液態氮，它的噪聲溫度在理論上可在 2°K 以下，實際工作中已經達到 10°K 左右。目前在400——35,000兆赫範圍內各種波段的量子放大器已經做出來，並已在射電天文和雷達上得到了實際應用。這些已經在運用的量子放大器有的是諧振腔式的，有的是行波式的（行波式的優點更多，它可以有較大的頻寬，並且容易進行頻率調諧，穩定性也較好）。兩者都在液態氮的低溫下工作。目前正在尋找新的晶體材料和新方法，希望在滿足增益、帶寬的要求下能解決更便於實際應用的三個問題：（1）能在較高溫度下工作，至少能在 78°K 液態氮溫度下工作，（2）能使激勵頻率低於訊號頻率，（3）去除外加的直流磁場，即能在零磁場下工作。這幾個方面目前都取得了不同程度的進展。

紅外和可見光量子放大器的出現，是1960年無線電電子學方面的一項突出的成就。目前已經製成了許多種固態的和氣態的光量子放大器。如貝爾實驗室的兩種固態的紅外光放大。一種的工作物質為 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}$ ，頻率為 4.320×10^{14} 赫（相當於波長6950埃，或0.695微米），在脈沖狀態工作，輸出功率為10千瓦，另一種工作物質為氟化鈣加鈔 $\text{CaF}_2 \cdot \text{Sm}$ ，得到的頻率為 4.21×10^{14} 赫（波長7230埃），在脈沖狀態工作，輸出功率為100瓦[41]。此外，也做出了好幾種用氦氖（ $\text{He} + \text{Ne}$ ）混合氣體作為工作物質的紅外放大，

頻率从 2.683×10^{14} 到 2.485×10^{14} 赫，連續状态工作，輸出功率10毫瓦[41]。應該指出，目前得到的相干光振盪的散彈噪声很大，它們祇能当作发射源而还不能用于接收放大的器件中。

有了光量子器件，人們就能得到具有相干性、单色性和稳定性的光振盪。这种高度相干性的光波具有許多明显的优点和广闊的用途。相干光振盪由于波长极短，如果用作光雷达，就可以用很小的天綫得到很大的作用距离。从分辨率看，人們利用毫米波已經可以在雷达显示屏上初步看到目标的形象，光波波长比毫米波更短四个数量級，分辨率之高是可以想象的。波长大大縮短以后，有条件可以把輻射能量高度集中成很小的波束，这样的射束可以形成强有力的“探針”。据估計，在这种射束形成能量的焦点时，光压可达几百万大气压。这在科学技术上当然会有很大的用处。从通訊角度考虑，光通訊道由于頻带极寬（比目前正在研究的毫米波波导通訊道还要高几个数量級），可以传送极大量的信息。据估計，一个光波发送器可以同时传送一万路电视。国外已利用光量子放大器做过雷达和通訊方面的初步实验[2]。近来还有人发现，海水对波长为5200埃的单色光（黄綠光）[42]和波长为39—41微米的远紅外[]衰減很小，因而有可能把紅外光和光的量子器件用在海水下作为通訊和探測潛艇的武器。

目前光量子器件的发展方向是选择适宜的工作物质（晶体和气体），降低注入功率，提高輻射的相干性单色性和稳定性。在应用方面，解决相干光系統里的調制、检波和混頻等問題的大量工作将随之而来，这是我們應該及早注意的。

除上述量子器件外，由于对固体微观結構及其中电子现象的逐步深入了解，这几年来，还发展和創造了許多新型的固态器件。如变容二极管参量放大器，隧道二极管，新型鉄氧体器件，各种磁性开关和記憶元件等。

变容二极管参量放大器的低噪声性能，在10,000兆赫（3厘米）及較低頻率时，可与量子放大器比拟。并且由于研制和使用的方便，已在許多方面得到广泛应用。目前的研究工作主要在寻找新的寬頻带放大器的結構以及不断改善变容二极管的工艺技术以求进一步降低噪声。隧道二极管的历史虽然更短，但应用已漸广泛。在高速电子計算机中，已开始采用为高速存儲元件，它的工作周期一般在0.1微秒数量級。用隧道二极管作为微波振盪和放大也正在发展。目前已能产生高达100千兆赫的振盪。

半导体三极管（晶体管）几年来由于在功率損耗、运用頻率、一致性、稳定性、可

靠性方面的不断改善，目前应用已非常普遍。

近二三年来，微波铁氧体的新元件新器件不断出现，应用最广泛的隔离器、环转器和快速开关等应用频段和性能方面都有新的发展。高功率4毫米和低功率2毫米的隔离器已经做出来[44]。Y型环转器在350—140,000兆赫的许多频段都已研制出来[45]。用来保护雷达的接收晶体和防止量子放大器饱和的铁氧体快速开关的插入损耗一般在0.3分贝左右。铁氧体参量放大器由于噪声水平较高，激发功率较大，目前虽还没有到实用阶段，但研究工作已有不少进展。

元件和器件的固态化，已肯定是一个重要的发展方向。从学科方面看，为了发展固体元件和器件，人们十分重视固体电子学的研究。它是固体物理和无綫电电子学之间的一门边缘学科。它的理论问题的范围是非常广阔的。例如，研究半导体的导电性能，扩散性能，表面物理，研究雪崩效应、隧道效应、霍耳效应，研究铁氧体的法拉第效应，场致效应、相移效应等等。在现阶段，有几个方面特别值得提出的是：

第一、研究共振现象。包括顺磁共振，迴磁共振，铁磁共振及核磁共振。这方面的研究必然会更深入地了解物质微观结构里的各种现象，必然会更有把握地使束缚在原子分子内部的电子，或被限制在晶体内错综复杂的晶格上的大量电子为无綫电电子学服务。为了开展这方面的工作，共振设备的建立当然是十分必要的。

第二、低温物理和超导现象的研究。在超低温情况下，物质往往出现许多新的现象。上述在液体氦温度下所获得的量子器件只是其中的一例。此外，在超低温情况下的超导现象，也已经被利用来制造很多极有用的电子器件。如惯性制导系统里用的超电导陀螺，它具有非常小的漂移率，每小时可低到0.0001度。又如用在红外綫探测技术里的超电导测辐射热器，它对热辐射非常敏感。又如可用在计算机里作为移位寄存器和存储器的薄膜冷致管，对小型化超高速计算机有很大作用。这些工作，目前大多尚处在探索试验阶段，而妨碍实用进展的一个重要问题是小型长寿命的超低温设备(液态氦产生器)的供应。从这里也可以理解，低温设备的建立是开展这方面研究工作的首要条件。

第三、研究晶体生长的理论，研究固体晶格结构的等效网络理论，为新材料，为元件器件的微小型化准备理论基础，这是分子电子学研究的一个重要方面。在现阶段已渐趋实用的微小型化方法中，总起来说，主要是大力改进工艺技术，并用新的拼装方法缩小已有电子元件和器件的尺寸，这一类方法在现阶段是非常重要的。但进一步缩小尺寸会

遇到散熱和拼裝可靠性等問題。根本出路則在於探索能完成電子綫路功能的新概念新原理和新方法。這是分子電子學的主要任務。這一分支從57年前後提出以後，各方面已進行了許多工作。國外已做出了許多種實驗性的“電子功能塊”，包括高電平和低電平的調諧放大器，檢波放大器，多諧振盪器，電子開關和邏輯門等等。這些功能塊中的每一個都只是一片硅或其他單晶，除了輸出端、輸入端、加偏壓端及接地端有四個引綫外，內部再沒有其他聯綫。當然，這些工作目前還在初始階段，離實用還有不少距離，但看來是富有生命力的方向。

三、

把基本理論探索的成果與新的電子元件器件結合起來，人們就能創造出豐富多采的電子裝備和電子系統來滿足社會經濟、軍事、和科學研究等各方面不斷增長的需要。在這部分里，將簡要地敘述一些重要電子設備、電子系統近年來的發展概況。

通訊系統是無線電技術的最早應用。但即使在現在和將來，跟着人類生活各方面日益增長的豐富內容，更有效地和更可靠地傳輸大量的信息將來仍然是無線電電子學應用的一個最重要方面。當然，現時代較廣含義的通訊系統的內容已經與過去大大不同了。過去只是簡單地指電報、電話，而今天，除了電報、電話、傳真和電視以外，它還包括許許多多各種形式的編碼和不編碼的數據的傳送。這些數據有的來自人造衛星和宇宙飛船中的傳感器，有的來自電子計算機和數據處理設備，有的來自雷達定位系統，也有的來自控制系統等等。

通訊系統的首要任務在於高速有效地傳送大量數據，並在敵人干擾和本身噪聲情況下保證傳送的可靠性。因此提高通訊距離、增寬通訊道的頻帶、多路化，以及提高抗干擾能力，都是通訊系統的研究課題。這些方面是與信息論研究的成就密切結合着的。

近年來在實際系統中，微波中繼已相當成熟，各國已普遍採用，蘇聯在57年國內已有數千公里的中繼綫；而且在七年計劃中規定，中繼綫長度要再增加六倍。西歐國家（英、法、西德、比利時、荷蘭、盧森堡、瑞士及意大利等）還利用它組成一個統一的電視網。在通路容量方面這幾年還在繼續提高，在每個高頻通路上，美國已實際應用的是1800路，並正在發展更多路的系統^[46]；有八個或更多個高頻通路共用一付天綫裝置的系統也在發展中。此外，在新型器件的應用方面（如全行波管式的中繼站、鐵氧體開

关、隔离器等等），在晶体管化、小型化方面都有进展。

单边带系统和对流层电离层散射系统是发展較快的两个方面。据报导，当传播情况良好时，单边带的最大短波通讯距离可达2,500哩左右；但当传播情况恶劣时，由于电离层对短波传播的不利影响，通讯距离縮短很多。据美帝軍方估計，在空一地联络系统中，用单边带系统来代替全部双边带調幅系统，只是一个时间問題。散射系统在軍事上的价值已經肯定。北大西洋侵略集团从土耳其到挪威全长6,500哩的通讯綫，就是由电离层和对流层两种散射系统組成的。在太平洋地区，美帝也有一条由电离层散射和对流层散射組成的軍事通讯系统。由于軍事上的需要，地下通讯方法目前也正在发展。在电波传播部分里，已提到有人建議利用地下波导进行通讯的一些設想。此外利用地波、利用零点儿赫芝的电波进行地下通讯，也有人在进行試驗[47]。这些討論，目前虽还处在初始阶段，但很值得我們注意。

利用毫米波H₀₁型圆波导通讯是一个很有前途的通讯系统。它的巨大的带宽（1千兆赫左右）、低的損耗以及好的保密性都是非常吸引人的。目前离开实用虽然还有許多工作要做，但近年来無論在理論上，实验上以及新器件的研制上都取得了許多进展。这方面的研究是与毫米波的产生、放大、量测和毫微秒脉冲等技术密切結合着的。

光量子放大器的出现，为利用相干光进行通讯打开了道路，貝尔实验室已經做过20哩范围内的通讯試驗，用脉冲紅寶石光放大发射机。前已述及，这方面的实际应用还有許多严重問題尚待解决，如調制与解調的方法，設法降低量子散彈噪声等。

利用月球对无綫电波的反射进行通讯，国外也在大力进行，第一个試驗性的月球通讯系统已經在华盛顿与夏威夷之間建立起来。

利用人造地球卫星进行全球通讯看来也是不远将来的事情[48]。这几年来，美国已經发射过几个試驗性通讯卫星（Score, Courier和Echo），并且將繼續做試驗。为了达到实用，許多壟断公司在設計通讯卫星一些参数方面，已有一些初步協議。他們考虑用1—10千兆赫之間的頻率，用調頻制多路系统，也考虑用脉冲編碼調制。卫星上的发射机用行波管功率放大，卫星上的接收机用参量放大。地面站用70—100呎直径的抛物面反射体作为发送和接收天綫，用高功率行波管或三极管作为地面发射机，用量子放大器作为地面接收前置放大，頻寬定为10—20兆赫。

从技术上看，問題在于火箭能否准确地把一个500—1,000磅的載量送入22,000哩