

高等学校教学用书

电子光学

DIANZIGUANGXUE

成都电讯工程学院选编

人民教育出版社

高等学校教学用书



电 子 光 学

DIANZIGUANGXUE

成都电讯工程学院选编

人 民 教 育 出 版 社

电子光学

成都电讯工程学院选编

人民教育出版社出版

高等学校教学用书编辑组
北京宣武门内承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第2号)

人民教育印刷厂印装

新华书店科技发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 13010·1030 开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 日张 $5 \frac{2}{3}$

字数 122,000 印数 0001—6,000 定价 (6) 0.55

1961年8月第1版 1961年8月北京第1次印刷

目 录

第一章 緒論	1
§ 1.1 电子束管的定义和典型結構	1
§ 1.2 电子束管的发展历史和应用	2
§ 1.3 电子束管与电子光学的关系	4
§ 1.4 电子束管的分类	6
第二章 电子光学与光学的类似性	8
§ 2.1 电子光学折射率的概念	8
§ 2.2 电子光学中的最小作用量原理	9
§ 2.3 电子光学折射率的特点	11
第三章 电子在軸对称靜电場中的运动	14
§ 3.1 軸对称电場(旋轉对称电場)	14
§ 3.2 場在对称軸附近的特点	16
§ 3.3 軸对称靜电場的求解	21
§ 3.4 解析法求解軸对称靜电場	21
§ 3.5 电位分布的数值計算法	31
§ 3.6 电位分布的实驗測定	34
§ 3.7 无源靜电場的电解槽模拟法	34
§ 3.8 有源靜电場的电解槽模拟法	40
§ 3.9 靜电場的电阻网模拟法	45
§ 3.10 軸对称靜电場中的旁軸电子軌迹方程	49
§ 3.11 軸对称靜电場的聚焦成象性質	51
§ 3.12 靜电場中决定电子軌迹的方法	55
§ 3.13 图解法定电子軌迹	57
§ 3.14 数值計算法定电子軌迹	62
§ 3.15 实驗法定电子軌迹	67
第四章 电子在軸对称磁場中的运动	74
§ 4.1 均匀磁場的聚焦成象特性	74
§ 4.2 軸对称磁場(旋轉对称磁場)	76
§ 4.3 磁場分布的实驗求測	81
§ 4.4 軸对称复合电、磁場中的旁軸电子軌迹方程	85
§ 4.5 軸对称复合电、磁場的聚焦成象性質	88
§ 4.6 磁場中电子軌迹的决定法	91

第五章 电子透镜	97
§ 5.1 光学透镜的参量及其基本关系式	97
§ 5.2 电子透镜的参量及其基本关系式	100
§ 5.3 静电透镜的类型	107
§ 5.4 静电透镜焦距的计算	109
§ 5.5 圆孔膜片	113
§ 5.6 浸没透镜	116
§ 5.7 单透镜	120
§ 5.8 浸没物镜	124
§ 5.9 电子镜	127
§ 5.10 圆柱透镜	129
§ 5.11 透镜特性的量测	132
§ 5.12 磁透镜	138
§ 5.13 短磁透镜的会聚特性	139
§ 5.14 短磁透镜的焦距与象转角	141
§ 5.15 短磁透镜的安匝数的计算	144
§ 5.16 磁浸没物镜	145
§ 5.17 静电透镜和磁透镜的比较	148
第六章 象差	149
§ 6.1 球差	150
§ 6.2 慧差	153
§ 6.3 象散和场曲	155
§ 6.4 畸变	156
§ 6.5 色差	158
§ 6.6 因轴对称性破坏而生的象差	160

第一章 緒 論

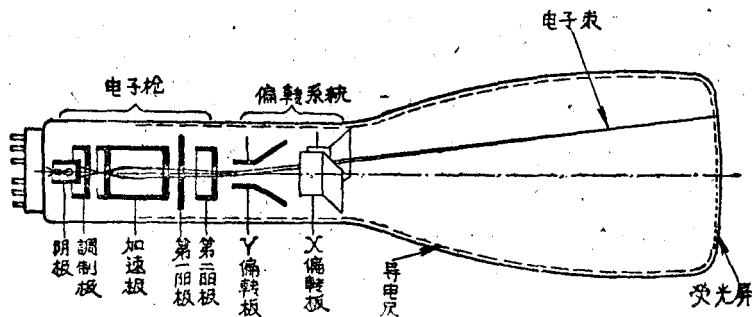
§1.1 电子束管的定义和典型結構

所謂电子束管,是指这样的一类电真空器件,其中利用了向一定方向投射的、聚焦的电子流。电子流的外廓形状可以是束状的,也可以是带状的,束状电子流可以是細束的,也可以是寬束的。

电子束管的类型很多,其結構也各不相同。但在大多数电子束管中,通常包含三个基本組件(图 1.1):

1. 电子枪——它的任务是产生强度足够的电子流,并且使它会聚成所需要的形状和截面尺寸;此外,对电子流的强度必須能够方便地控制。为此目的,在电子枪中,除了发射电子的阴极和控制束电流的調制极而外,通常还有两个或两个以上的电子透鏡,用来使电子束聚焦。电子透鏡可以是靜电式的(如图 1.1),也可以是磁場式的(由套在管頸外的磁場綫圈构成)。

2. 偏轉系統——它的任务是使电子束的空間位置任意偏轉。在电偏轉系統中,由两对互相垂直的偏轉板組成;在磁偏轉系統中,则由两对互相垂直的,通过电流的綫圈組成。

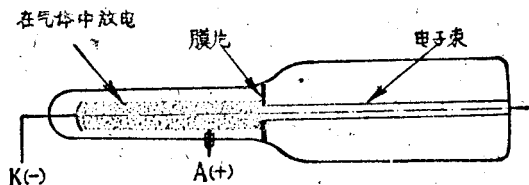


图(1.1) 电子束管的典型結構。

3. 电子收集器——它的任务是显示电子束投射的位置,并捕获电子束中的电子,或者完成某种特定的任务。它的形式可以是荧光屏、金属板、或者由绝缘层或半导体制成的靶。

§ 1.2 电子束管的发展历史和应用

电子束的发现,至今已有一百年的历史(十九世纪中叶),甚至还在人们了解电子的性能以前,曾经有“阴极射线”的名称。第一只实用的电子束管是在1897年制成的勃朗管(图1.2)。这只管子是为了适应当时量测技术上记录交变电流的需要而产生的。该管具有玻璃外壳,管内有两个电极(圆盘形阴极K和棒形阳极A);阴极后面放置一个膜片,片上有一个直径为2毫米的圆孔。管内气压抽至 10^{-3} — 10^{-4} 毫米水银柱。在阳极和阴极之间加上几万伏的电压,阴极表面就产生电子发射。发射的电子在阳极加速场的作用下,通过膜片,成为狭窄的射束打到对面的管壁,从而在玻壁上产生荧光。以后,为了提高玻壁上光点的亮度,开始涂复荧光质。利用横向磁场,可以使电子束在空间偏转。由此可见,在勃朗管中,还没有应用电子透镜。电子束的形成,主要是依赖膜片的切割作用。



图(1.2) 勃朗管。

此后,冷阴极电子束管虽然有一些改进(主要是对于电极的布置,气体压力,电源电压等等逐渐累积了一些经验),但直到二十世纪二十年代以前,并没有原则性的变化。

到了本世紀二十年代，人們才开始認識軸对称電場和磁場的聚焦能力，建立了电子光学。此后，在理論的指导下，电子束管的試制工作开始有了迅速的发展。与此同时，由于高效率的氧化物阴极的制成，和真空技术的发展，在 1924 年制成了低电压（阳极电压低于 1000 伏）高真空的示波管。到了三十年代，电子示波器已开始广泛应用在科学研究工作中，电子示波器的优点是：电子束对于偏轉的慣性很小（即使用在 10—100 兆赫，还几乎沒有表現慣性），而且运用方便，灵敏度高。現在，示波管已經成为研究短暫过程时不可代替的工具了。为了滿足不断提高的客观要求，示波管在結構設計上和制造工艺上曾經不断地經過改善。四十年代以后，进一步試制成功超高频示波管。現在超高频示波管已經能够成功地显示几千兆赫的訊号，不致产生显著的畸变。

到了三十年代，由于电视技术发展提出的要求，出现了电视发送管（摄象管）和电视接收管（显象管）。用电子束扫描代替了笨拙的机械扫描的結果，使电视技术的面貌发生了根本的改变：从三十年代之初首先出現的光电象管之后，經過不断的改进，相繼出現了正析象管、超正析象管、視象管等等。与此同时，显象管也在不断改善中。到了今天，除了黑白电视管之外，还制成了彩色显象管，至于彩色摄象管世界各国也在积极研究試制中。电视技术在文化教育、軍事国防、工业生产以及科学研究等等各方面，已經成为有力的工具，而电视技术之所以能够发展到今日的地步，电视管的发明和改进，起着决定性的作用。

在第二次世界大战期間，由于定位技术的需要，促进了定位管的研究和制造工作。定位管的出現，使得人們有可能准确地、方便地确定目标的位置。与此同时，由于夜間观察的需要，出現了变象管，利用紅外線来观察物体。到了今天，变象管的质量已經达到完善的程度，它不但是軍事国防上一种重要的偵察工具，而且还广泛

应用在医疗上（在X射线透视中用来增强荧光屏上图象的亮度），摄影技术上（用于快速曝光），以及有关红外线技术的科学研究中（例如现已制成红外线透视显微镜，用以检查半导体的纯度）。

在第二次大战的末期及战后，世界各国对另一种新型的电子束管——记忆管——普遍展开了研究。这种管子的特点是，能够将讯号（例如雷达讯号）长期储存，以供多次阅读。因此，它的出现不但对于定位技术具有重要的意义，而且对于科学研究（用来记录一瞬即逝的短暂讯号）、计算技术（用来储存数码）、电视技术（用来改变帧频或压缩频带）等等都有很大的帮助。

由于电子束的控制实际上几乎没有惯性，这一点使得电子束能够用来作为各种电路中的快速开关，这样，就出现了换接管。换接管在多路通讯中有重要的应用。

已经出现的电子束管的种类很多，而且还在继续不断地发明中。

其实，电子束聚焦的原理不仅应用在电子束管内，而且还普遍应用在许多其他的科学仪器中，例如，原子能研究中所用的粒子加速器，用来分离同位素的质谱仪，以及能够分辨微小物体（分辨能力比光学显微镜大100倍以上）的电子显微镜等等都是。

从以上简短的介绍，可以看出，任何一种电子束管，都是在生产斗争或阶级斗争的需要之下产生的；也可以看到，这些管子对于国民经济及科学研究具有十分重要的意义。

§ 1.3 电子束管与电子光学的关系

电子光学是电子束管的理论基础的一部分，两者在发展过程中一直保持着互相依赖互相促进的关系。

所谓电子光学，是指研究与利用电子流的聚焦、偏转及成象的规律的一门科学。由于电子在电场磁场中运动的规律与光线在光

学媒质中传播的规律相类似,以及在这門科学中,研究电子运动所用的处理方法也与光学中研究光线传播的方法相似,所以有这个名称。

关于几何光学定律和經典力学定律之間的类似性,早在一百年前,哈密頓就已經注意到了。在十七世紀时,費瑪已确定:在两点間傳播的光綫,选择这样的路徑,在这路徑中所需的时间是极值(极小值、极大值或穩定值)。后来,在力学中,欧勒創立了所謂最小作用量原理,根据这个原理,質点在位場力的作用下,沿着这样的軌迹运动,这时作用量的数值是最小。从这两个原理的比較,哈密頓注意到,質点在力場中的运动和光綫在光学媒质中的傳播相类似。从光学和力学的类似性,可以导出这样的結論:运动質点(不連續的客体)与某种波动过程相联系,而光波(連續的客体)則与某种运动質点相联系。这样一来,光学和力学的类似性,統一了同一个現象的两个方面。但在哈密頓的时代,这样的結論还不能理解,这是因为,当时还没有这样的实验基础,把光看作某种質点流,更談不上把运动的質点与某种波动过程联系起来。

一直到光的量子論发展起来以后,光学与力学的类似性才增添了深入一层的意义。按照光的量子論,在一定条件下,光表现为某种質点(量子)的运动,它的能量等于 $h\nu$ (h 是蒲朗克常数, ν 是光的频率)。

到了二十世紀二十年代,又发展了电子波动学說。不久以后,关于电子衍射現象的实验証实了电子的波动性質——运动的电子,与波长为 h/mv 的波动过程相联系(m 是电子質量, v 是电子速度)。

电子光学是在这样的历史条件下建立起来的。

上面說过,电子束管的誕生远在电子光学理論建立以前,乃是通過实践試制出来的。但当时由于还没有掌握电子运动的規律,

只能凭經驗粗略地選擇电极形狀。到了电子光学建立以后，人們才能有意識地利用电子在電場磁場中的运动規律，在理論指导下，制作了各种电子透鏡，使电子束聚焦的質量迅速改善。这样，电子光学理論的指导，促进了电子束管的发展。到了三十年代，不但示波管的質量有了显著的改进，而且还能陸續試制成功各种摄像管和电子显微鏡等等，这些成就，都是和电子光学的建立和发展不可分离的。

另一方面，电子束管中对于聚焦和成象的質量的要求，对电子光学不断提出新的課題，从而反过来促进了理論的发展。例如，在电子显微鏡中，为了减少象差，要求对象差理論进行深入探討，从而促进了象差理論的发展；强流电子束的广泛应用，要求对强流电子束的产生和会聚进行研究，从而促进了强流电子束聚焦理論的发展。总之，随着理論和实践的反复互相促进，人們对于电子运动規律的認識就愈来愈深入了。

但是必須指出，縱然电子光学到目前已經有了很大的发展，电子束管中仍然还有很多問題不能作定量的理論分析，例如，浸沒物鏡中的电子聚焦問題，如何减少寬电子束聚焦的象差，靶面記錄或擦除訊号的物理过程等等。許多电子束管的闡述，祇能停留在定性的阶段。所以如此，一方面是由于电子光学系統本身的复杂性，另一方面是由于，电子束管的工作原理不仅与电子光学有关，而且还牽涉到二次发射、光电效应和固体发光等等一系列問題。因此，电子束管理論的进一步发展，还有待我們努力。

§ 1.4 电子束管的分类

对于电子束管的分类方法，現在还没有一致的意見。一种方法是按照輸入訊号和輸出訊号的性質来区别，可以分为下列四类：

1. 把訊号轉变为图象——属于这一类的有：示波管、显象管、

定位管等;

2. 把图象轉变为訊号——属于这一类的有:各种类型的摄象管;
3. 把图象轉变为图象——属于这一类的有:变象管等;
4. 把訊号轉变为訊号——属于这一类的有:记忆管、换接管等。

另一种方法是按照电子束的形状来区别,可以分为:細束的、寬束的和带状的电子束管。极大部分电子束管都是具有細电子束的;具有寬电子束的有变象管等;有一部分换接管具有带状的电子束。

又有一种方法是直接按照用途来区别,可以分为下列几类:

1. 示波管(包括超高频示波管)
2. 定位管
3. 显象管
4. 摄象管
5. 变象管
6. 记忆管
7. 换接管

以及其他各种电子束管。

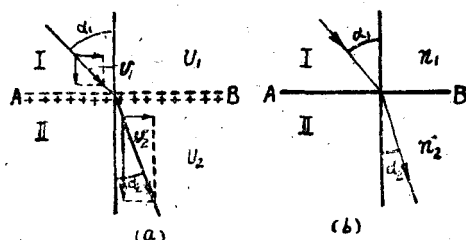
前面两种分类法的范围过于广泛,而且可以包括某些通常不理解为电子束管的器件,如电子显微镜、束射电子管等。最后一种分类法没有这个缺点,而且能够明确指出每种管子的特点。因此我们以后将采用最后一种分类法来叙述。

第二章 电子光学与光学的类似性

上面说过, 质点在力场中的运动与光线在光学媒质中的传播相类似。这一类似性的发现, 对于电子光学的建立, 起了十分重要的作用。我们知道, 在几何光学中, 利用折射率不同的各种媒质的适当分布, 可以造成光学系统, 使光线聚焦, 造成物体的(放大或缩小的)象。既然力学与光学有类似性, 那么, 只要能够造成合适的力场(例如, 电场或磁场), 使它的位函数的分布处处与某种光学系统中折射率的分布相对应, 就可以使质点(例如电子)在力场中运动时产生聚焦及成象现象。实践证实了这样的想法, 从而人们制成了各种各样的电子透镜。在本章中, 我们预备从折射率的概念入手, 来研究电子光学与光学的类似性, 最后还要指出, 除了类似性之外, 电子光学也有与光学不同的某些特点。

§ 2.1 电子光学折射率的概念

设有电子从电位为 U_1 的区域进入电位为 U_2 的区域, 两个区域的分界面为 AB , 在 AB 两边, 电位有跃变。为了实现这种情况, 可以对两个广大而非常邻近的细密金属网充电(图 2.1a)。在两个区域中电子的轨迹为直线, 其速度各决定于下式



图(2.1) 电子束在偶电层上的折射。

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = eU_1$$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = eU_2$$

因为速度的切向分量并不改变, 如果軌迹与分界面二边的法綫的交角各为 α_1, α_2 , 則有 $v_1 \sin \alpha_1 = v_2 \sin \alpha_2$, 即

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{U_2}}{\sqrt{U_1}} \quad (2.1)$$

在式(2.1)中, $\sqrt{U_2}/\sqrt{U_1}$ 起着决定电子运动方向的作用。

在光学中与此情况相类似的, 有光綫在折射率分別为 n_1 和 n_2 的媒質分界面 AB 上的折射(图 2.1b)。光綫的折射遵从折射定律:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

n_2/n_1 决定着光綫的折射方向。比較这两种情况及(2.1)(2.2)式, 可知: 电子在偶电层分界面前后方向的改变(决定于 $\sqrt{U_2}/\sqrt{U_1}$)类似于光綫受到折射时方向的改变(决定于 n_2/n_1)。所以, $\sqrt{U}$ 起着电子光学折射率的作用。

上述的质点运动与光綫傳播之間的类似性, 在連續改变的电場、磁場与連續分布的光学媒質之間也是存在着的。

§ 2.2 电子光学中的最小作用量原理

在几何光学中, 費瑪原理是描述光綫在媒質中傳播的普遍原理。它說: 光綫在光学媒質中傳播时是沿着这样一条路徑, 經過它所需要的时间間隔为极值(一般是极小值, 有时可能是极大值或穩定值)。如給定連續分布的媒質 n , 在光学中, 折射率为真空中的光速 c_0 与媒質中的光速 c 之比 ($n=c_0/c$), 所以費瑪原理的数学表示式如下

$$t = \int_{P_1}^{P_2} \frac{ds}{c} \propto \int_{P_1}^{P_2} n ds \longrightarrow \text{极值} \quad (2.3)$$

即在 P_1 与 P_2 之間, 几何上一切可能的路徑中, 光綫真正走的是这样一条路徑, 在这条路徑上, (2.3) 积分式是极值。实际上在 §2.1 的光綫在媒質分界面上折射情况中, 应用 (2.3) 式, 就可推出光綫折射时所遵从的折射定律 (2.2) 式^①。

在电子光学中可以証明: 电子在电位 U , 矢量磁位 $\mathbf{A}$ 决定的电場磁場中运动时, 从 P_1 到 P_2 之間几何上一切可能的軌迹中, 电子真正走的是这样一条軌迹, 在这条軌迹上, 下列积分是极小值:

$$\int_{P_1}^{P_2} [\sqrt{U} - \sqrt{\frac{e}{2m}} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{S})] ds \longrightarrow \text{极小值} \quad (2.4)$$

ds 是弧元, $\mathbf{s}$ 是軌迹切綫方向的单位矢量。力学中称这积分为作用量, 即在电子真正走的軌迹上, 作用量是极小值。所以, 决定电子在电場磁場中运动軌迹的 (2.4) 式, 称为电子光学中的最小作用量原理。

将 (2.4) 式与决定光綫在媒質中傳播路徑的 (2.3) 式比較, 可知, 在一般情况下, 电子光学折射率是: ^②

$$n_s = [\sqrt{U} - \sqrt{\frac{e}{2m}} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{S})] \quad (2.5)$$

在磁場不存在时, $\mathbf{A} \equiv 0$, (2.5) 式变成 $n_s = \sqrt{U}$, 此即 §2.1 的例子中的电子光学折射率。实际上, 应用 (2.4) 式于此例子中, 确可推出 (2.1) 式。

(2.3)、(2.4) 式具体說明了: 如果光学媒質的分布是

① 参考 C. Э. 福里斯, A. B. 季莫列娃: 普通物理学, 第三卷第一分册 §241。

② 为了把它化成无量綱的值, 可以乘上系数 $\frac{1}{c_0} \sqrt{\frac{2e}{m}}$, 这样, 就和光学中的折射率的形式完全一致了。

$$n = n_0 = \left[\sqrt{U} - \sqrt{\frac{e}{2m}} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{S}) \right]$$

則在起始条件(如起始点的坐标和路徑的斜率)相同时, 光綫在这媒質中走的路徑, 将完全和电子在(2.5)式决定的电場磁場中运动时的軌迹一样[質点的起始条件与軌迹的关系体现在, 用(2.4)决定具体軌迹时, 必須用起始条件以决定(2.4)式的积分常数]。于是(2.5)式启示了一种新的可能性, 就是用光学的方法来解决电子束聚焦成象等的电子光学問題。上述的带电質点运动与光綫傳播的类似性的意义还不止在启示了一种新的計算方法, 如前所述; 人們因此还得到了启发, 去創制許多与光学仪器类似的电子光学元件(如电子透鏡、电子棱鏡与电子反射鏡)以及电子光学仪器(如电子显微鏡与質譜仪)。

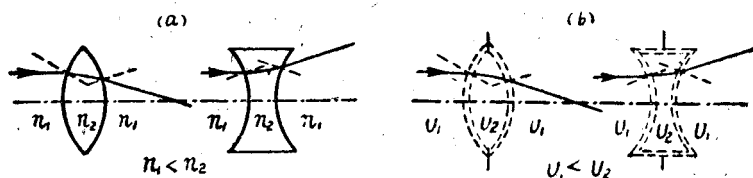
虽然, 电子光学与光学之間有着这样的类似性, 但是它們之間也存在着一些差別。

§ 2.3 电子光学折射率的特点

电子光学折射率对光学媒質折射率而言, 有着一些特点, 因而电子光学元件及仪器与光学仪器之間也存在着一些差別。

(一) 光学媒質的折射率可以是坐标的不連續函数, 譬如, 对一般实用的光学透鏡而言, 在透鏡中, 折射率是常数; 在边界上, 折射率突然变为透鏡周圍媒質(如空气)的折射率数值。电子光学的折射率是坐标的連續函数, 因为在决定它的(2.5)式中, 电位 U 与矢量磁位 $\mathbf{A}$ 不可能在电子通过的区域中有着突然的改变, 因而在电子透鏡中, 电子軌迹的方向不可能有突然的折射。实际上, 图(2.1)中的情况也不例外, 無論柵网是怎样的靠近, 由于网眼間电場的渗透, 电位是連續改变的。又如, 电子光学元件中曾經出現过

如图(2.2)的栅网透镜,^① 内外二栅网都为金属丝编成的球面形状,它是有对称轴的。其上各加电位 U_1, U_2 , ($U_2 > U_1$), 透镜周围的电位也为 U_1 , 即透镜内的电子光学折射率数值大于透镜外的。如电子平行于对称轴而入射, 将会聚于轴上的一点。与它对应的外



图(2.2) 光学透镜和与它对应的栅网电子透镜。

形相似的玻璃透镜也画在图(2.2)上。因为玻璃的折射率 n_2 大于空气的折射率 n_1 , 平行光线经过透镜折射以后, 也将会聚在轴上的一点。即使在这样的情况, 实际上栅网内外电子轨迹方向的改变仍然是连续的, 因为不论网眼何等细密, 电场总是可以渗透的, 电子通过之处(即网眼中)的电位分布是连续的。但是在玻璃与空气的分界面上, 光线行进的方向却是突然改变的。

(二) 实用的光学媒质的折射率, 其变化范围很小, 至多变化几倍。电子光学折射率, 如在电场中的情况, 正比于电位的平方根, 调节电极系统的电压, 容易使其数值在很大范围中改变。

(三) 在光学中, 由各种光学材料做成透镜系统时, 当沿对称轴的折射率分布确定后, 透镜的表面(折射面)的形状(即轴外的折射率分布)尚可任意改变, 以达到某些实用的目的(如减小象差)。在电子光学中, 这种可能性就不存在。电子光学折射率的一个特点是: 决定折射率的电位或矢量磁位必须满足一定的微分方程。因此, 当电位或矢量磁位的沿轴分布确定时, 电场磁场中空间每一点

^① 因其成像质量不佳, 现在没有得到应用。