

光纤电压传感器的电光晶体与传感器设计*

李开成

(华中科技大学电力工程系, 武汉, 430074)

摘要: 介绍了光纤电压传感器的敏感材料电光晶体, 说明了它们的点群结构和电光特性, 阐述了它们可能存在的旋光性、热光效应、热释电效应、自然双折射及其对电压测量精度的影响。指出 BGO 晶体是目前较理想的用作光纤电压传感器的敏感材料, 并介绍了传感器的结构和设计。

关键词: 光纤电压传感器 电光晶体 传感器

Electro-optic crystals used in optical fiber voltage transducers and the transducer design

Li Kaicheng

(Department of Electrical Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The electro-optic crystals used in optical fiber voltage transducers are introduced in the paper. Their point group structures, electro-optic characteristics, possible optical activity, thermo-optic effects, pyroelectric effects and natural birefringence are described. BGO is the best sensing material at present. At the end of the paper, the transducer design is introduced.

Key words: optical fiber voltage transducers electro-optic crystal transducer

引 言

光纤电压传感器的传感原理一般是基于电光晶体的电光效应, 即透过晶体的光在电场或电压的作用下发生双折射, 双折射两光波之间的相位差与被测电压成正比^[1]。

电光效应与晶体的对称性是紧密相联的, 从理论上来说, 凡无对称中心的晶体都具有线性电光效应的性质, 都可以用来构成测量电压和电场的传感器, 如某些单轴晶体和双轴晶体。但由于双轴晶体的光轴与所使用光的波长及晶体的温度有关, 因此, 一般不考虑用作电光材料^[2]。不同的电光晶体由于其成分和结构的不同存在物理和化学性质上的差异, 有些晶体除表现出电光效应外, 还有旋光性、热光效应、热释电效应和自然双折射等。这些效应产生附加相位延迟, 叠加到电光效应产生的相位延迟上, 影响电压测量精度。作为电压传感器, 希望电光晶体不存在这些附加效应, 或这些效应越小越好。

1 光纤电压传感器的电光晶体

电光晶体是敏感被测电压的核心元件, 对它的主要基本要求有: (1) 电光系数要大, 半波电压要低; (2) 折射率要大, 光学均匀性要好; (3) 透明波段范围要宽, 透过率要高; (4) 抗光伤能力要强; (5) 介质损耗要小, 导热性要好, 温度效应越小越好; (6) 晶体的物理化学稳定性好, 容易加工成合适的器件; (7) 易获得大尺寸、高光学质量的单晶; (8) 不存在旋光性、热光效应、热释

* 湖北省自然科学基金资助。

电效应和自然双折射等。

目前, 光纤电压传感器中比较常用的有这几类晶体。(1) KDP 型晶体(磷酸二氢钾), 如氘化 KDP 及 ADP, DKDP 晶体。KDP 晶体属 $\bar{4}2m$ 对称点群, 它容易从水溶液中生长得到。其特点是: 光学质量高、光学均匀性好、透过波段范围宽, 在 $0.19 \sim 2.58 \mu\text{m}$ 波长范围内光透过率达到 95% 以上, 电光系数较大, 半波电压较低, 介电常数小, 介质损耗小, 电阻率高, 无热释电性, 但这种晶体存在自然双折射和光学活性^[2], 且易潮解, 折射率受温度影响较大^[3,4]。(2) ABO_3 型晶体。这类晶体多从熔体中生长, 机械性能优良, 有较大的介电常数和折射率, 其对称类型为 $3m$, 如 LiNbO_3 。它的特点是: 容易得到大块单晶, 光学均匀性好, 在 $0.4 \sim 0.5 \text{ mm}$ 波段内透光率达 98%, 质地坚硬, 不潮解, 易加工, 电光系数大。缺点是: 在强光和紫外线下, 会使折射率变得不均匀, 出现损伤, 且折射率随温度变化较大, 存在热释电性^[5]和自然双折射^[6,7]。(3) AB 型化合物晶体。该类晶体大都是半导体, 具有立方($\bar{4}3m$)结构或六方($6mm$)结构^[8], 如 ZnS , CdS , GaAs , CuCl 等晶体。AB 型化合物晶体的折射率较大($2 \sim 3.5$), 透光波段较宽(如 CuCl 为 $0.4 \sim 20.5 \text{ nm}$)。该类晶体大多用于中远红外电光器件。因难以获得高质量的大尺寸单晶, 在实际应用中受到限制。(4) 其它电光晶体。凡是不属于上述 3 种类型的晶体都归入此类, 如 BaB_2O_4 (BBO), $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO), $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$, LiNaSO_4 , $\text{Bi}_{12}\text{ZnO}_{19}$ 等。BSO 晶体属立方晶系 23 点群, 无自然双折射和热释电效应, 但存在旋光性^[9~13]。BBO 晶体为负单轴晶体^[14], 其寻常光折射率大于非常光折射率, 透光范围 $189 \text{ nm} \sim 3500 \text{ nm}$, 电光系数大, 当光波长为 1064 nm 时, 半波电压 $V_\pi = 48 \text{ kV}$ 。该晶体存在热光效应, 其热光系数为 $dn/dT = -9.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $dn/dT = -16.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

BBO 晶体的缺点是易潮解, 必须在干燥的地方使用或存放。此外, 该晶体质地较软, 其抛光面需要保护。

若仅考虑单轴晶体, 在 32 个对称点群中的 15 个存在线性电光效应^[2], 但只有 $\bar{4}3m$ 对称点群如 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, ZnS , ZnSe , GaAs 和 GaP 不存在自然双折射、无光学活性、无热释电效应, 除 GaAs 在波长小于 1000 nm 因不透明不能使用外, 其余均可作电光元件^[2]。BGO 晶体是一种从熔体中生长出来的人工晶体, 在理论上不存在自然双折射, 无热释电性、无旋光性、无自然双折射, 在 $350 \text{ nm} \sim 4 \mu\text{m}$ 波长范围内透明, 在 $800 \sim 1500 \text{ nm}$ 波长范围具有良好的温度稳定性^[15], 故被广泛用作闪烁探测器^[2]和电压传感器。

2 用 BGO 电光晶体构成的光纤电压传感器

由以上分析可知, BGO 是较理想的电光晶体, 可用来设计性能优良的光纤电压传感器。

根据 Pockels 电光效应原理, 在电压的作用下, 透过晶体的光发生双折射, 双折射两光波之间的相位差为^[1]:

$$\varphi = 2\pi n_0^3 \gamma_{41} l V / \lambda d = \pi V / V_\pi \quad (1)$$

式中, n_0 为晶体的折射率, γ_{41} 为其电光系数, l , d 分别为其通光方向的长度和施加电压方向的厚度, λ 为光波长, V 为作用到晶体上的电压, 即被测电压。 $V_\pi = (\lambda / 2 n_0^3 \gamma_{41}) d / l$ 为晶体的半波电压, 其物理意义为: 使双折射两光波之间产生 π 相位延迟所需的外加电压。半波电压越小, 传感器的灵敏度越高。增加晶体的长度 l 或减小晶体的厚度 d 可减小半波电压, 提高传感器的灵敏度。

由(1)式可见, 相位差正比于被测电压, 测出相位差即测得被测电压。但由于相位差难以

精确测量,故可以利用偏光干涉原理,将相位调制变为强度调制,使光强反映被测电压。图 1 为光纤电压传感器结构,它由光纤 1、起偏器 2、1/4 波片 3、BGO 电光晶体 4、检偏器 5 和电极 6 按一定的方向用光学胶粘接而成。图 2 为由光纤电压传感器等构成的电压测量装置——光纤电压互感器,它主要由光源、光纤、电压传感器、光电探测器、信号处理和高压绝缘结构等构成,其中,高电压通过电极作用到电

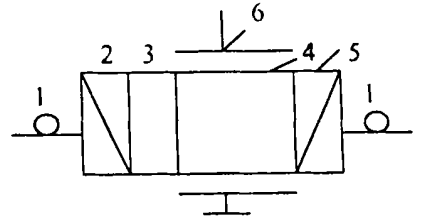


Fig. 1 Structure of optical fiber voltage transducer

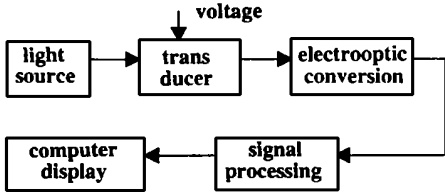


Fig. 2 Optical fiber voltage measuring system

压成正比的线偏振光,它再由光电探测器实现光电转换并进行信号处理,最后显示出被测电压。

理论分析可导出,传感器的输出光强^[1] $I = I_i(1 + \sin \varphi)/2$ (2)

式中, I_i 为输入光强, φ 为由电光效应产生的相位延迟。当 $\varphi \ll 1$, 即 $\pi V/V_\pi \ll 1$ 时, $\sin \varphi \approx \varphi$, 则有:

$$I = I_i(1 + \varphi)/2 = I_i(1 + \pi V/V_\pi)/2 \quad (3)$$

上式说明,在满足 $\pi V/V_\pi \ll 1$ 条件时,传感器的输出光强与被测电压之间具有线性关系。

由(1)式,(3)式可知,被测电压越高,传感器的输出也越大。但实际上施加到传感器上的电压要受到两方面的限制:(1)电压太高,电极间距离太近,有可能使电光晶体击穿;(2)电压高到一定的程度,有可能破坏 $\pi V/V_\pi \ll 1$ 的条件,使传感器的线性度变差。

我们设计了 110kV 光纤电压传感器。当三相电力系统的线电压为 110kV 时,作用到电光晶体上的相电压为 $110\text{kV}/\sqrt{3} = 63.5\text{kV}$ 。

BGO 晶体的折射率 $n_0 = 2.07$, $\gamma_{41} = 1.03 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, 晶体为正立方体结构,尺寸为 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 10\text{m}$,可算出其半波电压:

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3\gamma_{41}} \cdot \frac{d}{l} = \frac{0.85 \times 10^{-6}}{2 \times 2.07^3 \times 1.03 \times 10^{-12}} \cdot \frac{5}{10} = 23.26\text{kV}$$

调制度: $\pi V_m/V_\pi = \pi \times \sqrt{2} \times 63.5/23.26 = 12.13\text{kV} \gg 1$

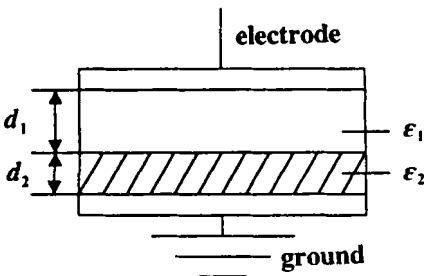


Fig. 3 Crystal put between the two electrodes

式中, V_m 为被测电压的峰值。由于不满足 $\pi V/V_\pi \ll 1$ 的条件,故传感器不能工作在线性区。

此外,理论分析和实验证明,5mm 厚电光晶体两端无法承受 63.5kV 的高电压。可采取如下措施来解决:(1)采用精密稳定的电容分压器,将高电压降至适合于晶体的较低电压作用于晶体,但分压器的分压比难以做到十分稳定;(2)提高极间距离,降低作用到电光晶体上电场强度。我们应用方法(2)。

假设晶体的一个端面紧靠电极,另一端面与另一电极之间拉开一定的距离,中间为一种气

体介质(如 SF₆),如图 3 所示。为简单起见,我们认为极间电场均匀,忽略边缘效应。根据电磁场理论,应有下列关系:

$$\begin{cases} E_1 d_1 + E_2 d_2 = V \\ \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \end{cases}$$

(4)

解得:

$$E_1 = \epsilon_2 V / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)$$

(5)

$$E_2 = \epsilon_1 V / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)$$

(6)

晶体厚度 $d_2 = 5\text{mm}$, 电极之间的距离 $d = d_1 + d_2$, $\epsilon_1 = 1.002 \approx 1$ 为 SF₆ 气体的介电常数, BGO 晶体的介电常数 $\epsilon_2 = 16$, 将参数代入上式则得:

$$E_2 = 1 \times V / (d_2 + 16d_1) = 63.5 / (5 + 16d_1) \text{ kV/mm}$$

(7)

$$V_2 = E_2 \cdot d_2 = 63.5 \times 5 / (16d_1 - 75) = 317.5 / (16d_1 - 75) \text{ kV}$$

(8)

求 E_2 对 d_1 的导数, 得: $dE_2/dd_1 = -1016/(5+16d_1)^2 < 0$ 。

由此可得两点结论: (1) 增大极间距离, 可以减小电场强度; (2) 场强的变化随极间距离的增大而显著减小。极间距离越小, 场强变化率越大; 极间距离越大, 场强变化率越小。为分析方便起见, 我们将计算数据列成表 1。

Table 1 Relations between E_2 , V_2 , dE_2/dd_1 and pole distance d_1

$d_1(\text{mm})$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$E_2(\text{kV/mm})$	12.700	0.385	0.195	0.131	0.098	0.079	0.066	0.056	0.049	0.044	0.040
$V_2(\text{kV})$	63.5	1.925	0.975	0.655	0.490	0.395	0.330	0.280	0.245	0.220	0.200
dE_2/dd_1	-40.64	-0.0373	-0.0096	-0.001	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$

由表可知, 当 $d_1 = 100\text{mm}$ 时, 场强已趋于恒定, 场强的变化率趋于 0。此时施于晶体上的电压只有 200V。由于极间距离增大, 会减小场强和场强的变化率, 从而降低测量灵敏度, 应折衷选取 d_1 值, 取 d_1 在 20mm~ 50mm 较合适, 此时, 施于晶体上的电压在 1000V~ 400V 之间。为保守起见, 可选取 $d_1 = 50\text{mm}$, 则调制度 $\Gamma_m = \pi V'_m / V_\pi = \pi(\sqrt{2} \times 0.395) / 23.26 = 0.075 \ll 1$, 满足线性响应条件, 故传感器能获得良好的线性度。根据电光晶体透射率与外加电压的关系曲线, 在 0.4% 以内的线性范围, 必须使调制度 $\Gamma_m = \pi V_m / V_\pi \leq 0.15$, 则 $V_m \leq 1110.6\text{V}$, 即在 0.4% 的线性度范围内直接测量的电压范围约为 0~ 1000V。

3 结 论

BGO 电光晶体不存在旋光性、热释电效应、热光效应及自然双折射等, 且性能稳定, 可用来设计性能优良的光纤电压传感器。

参 考 文 献

1 李开成, 叶妙元. 变压器, 1995; 32(11): 6~ 8

2 Christensen L H. IEEE T ransactions on Power Delivery, 1995; 10(3): 1332~ 1337

3 李家泽, 朱宝亮. 晶体光学. 北京: 北京理工大学出版社, 1989

4 小川智哉. 应用晶体物理学. 北京: 科学出版社, 1985

5 陈 纲, 廖理几. 晶体物理学基础. 北京: 科学出版社, 1992

6 Sawa T. Knrosawa K. IEEE T ransaction on Power Delivery, 1990; 5(2): 884~ 891

7 郭小明, 罗承沐, 张贵新 *et al.* 电工电能新技术, 1995; (2): 1~ 5

8 沈能钰主编. 现代电子材料技术, 北京: 国防工业出版社, 2000

9 Gruden A. Compact 132kV Combined Optical Voltage and Current Measurement System. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Canada: Ottawa, May 19-21, 1997: 1399~ 1402

激光多普勒细水雾雾场特性实验研究*

秦 俊 廖光煊 王喜世 姚 斌 杨远智
(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥, 230026)

摘要: 结合细水雾的特点和粒子的光散射理论, 对三维 APV (adaptive phase/ Doppler velocimeter) 的光路系统设计了合适的参数, 并进行了合理地布局。对细水雾雾场进行了实验研究, 细水雾的速度分布、滴径分布以及雾通量的测量等都得到了合理的实验结果。

关键词: 激光相位多普勒 粒子散射理论 细水雾雾场测量

Study on the flow field of water mist with laser Doppler

Qin Jun, Liao Guangxuan, Wang Xishi, Yao Bin, Yang Yuanzhi
(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei, 230026)

Abstract: On the basis of the light scattering theory of spherical particles and the characteristic of the water mist, the optimum optical path for 3D APV (adaptive phase/ Doppler velocimeter) and reasonable layout of the system are designed. The particle size, the velocity distribution and the water mist volume flux of the water mist flow field are obtained through experiments.

Key words: laser phase Doppler light scattering theory of spherical particles measurement of the water mist flow field

引 言

超细水雾作为消防灭火剂的替代品, 具有清洁高效、无环境污染等优点。对于各种不同类型火灾, 需要选择合适的细水雾才能达到较好的灭火效果。不同方式产生的细水雾有不同的压力流量关系、速度滴径分布及浓度等参数, 而且在真实条件下, 基本上都是三维湍流多相流场。90 年代发展起来的三维激光相位多普勒 LDV/APV (laser Doppler and adaptive phase/ Doppler) 方法为研究细水雾雾场的特性提供了有力的手段。为了测量细水雾三维雾场的特性, 需要搞清细水雾颗粒的光学特性, 才能得到合理的结果。

* 国家自然科学基金资助。

- 10 Mitsui T, Hosoe K. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987; 2(1): 87~ 93
- 11 Norimatsu M, Shirasaki M. 压电与声光, 1989; 11(1): 46~ 49
- 12 谢克诚. 电压与声光, 1991; 13(1): 23~ 26
- 13 Gruden A, Richardson Z J. IEEE Transaction on Power Delivery, 1995; 10(3): 1217~ 1223
- 14 Crystal Products. Fujian Castech Crystals, Inc.
- 15 Williams P A, Rose A H, Lee K S et al. Appl Opt, 1996; 35(19): 3562~ 3569

作者简介: 李开成, 男, 1962 年出生。博士, 副教授。主要从事自动检测技术、信号处理、智能仪器等研究。

收稿日期: 2000-06-29 收到修改稿日期: 2000-08-17