

# 集成光学三十年

JI CHENG GUANG XUE SAN SHI NIAN

陈益新 著



上海交通大学出版社

# 集成光学三十年

陈益新 著

上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

集成光学三十年/陈益新著. - 上海:上海交通大学出版社, 1999

ISBN 7-313-02238-7

I. 集… II. 陈… III. 集成光学 - 现状 IV. TN25-1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 24014 号

集成光学三十年

陈益新 著

上海交通大学出版社出版发行

上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030

电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

常熟市印刷二厂·印刷

开本: 787×1092(mm) 1/16 印张: 19.5 字数: 476 千字

版次: 1999 年 10 月 第 1 版

印次: 1999 年 10 月 第 1 次

ISBN 7-313-02238-7/TN·079

定价: 32.00 元

---

本书任何部分文字及图片, 如未获得本社书面同意,

不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误, 请寄回本社更换。)

# 前 言

自 1956 年起,我在上海交通大学执教 40 余年,教学工作和科学研究先后涉及的领域和学科有电力电缆、通信电缆、电气绝缘材料、电介质物理、高分子物理、超导材料及器件(如超导磁铁、超导薄膜和器件)、半导体器件(如高频硅可控整流器)、固态电子学、集成光学、光电子器件(如锗雪崩光电二极管、Ⅲ - V 族半导体光晶体管、半导体超晶格 MSM 光电探测器)、光纤通信、光计算机和光互连、垂直磁记录 and 薄膜磁头、微加工、微机械以及纳米技术等。单独编写、主编或参加编写的教材和专著有《电介质物理》、《高分子物理》、《集成光学——理论和技术》、《固态电子学》、《固体电子学中的等离子体技术》、《光计算》以及《毫微加工——物理、技术、应用》等,发表论文 120 余篇,培养了硕士和博士研究生共 50 名。

在许多同事、同学和学生们的建议和鼓励下,我挑选了 1980 年以来有一定代表性的章节和论文编成这部选集。一时想不出合适的书名,只能借用最近应邀撰写的一篇综述性论文的题目:集成光学三十年。不过,就全书的内容而言,除了垂直磁记录 and 薄膜磁头这部分偏离较远外,其余的内容与集成光学及其相关领域都有不同程度的联系。因为集成光学从其基本理论、器件结构、工作原理、材料和加工、测试和应用所涉及的学科和领域是十分广泛和相互交叉的。实际上,即使垂直磁记录也不是与集成光学毫不相关的。记录信息的磁畴与介质表面垂直,从物理上看,它不仅可由磁场直接磁化形成,也可以在较弱偏置磁场下由激光束加热形成,这就是磁光记录的原理。磁光记录中信息的写入和读出,都由受控制的聚焦激光束来实现,因而“光头”相当于磁记录装置中的磁头,是磁光记录装置中的核心部件,如果这光头能用集成的微光电机系统来构成就可使光头的结构更为紧凑、可靠、体积小、质量轻,提高响应速度,适合批量制造,降低成本。

本书的内容分二部分,即教学篇和研究篇。前者都选自出版的教材和专著中由本人撰写的对不同学科的领域有一定代表性的章节。后者选自主要由本人撰写的论文和报告,其中大部分已在期刊或学术会议上公开发表过,只有少数几篇是第一次发表。为了使读者查阅方便,研究篇先按内容分成集成光学和光纤通信、光计算和光互连、垂直磁记录 and 薄膜磁头以及微米纳米技术及其应用四部分,每一类中大致以时间先后分序。

本书不仅可作为在党和人民培育下,在社会主义制度下成长起来的一个教育工作者和科技工作者毕生的工作总结和汇报。同时,也从一特定的角度上多少能示踪出近二十年来我国高等教育和科学研究发展所经历的过程和取得的进步。发展像集成光学这类多学科交叉的高新科技,需要把自然科学与工程技术熔合成一体。培养新一代的应用科学人才就是要善于在这两者间架起桥梁。希望本书也能对作者这一贯的教育思想有所反映。由于本人学术水平有限,对书中的差错和不当之处,欢迎读者批评指正。

本书所包含的内容决不全是我的个人贡献,它也凝聚了我的许多同事和学生们的长期辛勤的工作和巨大的努力。在出版过程中又得了上海交通大学领导和有关部门的多方关心和支持。作者对此一并表示衷心感谢。

陈益新

# 序

《集成光学三十年》是陈益新同志 40 多年来在上海交通大学从事教学工作和科学研究工作的辛勤劳动成果。1952 年我国高等学校进行院系调整后,交通大学设置了一些新专业,电气绝缘与电缆技术专业就是其中之一,这个专业需要电工和电子、物理、化学以及机械等多学科交叉的知识。陈益新同志是这个专业第一届毕业生,他毕业后留校任教,师从我国著名的无线电前辈陈季丹教授,担任电介质物理的教学和科研工作。1979 年,他作为我国第一批访问者前往美国圣地亚哥加州大学,在国际知名教授张慎四博士的指导下进行集成光学研究。1980 年底回国后,他作为上海交通大学集成光学的学科带头人带领了一批青年教师和学生拼搏在教学科研第一线,取得了显著成绩。他致力于把我国集成光学研究推向当前国际上发展的前沿,他不断在国内学术会议上率先提出新的研究方向,如三维集成光学、非线性集成光学和微光电机集成系统等。同时他也积极组织国内和国际的学术交流,以进一步推动我国集成光学的发展。他的辛勤工作,得到了国内外许多同行学者的高度评价。陈益新同志已成为推动我国集成光学学科发展的先驱者之一。

陈益新同志在上海交通大学任教期间,根据工作需要,多次负责筹建新学科,他先后从事的学科领域有:电气绝缘、电线电缆、电介质、高分子、半导体、超导、磁记录、光电子和集成光学、固态电子学、微加工、微机械和纳米技术等。他理论基础坚实,知识面较广,富有开拓精神;他在教学中努力使理科与工科的知识相互渗透,积极倡导理工结合;他在科学研究中重视理论和实际应用相结合;他在学生中反复强调要善于在自然科学与工程技术之间构筑桥梁,这样学生才能更好发挥创造性。他的教学思想和学术观点在科学技术突飞猛进的今天,对培养面向 21 世纪的科技人员是具有积极意义的。本书主要选辑了这一时期的作品,读者不难从本书的各部分内容中体会到上述学术思想和观念。

《集成光学三十年》书名虽似偏专业化,但本书内容覆盖的学科相当广泛。内容涉及:物理、化学、材料学、电子学、计算机、光子学和光电子学、集成光学和光纤通信、磁记录、固态电子学、微加工、微米和纳米技术等。相信本书的出版将会引

起多方面读者的兴趣,包括高等学校的教师、高年级大学生和研究生,研究机构和工厂企业的科技人员,乃至教育科技管理部门的干部等。读者不仅可在具体的知识内容上得到益处,也能从如何加速自我知识更新,跟上科技发展日新月异的进展,树立适应新时代的教学和科学研究新观念方面有所启迪。

中国科学院院士  
上海交通大学教授



1999 年 5 月

# 目 录

## 第一篇 教 学 篇

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 固态电子学是沟通科学和工程的桥梁····· | 3   |
| 电介质的电子性质·····         | 5   |
| 集成光路及其应用·····         | 54  |
| 光计算导论·····            | 93  |
| 微米纳米加工导论·····         | 118 |

## 第二篇 研 究 篇

### 集成光学和光纤通信

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Planar and Channel Single-Mode $\text{LiNbO}_3$ Waveguides Fabricated by Ion Exchange ·····           | 159 |
| Characterization of $\text{LiNbO}_3$ Waveguides Exchanged in $\text{TiNO}_3$ Solution ·····           | 160 |
| $\text{LiNbO}_3$ Waveguides by Electrically Enhanced Ion Migration and a Comparison of Techniques ··· | 164 |
| A New Concept of 3-Dimensional Integrated Optics ·····                                                | 166 |
| Nonlinear Integrated Optics ·····                                                                     | 168 |
| 光通信传输速度的进展引人注目·····                                                                                   | 180 |
| 以网络和应用为导向的光纤通信·····                                                                                   | 184 |
| 集成光学三十年回顾及展望·····                                                                                     | 189 |

### 光计算和光互连

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 二维空间光调制器的研究和应用·····        | 202 |
| 二维 Si/PLZT 混合集成空间光调制器····· | 209 |
| 未来计算系统中的光互连·····           | 214 |
| 光互连技术·····                 | 215 |

### 垂直磁记录和薄膜磁头

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 磁记录技术的现状和趋向·····                                                              | 226 |
| 垂直磁记录的新进展·····                                                                | 235 |
| A New Concept of Magnetic Thin-Film Heads with Superconductors ·····          | 243 |
| Characterization of the Film Heads for Perpendicular Magnetic Recording ····· | 248 |
| The Thin Film Magnetic Recording ·····                                        | 250 |

## 微米/纳米技术及其应用

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 新世纪的纳米科学技术 .....                                                                   | 258 |
| 近场扫描光学显微镜中探针优化设计的考虑 .....                                                          | 277 |
| 微光机械系统的技术和应用 .....                                                                 | 283 |
| Thin Film Technologies for Micro-Opto-Electro-Mechanical System Applications ..... | 292 |



---

# 第一篇 教 学 篇

---



# 固态电子学是沟通科学和工程的桥梁

固态电子学是一门以固体中的电子过程为基础,阐明固态电子材料的各种特性和效应,以及研究如何利用这些特性和效应构成固态电子器件的基本原理的应用基础学科。以晶体管和半导体激光器为代表的固态器件的发明和发展而导致的集成电路、电子数字计算机、光纤通信、集成光路和光电子集成等许多应用技术领域的突飞猛进,成为当代信息技术的主要支柱。这是把固态物理和近代物理学中的成就与电气和电子工程应用相结合的最好实例。固态电子学是以沟通科学和工程的桥梁而获得了强大的生命力。自从 60 年代开始在国外一些著名的大学中开设这门课以来,一直受到越来越广泛的重视,在内容上也有很大的充实和更新;它已成为电气和电子工程、材料科学和工程、应用物理和应用化学等许多方面的工程技术人员及学生从固态电子器件的角度出发对固态电子材料的电、磁、光、声和热等各种特性和效应及其机理进行研究,并将这些基本科学知识转变为技术进步和创造发明的不可缺少的课程。

由于历史原因,我国高等学校的课程中至今只有“固态物理学”,从未开设“固态电子学”。而在有关的专业课程中,对固态电子材料和器件的学习,几乎都是分门别类的,例如半导体材料和器件、电介质材料和器件、磁性材料和器件以及激光材料和器件。这样造成的后果往往使学生对固体中的电子运动和对固态电子材料和器件及基本物理过程缺少完整和统一的了解,知识面不广,思路比较局限,不利于培养学生的创造性。特别应看到的是随着技术的不断进步,固态电子器件已从应用单功能材料进而应用多功能材料或复合功能材料,从利用单一效应发展到利用多种效应,例如:采用铁电晶体薄膜代替 MOS 半导体器件中的氧化层电介质,就可获得非挥发性的半导体存储器;光子器件与电子器件的集成不仅可以大大改善器件的原有性能,而且还包括能达到单一器件所不可能获得的功能;在未来的集成光路中不仅包括了光电子集成的光源和探测器,而且还利用了如电光效应、声光效应、磁光效应和热光效应等许多相关效应所构成的调制器和其他器件。最大限度地利用固体材料的电、磁、光、声和热等自效应和相关效应将是固态电子材料和器件发展的一个重要趋向。

出于上述的认识,我们从 1981 年开始,参照了国外一些“固态电子学”的教科书以及有关期刊,对物理系的高年级大学生和一年级研究生开设了“固态电子学”课程,同时也作为其他系,如材料科学和工程系、电子工程系等的学生的选修课。7 年的教学实践表明,“固态电子学”课程对扩大学生知识面,培养学生的创造性和提高学生对高科技工作的适应性是有帮助的,因而引起了更多师生的兴趣和重视。

由于迄今尚没有“固态电子学”的中文教科书,开始两次讲课都选用几本英文课本。为了进一步把这门课程提高和推广,就在历次讲课提纲和讲稿的基础上整理成“固态电子学”讲义,共分上下两册。本教科书是在讲义的基础上,根据多年的教学实践修改而成的。希望通过广泛使用和积累更多的教学经验,对其加以进一步的提高和完善。

本书适用于电工和计算机、电子工程、无线电和通信、材料科学和工程、应用物理、应用化学和生物工程等系科三、四年级大学生。由于这是一本带有引论性质的教科书,所以在内容上力求避免用较多的数学演算而能给出清晰的物理概念。只要具备一些近代物理和量子力学的

基本知识和基本概念,就不难学习这门课程。上述系科的低年级研究生也可选用本教材,教学中必要时可补充内容,学生也可多阅读一些每章所附的参考书和文献。适合于研究生用的高层次的“固态电子学”待取得更多经验后再行编写。

全书共分七章。第一章介绍金属和半导体电子学,这里所讨论的特性和效应都与电子的输运过程有关;第二章讨论利用这些特性和效应构成各种半导体器件的基本原理;第三章光电子和光电器件中所述及的那些效应和现象虽与电子输运过程有关,但起主导作用的往往是电子的跃迁过程,超导现象也可看作电子的输运过程,但与金属和半导体的导电特性差别极大,特别近年来高临界温度超导材料的发现,对超导现象和应用又提出了许多新的研究课题,这部分内容作为第四章;与电子的自旋和轨道运动过程相联系的磁性和磁效应及其在磁电子器件中的应用将在第五章阐述;束缚状态的电子发生位移时形成极化,当电场从直流变到光频以上(甚至可包括 $\gamma$ 射线在内)时,极化过程所伴随着的各种效应都在第六章讨论;最后一章介绍固体中相关效应,主要讨论电介质中电、光、声和热效应之间的相互作用,这里虽然不能包括固体中全部的相关效应,但读者从这一章可以得到启迪,应该如何进一步发现和运用固体中一切可能出现的效应来发展新一代固态电子器件。贯穿全书各章的统一思想是以固体中电子运动的各种形式和过程作为认识的基础来理解固体所呈现的全部特性和效应,同时又把这些电子过程和效应的形成与固体微观结构的特征紧密相联系。因而,读者将获得对固态电子学,包括物质结构、电子过程、特性和效应、材料和器件较完整的认识。由于本书是一套固体物理教学参考书中的一本,为避免内容重复,在把讲义修改成书时,有关晶体结构、能带理论等一些详细内容已予删节。

# 电介质的电子性质

从能带结构来看,如果固体的价带与导带之间具有较宽的能隙,例如数电子伏或更高,这类固体几乎完全没有导电性,是电绝缘体,或叫电介质。在外电场作用下,原子、分子或晶体中的电子或其他电荷不能自由迁移,只能作有限的相对位移,形成电偶极,这叫做电介质的极化。如果电场以很高的频率交变、极化将引起能量的损耗和色散现象。当频率范围从工频、射频、微波直到光波范围,或波长更短时,电介质的极化和能量损耗可采用不同的宏观参数描述,如复电容率、复传播常数和复折射率等。从固体在交变电场下呈现极化特性这点来说,电介质的含意不能狭义地限于绝缘体,只要不是金属,或即使是金属在特殊情况下,都可看成是广义的电介质。

实际的电介质具有一定的漏泄,其所能承受的电场强度也不能超过某极限,否则电介质中的电流将剧增,引起电介质的损坏这叫电介质击穿。另外,电介质除了由于外场感应产生极化外,还可能由于分子或晶体结构的不对称,或由于应力和温度等外界条件造成极化,这些特性和效应有许多已在实际中广泛应用。

## 1 电介质极化

### 1.1 极化的宏观现象

当一平行板电容器在真空中充有电荷  $Q_0$ 、电极间电压  $V$ ,则这真空电容器的电容  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{Q_0}{V} \quad (1)$$

电容  $C_0$  与电极的几何形状和尺寸有关,对平行板电容器来说,如果忽略边缘效应,  $C_0$  可表示为

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2)$$

式中:  $A$  为极板面积;  $d$  为极板间距;  $\epsilon_0$  为真空电容率或介电常数。在国际单位制中,  $\epsilon_0 = 8.855\text{pF/m}$ 。

如果在电容器中充以电介质,外施电压保持不变,则可观察到电容器所充的电荷增大为  $Q$ ,表明电容器的电容增大为  $C = Q/V$ 。电容  $C$  的增加,不是由于电容器几何尺寸的改变,而是因为电介质的电容率  $\epsilon$  比真空电容率  $\epsilon_0$  大,  $C = \epsilon(A/d)$ 。电容器由于充入电介质使电容增加的相对值为

$$\frac{C}{C_0} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r \quad (3)$$

式中  $\epsilon_r$  是电介质的相对电容率或叫相对介电常数。

为什么当有电介质放进电容器后,电极上所带电荷会增加? 这是由于电介质在电场作用

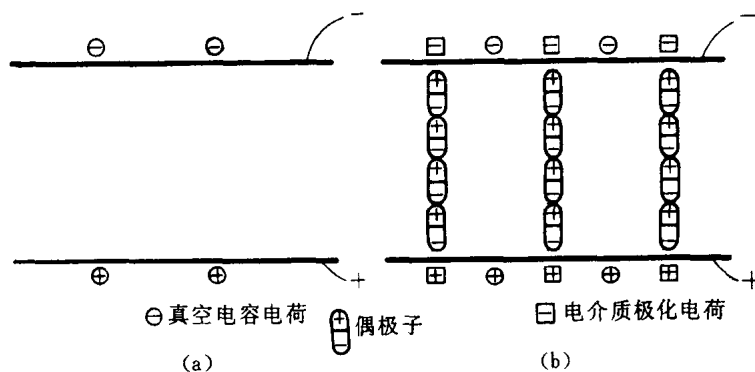


图1 真空中(a)和放入电介质(b)的平行板电容器

下极化,这极化在电介质表面形成的束缚电荷在电极上引起了附加的自由电荷,如图1所示。当电容器中放入电介质后,电极上的总电荷  $Q$  包括两部分:一部分为真空电容电荷  $Q_0$ ,  $Q_0 = Q/\epsilon_r$ ;另一部分电荷是由于放入电介质后,要补偿极化偶极子作用而增加的电荷

$$Q' = Q - Q_0 = Q(1 - 1/\epsilon_r) \quad (4)$$

为了进一步说明这些电荷的物理意义及它们在空间产生的作用,我们在下面引进三个电场中的矢量来表示电荷密度,总电荷密度为

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

定义矢量  $\mathbf{D}$  (电通密度或介电位移)表示电极上总电荷密度  $\sigma$ ,表面电荷密度与  $\mathbf{D}$  的垂直分量相等,矢量从正电荷指向负电荷。与此相似,用  $\epsilon_0 \mathbf{E}$  表示真空电容电荷密度  $\sigma/\epsilon_r$ ,矢量  $\mathbf{E}$  称电场强度,矢量  $\mathbf{P}$  叫极化强度,用来表示电介质极化后在电极上引起的附加电荷密度  $\delta(1 - 1/\epsilon_r)$ ,它等于电介质表面极化电荷密度。

从  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{E}$  的定义可知,它们具有关系:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

从式(4)可以导出电介质极化的宏观关系式为

$$\mathbf{P} = \mathbf{D} - \epsilon_0 \mathbf{E} = (\epsilon - \epsilon_0) \mathbf{E} = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 \mathbf{E} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (7)$$

式中  $\chi$  为电介质的电极化系数,  $\chi = \epsilon_r - 1$ 。  $\chi$  等于电介质极化后引起的附加电荷与真空电容电荷之比值,  $\chi$  和  $\epsilon_r$  相似,它们都是表示电介质极化能力的宏观参数。当  $\epsilon_r \gg 1$  时,  $\chi \approx \epsilon_r$ 。

三个矢量中的  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{P}$  具有单位面积上的电荷,即电荷密度的量纲,而  $\mathbf{E}$  具有不同的量纲与物理意义,根据静电学原理,试验电荷  $q$  在电场强度为  $\mathbf{E}$  时受到的作用力为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (8)$$

因而  $\mathbf{E}$  的大小和方向与单位电荷所受力的大小和方向相同,由此可以得出介电常数的量纲为

$$[\epsilon] = \left[ \frac{\text{单位面积上的电荷}}{\text{单位电荷所受的力}} \right]$$

## 1.2 极化的基本形式<sup>[1]</sup>

电介质极化的宏观现象是在表面出现极化电荷。电介质极化的微观过程是其中的分子形成电矩或叫偶极矩  $\mathbf{p}$ 。偶极子是等量的正负电荷相对位移形成的,偶极矩是表示偶极子基本

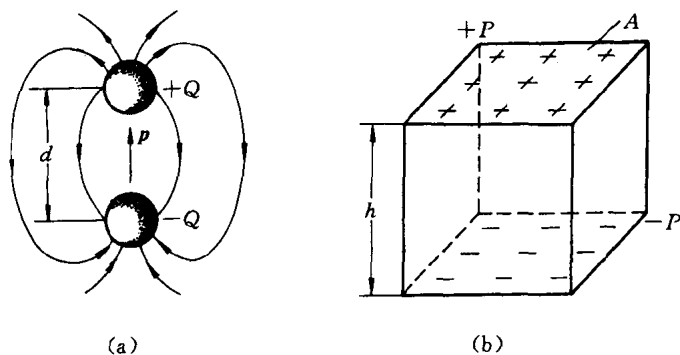


图2 偶极子(a)的电矩和电介质的电矩(b)示意图

特性的参数,其大小等于电荷与位移距离的乘积,其方向由负电荷指向正电荷(见图2)。偶极矩  $p$  可表示为

$$p = Qd \quad (9)$$

如果电介质单位体积内的分子数为  $N$ ,每个分子具有相同的偶极矩  $p$ ,则面积为  $A$ 、高为  $h$  的电介质内的总电矩为

$$p' = NpAh \quad (10)$$

从前面极化强度的定义,即单位面积表面上的极化电荷,也可以得出此电介质具有的总电矩为

$$p' = pAh \quad (11)$$

从物理意义上说,式(10)和(11)都是表示电介质电矩,因而  $P = Np$ 。这是极化强度的另一个物理意义,即  $P$  为单位体积内的电矩。

电介质在电场作用下,其分子极化的基本形式有电子极化、原子极化、偶极极化和空间电荷极化四种,如图3所示。各种极化的特性可用极化率  $\alpha$  来表征,它是分子极化形成的感应电矩  $p$  与作用于分子的电场强度  $E'$  的比例系数

$$p = \alpha E' \quad (12)$$

不同的极化形式,具有不同的极化率。

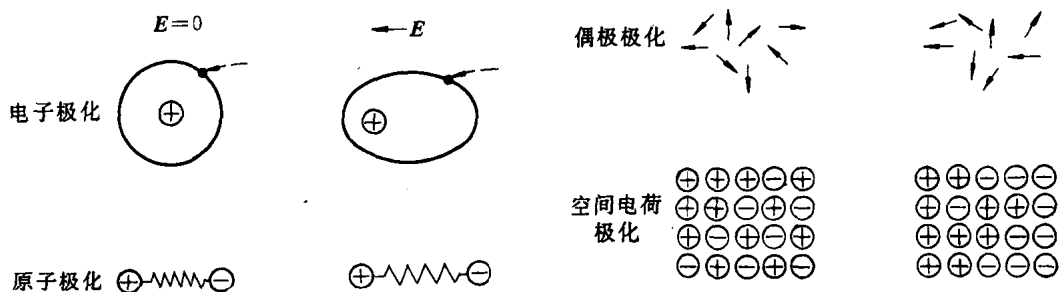


图3 电介质极化的基本形式

电子极化是原子外围的电子云相对于原子核的位移。这种极化形式出现于所有各种电介质,由于电子质量轻,电子极化的响应时间很短,在  $0.1 \sim 1\text{fs}$  范围,因而电场交变频率进入光频也能响应。电子极化率  $\alpha_e$  应包括核外全部电子位移的结果,但最外层的价电子束缚最弱,对

极化率的贡献最大。应用量子力学方法可以对原子的电子极化率作精确计算,但对多电子体系来说,这种计算十分繁复,如将电子云看成在核外是均匀分布,则根据静电学原理可以作近似估算,结果为

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3 \quad (13)$$

式中  $r$  为原子半径。由式(13)可见,原子的电子极化率与其体积成比例,量子力学计算也有相似的结果。

原子极化或离子极化是构成分子或晶体的正负离子或负电性不同的原子之间的位移。由于原子的质量比电子大得多,极化的响应时间比较长,一般为  $1 \sim 0.1\text{ps}$ ,响应频率相当于红外光谱范围。外电场作用下使正负离子相对位移,这不仅与正负电荷的库仑引力有关,也与电子云之间的斥力有关。从正负离子间的引力和斥力,用静电学可以算出离子极化率为

$$\alpha_i = 4\pi\epsilon_0 \frac{\alpha^3}{n-1} \quad (14)$$

式中:  $\alpha$  为正负离子间距离,即晶格常数;  $n$  为电子壳层之间的斥能与距离关系的指数。  $n$  值可由实验测定,  $n$  值大,表示电子壳层不易变形,离子在外场作用下位移小。

偶极极化(或叫转向极化)是极性分子在电场作用下的转动而不是位移。无电场作用时,极性分子由于无规则热运动,它们在偶极方向作杂乱的随机分布,因而宏观上不呈现极性,在电场力作用下,这些极性分子都将不同程度地转向电场方向,这就形成介质的极化。除去电场,在热运动驱动下,极性分子又最终回复到随机分布。必须指出,偶极极化的转向过程与前两种极化的位移过程是有区别的,前者是一种与热运动密切联系的弛豫过程,而后者则是与弹性回复力有关的谐振过程。一般来说,这种与热运动有关的弛豫过程比较缓慢,其响应频率分布很广,可以从工频到射频。偶极极化率为

$$\alpha_d = \frac{p_0^2}{3k_B T} \quad (15)$$

式中:  $p_0$  为极性分子的固有偶极矩;  $k_B$  为玻耳兹曼常数。

$\alpha_d$  与绝对温度  $T$  成反比,温度升高,分子热运动加剧,电场方向的偶极矩分量减小,因而  $\alpha_d$  随之减小。另外,在推导式(15)时有一假设,即偶极子在电场中的势能远比分子的热运动能小。这样,分子在电场方向的平均偶极矩可以近似与电场强度成正比,  $\alpha_d$  为一常数。如果偶极子在电场中势能超过了分子的功能,则大部分偶极子都已转到电场方向,趋于饱和状态,这时极化与电场强度不再是线性关系。但实际上,电场强度即使高达  $3\text{MV/m}$ ,上述的假设仍能满足。

空间电荷极化是由于那些受阻的载流子在电介质内迁移所形成的。这些载流子一般都处于较深的势阱内,在热运动激发下也能迁移,但几率较小,结果使这些载流子在介质内均匀分布。在电场力作用下,迁移不再是随机分布,具有一定的方向性,形成空间电荷极化,电场除去后,空间电荷慢慢消失。这种极化的响应时间非常长,一般只有在超低频或直流下才能明显地观察到。空间电荷极化与转向极化相似,也是一种与温度有关的弛豫过程,因而具有与转向极化相似的特性,只是各有不同的响应频谱。所以下面我们不再对这种极化作专门讨论。

如果电介质内上述各种极化都存在,则其总的极化率为

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_d \quad (16)$$

### 1.3 内电场

从上面的讨论得知,表示电介质极化的宏观特性是介电常数  $\epsilon$  或极化系数  $\chi$ ,电介质受



到的作用是宏观电场强度  $E$ ; 表示电介质分子极化的微观特性是极化率  $\alpha$ , 分子受到的作用是内电场或叫有效电场  $E'$ 。我们也看到, 极化率  $\alpha$  与电介质的分子结构特征有关, 找到  $\epsilon$  与  $\alpha$  的关系, 也就知道电介质极化特性与材料结构的关系。要建立这一关系必须弄清  $E'$  和  $E$  的关系。

为什么分子受到的内电场  $E'$  不同于外电场  $E$ ? 这是因为电介质内的每一个分子除了受外电场作用外, 还受到周围分子极化形成的偶极子电场的作用。只有在气态下, 分子相距甚远, 相互作用可以近似地忽略不计, 因而  $E' = E$ 。在凝聚态下, 则必须考虑分子间的相互作用。

为了计算方便, 取如图4所示的计算模型。为了计算  $A$  点处分子所受的有效电场, 以  $A$  为圆心作一球, 此球是虚拟的, 把电介质分子极化形成的偶极矩对  $A$  点的作用分成球内和球外两部分。球的半径比分子尺寸足够大, 使球外分子对  $A$  的作用可以作宏观处理; 但球的半径又不能太大, 使球内有限个分子对  $A$  的作用可以逐个计算。这样, 作用于  $A$  的有效电场  $E'$  可表示为

$$E' = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 \quad (17)$$

式中:  $E_0$  为电介质二面电极上总电荷对  $A$  作用的电场;

$E_1$  为电介质极化在二表面形成的极化电荷对  $A$  作用的电场, 这电场与使电介质极化的电场  $E_0$  方向相反, 也叫去极化场;

$E_2$  为球表面极化电荷对  $A$  作用的电场, 也叫洛仑兹电场,  $E_1$  和  $E_2$  是用宏观电荷的方法代表球外所有分子的偶极矩电场对  $A$  的作用;

$E_3$  为球内分子偶极矩电场对  $A$  的作用的矢量和, 可根据晶格结构和各分子的具体位置, 逐个进行计算。

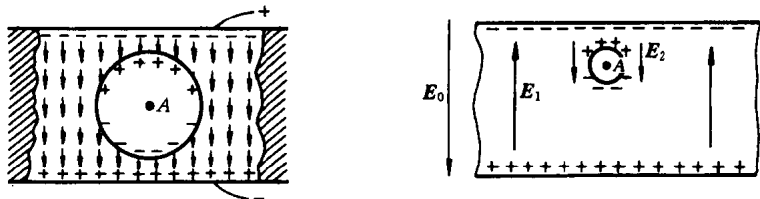


图4 计算内电场的假设模型

根据前面定义的几种电荷面密度与电场中矢量的关系, 不难找出如下关系:

$$\begin{aligned} E_0 &= D/\epsilon_0, E_1 = -P/\epsilon_0 \\ E_0 + E_1 &= (D - P)/\epsilon_0 = E \end{aligned} \quad (18)$$

计算  $E_2$  可将球面上的元电荷对  $A$  作用的电场进行积分, 元面积可取与轴线夹角为  $\theta$  和  $\theta + d\theta$  之间的球面环 (见图5):

$$dA = 2\pi \sin\theta r^2 d\theta \quad (19)$$

$dA$  元面积上极化电荷对  $A$  的作用电场为

$$dE_2 = \frac{P \cos\theta}{\epsilon_0 4\pi r^2} dA \quad (20)$$

沿整个球面积分 ( $\theta$  从 0 变到  $\pi$ ), 则

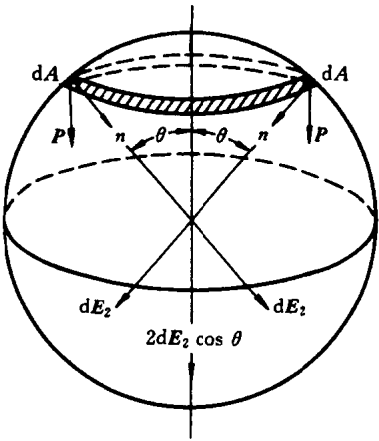


图5 计算有效电场分量  $E_2$