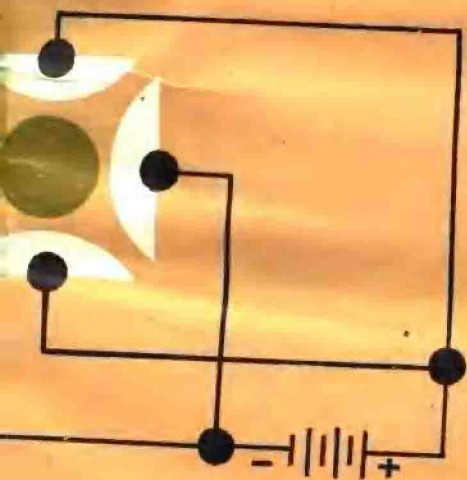


# 量子电子学

无线电电子学基础 第二分册

〔美〕 J.R. 皮尔斯 著



科学出版社

## 内 容 简 介

本书在第一分册《电子与波》的基础上，进一步介绍与量子现象有关的电子器件的工作原理。书中先简单地讨论了这类器件的重要性和量子物理学的一些最基本的概念，然后由浅入深，分章介绍脉泽、激光器和半导体的工作原理、性能和优缺点。书中着重讲解物理概念，尽量少用数学公式。本书可供广大高中水平的读者阅读，也可供各方面科学技术人员参考。

John R. Pierce  
QUANTUM ELECTRONICS  
Doubleday & Company, 1966

## 量 子 电 子 学

无线电电子学基础 第二分册

[美] J.R.皮尔斯 著

罗金波 译

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1974年9月第一版 开本：787×1092 1/32  
1974年9月第一次印刷 印张：3 5/16  
印数：0001—55,450 字数：72,000

统一书号：15031·90

本社书号：416·15—7

定 价：0.28 元

## 译 者 前 言

半导体、激光和脉泽是近年来发展迅速、应用广泛的新技术。它们的发明和不少研制工作都是在量子力学理论的指导下进行的。由于它们着重利用的是电子在气体、液体、特别是在固体中的运动，着重利用的是在这些物质中运动电子的量子现象，因此，量子电子学更是理解、运用和研究这些新技术的重要基础。

皮尔斯的这本《量子电子学》，结合半导体、激光和脉泽的实际，不用复杂的数学公式，比较通俗形象地说明了量子力学和量子电子学的一些基本概念，比较概括地说明了它们的实际应用。这不但为一般没有学过量子力学，但又需要知道一些半导体、激光和脉泽的理论基础的人，提供了一本通俗的入门书，而且也为一些正在开始学习量子电子学的人，提供了一本理论联系最新技术发展的补充读物。正是出于这些考虑，我们译出了本书。

本书是《电子与波》一书的续篇，在技术上它反映了从真空管到固体电子器件的过渡，在理论上反映了从经典电磁理论到量子力学的发展。

本书写于1966年。近十年来，半导体、脉泽和激光都有发展，特别是激光的发展更加突出，大大冲破了作者在书中对激光发展前途所作的保守的估计。但是，书中阐述的有关这些新技术的量子电子学的基础，则仍然是适用的，而且新的技术发展更加证实了它的正确。

书中第二章讲的是电子器件中的噪声，特别是与量子现象有关的热噪声。因为涉及到黑体辐射等一些比较抽象的理论推导，读起来比较困难一些。读者也可以跳开这一章，先读后面的部分。

译者删节了原书中少数与科学内容无关的议论，并对某些地方作了简单的注解。

译者

1973年11月

# 目 录

译者前言 .....	( i )
第一章 认识世界 .....	( 1 )
一门关于精确定律的科学(2) 光是粒子还是波?(5) 光子是一个个能包(8) 测不准原理(9) 电子的特性(12) 微观领域的新概念(15) 量子现象的应用(15)	
第二章 噪声 .....	( 17 )
约翰逊噪声或热噪声(19) 电磁能量的计算(20) 普朗克常数(21) 测量约翰逊噪声(24) 约翰逊噪声功率的大小(28) 超外差式接收机(30) 理想放大器的极限(32)	
第三章 脉 泽 .....	( 36 )
能级(37) 感生能级跃迁(38) 对光谱的一个基本解释(39) 玻尔兹曼分布曲线(40) 微波波谱在通信技术中的应用(41) 三能级固体脉泽(45) 利用粒子数反转的几个问题(47) 脉泽放大器的效率(50)	
第四章 激光器 .....	( 53 )
相干光的利用(55) 激光器的性能(56) 激光器的物理结构(59) 气体激光物质(63) 麦克斯韦方程对相干光的应用(65) 其他激光现象: 细光束(68) 颗粒性(70) 全息相片(71)	

第五章 半导体器件..... (74)

原子结构和能级(76) 电子在晶体中的运动(78) 导体、绝缘体和半导体(81) 半导体用作二极管(83) 半导体用作三极管(85) 扩散结台式晶体管(86) 其他半导体器件(89) 半导体用作电容器(89) 太阳电池(90) 半导体的缺点(92) 半导体的重要性及其挑战(94)

附录：数学表示法..... (95)

## 第一章 认识世界

有时我们大家都对远离我们的事物或者感觉达不到的事物有兴趣。我们希望知道远处发生着什么？过去发生过什么？将来会发生什么？但是，有时我们需要更深入地知道日常生活中遇到的事物，这时，我们的好奇心常常是在电话、电视和半导体收音机上。

十年前，我们有电话和电视，但是我们还没有半导体收音机。今天，许多在公共汽车上、海滨上、球场上玩半导体收音机的孩子们都知道这种收音机，任何一个有听觉能力的成年人更是如此。

在听过半导体收音机的人当中，见过晶体管的并不多，见过晶体管而又懂得它是怎样工作的人就更少。我打算使你通过这本书能够懂得晶体管是怎样工作的，还懂得其他一些东西。但是要懂得晶体管和其他有关的一些器件，需要知道一些新的知识，这些知识与十年前为了懂得电话、电视和当时的收音机所需要的知识是不同的。近十年来，在电子学领域发生了革命性的变化。这个变化就是发明和使用了一些新器件，它们是建立在量子力学定律的基础上的。这些器件包括晶体管、脉泽和激光器。

物理理论是解释和探索自然现象的一个基础。牛顿的运动定律和引力定律告诉我们行星怎样绕着太阳运转，使我们能预测和控制导弹和人造卫星的轨道。麦克斯韦方程解释了光的传播，使我们能设计收音机的天线和微波通信系统。量

子物理（或者叫量子力学）的定律解释了很多物理现象和化学现象。

## 一门关于精确定律的科学

我们现在已知道牛顿运动定律和麦克斯韦方程只是近似的自然定律，它们对于大的物体和不太快的变化是完全适用的。量子力学定律是更好的定律，它使我们能理解发生在象原子和离子这样小的物体中的物理现象，理解象光的振动这样迅速的变化，使我们能理解利用了这些物理现象和变化的晶体管、脉泽和激光器。

在宏观和慢速的范围内，量子力学是与我们日常生活中所观察到的事物（例如踢一个球，用绳子旋转一重物，投一石子于池水中）相一致的。但是，通过牛顿定律，我们也能理解这些物体的运动。牛顿定律对于大到眼睛能看得见的物体和慢到眼睛能跟得上的运动是正确的。量子力学的特别和新鲜的地方，只有在实验室的实验中才能直接显示出来。用解释这些实验的量子力学定律，才能对晶体管、脉泽和激光器这样的重要器件的工作原理作出圆满具体的描述，才能深入研究许多其他有趣的问题。

差不多每一个听到量子力学的人都一定会提出这样的问题：量子力学比牛顿力学（或者叫经典力学）和麦克斯韦方程是不是要难得多？这里我要提到我的两位朋友的言论。一个说，要对许多有关脉泽和激光的问题得到定量的结果，并不需要多少量子力学。另一个说，用量子力学处理一个非常简单的问题（例如正弦电磁波沿一根会引起能量损耗的传输线的传播）也是非常困难的。他们的这两种看法都对。

我不知道对量子力学有任何一种表述方法，可以象牛顿



运动定律和麦克斯韦方程那样简单、概括而又易于掌握。也许是因为我的无知；也可能是因为量子力学的发展和表述还没有达到这个地步；还可能是量子力学本身的确困难，因为它需要一种既不是大家都熟悉的、也不是轻易可以掌握的数学技巧。

关于量子力学还经常有人提出另外一些问题。量子力学合理吗？它是不是有些违反经验和普通常识呢？

如果读者没有提出这第二个问题，我也要提出来。提出这样的问题是自然的，但也是令人惶惑的。可以肯定，量子力学并不违反经验，它与经验是相符的。但是，量子力学的某些现象，在那些常常只以实验室外的日常经验为基础而得出结论的人看来，是奇怪难解的。

普通经验用到分子和原子世界的问题是一个值得广泛讨论的问题。在一个大人国或小人国的人的眼里，我们周围这个世界是什么样子？我想我们一定都对这样的问题感兴趣。当显微镜扩大了人的观察能力时，它激起了人们的惊异。费兹-詹姆斯·奥布赖恩 (Fitz-James O'Brien) 这位十九世纪富于想象力的作家，在显微镜的奇迹的鼓舞下，曾经设想过一个观察者，借助于一种从未有过的强有力的工具，能看到什么的问题。他在一个名叫《金钢石透镜》的故事中，描述了一个使用显微镜的人在一个水分子中看到了一个可爱的小女孩。

沿着这样的途径，我们是否能更深入地考察和了解自然呢？这只是幻想，只是那些对自然定律无知的人的幻想。因为我们知道，对于物体的结构，我们所能看清的细部只能大于光的波长的大小。还有，当透镜（显微镜的透镜或人眼这种透镜）的孔径小于光波的波长时，它所形成的象的清晰度

就会降低。如果一个小人国的人和他的书越变越小，最后他就会读不清他的书了。

在我们宏观世界内，我们有眼睛、耳朵、手指和舌头，我们能用电计和安培计测量电压和电流，用验电器测量电荷，用磁强计测量磁场，用弹簧秤测量力的大小。但是，我们不能把我们自己缩小，也不能把我们的感觉缩小，或者把我们的测量仪器缩小，来探索物质的最后结构，来探索电子，来确定非常小的范围内的电场和磁场\*。

一个儿童可能要问，电子是发亮的还是发黑的？一个发亮的物体之所以发亮，是因为它的表面的不平整度小于一个光波的波长，而一个物体之所以发黑，是因为它表面的不平整度大于一个光波的波长，因而把光散射掉了。我想，我们可以说，电子是发亮的，但是那不是一个小童所指的那种意义上的发亮。电子的味道是怎样的？我们用什么嘴来尝它呢？电子是硬的还是软的？我们用什么手指来试它呢？然而，一个固执的小孩可能坚持要你回答这种问题。

在我们直接感觉到的这个世界中，我们遇到一些我们希望加以认识、预测和利用的现象。这些现象包括仪表的读数，电子撞击玻璃表面上一层薄薄的荧光物质时（即当电子打在荧光屏时）发出的闪光，放大一个微弱信号所产生的听得见的声音。科学工作使我们能通过这些现象与现象所显示的内容的定量关系，来“理解”这些现象。科学不需要回答象电子的味道和颜色这类似是而非的问题。

---

\* 人的感觉，乃至测量仪器的宏观性质，不能成为我们认识微观客体的限制。“我们不能把我们自己缩小”，但是，我们的思维却可以在变革客观的实践基础上，去不断深入地把握微观客体的本质。——译者注

在我们周围这个宏观世界中，我们能观察到粒子，即一小块物质；我们也能观察到波。波可以是声波和水波这样的物质振动。波也可以是从一处运动到另一处的、变化着的电场和磁场\*；收音机和电视机接收的电磁波就是这种传播着的电场和磁场的起伏。

通过对自然的观察，我们就会熟悉波和粒子，熟悉它们的特性，就象我们熟悉硬软、味道和颜色一样。于是，我们要问，电子是粒子还是波？我们也会要问，光是粒子（光子），还是波？我们需要回答这样的问题吗？我们能够回答这样的问题吗？怎样回答才能符合客观实际呢？

### 光是粒子还是波？

图 1 表示一种可以帮助我们回答这个问题的实验<sup>1)</sup>。左边是一个离板较远的单一频率和波长的光源，板上刻有两条非常狭窄、相互平行的缝（缝必须窄到同光波波长相去不远）。光线照在板上，经过两条缝，落在叫做光度计的一层

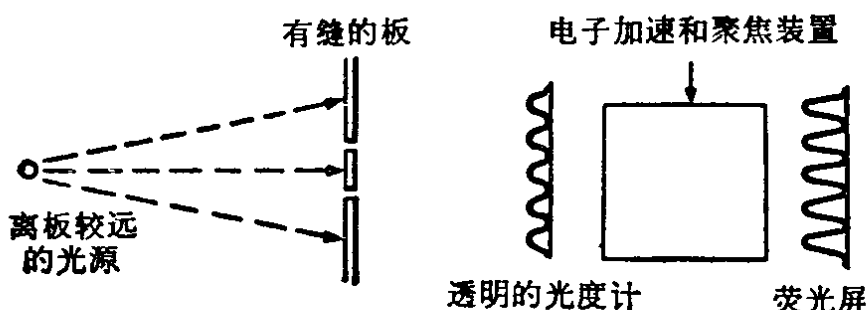


图 1

\* 电场和磁场也是一种物质。——译者注

1) 可以如图所示地来进行这个实验，但真正的结论是从一些不容易描述的较简单的实验中推论出来的。再者，图 1 的两条缝需要非常窄（每条缝约  $10^{-5}$  厘米宽），彼此要靠得很近。

很薄的物质上。当光线射到光度计上，在另一边就有电子出来。这些电子经过加速和聚焦，以高速打在一平整的荧光屏上。当一个电子打到荧光屏上时，屏上就发出一个闪光。这样，光在透明的光度计上引起的电子发射的花样便在荧光屏上以光或闪光的花样再现出来。如果光“的确”是波，我们就应该在荧光屏上看到一个与窄缝平行的明暗线条所组成的花样。这是一种叫波的干涉或衍射的现象。它是所有波动的一种特性。

当一个波经过观察者时，有某种量在大小方面作规则的起伏。这种周期性在图2中以图象表示出来。在水波中，我们看到一个最大值或波峰，接着就是一个最小值或波谷，再接着是另一个波峰，另一个波谷，如此一个接一个。如果我们从整体来看波，我们就会看到一组波峰和波谷的花样以一定的速度经我们而过，这个速度就是波的速度。前后相继的两个波峰或两个波谷间的距离就是波的波长。在一秒钟内经过我们的波峰数或波谷数就是波的频率。相继的最大值和最小值，在水波中是波峰和波谷；在声波中，是相继的压力的增加和减小；在电磁波中，是电场或磁场相继处于相反的方向。

对于任何一种类型的波，如果把强度相等的两个这种波叠加在一起，使得波峰（或其他相当的最大值）与波峰重合，波谷（或其他相当的最小值）与波谷重合，两个波的和就是总波，总波比其中任一个单独的波都要强。但是，如果一个波的波峰落在另一个强度相等的波的波谷上，两个波就会抵消，这时，两个波加在一起变成什么也没有。

如果光是一种波，那么当光线通过两条宽度比波长还要小的缝时，光波就会从每条缝向各个方向传播。假如我们

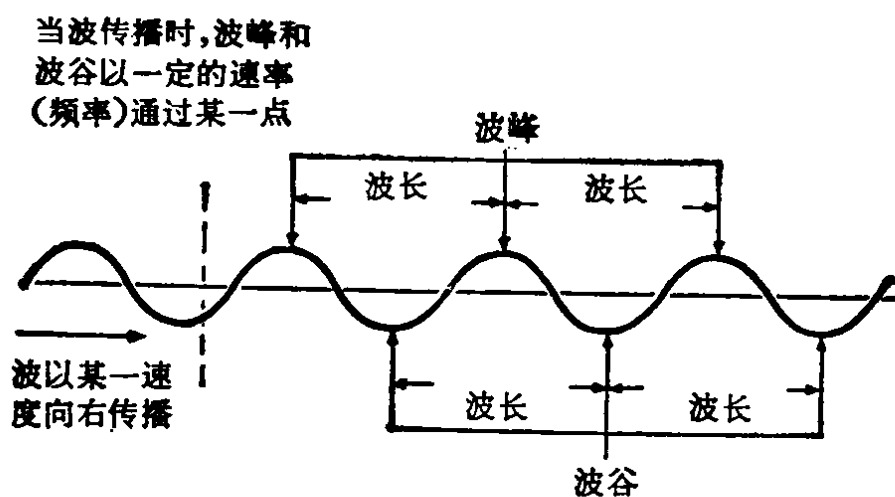


图 2

观察光度计上正对两条缝之间的中点的那一点。这一点离每条缝的距离等于相等的波长数，所以从一条缝出来的波的波峰到达这一点时，从另一条缝出来的波峰也同时到达。同样，波谷也是同时到达。从两条缝出来的光波的振幅将相加。波与波将相互增强。

当我们沿光度计向上移动时，我们会较接近上面那条缝而较离开下面那条缝。很快我们会到达这样一点，从一条缝出来的波的波峰到达这一点时，从另一条缝出来的波到达这一点的是波谷。这样，从两条缝出来的光波在这一点上便会抵消，这里便没有光，也没有电子从光度计跑出来。光度计上画的起伏曲线，表示光的亮度或功率是离两缝中点的距离的函数。因为电子发射的多少随光强度的增加而增加，这条曲线同时也表示离开光度计表面的电子的多少。当被加速和聚焦的电子打在荧光屏上时，光的花样就这样又再现在右边的荧光屏上。做完这个实验便可看出，它与波的特性是完全相符的。如果我们盖掉一条缝，就不再有起伏的干涉花样了，代替它的是一种均匀地照在光度计上的光和从光度计出

来的一股均匀的电子流，电子流也是均匀地打在荧光屏上的。这样看来，光似乎准是波了！

### 光子是一个个能包

但是，让我们来考虑另一种现象。把一个电子从光度计中释放出来要花很大的能量。我们可以设想，如果我们把光的强度削减到一定的程度，就应该会没有足够的能量去释放一个电子。但是事实上，被释放的电子的多少，是严格地与能量流成正比的，也就是与光的功率成正比的。这似乎表明，能量是集束成一个个小丸子，每个小丸子都能引起一个电子的发射。这样，一支弱光便意味着丸子数较少，而不是它的能量效果小。这种现象似乎又证明光是由我们可以叫它光子的小丸子或粒子组成的。

物理学家不愿接受光的粒子（或光子）的概念，因为多年来，光的衍射已经如此清楚地表明光的性质很象波。普朗克（Max Planck）第一个打破了僵局。他在1900年指出，一个具有某一温度的封闭的盒子或“暗箱”的电磁辐射的强度（实验观测值），只能用一种假设来解释，即用一定频率的辐射只能具有一定大小的能量的假设来解释。这些特定大小的能量都是  $h$  和  $f$  的乘积  $hf$ ，其中  $f$  是辐射的频率，而  $h$  是普朗克常数： $h = 6.62 \times 10^{-34}$  焦耳·秒<sup>1)</sup>。这个说明与光是由每包能量为  $hf$  焦耳的一个个小能包或光子所组成的概念相一致，但是它并没有证明光子的存在，它只是做到可以自圆其说罢了。

---

1) 焦耳是能量的单位。1瓦的功率即指每秒消耗1焦耳的能量。因此，点一个100瓦的电灯泡，每秒需要消耗100焦耳的能量。

1905年，爱因斯坦（Albert Einstein）写了一篇论光电效应的论文，并因此获得了诺贝尔奖金。这时实验才证明，电子离开光度计的能量并不随引起电子发射的光线的强度或功率的增加而增加。功率较大的光只能打出较多的电子，却不能使每个电子获得较快的速度。爱因斯坦假定光的能量是集束成一个个能包的，每个能包的能量为  $hf$ （爱因斯坦把这些能包叫做光子），他用这个假定解释了上述电子发射的情况。他指出，任何一个光子打在光度计上能引起一个电子发射，因此，电子发射的多少与达到光度计表面的光子的多少成正比，也就是与每秒多少焦耳（即光的功率）成正比。因此，电子离开光度计表面的最大能量等于引起电子发射的单个光子的能量。

不仅如此，对于各种光度计，都有它们各自的引起电子发射的最小能量。如果我们使光的功率保持不变，但是降低光的频率，那么，对于某种光度计说来，就会有一个临界频率，低于这个频率就不会再有电子发射出来，即使再增高光的强度，也不会再有电子发射出来。低于这个频率的光子的能量根本不足以把一个电子从这种光度计上释放出来。

物理学家已经发现了这些和其他一些无可辩驳的证据，现在没有人再怀疑光（和所有包括无线电波在内的电磁辐射）是由不连续的能量或光子组成的了。人们很容易想象光是由每粒能量为  $hf$  的一些小粒子组成，而不是由波组成。

### 测不准原理

但是，我们要问：当光很弱，我们只能在荧光屏上偶而看到闪光（这相当于个别的光子偶而打在光度计上）时，某一特定的光子到底是通过哪一条缝来的呢？我们可以盖掉一

条缝，这样就可以肯定了。但是，这样做后，光度计表面上的干涉花样（即在光度计表面的某些点上光照的强度以及发射的电子数大于其他一些点的现象）就不见了。当一条缝被盖上后，从光度计的这一部分与另一部分出来的电子数便完全一样了。

干涉花样的存在与光的强度无关。当几秒钟才有一个光子到达时，我们也能得到干涉花样（即光子打在光度计某一部分的次数比打在其他部分的次数要多）。但是，只有两条缝都开着时才能得到干涉花样。因此，光子达到光度计的方向有某种不确定性，也就是光子的动量<sup>1)</sup>有某种不确定性。

这里我们接触到量子力学的一条普遍原理，它在量子电子学中要引出一些重要结果。这就是测不准原理，它是海森堡（Werner Heisenberg）在1927年发表的。我们将只考虑一种特殊的测量中所表现出来的测不准原理，但是这个原理同样适用于其他量的测量。

海森堡的测不准原理把测量光子达到的位置时的不确定性和测量光子的动量时的不确定性联系起来。对某一特定的仪器来说，要使一种不确定性小，只有让另一种不确定性大，才能做到。一个象的清晰度与成象透镜的半径之间的关系就是一个例子。透镜越大（如果没有象差的话），象越清晰。但是，透镜半径越大，一个光子到达象上某部分的方向的变化范围也越宽。动量是一个既有方向又有大小的矢量。因此，方向上的不确定也就是动量上的不确定。

在海森堡的测不准原理的一种数学表述中，物理学家采

---

1) 动量是物理学的一个基本量，定义为质量乘以速度。见本书第一分册《电子与波》第二章。



用量子力学中的做法，把我们所知道的关于位置的知识用一种波动图样或“波函数”<sup>1)</sup>来表述，把我们所知道的关于动量的知识用另一种波函数来表述。动量波函数是位置波函数的傅里叶<sup>2)</sup>变换。

一个函数和它的傅里叶变换的关系与一个电脉冲和组成这个脉冲的频带宽度的关系相似；这已在《电子和波》第八章作了简单讨论。这里我要说的只是，一个窄的、精细的波函数的傅里叶变换是一个非常宽的波函数，而一个非常宽的波函数可以有一个非常窄的、精细的傅里叶变换。

在量子力学中，象位置和动量这样的量的测量问题是一个深奥的问题，在本书中，我打算只举一些非常简单的，不引起困难问题出现的例子来加以说明。

在图 1 的装置中，如果光子从一条非常窄的缝到达光度计，我们所知道的就是当光子通过窄缝时，光子的位置；因此，它的动量一定是不确定的，我们不能知道它运动的方向。这样，当光子通过单条非常窄的缝时，我们不能预测它们会落在光度计的什么地方。

但是，如果一个光子既可以通过一条缝，也可以通过另外一条缝。当它通过这些缝时，关于它的位置，我们是不能确定的。就是因为光子位置的这种不确定性，使我们能对它

---

1) 波函数是波的数学描述，它表示波的强度怎样在空间中由一点到另一点变化的情况。在光的量子力学理论中，位置波函数告诉我们在任一指定的地方观察到一个光子的几率，动量波函数则告诉我们观察到一个具有指定动量的光子的几率。

2) 法国数学家，傅里叶 (Baron Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768—1830) 证明一条曲线可以用一些具有不同波长的正弦波的和来表示。例如，一长度为  $L$  的被拉紧的弦的振动，可以用波长为  $L, L/2, L/3$  等的正弦波的和来表示。一个函数（例如一个波函数）的傅里叶变换，就是把 这个函数表示成波长从无穷大到零的连续范围内的正弦函数。