

泡克耳斯效应在电学测量上的应用*

葛自良 马宁生 章昌奕 谢嘉祥

(同济大学物理系 上海 200092)

摘要 对于电场测量,传统上采用的电学方法,会扰乱原有的电场分布,带来若干测量上的问题.应用泡克耳斯效应来测量电场,具有很强的抗电磁干扰性、测量灵敏度高、测量频带宽等电学方法难于相比的优点.文章叙述了泡克耳斯效应在电学测量上的应用,阐述了其测量电场的原理和测量系统,并探讨了为测量所需的电场分量,应如何选择泡克耳斯晶体和电场测定方向.

关键词 泡克耳斯效应,电压,电场强度,传感器

APPLICATION OF THE POCKELS EFFECT TO ELECTRICITY MEASUREMENT

GE Zi-Liang MA Ning-Sheng ZHANG Chang-Yi XIE Jia-Xiang

(Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The traditional way to measure an electric field electrically disturbs the original field, so that can cause a number of measuring problems. Using a Pockels' crystal to measure an electric field has several advantages over electrical methods, such as resistance to interference from electromagnetic radiation, high sensitivity and wide frequency bandwidth. The principle and application of the Pockels effect to electricity measurements are reviewed, with discussions on how to choose the Pockels' crystal and incident field direction.

Key words Pockels effect, voltage, electric field intensity, sensor

1 引言

电场强度是个重要的电学量.测量电场强度,通常采用电学方法,使用特殊的探头或传感器.在待测电场中引入探头或传感器等测量器,会扰乱原有的电场分布,而且由于探头的几何尺寸限制,其空间分辨能力有限,因此带来若干测量上的问题.例如,在有空间电荷存在的场合,就必须考虑到空间电荷流入测量器及测量器上感应效应所引起的误差.要解决这些问题,近年来利用电光效应的新型电场测量法颇引人注目.本文仅就线性电光效应——泡克耳斯效应在电学测量上的应用展开叙述.

这种新型测量法是将利用泡克耳斯效应的传感技术与光学技术相结合,不仅可以测量电场强度,而且还可以对场强的积分量电位进行测量.泡克耳斯效应法可测量从直流到 GHz 范围内的电场变化,可测量空间中任意点的场强和电位.由于测量点是电气绝缘的,对测量点附近的电气影响可降至最小程

度.测量时从电学量变换到光学量是在物质内部进行的.无需变换电源及电子线路,而且测量信息以光学形式输送,具有很强的抗电磁干扰性.这些显著的优点正是电学测量法所欠缺的.

2 泡克耳斯效应法的测量原理

泡克耳斯效应在光学信息处理领域及激光技术中有着广泛和重要的应用.1883年,实验观测到在外电场的作用下,水晶的双折射会发生变化的现象^[1],这是线性电光效应的首次发现.但当时并未将该现象与由静电力导致的折射率变化现象区分开来.直到1891年泡克耳斯才从理论上阐明这种不伴随力学上变化的电致双折射现象^[2],因此这种电光效应称为泡克耳斯效应.

在外电场的作用下,晶体中的束缚电荷会重新

* 2000-05-15 收到初稿,2000-08-28 修回

分布,还会引起晶格的微小改变.泡克耳斯首先从实验上证实,晶体的介电特性的变化使晶体的两个主折射率之差 Δn 与外电场场强 E 成正比:

$$\Delta n = n_e - n_o = rE, \quad (1)$$

式中 r 为线性电光系数.具有中心对称的晶体的线性电光系数恒为零,泡克耳斯效应只存在于没有对称中心的晶体中.

由控制外电场的场强可以人为地改变材料的双折射,利用泡克耳斯效应,可调制光束的位相,进而可调制光束的频率、振幅、偏振态及传播方向.第一个可实际用于调制器的泡克耳斯盒一直到1940年有了合适的晶体材料后方才实现.泡克耳斯盒是放在可调电场中的一个没有对称中心而有一定取向的单晶.通常有两种调制类型:光传播方向与电场方向垂直的横向调制和两者相互平行的纵向调制.对于后者,光要通过电极,电极必须采用氧化锡等金属氧化物制成的透明电极.

在不加电场时,由于是单轴晶体,光在光轴方向上传播不产生双折射.施加电场后产生两束偏振光,其位相差为

$$\delta = 2\pi n_o^3 r_{63} V / \lambda_0 = AV / L = AE_z. \quad (2)$$

式中 $V = E_z L$ 为在光轴 z 方向上厚 L 的晶体两端外加的电压, λ_0 为光在真空中的波长. $A/L = 2\pi n_o^3 r_{63} / \lambda_0$, 称为电场感量系数.在没有外加电场时,光路中泡克耳斯盒后的检偏镜没有光通过,相当于开关处在关闭状态.在外加电压使两偏振光的位相差为 π 时,有最大光强通过检偏镜,相当于开关处在全开状态.此时所需电压称为半波电压 V_π .利用半波电压可将(2)式写为

$$\delta = \pi V / V_\pi. \quad (3)$$

在电场作用下的泡克耳斯晶体如同一个位相滞后可随电压改变的波片.当入射的线偏振光的光矢量不与晶体主轴平行时,出射光的偏振态将随电压改变.如果在泡克耳斯晶体后再放置一个检偏器,出射光的振幅或强度就会随电压的变化受到调制.在光强调制装置中,一般检偏器总与起偏器的透光轴正交,且与晶体主轴的夹角均为 $\pi/4$.在这种情况下,出射光强 I_o 与入射光强 I_i 之比为

$$I_o / I_i = (\sin \delta + 1) / 2. \quad (4)$$

若晶体上外加的是直流电压或在光路中晶体前再插入 $1/4$ 波片,并使波片的快慢轴与晶体的快慢轴一致,则产生的两束偏振光位相差 δ 很小, I_o 与 δ 间的线性关系近似成立,即 I_o 随外加电压 V 近似呈

线性变化,输出光信号的畸变很小.外电场场强为 50 kV/cm 时, I_o 约有 5% 的线性偏差值,因此电场强度 E_z 在 50 kV/cm 范围内与 I_o 间也存在着近似的线性关系.这样由测量出射光强 I_o 便可测知电场强度了.

3 测量系统

测量系统就光传输形式可分为自由空间传输及光纤传输两大类,分别如图1(a)和(b)所示.两者均在泡克耳斯晶体上设置电极,施加待测电压,将其作为电压传感器利用.

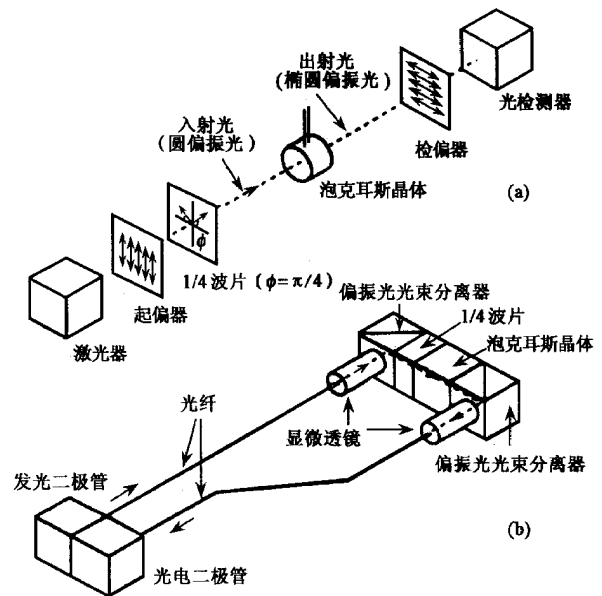


图1 测量装置示意图

(a) 自由空间传输方式;(b) 光纤传输方式

4 泡克耳斯晶体及电场测定方向的选择

在使用泡克耳斯晶体测定电场强度时,一般根据电场感量系数来选择合适的晶体.同时也要适当考虑泡克耳斯晶体的其他电学性能.从减少对周围电场扰动的角度而言,晶体的介电常数及电阻率宜与周围介质的相应值接近为好.压电晶体在外电场中会产生机械振动.焦电晶体具有温度依存性,导致透射光的偏振态也与温度有关.这些问题都必须加以考虑.表1列出常用泡克耳斯晶体的电学性能,可根据测量条件选择适当的晶体.

电场强度是个矢量.对于不同的泡克耳斯晶体,光束从怎样的方位入射晶体,才能测量到所需的光强分量呢?表2列出常用泡克耳斯晶体的入射光传

表 1 常用泡克耳斯晶体的电学性能

晶类	晶体	电场感度系数 $A/L (\times 10^{-5} / \text{V})$	相对介电常数	电阻率 $/ \Omega \text{cm}$	压电效应	焦电效应
3 m	$\text{LiNbO}_3, \text{LiTaO}_3$	40—100	$e \parallel z : 50, e \perp z : 100$	10^{16}	有	有
42 m	ADP, KDP	30	$e \parallel z : 20, e \perp z : 50$	$10^{10} - 10^{14}$	有	无
23	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}, \text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	40—70	50	10^{14}	有	无
43 m	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	10	16	10^{14}	有	无

* 表中电场感度系数计算时, λ_0 取 632.8 nm

表 2 晶体方位与电场测定方向

晶类	晶体	横向调制			纵向调制	
		晶轴	测定电场 ($\phi = 0$)	测定电场 ($\phi = \pi/4$)	晶轴	测定电场 ($\phi = 0$)
3 m	$\text{LiNbO}_3, \text{LiTaO}_3$	图 2(a)	$r_{22} E_a$	$r_{22} E_b$	图 2(a)	$r_{63} E_c$
42 m	ADP, KDP	图 2(b)		$(r_{63} E_a)/2$		
23	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}, \text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	图 2(b)	$r_{41} E_b$	$(r_{41} E_a)/2$	图 2(a) 或 (c)	$r_{41} E_c$
43 m	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	图 2(b)	$r_{41} E_b$	$(r_{41} E \setminus - a)/2$	图 2(a) 或 (c)	$r_{41} E_c$

播方向及检偏器的取向与电场测定方向的关系,并用图 2 说明入射光方向与晶体方位^[3],图中 a, b, c 表示晶轴.图 2 中圆偏振光沿晶轴 c 入射,当检偏器的偏振化方向与晶轴 a 的夹角 ϕ 为 0 或 $\pi/4$ 时,横向及纵向调制解析得到的电场测定方向一并列入表 2.

由表 2 可知,横向调制时改变检偏器的取向,能测量两个相互正交的场强分量.利用这个性质,如图 3 所示使用一个泡克耳斯晶体便可同时测量两个场强分量^[3].

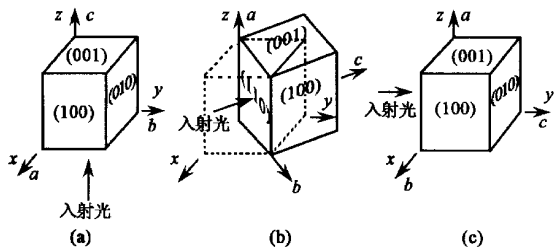


图 2 光入射方向与晶体方位

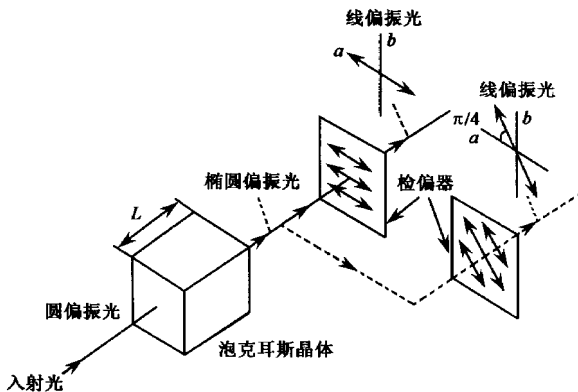


图 3 两个场强分量同时测量法

5 泡克耳斯晶体的响应特性

利用泡克耳斯晶体,最终要观测由外加电场改变而引起的光强变化.检测感量主要取决于光源的稳定性及噪声.为了提高检测感量,必须进行光源的稳定化及调制工作,对入射光进行监控,对输出信号进行波形处理.在外加 400 Hz 交流电压情况下,检测感量可达 $0.0001 \text{ V/cm}^{[4]}$.外加 50 Hz 交流电压时,可测得检测感量为 $0.2 \text{ V/cm}^{[5]}$.

从理论上讲,泡克耳斯效应的响应速度是束缚电荷极化的响应速度,应是极其迅速的.而实验中其响应速度的上限取决于测量回路的频率特性,现在可测到 10^{-11} s 的脉冲电场^[6].晶体的压电振动是妨碍测量脉冲电场的因素.晶体大小一般在几 mm 至几 cm 间,其固有振动频率可达几 kHz 到几 MHz,在这固有振动频率附近,泡克耳斯效应也显示出共振特性.可适当调节晶体的大小以规避共振,经细分胶接后的晶体,其固有振动频率移向高频端^[7].若已知泡克耳斯晶体的频率特性,可对晶体的输出波形进行数字化波形处理,再现无共振时的原波形.

在测量直流电场时,由晶体内杂质能级产生的载流子会对晶体电场起屏蔽作用,降低测量灵敏度.其对策一是选择高纯度的晶体,二是在测量过程中,周期性地旋转晶体,用金属将电场屏蔽起来,使直流电场变换为交流电场^[8].

泡克耳斯晶体的响应特性还有温度依存问题.这不仅涉及晶体自身的温度特性,还与各种光学元件及粘合光纤的胶接剂的温度变化有关.胶接状态的微小变化,都会影响传感器的输出.现在泡克耳斯

晶体传感器在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内,可将交流电压测量值的误差控制在 $\pm 1\%$ 以下。

6 电学测量上的广泛应用

泡克耳斯效应测量法在 20 世纪 80 年代前期尚处于电压传感器的研制开发阶段,80 年代后期则走向具体应用,进入 90 年代,随着其应用范围的不断拓宽,测量系统也趋向于完善。

泡克耳斯效应法在测量电场方面,已陆续开发出测量放电空隙中的电场、人体周围的环境电场及高频电场的泡克耳斯效应传感器,应用这些泡克耳斯传感器可分别测量长放电空隙中的弧光放电电场^[9]、高压充油电力设备内的油中电场^[10]、人体周围的交变电场^[11]、3 GHz 高频电场^[12]及 5 ns 脉冲电场^[13]等。

泡克耳斯效应法在测量电压方面,已通过长期的可靠性试验,实际应用于电机上,并作为高电压测量装置使用于电力工业上。例如用泡克耳斯效应法测量 500kV 高压输电线的悬垂绝缘子电压^[14]等。近来还将泡克耳斯晶体的纵向电光效应和火石玻璃的磁光效应组合起来,在测量 220kV 高电压的同时,进行电流测量^[15]。泡克耳斯效应法还可对半导体集成电路中的电压进行非接触式的测量。或是利用半导体基板自身所具有的泡克耳斯效应,采用激光直接照射的方法,或是在半导体近旁设置泡克耳斯晶体,采用对其近旁电场进行测量的方法,对半导体集成电路中的电压及电场进行采样,从而进行测量^[16]。

利用泡克耳斯效应还可测量电介质表面剩余电荷的分布^[17]。采用光纤传感系统对输出的光信号进行采样,通过 CCD 转换,可直接观测到表面电荷的二维分布情况。采用计算机图像处理技术,还可进行各种运算处理。若配有超高速扫描摄影机,便可进行表面放电进展时的放电电位分布的测量^[18]。

7 结束语

泡克耳斯效应在电学测量上的应用范围不断扩

大,向着纵深发展。实用的泡克耳斯效应电压传感装置不仅源源不断地应用于电力系统,还在历来令人棘手的放电空隙电场解析中大显神通,为阐明高电压现象及静电现象的物理机制提供重要的信息。

随着光集成回路技术的发展,必将开发出所有光学元件构筑在一块基板上的传感装置,这就促使进一步研究开发新型的泡克耳斯材料。同时随着光信息技术的发展,相应的泡克耳斯效应传感装置必将在更多的产业领域内得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Kundt A. Wiedmann Annale, 1883, 18 : 228
- [2] Pockels F. Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Geologie und Palaeontologie, 1891, 7 : 201
- [3] Hidaka K, Kouno T, Hayashi I. Rev. Sci. Instrum., 1989, 60 : 1
- [4] 冈村静到,丸山正树,羽根稔尚.电子通信学会论文志, 1984, J67-C: 320 [Oka mura S, Maruyama S, Hanekon T. Trans. IECE Jpn., 1984, J67-C:320(in Japanese)]
- [5] Murooka Y, Nakano T. Rev. Sci. Instrum., 1994, 65 : 2351
- [6] Sahara R T et al. IEEE J. Quantum Electronics, 1995, 31 : 120
- [7] Mitsui T et al. IEEE Trans. Power Delivery, 1987, PWRD-2 : 87
- [8] 大野丰.静电气学会志, 1986, 10 : 487 [Oono Y. Proc. Inst. Electrostat. Jpn., 1986, 10 : 487(in Japanese)]
- [9] Hidaka K, Murooka Y. IEE Proc., 1985, 132A:139
- [10] 赵子玉等.西安交通大学学报, 1997, 11 : 66 [ZHAO Zi-Yu et al. J. Xi'an Jiaotong University, 1997, 11 : 66(in Chinese)]
- [11] 远藤秀人,清水孝一,松本伍良.电子通信学会论文志, 1984, J67-C:964 [Entou S, Shimizu K, Matsumoto K. Trans. IECE Jpn., 1984, J67-C:964(in Japanese)]
- [12] Chang J et al. J. Appl. Phys., 1985, 57 : 4843
- [13] Kuwabara N et al. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 1992, 34 : 391
- [14] Iwama T et al. IEEE Trans. Power Deliv., 1990, 5 : 1977
- [15] 朱勇等.高电压技术, 2000, 2 : 34 [ZHU Yong et al. High Voltage Engineering, 2000, 2 : 34(in Chinese)]
- [16] 神谷武志,高桥亮.应用物理, 1992, 61 : 30 [Kamiya T, Takahashi R. Oyo Buturi, 1992, 61 : 30(in Japanese)]
- [17] Kawasaki T et al. J. Appl. Phys., 1994, 76 : 3724
- [18] 熊田亚纪子等.电气学会放电研究会资料, 1995, ED-95-111 [Kumoda A et al. Inf. ED Jpn., 1995, ED-95-111 (in Japanese)]