

光 电 子 学

〔日〕 西沢潤一著
史一京 石忠诚 译

人 民 邮 电 出 版 社

オプトエレクトロニクス

西沢潤一著

1977年

内 容 简 介

本书是一本着重介绍半导体光电子学的专著。内容较丰富，既有基本概念又总结了70年代的科研成果，同时预测了未来的发展，理论密切结合实际。

本书一至四章从光的电磁波理论出发讲述了光在介质中的传播，重点介绍了介质光学的经典理论。以下各章分别对与光通信直接有关的发光器件、光接收器件、光纤传输以及二维显示等各专题作了阐述。这几章除一般性理论介绍外，还给出有关图表或结论性公式，并提供了一些器件的设计、性能参数，便于实际应用。可供大专院校有关专业的师生、工程技术人员阅读。

光 电 子 学

〔日〕 西沢潤一 著

史一京 石忠诚 译

责任编辑：李 树 岭

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：850×1168 1/32 1983年10月第一版

印张：9 28/32 页数：158 1983年10月天津第一次印刷

字数：259千字 印数：1—9,000册

统一书号：15045·总2785—有5329

定价：1.45元

译 者 序

光电子学是研究光与固体中的电子相互作用以及光能与电能相互转换的科学，它是一门既老又新的学科，说它老指的是它所涉及的一些内容早在十八世纪就已经进行了研究；说它新是因为它只是在近期（60—70年代）才有了较大的发展，并且成为一门比较系统的学科。

关于光通过介质界面时的折射和反射以及在吸收介质中的传播，早在上一世纪就已经用麦克斯韦的经典电磁理论进行了研究。关于光的受激辐射和吸收在1917年爱因斯坦就建立了系统的理论。但是，利用光的受激辐射制成固体、气体和半导体等激光器则是1960年以后的事情。激光器问世后，人们才得到了高转换效率的相干光源，这是电能向光能转换方面的一次飞跃。关于光能到电能的转换以及用光信号控制电信号的研究，是本世纪五十年代开始的。

随着半导体激光器以及光纤研究的深入，到了70年代，光通信具有了现实的可能性。同时薄膜光学与集成光学也同时得到了进展，这为今后的光计算机和光信息处理等应用奠定了基础。这时，光电子学开始成为一门比较系统的学科。

本书作者西沢潤一教授在光电子学方面有不少贡献，作者在本书中综合了包括自己的研究在内的许多新成果。本书的特点是基础理论叙述比较清楚，具有一定的深度，同时还根据实用的需要，给出了很多具体的实验数据，在对光电子学的基础知识进行了讲解之后，对光电子学的各个部份诸如发光器件、光接收器、光纤传输以

及二维显示等进行了叙述。本书完稿于1976年，时至今日，在光电子学的各个领域自然又有很多新进展，但就其基础而言，仍未脱离本书所涉及的内容。对于从事激光器、光接收器、光通信、光计算机以及显示工作的工程技术人员以及有关专业的大专院校师生具有一定的参考价值。

本书成稿后，全部译文请中国科学院半导体研究所杜宝勋同志作了审阅。由于译者水平有限，错误和不妥之处敬希读者批评指正。

译者

1982年11月30日

作 者 序

用光进行通信的历史虽然十分悠久，但现代化光通信却是极近的事情，比本书作出版计划的时间还要晚。现代化光通信的转机在于半导体激光器的出现和光纤的发展。关于光通信的开端，如喜安善市先生所说：“光通信发端于东洋人。”但是要谈到其后的发展，我们只能说“遗憾”二字。只希望今后能再度通过我们的努力，使光通信得到进一步的发展。

我们日本几乎什么资源也没有，我们民族赖以生存的唯一手段是灵活运用大脑和技术。包括光通信在内的光电子学，与其他学科相比，无论速度、密度和能量灵敏度都是出类拔萃的，发挥了物质的极大功效。这是一个很合乎日本国情的领域。

在写本书的时候，八木秀次先生和渡边宁先生逝世了。八木先生是本世纪的巨星，他曾组织了冈部金次郎、宇田新太郎等东北大学的一些青年教师，进行了超短波的研究，并在偏僻的仙台组织了国际性的研究小组。渡边先生是我的恩师，是仙台市研究半导体技术的先驱者。

光通信是无线电研究方向越来越向短波长发展的产物。至于说到我，甚感惭愧，由于受宇田和冈田幸雄二位的影响，以及前辈松前重义所说的“频率是个宝”等名言的启发，方立志于研究光。另外我也不爱赶时髦，渡边先生让我研究半导体，于是我就根据他的意见选择了我的研究道路。就这样我也参加到光电子学研究的行列里了。还是在高中的时候，我参观过有井癸巳雄和富永齐等人发展起来的东北大学的玻璃研究所和玻璃工培训所。到大学的研究室之后，又实习过真空管道和扩散泵的修理，这是我使用玻璃的开端。

世界闻名的贝尔研究所把心血放到了气体透镜上，而忽视了使

用玻璃。在当时的STL（现在的ITT）工作的年轻学者高铨提出了利用玻璃，並得到了所长艾温斯（Evans）的支持。作者也提出了聚焦纤维的方案。当你看到有人怀着悲戚的心情竭尽全力去通读特许书，拚命地想对事情进行订正时，大概就能推测到当时的真实情况。

苏联列别捷夫研究所的巴索夫和普列霍罗夫博士以及多温斯教授由于提出了半导体激光器的设想而获得了诺贝尔物理学奖金，但他们的提案要比作者的晚一年多。在光电子学方面我真是感慨万端。

本书与一般的科普读物不同，重点在于讲解基础知识，同时又对现状作了介绍。因基础知识讲的是基本原理，所以它包含有将要发展的东西，本书是想播下一些未来技术的种子。如果读者由于读了本书而抓住了某些新的线索，本书就算起到了应有的效果。

光电子学的研究对象是速度最快的量子现象，所以可以得到效率极高的东西，因而可以说是一种极端技术。在半导体激光器上加的电压即便很小，复合发光的光子能量也与禁带宽度相等。因此可以发射出能量比所加电压要大的光子。如果发射效率高，将半导体激光器一边冷却，一边让其发光时，可能发出比输入功率还要大的光功率。

对于电磁波，当波长变短时，若物体的尺寸也相应减小，则处理就比较容易。在光电子学中，作为量子现象，利用光化学作用可以在一个分子的大小上得到很高的速度和很高的效率。

最后，光电子学也是一门极为理想的技术。节省能量，节省资源，对于人类社会的神经系统最有适用价值。当然在进到最后的应用阶段时会遇到很多困难，但作为前期已经在飞机的控制系统上大量采用了，今后还会被大量的应用。人类社会的进步就在于更多地使用可靠的技术，因而估计这门学科对将来的世界文明可能有更大的贡献。

光电子学是一门最新技术，同时又是一门古老的技术，从宏观

现象到分子现象，其范围非常广泛，因而要想只靠本书来得到全面而彻底地理解是很困难的。通过本书只能掌握一些概念，对需要作进一步了解的问题，可参考列出的文献。

不管怎样，“书读百遍，不嚼自烂”，对一本书反覆熟读要比泛读许多本书的效果好得多。

本人不才，本书完成时间比预定的较晚，给北川敏男先生和喜安先生添了不少麻烦。另外共立出版社的佐藤邦久科长和安部登祉子对本书的出版也费了许多心血，在此深表感谢。本研究室的日野和森下帮助我进行了誊抄、校正以及文献整理，也在此致谢。

本书开始在图像技术上进行了连载，这次又作了补充修正。由于著作权的关系复杂，所以这里说明一下，本书采用了原著的很多图，只不过是表示仍然承认原著作的创造性，并对那些能谅解我使用原图的人们表示深切的感谢。

西沢潤一 1977年6月

目 录

第一章 绪论—光电子学的发展	1
1.1 光波与通信的回顾	1
1.2 高效率光源的探索	2
1.3 相干光源的进展	4
1.4 光耦合方式的进展	7
1.5 光的传输	8
1.6 光的调制	10
1.7 光的接收	12
1.8 光的偏转	13
1.9 全息照像和光放大	14
1.10 集成光路	15
文献	
第二章 光波与电磁波	18
2.1 光波的电磁理论	18
2.2 光波的干涉与全息照像	23
2.3 衍射光栅的分光作用	34
文献	
第三章 光的折射和反射	41
3.1 斯涅尔定律和布儒斯特角	41
3.2 全反射	53
3.3 金属反射	56
3.4 抗反射膜和增反射膜	58
3.5 法布里——珀罗干涉仪	61
文献	
第四章 介质光学	63
4.1 光的传播速度和色散	63
4.2 非线性光学效应	68

4.3	光在晶体中的速度	69
4.4	一次电光效应	74
4.5	光活性	78
4.6	二次电光效应	82
4.7	法拉第效应	85
4.8	克通—姆通效应和伏格特效应	92
4.9	光波引起的高次谐波	96
4.10	受激拉曼散射和受激布里渊散射	101
4.11	压光效应	102

文献

第五章	光的发射和放大	111
-----	---------------	-----

5.1	历史上的发光现象	111
5.2	发光二极管	115
5.3	激光器和微波量子放大器的原理（光的振荡和放大）	120
5.4	气体激光器	122
5.5	化学激光器	123
5.6	半导体激光器	126
5.7	半导体激光器中的电磁场	136
5.8	激光二极管的工作速度	150
5.9	激光器间的相互作用	157
5.10	其它激光器	160

文献

第六章	光的吸收和探测	167
-----	---------------	-----

6.1	物质对光的吸收	167
A、	晶格吸收	169
B、	载流子吸收	175
C、	杂质吸收	179
D、	本征吸收	186
E、	等离子吸收	190
6.2	利用光电导的光探测	191
3.3	pin光二极管	199
A、	光二极管的灵敏度	200

B、光晶体管	205
C、光电容	208
6•4 光-电解存贮变换	209
6•5 光照使物质的光学性质发生变化	210
6•6 光化学效应	212
6•7 光热效应	212
6•8 光电子发射	213
6•9 光波的混频调制	214
6•10 结束语	219

文献

第七章 光的传输	224
7•1 光的无线传输	224
7•2 光在圆管中的传输	225
7•3 光束传输	227
7•4 气体透镜	229
7•5 玻璃纤维	230
7•6 被复型玻璃纤维	231
7•7 聚焦型光纤	235
7•8 方形介质波导	237
7•9 聚焦型薄膜波导	238
7•10 薄膜包复传输线	239
7•11 光的耦合	240
7•12 光转换器	242
7•13 数值孔径	243
7•14 集成光路	244

文献

第八章 二维处理和记录显示	252
8•1 从前的二维显示	252
8•2 二维光信息处理	254
8•3 光束偏转	265
8•4 光点移动	270
8•5 光记录	281

8.6 摄像291

 文献

第九章 光电子学的未来302

 文献

第一章 绪 论

——光电子学的发展

1.1 光波与通信的回顾

1954年人类成功地把光同电磁波衔接起来了。也就是说，人们用分光法得到了波长为 $100\mu\text{m}$ 的单色光，同时又用晶体整流器得到了倍频的电磁波。1973年又得到了波长为 $30\mu\text{m}$ 的受激光。现在光与电磁波同样地被广泛应用着。

顾名思义，光电子学是利用光的电子学。人类利用光来进行通信的历史可以追溯至原始社会，当人们开始认为有必要进行通信时，首先用的就是光，所以说它的历史是相当悠久的。印第安人的烟信号就是一种莫尔斯符号，这是通过烟量随时间的变化而发出的时序信号。旗语信号与此不同，就某一时刻来说，它是根据红旗和白旗相对于旗手的方位不同来传递信号的，所以它是一种图样识别信号。气象台的天气预报旗完全是没有时序的空间分布信号。

这种自古以来，或者说在有人类历史以来，一直使用的光通信，后来完全被电通信所淘汰，这是因为对光不能进行有效的高速调制的缘故。其次，就算是可以进行高速调制，也没有解调的方法。

另外，大气对光的吸收很大，没有合适的光路就不能把光传到远处，这与电通信相比也是其不足之处。此外，还有一个相干性的问题。在无线电通信中，通过方向性很好的天线把载有信号的电波传到远方。例如八木天线或八木——宇田天线。抛物天线也是其中的一种。当用这些天线将电波定向发射时，发射的这些电波必须有一定的相位关系，这样它们就会因相互干涉而得到定向发射的效果。

在对相位相关的连续波进行分谱测量时，结果看到能量都集中在一个波长上。可是在对非相干光进行分光时，即使说单色光，它也含有若干不同的波长。而且，所含的波长成份时时刻刻都在变化着，这就产生了噪音。当用高速调制来传送信号时，严重的噪音是十分令人烦恼的。由此可知，如果用高速调制，也就是要传送大量信息时，必须使用具有相干性的光。

因此，为了广泛应用光通信，还必须发展许多种部件，所以直到晚期它才获得应用，而且发展也很慢。就光源来说，是一直没有适当的发光装置。稍微好一点的发光装置要算弧光灯了，虽然它的效率很高，但是碳棒电极消耗严重，所以其装置很庞大。

1.2 高效率光源的探索

请回忆一下迈克尔逊的干涉实验。如图1.1所示，利用半透镜把来自光源的光分为两束，再用反射镜把这两束光反射回来，形成合成光，将合成光照射到毛面反射板上，这时无论从什么角度都能看到反射光的干涉图样。当把其中一个反射镜前后移动时，会发现干涉光时隐时现。这是因为：当二束光的光程差是波长的整数倍时，它们互相加强，使眼睛看得见；当光程差为半波长的奇数倍时，它们互相抵消，眼睛就看不见了。

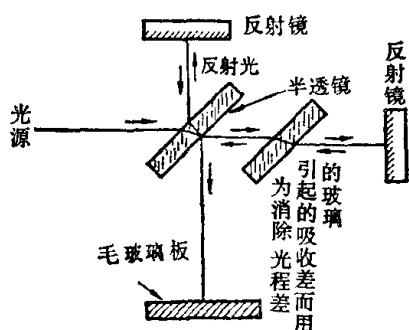


图 1.1 迈克尔逊干涉仪原理图

一般说来，当光程差过长时，不发生这种干涉现象。这就是说，当一列光波超过一定长度时，它们是不连续的。光波维持连续的最大长度称为一个波列。从光的粒子论来说，一个波列并不限于一个光子。例如镉原子，在一个大气压下，在 15°C 的空气中，它发出波长为 $6438.469\text{ \AA}$ 的红光，而波列约为 30cm ，即持续时间约为

10^{-9} 秒。因而把它作为米的标准原器是相当困难的。

另外，在相当长的时间内，人们苦于只有体积大且效率低的光源，一直到现在电灯泡（包括小电珠）仍然被广泛地使用着。后来，好不容易制成了荧光放电管，效率要算是相当高了，但是也不过只有20%，而且它的体积不能再小了。人们本来对场致发光抱有很大希望，但到此时，也几乎不再有呼声了，可以说它完全没有得到应用。

但是，这种场致发光与从前所用的发光体相比，不仅体积小，并且发出的光相当接近于单色光，因此有人探讨了它的许多可能应用。因为它的体积可以作得很小，所以就连它必须使用交流电这一缺点也不算什么问题了。

在这样的历史背景下，劳伯纳 (Loebner)¹⁾ 提出了光电子学这一概念。如图1·2所示²⁾，他把电光学 (electro-optical) 和光电子学 (optoelectronic) 严格地区分开了。实际上这并没有多大意义，从广义来说，还是把光电子学解释为“利用光的电子学”为宜。

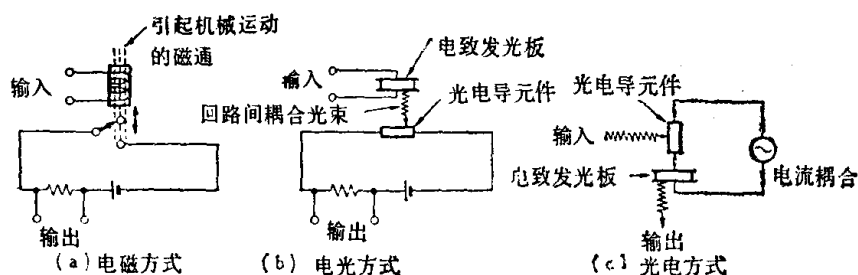


图 1·2 回路间的光耦合和电磁耦合 (据E.E.Loebner²⁾)

按照劳伯纳的说法，当输入和输出信号为电流或电压，而其间的耦合利用光时，称为电光学。如果输入和输出信号是光，而其间的耦合利用电流或电压时，称为光电子学。但是，如果把这个概念用到包括激光器在内的现代光电子学上，诸如考虑利用电流或电压来控制输入和输出之类，则在现代的光电子学中是毫无意义的事，所以应该多加注意。

这样区分通常不过是表示对发明者的原意的尊重。试想如果在输出和输入中只有一方是光的时候，那又该叫什么呢？这岂不成了一个很复杂的问题吗？因此，以下的论述是把光电子学理解为“利用光的电子学”。现在，习惯上也多是这样理解的。

1.3 相干光源的进展

当利用福岛县原町上的天线塔同美国进行无线电通信时，发射的电磁波是通过把水银开关和共振回路连接起来而获得的断续波，这样的断续波与光的波列十分类似。

人们把从各个天体传来的光进行分光，渐渐弄清楚了天体周围的气体发出的亮线和吸收线，这些线为受激发射线。也就是说，当气体受到外界光照射时，助长了在激发状态下产生波长与外界光相同的复合发光。人们大约是在十九世纪初期，即弗朗荷费时代才认识到这一点的。

在对分子进行研究时，常常取出处于激发态的分子测定它的发射光谱。这时必须把激发态的分子和基态的分子区分开来，为此通常利用斯塔克效应。即加上电压使某一能级上的电子能量增加，而其它能级上的电子能量减少。

对氨分子来说，基态的分子，最外层电子的能量随电场而减小，而激发时，电子的能量增加。即分子的能量随电场而变：激发态分子的能量随电场增加，处于不稳定状态；而基态的分子与此相反。使一些区域有电场，一些区域无电场，并把分子置于它们的交界处，处于激发态的分子将向无电场的地方集结，而未被激发的分子则被拉向相反的方向，结果就将两种分子分开了。利用塞曼效应也能够得到同样的效果。

在相当于正方形的四个顶点的地方平行地放置四条线，交错的加上正电压和负电压，就形成了一个长长的四极子。利用磁极也可形成同样的磁四极子。当把氨分子引入四极子的中心时，处于激发

态的分子将聚集到无电场的中心上，而处于基态的分子将跑到电场较强的位于四周电极之间。也就是说，沿着四极子中心线到电极端点聚集的分子都是激发态的分子。分子的分离在电四极子的情况下是由斯塔克效应引起的，而在磁四极子的情况下是由塞曼效应引起的。

利用能使这些分子产生受激辐射的电磁波照射这些分子，氨分子就逐渐发射微波。多温斯在1954年进行了这个实验，得到了23870MHz，即1.25cm的微波，结果表明得到的是受激发射，相位有一定的关系。在这一现象的研究中，霜田光一教授的功绩也是很显著的。

1961年捷温(Javan) 等人³⁾用氦气成功地实现了光波段的量子受激放大。沙维罗夫(L.Schawlow) 和多温斯(C.H.Townes)早在1958年就预言过这一现象⁴⁾。捷温的实验是在此三年之后的事。

梅曼(T.H.Maiman) 于1960年首先在固体中得到了光受激放大，即激光⁵⁾。开始是在硅中掺入磷，利用自旋的能量差得到

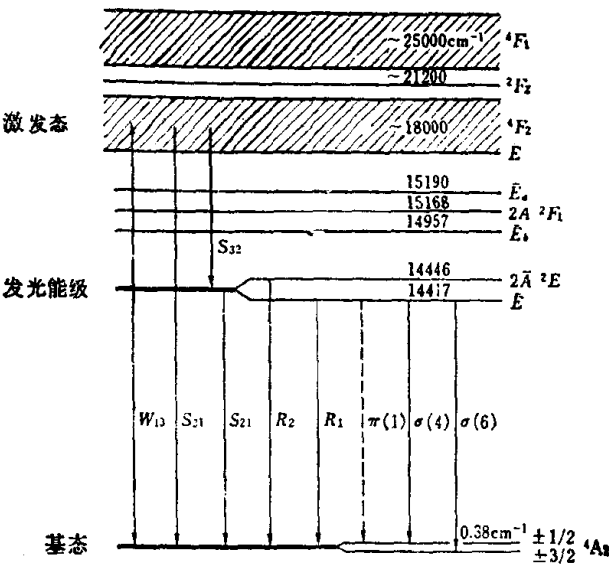


图 1·3 红宝石激光器的跃迁。右边数字表示向基态跃迁时的发光波长，单位是1cm中所含的波长个数（据A.K.Livene编的“激光”第一卷，V.Ertuhov和J.K.Neeland “脉冲红宝石激光器” P.4）

微波振荡的。数年之后，就用红宝石材料了。

但是，利用固体有一个较大的缺点，如图1·3所示，它利用的是三能级，首先必须把电子激发到高能级 4F_2 上(W_{13})，然后落到发光能级 2E 上(S_{32})，再跃迁到基态 4A_2 上，并发出能量为 R_1 的光。只有这部分能量才是可利用的能量。而在 S_{32} 过程中放出的能量则是无用的。 R_1 的波长是 14417^{-1}cm ，即 0.7μ 。而最初将电子激发到能级 4F_2 上时所需的能量 W_{13} 是借助于另外的光照得到的。必须用 18000^{-1}cm ，即约相当于 0.55μ 的光进行激发。一般用氙灯激发。由于其效率相当低，氙灯只能脉冲工作，若连续工作(CW)氙灯就会立即损坏。

下面我们来研究一下激光和微波量子受激放大的本质。它们都是使电子从高能级落到低能级并放出能量。为了使高能级上的电子得到补充，必须通过光照激发一定的分子，或者通过放电使其离化。

就固体激光器来说，可以把激发了的红宝石移到谐振腔中，这与分子束微波量子放大器相对应。也可加强电场以破坏其绝缘性，这与放电的情形相对应。

在半导体领域里，除上述方法之外还可以采用注入载流子的方法，因为在pn结上加正向电压之后n区导带中的电子就会流入p区，在那里与空穴复合。这正符合激光器和微波量子放大器的原理。在pn结上加较大的反向电压会使其击穿，这则与气体激光器相似。用光或电子束照射半导体，则与光激发的激光器相似。渡边等⁶⁾人在1957年曾提出这一方案，霍尔(R.N.Hall)⁷⁾、内森(M.I.Nathan)⁸⁾以及奎斯特(T.M.Quist)⁹⁾等三个小组在1962年分别制作出了半导体激光器。

半导体激光器的效率在50%以上，可以小型化，而且能量密度很高。另外还有电源小等许多优点。

从图1·4可以看到，利用半导体材料已经在 $0.33\sim 30\mu$ 波段内得到了激光。也就是说，在半导体中已经得到了从 10THz 到 1000THz