

电子学基础知识丛书

量子电子学

王庆吉 冯义濂 编著

201

科学出版社

内 容 简 介

量子电子学是二十世纪五十年代兴起的一门新兴学科，是电子学与量子物理学互相促进、紧密结合的产物。六十年代初，激光器发明以后，它的应用便成为量子电子学中内容最丰富、发展最迅速的重要领域。因此，量子电子学不但是一门蓬勃发展的前沿学科，而且也是一个应用广泛的科学技术领域。

本书主要介绍量子电子学的基本知识，包括：量子电子学的产生，量子放大和振荡的基本原理，量子频标，非线性光学及激光的主要应用等。

本书通俗易懂，是一本学习量子电子学和激光技术的入门书。可供具有中等以上文化程度的读者阅读、参考。

电子学基础知识丛书

量子电子学

王庆吉 冯义濂 编著

责任编辑 曾美玉

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

1986年 12 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1986年 12 月第一次印刷 印张：4 5/8

印数：0001—3,150 字数：101,000

统一书号：15031·762

本社书号：4938·15—7

定价：0.90 元



《电子学基础知识丛书》编委会

顾问: 杜连耀 毕德显 吴朔平 任 朗
顾德仁 张恩虬 陈芳允 秦诒纯

主 编: 孟昭英

副主编: 吴鸿适 王守觉 李三立 凌肇元

编 委: 叶培大 童志鹏 陶 棣 甘本祓
何国伟 周炯槃 邱绪环 王玉珠
周锡龄 周明德 刘 诚 俞锡良
王明臣

秘 书: 刘学达

本书责任编辑: 杜连耀

前 言

电子科学技术是一门发展迅速、应用广泛的近代科学技术。电子技术水准是现代化的重要标志。为了尽快地普及电子科学技术知识，中国电子学会和出版部门聘请有关专家、学者组成编委会，组织编写三套有不同特点的、较系统的电子学普及丛书。本丛书是《电子学基础知识丛书》，由科学出版社出版；其余两套是《无线电爱好者丛书》，由人民邮电出版社出版；《电子应用技术丛书》，由科学普及出版社出版。

《电子学基础知识丛书》侧重于系统地介绍电子学各专业学科的基础知识。以定性说透物理意义为主，少用数学推导。在文字上尽量做到严格准确、深入浅出。读者通过阅读本丛书，可以为更深入地学习、掌握和应用电子科学技术知识打下一定的基础。本丛书适于具有高中和大学低年级文化程度的广大读者阅读。

我们希望广大读者和电子科学技术工作者，对这套丛书的编辑出版提出宝贵意见，热情给以帮助，使之不断充实和完善。

中国电子学会科普编委会

目 录

第一章 开拓新波段, 建立新学科	(1)
(一) 电磁波大家族	(1)
(二) 信息时代的难题	(5)
(三) 解决难题的钥匙	(8)
(四) 难于驾驭的光波	(11)
(五) 量子电子学的诞生	(16)
第二章 量子放大器与量子振荡器	(21)
(一) 受激发射概念的提出	(21)
(二) 第一台量子振荡器的诞生	(25)
(三) 三能级微波量子放大器	(30)
(四) 从微波激射器到激光器	(33)
(五) 激光是怎样形成的	(37)
(六) 历史的回顾	(42)
第三章 形形色色的激光器	(46)
(一) 与众不同的激光	(46)
(二) 形形色色的激光器	(55)
第四章 光学领域的新效应和新现象	(67)
(一) 线性光学与非线性光学	(67)
(二) 倍频、混频和参量过程	(70)
(三) 自聚焦与自散焦	(75)
(四) 吸收与透明	(77)
第五章 光谱学的新秀——高分辨率激光光谱学	(81)
(一) 激光应用于光谱学之中	(81)
(二) 常规光谱与激光光谱	(86)
(三) 无多普勒增宽的激光光谱技术	(89)

第六章 量子计量学与量子频标	(97)
(一) 从宏观尺度到微观尺度	(97)
(二) 量子频标的组成和发展	(104)
(三) 非自激型铯束原子频标	(110)
(四) 自激型氢原子频标	(112)
(五) 稳频激光器与光频标	(116)
第七章 量子电子学的应用与发展	(128)
(一) 发挥激光三个高分辨率特点	(128)
(二) 促进通信与光学信息处理的新发展	(133)

第一章 开拓新波段，建立新学科

(一) 电磁波大家族

在浩瀚的海洋上，或在奔腾的江河中，我们经常能看到汹涌澎湃的波涛；在平静的湖面上，投下石子，波光粼粼，犹如一朵盛开的睡莲。这些波给美丽的自然界增添了不少诗情画意。除了水波之外，自然界还存在着许多其他形式的波，如声波、电磁波，等等，这些波整天在我们身边来回奔波，川流不息，我们简直是生活在波的“海洋”中。

电磁波是自然界中很普遍的一种波。无线电波、可见光、X射线和 γ 射线都是电磁波。电磁波种类繁多，是个成员众多的大家族。这个家族成员之间的差别，只是频率或波长不同。在讲到波的频率或波长时，有些读者可能不大清楚，你们可以想象在海面上一个长而平滑的水波经过一个浮标的情景：水波经过时，浮标一起一伏。我们可以测量两个波峰经过的时间间隔，这个时间叫做波的周期，通常用英文大写字母 T 表示。每秒钟经过的波峰数就是波的频率，用希腊字母 ν 表示。用式子表示为：

$$\nu = 1/T。$$

两个相邻波峰间的距离叫波长，并用希腊字母 λ 表示。波传播速度是波每秒钟走过的距离，它等于

$$v = \lambda/T \quad \text{或} \quad v = \nu \cdot \lambda$$

即，波传播速度 = 波的频率 $\times$ 波长。

频率的单位是赫 (Hz)，千赫 ($1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$)，兆

赫 ($1\text{ MHz} = 10^6\text{ Hz}$)，吉赫 ($1\text{ GHz} = 10^9\text{ Hz}$)。一赫代表波一秒钟振动一次，一千赫表示波每秒钟振动一千次，依此类推。波长 (λ) 通常用米 (m)，厘米 (cm)、毫米 (mm) 和微米 (μm) 等单位度量。一微米等于百万分之一米，即 $1\text{ 微米} = 10^{-6}\text{ 米}$ 。光波的波长通常用更小的单位——埃 ($\text{\AA}$) 来表示，一埃是一厘米的亿分之一，即 $1\text{ 埃} = 10^{-8}\text{ 厘米}$ 。

电磁波是传播速度最快的一种波。在真空中它和光一样，每秒钟跑30万公里，在1秒的“嘀哒”声中它可绕地球七圈半。通过精密测量，光在真空中传播的速度 c 为，

$$c = 299792458\text{ 米/秒}$$

或者，

$$v = c = 299792458\text{ 米/秒}。$$

从 $v = \nu \cdot \lambda$ 这个式子可以看出，当速度一定时，波长与频率成反比关系，即频率低的波，它的波长长；反之，频率高的波，它的波长短。把电磁波按频率从高到低或波长从短到长顺序排列成谱，此谱叫作电磁波谱。这时电磁波家族中各成员所对应的频率或波长范围示于图1.1中。无线电波的波长在几千米到一毫米的范围内，包括长波 (λ 约为 $10^3 - 10^4$ 米)，中波 (λ 为 $10^2 - 10^3$ 米)，短波 (λ 为 $10 - 10^2$ 米)，超短波 (λ 为 $1 - 10^2$ 米) 和微波 (分米波、厘米波、毫米波)；可见

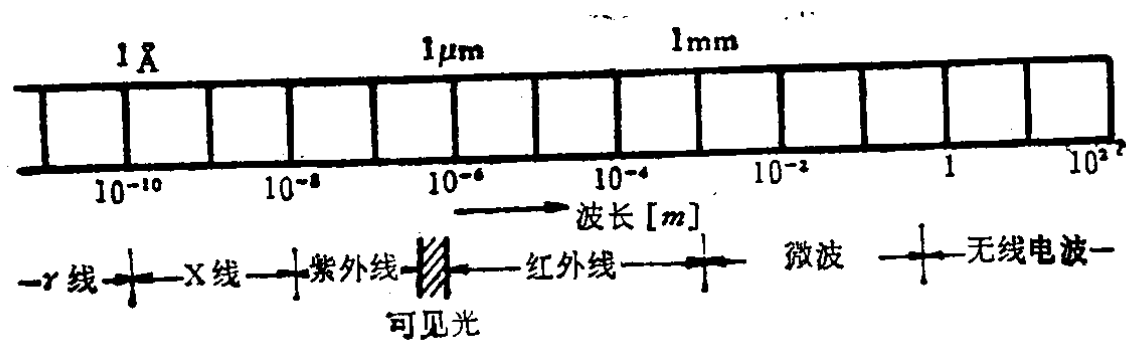


图1.1 电磁波谱

光的波长大约是4000—7000埃，它只占电磁波谱的很小一部分。

电磁波谱是在漫长的历史中逐渐被发现的。可见光是眼睛所能看得到的光，用不到科学家通过实验发现。但是，光的本质是电磁波这个科学结论是在1873年麦克斯韦（Maxwell）电磁理论发表后才逐渐弄清楚的。红外线的发现较早，1801年，英国一位物理学家做了个有趣的实验，他用棱镜把光分成各种颜色之后，拿一支温度计放在这些不同颜色的光之中，当他把温度计从紫光一端移向波长较长的红光一端时，温度计读数上升。当把温度计移到超出红光区时，温度计读数继续上升，而那里却看不见棱镜分出的光，从而发现了红外线。第二年，即1802年，科学家发现在太阳光的紫光区外，有射线能使氯化银（ AgCl ）分解，从而发现了紫外线。X射线发现较晚，1895年，德国物理学家伦琴（Röntgen）发现，在阴极射线管中受电子轰击的地方有一种看不见的射线，它能使照相底片感光。当时因为不知道它的本质，伦琴把它叫做X射线。后来才知道，它是一种比紫外线波长还短的电磁波，其波长大约在0.4埃到50埃范围，为纪念伦琴，人们也称它叫伦琴射线。发现X射线后的第二年，即1896年，法国物理学家贝克勒尔（H. Becquerel）发现 γ 射线，经研究知道，它是一种比X射线波长更短的电磁波。

电磁波的存在是英国物理学家麦克斯韦首先从理论上预言的。麦克斯韦的预言对物理学的贡献是划时代的，遗憾的是，麦克斯韦本人未能证实自己的理论，他的功绩在生前也没能得到重视，只是在他死（1879年）后许多年，赫兹（Hertz）证明了电磁波存在，人们才意识到并公认他是“自牛顿以后世界上最伟大的数学物理学家”。

赫兹是德国物理学家，他经过反复实验，终于在1888年

发现并探测到人们期望已久的电磁波。赫兹实验公布后，轰动了全世界的科学界，麦克斯韦的电磁理论取得了决定性胜利。这位科学巨匠的伟大遗愿，终于实现了。

赫兹的发现，不仅证实了麦克斯韦预言的真理，更重要的是导致无线电技术的诞生。理论能够解释世界，理论回到实践又可以能动地改造客观世界，赫兹的不朽功绩就在于他促成了这一转变。

电磁波的出现所产生的巨大影响，连赫兹本人也没有预料到。第二年(1889年)曾有人问他电磁波可否做无线电波通信，赫兹不敢肯定。然而，事隔不久，1895年，意大利科学家马可尼 (G. Marconi)、俄国科学家波波夫 (Попов) 分别实现了无线电波通信。随后，无线电技术如雨后春笋般涌现出来，无线电广播 (1906年)，导航 (1911年)，无线电话 (1916年)，短波通信 (1921年)，微波通信 (1933年)，微波雷达 (1935年) 以及遥控遥测、卫星通信、射电天文等都是这一变革的产物。无线电波使人类社会的生活面貌发生着深刻的变化：遥距万里的亲人，通过电视电话能如同面对面一样地交谈，音容笑貌栩栩如生；远在祖国边陲的军民，通过电视广播也如身临其境地看到首都北京正在进行的体育比赛和文艺演出…人们好似长了“千里眼”、“顺风耳”。

电磁波谱从波长几千米的无线电长波到波长小于亿分之一厘米的 γ 射线，波长变化达百万亿倍 (10^{14})！不管波长变化有多大，它们都具有同一的电磁本质，真空中具有相同的传播速度——光速，它们是属于同一族的。但是，不同波长范围的电磁波产生的方法是很不相同的。无线电波是由电磁振荡电路产生，通过天线发射的，它是利用真空中或半导体中运动的自由电子或自由载流子实现放大和振荡的；炽热的物体（例如白炽灯）、气体放电（日光灯）以及其他光源

发射的可见光波是由原子中外层束缚电子的跃迁产生的，X射线则来自于原子内层束缚电子的跃迁，具有很强的穿透本领；γ射线起因于原子核中的电磁跃迁，其穿透本领更强。

从这些介绍中，我们既看到各种波长电磁波本质是相同的，又看到不同波长范围的电磁波各具有自己的特殊性质，这就是电磁波大家族成员的共性和特性。

(二) 信息时代的难题

大家常说，通信好比人体的神经，因为它能象神经一样迅速传递信息。人类社会就象整个人体一样，各地区与各地区，各部分与各部分，人与人之间都需要互相联系，互相配合，互相协调，都有大量的信息需要交流和传递。通信就是人们传递信息的工具。它把社会生产、分配、交换、消费以及人们之间的交往有机地联系起来，从而节约时间、缩短空间、节省能源，加速社会的生产和流通过程，促进社会进步和发展。在当今世界上，与通信不发生联系的人恐怕是不多的，一般人总要打打电话、听听广播，看看电视吧。可以设想，如果现代社会中没有电报、电话、广播、电视，没有航空通信、航海通信、气象卫星通信以及医疗急救通信等，我们的生产和生活将是什么样子呢？因此，有人把通信比做支柱，认为能源科学、材料科学和信息科学是近代科学的三大支柱，并认为未来的社会中，各种信息的提取、传输和处理将成为社会生活的主流。

那么，什么是信息呢？信息是个抽象名词，它的性质有点象“数”这个概念。信息既不同于任何具体事物，又不能把它和具体事物分开。打电报时，信息的表现形式是电报的内容；在两人对面交谈中，信息既可以通过语言来传递，又可以

• 5 •

通过手势、眼神、面部表情等进行传递。在这种情况下，可以说一举一动、言谈笑貌无不包含信息的表达和传递。概括地说，信息就是对接收者来说预先不知道的消息，是人类知识的媒介，是在技术、经济和社会范围内通信的媒介。

信息处理方法的每一次重大革命或革新，都使人类社会进入更文明阶段。纸和活字印刷术的发明，是信息的表示和存储方法的革命；电报、电话和电视的发明，是信息加工和传递方法的革命；算盘、计算机的发明，是信息处理工具的革命……“信息时代”的美好远景，令人神往。然而，人们的社会需求是无止境的。比方说，人们不满足于只能听到对方声音的普通电话，希望有既能听到对方声音，又能看到对方面容的可视电话，当然还希望有电视教学辅导、电视科学讨论会，又多么希望能有全频道电视广播。目前，我国正在试播的立体声广播，也是人们盼望已久的事情。

为了满足人们对通信越来越高的新要求，必须大大增加通信容量。例如，250路普通电话的线路，只能通一路可视电话。这就是说，如果普通电话用户都改用可视电话的话，就要把现有的通信容量增加250倍！

讲到这里，你也许会说，增加通信容量不是一件很容易的事吗？多铺设几根电缆，多建立几个电台不就解决问题了吗？事实上，问题并不这么简单。铺设电缆要花费巨大投资，用掉大量铜、铅等贵重金属。在地下管道十分拥挤的城市，铺设电缆更是一件难事。那么，多增设电台是不是就可以解决问题了呢？情况也并非如此，这是因为广播电台的数目不能无限制地任意增加。某一个地方，到底最多能允许设立多少个电台，是受一定的条件制约的。原因何在呢？

大家知道，收音机频率刻度盘上分布着许多刻度，一定的刻度对应着一定的频率，每个电台都占有一定频率范围，

通常称它为频带宽度，简称带宽。无线电广播电台的带宽一般是10千赫，电台数目多了自然发生拥挤。此外，同一地区两个电台使用的频率不允许重叠，否则，两个电台广播的节目就要“打架”了，“你中有我，我中有你”，听众收到的是夹杂在一起的声音，好象许多人同时对你大喊大叫，结果谁的声音都听不清。为了保证电台广播的质量，每个电台所使用的频率都被划定了一个“势力范围”，谁都不能越过雷池一步。因此，同一地方能允许设立电台的数目是有限的。一般说来，一路语言电话占300—2700赫带宽，就能分辨出讲话者是男还是女，是张三还是李四；一个优质的音乐节目需要占用30赫到15千赫的带宽，才能充分保证音响效果。无线电中波广播的频率范围大约是550千赫到1450千赫，如果平均按每个电台占10千赫带宽计算，最理想的排列也只能容纳90个中波电台。短波波段的频率范围是3兆赫到30兆赫，可资利用的带宽是27兆赫，最多也只能设立2700个电台，当然也应该包括所有的广播电台、电信台、导航台等。目前，全世界所有短波电台数目显然超过2700个，短波波段也实在太拥挤了。

问题还不止于此，正在蓬勃发展的电视广播和调频广播，需要更宽的频带。调频广播需要150千赫带宽，电视广播带宽一般为6到10兆赫。现在，人造卫星、宇宙飞船，已经成为二十世纪的科学现实。通信技术面临一个新的考验，人们不但需要洲际通信、全球通信，而且需要空间通信、宇宙通信，这一切对电磁波“通信员”的要求越来越高，长波、中短波都不能满足这个要求，就连频率更高的微波通信也只能传送几千路电话或几十路彩色电视。事实上，目前的通信设备处于超载运行。横跨大洋的电话线已经满足不了要求，用户经常要等几个小时才能轮到使用。然而不断增加的

发射天线，又大量地向空中倾泻信息，使通信通道异常拥挤。

各种形式的发射，如调幅和调频广播，国际电话和传真，电视和雷达，它们互争频道，相互干扰。为了防止这个局面出现，正在发展许多巧妙通信办法，设法把信息装到传播通道中。这些技术虽然是有价值的，但都无法解决根本问题，因为无线电通信目前可资利用的频带太狭窄了。因此，开拓新的无线电波段，不断增加传送信息的能力，是摆在“信息时代”的一个难题。

(三) 解决难题的钥匙

有没有办法增加通信容量，能不能找到一把解决“信息时代”难题的钥匙？让我们先看下面事实：

直流电报是沿金属导线传输用电脉冲表示的电码，所以，传递脉冲就是传递信息。只要有100赫的频带宽度，就足以满足直流电报的传输要求了。

传真电报已不是传送文字的编码了，而是直接传送文字或图象的真迹，显然它传送的信息量比直流电报要大，需要的频带也宽。

电话传输的信息是直接语言，另外还伴有表征人们语言特点的音色。在满足语言清晰度的前提下，它所需要的带宽比电报所需带宽还要宽。

电视广播不但播送伴音信号，还要播送活动的图象，它提供了更多的信息，需要占有更宽的频带。

上述事实告诉我们，传输的信息量越多，需要占用的频带就越宽，或者说，传输的信息量与频带宽度成正比。因此，为了满足人们对通信容量日益增长的要求，必须不断扩

展可用的带宽。

频带宽度这个概念，前面已经简单地介绍过，为了使读者进一步了解这个概念，在这里我们结合无线电广播的具体情况再补充说明一下。大家知道，声音或者图象只有转变成电磁波后，才能由电台发送到远方并为听众或观众所接收。我们称载有声音或图象信息的电磁波叫“载波”，它好象一个行动迅速、善于长跑的通信员，“背”着声音或图象这些信息，从一地传送到另一地。那么，怎样使声音等信息“骑坐”在载波上发送出去呢？通常有两种办法：一种叫调幅（记做AM），另一种叫调频（记做FM）。调幅就是用声音信号去调制高频载波的振幅，这时声音信号就“骑坐”在载波振幅上被发送出去〔图1.2（a）〕。调频则是用声音信号去调制高频载波的频率，这时载波振幅虽然不变而它的频率则随声音信号强弱有规律地变化，变成疏密不等的波列，于是，声音信号就载在频率变化的载波上被发送出去〔图1.2（b）〕。当电台在发射电磁波（例如调幅波）时，除了发送载波频率之外，还伴随有两个新的频率成分：其中一个比载波频率高，叫上边带；另一个比载波频率低，叫下边带。无线电广播中，常把上边带的最高频率和下边带的最低频率之差叫广播的频带宽度。例如，载波频率为640千赫的中波广播，其上边带的频率范围是640至645千赫，下边带的频率范围是635至640千赫，于是，广播的频带宽度是 $645 - 635 = 10$ （千赫）。

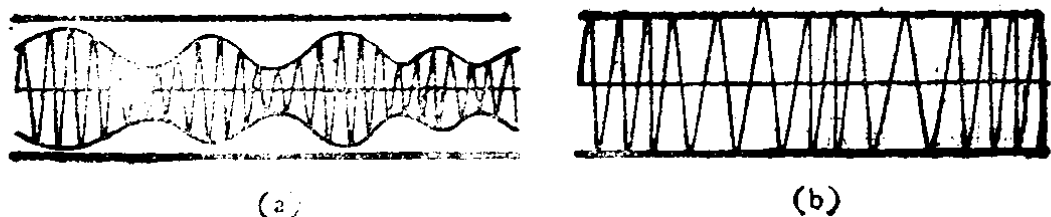


图1.2 调幅波与调频波

理论分析结果告诉我们：第一，信道的传输能力与信道的频带宽度成正比，即：

信道传输能力 $\propto$ 信道频带宽度

所谓“信道”，就是信息传输的通道。例如，我国自行设计制造的一千八百路中同轴电缆，它能传输一千八百路电话。对于传输电话来说，我们就可认为，这根中同轴电缆有一千八百个信道。第二，同一地区允许同时设立电台的最大数目与载波频率成正比，即：

设立电台最大数目 $\propto \frac{\text{载波频率}}{\text{频带宽度}}$

这样，我们可以找到一把解决难题的钥匙，这就是，扩展可用的频带宽度就能增加通信的信息容量；对于一定频带宽度的广播来说，提高所用载波频率就可增加允许设立电台数目，即高频电磁波比低频电磁波能载送更多的信息。

电视比一般无线电广播能传送更多的信息，所以它需要更宽的频带。一路电视所需要的带宽比整个中波波段还要宽好几倍，这样宽的频带根本无法安排在中、短波段。如果用一厘米波长的微波代替波长一百米的中波载波，信息容量可以提高上万倍。如果波长进一步缩短，例如毫米波段（波长从10毫米至1毫米），它的可用频率范围是3万兆赫至30万兆赫，相应的频带宽度为27万兆赫，可同时设立上千万个广播电台或上万路电视广播。讲到这里，大家自然会想到，用波长比微波更短的光频电磁波作载波进行通信，信息容量不是可以千万倍甚至亿万倍的增加吗？

事实的确如此，不断地争取提高载波频率，不断地扩展可用频段，是几十年来无线电电子学发展的一个主流，是通往信息时代的一块敲门砖。回顾几十年电子技术发展的历史，概括起来说，本世纪二十年代以前，人们使用的是无线

电中波和长波，三十年代驾驭了短波，四十年代征服了超短波。第二次世界大战期间，雷达的发明和使用，促进微波技术日臻成熟。到了五十年代，人们彻底驾驭了厘米波，开始向更短波段开拓，向更高频率挺进。下一个攻克的目标，当然是波长更短、频率更高的光波波段，人们正期待着无线电波和光波的会师。

这里再补充说明一点，扩展可用频带、提高载波频率或缩短波长，不仅是增加通信容量、解决“信息时代”难题的一把钥匙，而且也是提高“分辨力”的有效手段。因为波长越短，电磁波的“分辨力”就越高。道理很简单，比如请你测量和分辨两张纸哪张薄哪张厚，如果给你一把售货员卖布的尺子让你去测量，几乎无法分辨；如果你用测微计去量，就可以测量和分辨出来了，这是因为测微计空隙宽度甚至可以小于纸的厚度。目前用的厘米波雷达，在荧光屏上只能看见空中飞机和海上舰队的队形，看不见目标本身的形状；如果使用光波雷达，那么不但飞机类型，就连驾驶员的面目也清晰可辨了。

到此，问题已经讲清楚了，解决难题的途径也基本明确了，这就是，向光频进军，开拓光波新波段，象利用和控制无线电波那样，掌握和驾驭光频电磁波，让光波参加无线电通信行列。

（四）难于驾驭的光波

我们的祖先，早在古代就已使用烽火台的火光进行通信，这就是一种原始的光通信方式。直到现在，船舰之间还经常用灯光语进行光通信。近代光通信的历史比无线电通信的历史还长，波波夫成功地发送和接收第一份无线电报是在