

光学电功率传感器研究综述

李长胜¹, 崔翔²

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;

²华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206

摘要 综述了现有各种光学电功率传感器的传感机理和主要特点, 提出了电功率传感器研究中存在的问题、方法和研究方向。光学电功率传感器一般具有测量范围大、响应频带宽和电气绝缘能力强等优点。根据光载波中是否含有电功率调制信号, 可将光学电功率传感器分为直接调制型和间接调制型两类; 与光学电压、电流传感信号相比, 直接调制型光学电功率传感信号更加微弱, 且其有功功率传感信号为直流信号, 易与光载波强度波动混淆。对于单晶型电功率传感器, 一般要求传感介质兼具线性电光、磁光效应, 或者具有双横向电光 Pockels 或 Kerr 效应; 此外, 选择传感介质时应全面考虑其多重光学效应及其相互关系, 并应考虑如何避免或抑制传感信号的温度漂移。光学电功率传感器在智能电网、微波功率及电磁脉冲功率测量等领域具有潜在的应用前景。

关键词 光学传感器; 电功率传感器; 微波功率测量; 电光效应; 磁光效应; 晶体

中图分类号 O436.4; TM933.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328011

Review of Optical Electric-Power Sensor

Li Changsheng¹, Cui Xiang²

¹School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

²School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract Sensing principles and characteristics of some optical electric-power sensors are reviewed, and some typical problems, solutions, and research proposals are summarized and analyzed. Main advantages of optical electric-power sensors include large measurement range, broadband frequency response, and good electrically insulating capability. Optical electric-power sensors can be classified into two types according to different light modulating approaches, i. e. direct modulation and indirect modulation. Compared with conventional optical voltage and current sensing signals, the optical electric-power sensing signal is much weaker and the active power sensing signal is a direct current signal. It is difficult to distinguish the direct current sensing signal from fluctuation of the probing light intensity. The sensing material of a single crystal-based electric-power sensor should exhibit both electro-optic and magneto-optic effects, or dual transverse electro-optic Pockels or Kerr effects. In addition, we should consider multiple optical effects in sensing crystals and their mutual interference, and how to avoid or suppress the temperature drift of sensing signal. Optical electric-power sensors have potential applications to smart power grid, microwave and electro-magnetic pulse power measurement.

Key words optical sensors; electric-power sensor; microwave power measurement; electro-optic effect; magneto-optic effect; crystal

OCIS codes 280.4788; 120.4570; 160.2100; 230.4110; 260.5430; 350.4010

1 引 言

电功率是电气和电子科学与技术领域中的基本物理量, 指电磁能量随时间的变化率, 可用于描述电磁能量产生、传输和消耗的速率, 也可用于解释许多电磁现象和规律。电功率测量是电气与电子技术领

域的重要研究内容, 已被广泛应用于智能电网、电磁兼容、微波工程以及电磁科学研究等领域^[1-2]。在电力系统中, 电功率主要采用电气与电子方法测量, 其中单相电路功率的典型测量方法主要包括: 1) 基于安培力和电磁感应原理的电动式功率表; 2) 基于模拟乘法器、时分割乘法器或数字乘法器的电子式功率计;

收稿日期: 2017-08-29; **收到修改稿日期:** 2017-10-17

作者简介: 李长胜(1967—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事物理光学效应、偏振光学、光学传感技术等方面的研究。E-mail: cli@buaa.edu.cn

3)利用热电偶或半导体霍尔效应元件的功率计等^[2-3]。大功率微波功率的现有典型测量技术主要包括:量热法、半导体传感器及耦合衰减法等^[4]。电功率的上述电气及电子测量方法具有一定局限性,主要为:1)被测电功率信号端在测量仪器及人员之间存在电气连接,其电气绝缘性能较差,在高电压或强电磁脉冲环境条件下的功率测量存在安全隐患;2)基于电磁感应原理的电流、电压互感器,以及电动式功率计的频率响应范围较窄(例如低于1 kHz),难以准确测量大量非正弦及谐波信号条件下的电功率;3)电气与电子测量电路自身存在一定的功率损耗,传感元件自身介入对被测电功率信号存在一定影响。

随着现代科技的迅速发展,越来越多的科技与工业领域需要快速、准确地测量电功率,同时对电功率测量的技术要求也越来越高。例如,在电磁兼容和微波工程等技术领域,需要测量宽频带、大功率微波信号的幅值、功率和频谱等信息^[4-6];脉冲功率技术中需要测量高电压、大电流和强电磁脉冲功率等信号^[2,7];此外,无线电能传输技术和太赫兹辐射功率计量技术等领域中,也需要对空间传输的电功率信号进行绝缘性测量^[8-11]。

为了克服电气与电子测量方法的上述不足,人们逐步开始研究电功率的光学传感与测量方法,包括电力系统中工频电功率的光学传感方法^[12-13]、微波功率的光纤与光子测量方法^[5-6]和太赫兹辐射功率的光学测量方法^[10-11]等。1996—1998年,华北电力大学崔翔教授主持完成的“光纤电功率传感机理及信号检测方法”国家自然科学基金资助项目,主要研究了若干工频电功率的光学传感方案和电功率传感信号的检测方法。利用光学电功率传感器可以直接在光载波中获取电功率信号,该传感器具有电气绝缘能力强、响应频带宽、对被测信号影响小和安全性能高等优点,在智能电网、电磁兼容、微波工程、高电压和脉冲功率技术等方面具有潜在的应用价值。

目前,随着电力系统中智能电网、能源互联网和各种新能源技术的发展,各种光学电流和电压传感器研究发展迅速^[14-18],但有关光学电功率传感器的研究鲜见报道。本文综述了国内外光学电功率传感器的研究现状和进展,分析了本领域研究中存在的技术问题与方法,并指出了其可能的研究方向。

2 光学电功率传感机理

2.1 电功率的基本概念

在正弦稳态电路系统中,电源输出的或负载消

耗的瞬时电功率 $p(t)$ 被定义为所在一端口网络的端口电压 $u(t) = \sqrt{2}U\cos(\omega t)$ 与端口电流 $i(t) = \sqrt{2}I\cos(\omega t - \varphi)$ 的乘积,即^[2, 19-20]

$$p(t) = u(t)i(t) = \sqrt{2}U\cos(\omega t) \cdot \sqrt{2}I\cos(\omega t - \varphi) = UI\cos\varphi + UI\cos(2\omega t - \varphi) = UI\cos\varphi \times [1 + \cos(2\omega t)] + UI\sin\varphi\sin(2\omega t) = P[1 + \cos(2\omega t)] + Q\sin(2\omega t), \quad (1)$$

式中, U 、 I 分别为端口正弦电压和电流的有效值, ω 为其角频率; φ 为电压与电流的相位差; (1) 式中的第一项表示一端口网络吸收的瞬时功率, 其在一个正弦电流周期内的平均值被定义为有功功率, 即 $P = UI\cos\varphi$, 也称为平均功率, $\cos\varphi$ 称为功率因数, 故 φ 也称为功率因数角; (1) 式中的第二项表示一端口网络与外电路周期性交换的瞬时功率, 其最大值被定义为无功功率, 即 $Q = UI\sin\varphi$; $S = UI$ 被定义为视在功率。由 (1) 式可见, 电功率测量具体包括瞬时功率、有功功率、无功功率和视在功率等的测量。

在智能电网中, 可再生能源并网装备、电动汽车充电装备、数据中心直流电源装备和储能装备等各类电力电子装备的急剧增加, 导致电网中存在大量的谐波, 传统的电功率理论不再适用。文献^[20]分析讨论了非正弦条件下的电功率理论。

2.2 基于电光、磁光效应的光学电功率传感器

光学电压、电场传感器主要是基于某些光学晶体的 Pockels 线性电光效应, 即电光晶体在外加电场作用下产生折射率变化, 且折射率变化量与外加电场强度成正比, 有时还伴随新折射率主轴方位角的变化。光学电流、磁场传感器主要依据 Faraday 磁光效应, 使通过处于外加磁场作用下的磁光晶体、玻璃、光纤等介质的光波偏振面产生旋转, 且旋转角度与外加磁场强度成正比。由于电功率信号产生于电压与电流的乘积, 因此需要同时利用光学介质的电光与磁光效应, 才能实现电功率的光学传感。

根据光载波中是否含有电功率传感信号, 可将光学电功率传感器分为两类, 一类是直接调制型电功率传感器, 被测电功率信号通过光学介质直接调制光载波; 另一类是间接调制型电功率传感器, 即利用光学方法同时传感电压(电场)、电流(磁场), 再根据电压、电流与电功率之间的关系, 通过信号处理获取电功率信号。

2.2.1 直接调制型光学电功率传感方案

根据现有文献, 已经过实验验证的直接调制型

光学电功率传感方案主要包括以下 3 种。

1) 级联电光晶体与磁光玻璃的电功率传感方案^[21-24]。例如同时利用铌酸锂(LiNbO₃, LN)晶体的线性电光效应和含铽(Tb)元素玻璃的 Faraday 磁光效应,使光载波先后通过被测电压调制的 LN 晶体和被测电流调制的铽玻璃,则可在光载波中获得电功率传感信号,该方案的一种典型实验装置如图 1 所示,图中 EO、MO 分别为 LN 晶体和含铽磁光玻璃, Z_L 为负载阻抗。利用双光路信号检测方法,可以从输出光强度传感信号的 *x*、*y* 正交偏振分量的差值(*I*_{ox} - *I*_{oy})中获得有功功率信号,传感器输出电压 *u*_{ox} 和 *u*_{oy} 随被测有功功率变化,实验数据的非线性误差低于 3.7%。

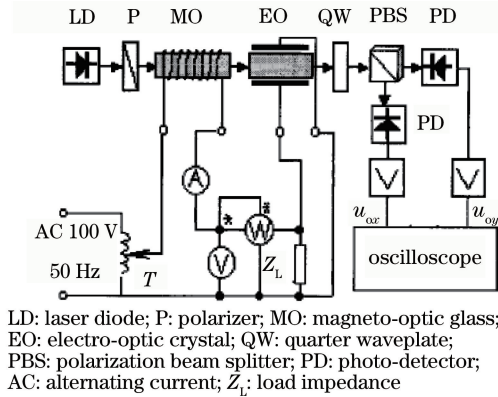
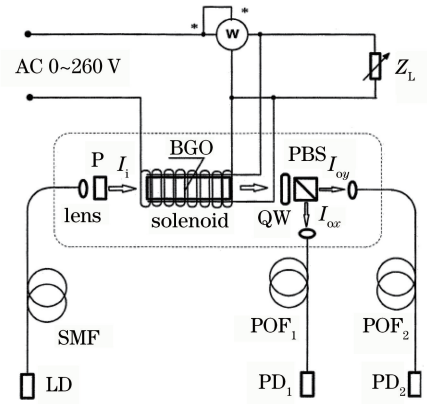


图 1 基于级联电光晶体和磁光玻璃的光学电功率传感实验装置^[24]

Fig. 1 Experimental setup of the optical electric-power sensor based on cascaded electro-optic (EO) crystal and magneto-optical (MO) glass^[24]

2) 利用兼具电光、磁光效应的单晶体的电功率传感方案。例如闪烁锆酸铋(Bi₄Ge₃O₁₂, BGO₁₂)晶体兼具 Pockels 效应和 Faraday 效应,利用该晶体传感工频电功率的实验装置如图 2 所示^[25],其电功率传感单元主要包括偏振器(P)、BGO₁₂晶体、1/4波片(QW)和偏振分光器(PBS)。在小信号调制条件下,当电光相位延迟和 Faraday 旋光角均远小于 1 rad 时,可由输出光强度的 *x*、*y* 偏振分量获得电功率传感信号。当负载功率因数分别为 1.0、0.5、0.1,视在功率小于 2 kVA 时,有功功率测量的非线性误差低于 2.9%,视在功率测量的非线性误差低于 2.0%。

此外,文献[26-29]报道了利用兼具线性电光、磁光效应的硅酸铋(Bi₁₂SiO₂₀, BSO₂₀)晶体和石英(SiO₂)晶体传感电功率的方案,但这两种晶体具有较强的自然旋光性,特别是石英晶体,同时兼具电致旋光效应^[30],要设计电功率传感器,通常需要补偿



SMF: single mode fiber; POF: polymer optic fiber

图 2 利用闪烁锆酸铋晶体的光学电功率传感器实验装置^[25]
Fig. 2 Experimental setup of the optical electric-power sensor based on bismuth germanate crystal^[25]

和抑制这些效应的影响,否则难以实现电功率传感。文献[26]提出了采用螺旋型电极和反射光路的补偿方法,但二者增加了传感系统结构及其加工的复杂性,并易引起额外的测量误差。

3) 基于电光晶体乘法器的电功率传感方案^[31-32]。电光晶体乘法器可以实现两个电压信号的乘法运算,如果将被测电流成比例地变换为电压信号 *u*_x,而被测电压变换为 *u*_y,则可以利用电光晶体乘法器实现电功率传感。利用单块 LN 晶体的电光晶体乘法器如图 3 所示,主要包括偏振器、LN 晶体和偏振分光器;将被测电功率的电流和电压变换为 LN 晶体的两个横向调制电压 *u*_x 和 *u*_y,则可通过检测输出光强度的 *x*、*y* 偏振分量实现电功率传感。此外,可以利用两块串联的光波导调制器或电光晶体来实现电光乘法器^[33-34],双横向电光克尔效应也可以用于设计电光乘法器^[35-36]。

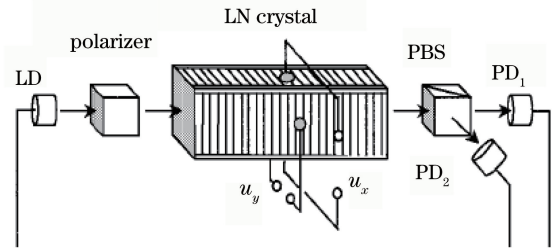


图 3 利用单块铌酸锂晶体的光学电功率传感单元结构示意图^[32]

Fig. 3 Schematic of the optical electric-power sensing unit based on a lithium niobate crystal^[32]

2.2.2 同时测量电压、电流的光学电功率间接传感方案

如果能够利用单块或两块光学介质同时传感电

压和电流,再利用电子模拟或数字式乘法器将电压与电流传感信号相乘,也可以实现电功率的间接光学传感。文献[37]利用单块 BGO₁₂ 晶体兼具的 Pockels 效应和 Faraday 效应,实现了工频交流电压和电流的同时传感,利用电子模拟乘法器获得了电功率传感信号。文献[38-42]报道了利用单块光学介质实现电压、电流传感方案,所采用的传感介质包括 BGO₁₂ 晶体^[38]、BSO₂₀ 晶体^[39-40]、石英晶体^[41] 和低双折射保偏光纤^[42],文献[41]利用石英晶体的线性电致旋光效应实现电压传感,文献[42]利用低双折射保偏光纤的电光克尔效应实现电压传感。

此外,文献[43-44]报道了利用一块电光晶体(LN 或 ADP 晶体)和一块磁光玻璃(Tb 玻璃或 TGG)组合实现电压、电流同时传感的方案;文献[45]研究报道了利用逆压电效应、磁致伸缩效应、基于阵列波导光栅实现电压和电流同时传感的方案。

2.2.3 基于光学电场、磁场传感器的微波功率传感方案

除了电力系统中工频电功率的光学传感以外,在许多科技与工业领域中也需测量微波及电磁脉冲功率。由于电光、磁光效应一般具有良好的频率响应特性,因此具有电光、磁光效应的光学介质也适用于微波功率传感器。例如,文献[46-51]研究报道了各种基于电光、磁光效应的微波功率间接传感方案,其传感机理主要是利用被测微波功率与其电场振幅之间的关系,通过光学电场传感器测量微波电场振幅,从而间接获得微波功率信号。文献[46-47]采用单晶型(例如 LiTaO₃ 晶体)电场探头,如图 4(a)所示,可以实现约 95 GHz、1 kW 量级的微波功率测量;文献[48]采用硅-有机物混合材料制成的集成光子波导型电场探头,其波导电光系数达到 1 nm/V,电场探头带有蝶形天线,可以将空间微波电场信号耦合成为调制电压信号并作用于光波导,微波功率传感实验装置如图 4(b)所示,其中电场探头置于马赫-曾德尔(M-Z)型光纤干涉仪的传感臂;文献[49-51]采用金属环形天线耦合空间电场、磁场信号,该信号作用于 LiNbO₃、CdTe 电光晶体,通过电光调制实现微波功率及坡印亭矢量的间接传感。

根据被测微波功率与空间磁场振幅之间的关系,通过测量磁场强度也可以实现微波功率以及坡印亭矢量的间接测量,例如,文献[52]研究报道了利用 FR-5 型磁光玻璃的微波功率传感器。此外,文献[53]研究了同时利用碲化镉锰(CMT)晶体的 Pockels 效应和 Faraday 效应测量微波坡印亭矢量

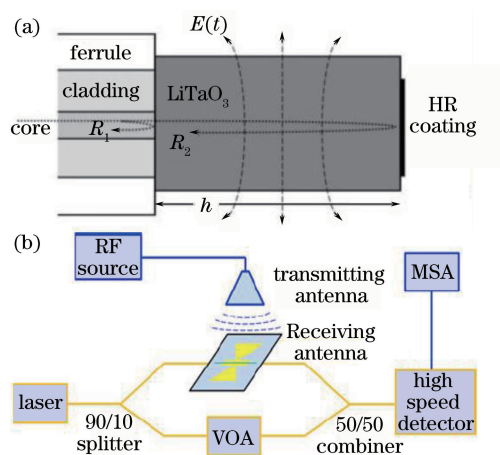


图 4 基于电光效应的微波功率传感器。(a) LiTaO₃ 单晶体探头^[46]; (b) 采用集成光子波导的微波功率测量实验装置^[48]

Fig. 4 Schematics of the microwave power sensor based on electro-optic effect. (a) Electro-optic probe by using single LiTaO₃ crystal^[46]; (b) experimental setup of microwave power measurement based on integrated photonic waveguide electric field sensor^[48]

的方案;文献[6]综述了基于光子技术的各种微波参数测量方法。

2.3 其他光学电功率传感方案及机理

2.3.1 基于微波焦耳热效应的微波功率传感器

文献[54-56]研究报道了基于微波热效应的电功率传感方案。一种利用半导体硅片微波焦耳热效应的电功率传感方案如图 5 所示^[56],其传感单元如图 5(a)所示,利用此传感探头测量矩形波导管内微波功率的传感实验系统装置如图 5(b)所示。在被

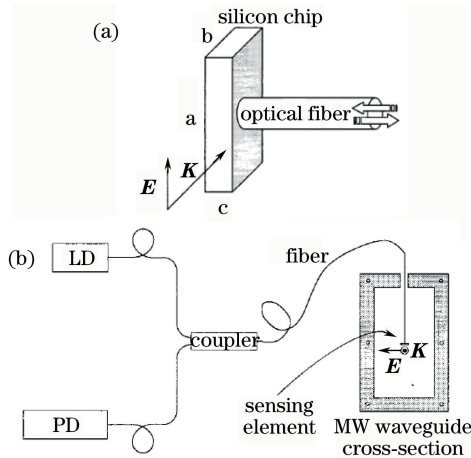


图 5 基于硅片微波热效应的微波功率传感器^[56]。(a) 硅片与光纤传感单元; (b) 微波功率传感实验装置

Fig. 5 Schematics of microwave power sensor based on silicon microwave thermal effect in silicon chip^[56].

(a) Microwave power sensing unit by using silicon chip and optical fiber; (b) experimental setup of microwave power sensing

测微波电磁场作用下,硅片由于存在焦耳热效应而产生温度变化,同时由于热光效应而引起硅片介质折射率变化,硅片两边分别是空气和光纤界面,等效于一个法布里-珀罗(FP)谐振腔,由光纤入射的光波在FP腔内多次反射后重新返回到光纤中,其光强度将随FP腔内介质折射率发生变化,反射回到光纤内的光信号经过光纤传输到达光电探测器(PD),最后的输出传感信号将随被测微波平均功率发生变化,该传感器可测量频率为10 GHz的微波功率,最小可测功率约为1 mW/cm²。

2.3.2 基于光纤光栅的电功率传感器

文献[57-60]研究报道了基于光纤光栅的电功率传感器,如图6所示,其基本传感机理是将被测电功率信号转换为光纤光栅对光谱的调制。其中图6(a)利用铁芯线圈将被测电功率信号转换为磁场力并作用在一种超结构光纤光栅(SFG)上,通过测量SFG反射光谱中心波长的移动即可获知被测电功率的变化^[57];图6(b)首先利用模拟乘法器将被测电功率信号成比例地转换为一个输出电压信号,该电压施加到与光纤 Bragg 光栅(FBG)粘接在一起的压电陶瓷(PZT)上使其产生应变,该应变作用于FBG,通过测量FBG反射光谱随着PZT应变的变化,即可获知被测电功率^[58-59]。此外,文献[60]研究

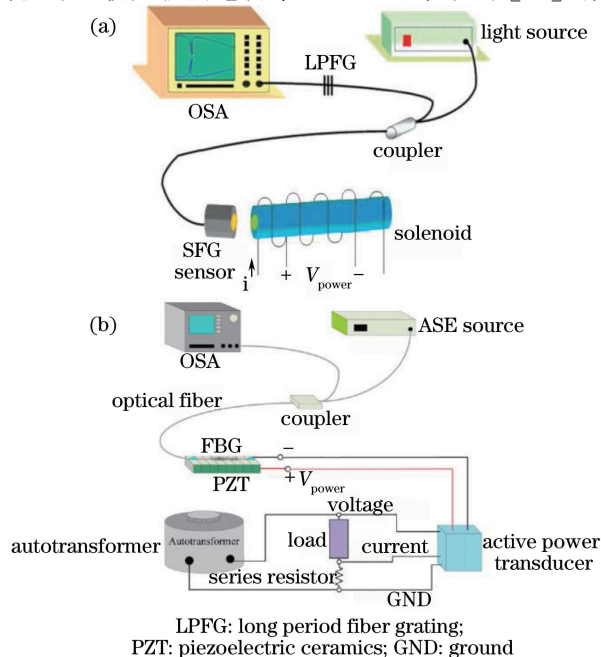


图6 基于光纤光栅的电功率传感器。

(a)利用磁场力^[57]; (b)利用PZT的逆压电效应^[58-59]

Fig. 6 Optical electric-power sensor based on fiber Bragg grating. (a) Magnetic field force; (b) inverse piezoelectric effect of the PZT

了基于FBG的无功功率传感方案。

2.3.3 光电式电功率传感器

文献[61]研究报道了一种光电式坡印亭矢量传感方案,如图7(a)所示,利用具有双间隙的半圆环形金属天线将空间电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{H} 成比例地耦合转换为两个感应电压信号 $K_E V_E$ 和 $K_H V_H$,其中 K_E 和 K_H 为比例系数,两个天线间隙之间的电压分别为 $K_E V_E - K_H V_H$ 和 $K_E V_E + K_H V_H$,通过对这两个间隙电压分别取和、差运算,即可获知 $K_E V_E$ 和 $K_H V_H$;之后利用发光二极管(LED)将其转换为光信号,并由光纤传输到信号检测单元,从而获知空间电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{H} ,以及相应的坡印亭矢量 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ 。

此外,文献[62]研究报道了一种利用光纤耦合并传输球形间隙放电发光,从而实现放电脉冲电流以及功率直接测量的方案,其利用了放电脉冲功率与放电火花光强度之间的关联关系,如图7(b)所示,图中sg1和sg2为两个球形电极, Ω 、 R 为电极间隙中心对光纤纤芯横截面所张的立体角及对应的球冠半径, r 为光纤纤芯半径。

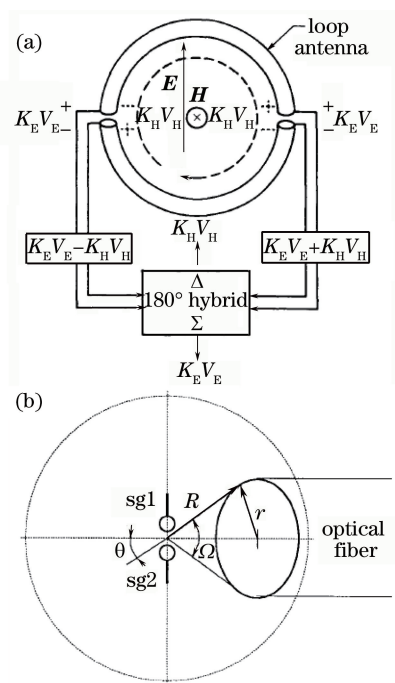


图7 光电式电功率传感单元。(a)利用双间隙半圆环形金属天线的空间电场、磁场及其坡印亭矢量传感单元示意图^[61];

(b)球形放电火花间隙与光纤耦合示意图^[62]

Fig. 7 Schematics of opto-electronic electric-power sensing units. (a) Space electric field, magnetic field, and corresponding Poynting vector sensing unit composed of two semi-circular metal loop antennas between two gaps^[61]; (b) spark gap with optical fiber^[62]

3 现有光学电功率传感方案的特性分析与比较

根据上述各种光学电功率传感机理可知,文献[21-29,31-32]传感器属于直接调制型电功率传感器,而文献[37,46-53]的传感器属于间接调制型光学电功率传感器,这两类光学电功率传感方案各有优缺点。

直接调制型光学电功率传感器,可以采用单晶体或两块光学介质实现电功率传感。例如,文献[21-24]分别采用电光晶体和磁光玻璃依次实现被测电压和电流对光载波的调制,从而获得电功率传感信号,该方案的优点是可供选择的电光晶体和磁光玻璃材料种类较多,可以通过选择具有较大电光系数的电光晶体和较大 Verdet 常数的磁光玻璃作为传感介质以获得较大的测量灵敏度;但与单晶体型电功率传感器比较,其缺点是传感单元中含有两块光学介质,结构相对复杂,且被测电压与电流信号之间易引入附加相位误差。文献[25-29,31-32]采用单晶体实现电功率传感,其优点是传感单元结构简单;但可选用的多功能晶体种类较少,且其电功率测量灵敏度受所选晶体材料的限制,一般较低。此外,基于电光乘法器的电功率传感器需要将被测电流转换为电压,可能会引入附加的测量不确定度。总之,直接调制型电功率传感器的主要优点是可以直接从光载波中获得电功率传感信号,传感单元结构简单,有利于减少电功率测量的不确定度;但其缺点是电功率传感信号通常比较微弱,且有功率为直流信号,易与光载波强度波动混淆。此外,能够实现电功率直接调制的光学传感方案较少,可选择的光学介质材料种类也较少。

而间接调制型光学电功率传感器的可用光学介质种类及其组合方案较多,可以利用以往各种具有线性响应特性的光学电压(或电场)、电流(或磁场)传感介质;但此类电功率传感单元中一般需要两块光学介质,结构相对复杂;且如果在被测电压和电流的传感路径中产生了额外的幅值、相位误差及其波动,均将引起电功率测量的附加不确定度。文献[46-53]的间接调制型光学电功率传感器一般由单块晶体或波导构成,结构相对简单,且其测量灵敏度一般大于直接调制型电功率传感器;但被测微波功率与其直接传感的电场或磁场幅值之间为平方关系,具有非线性响应特性。

在 2.3 节所述的各种电功率传感方案中,文献

[54-56]报道了基于介质的微波焦耳热效应的传感方案,可以实现微波平均功率的直接测量,且结构简单;但这种传感器的响应输出信号依赖于介质温度变化,因而限制了其响应速度;此外,环境温度变化对传感器输出信号具有一定影响。文献[57-60]基于光纤光栅的电功率传感系统结构相对复杂;由于输出信号为光谱变化,其响应频率一般较低。文献[61]的光电式电功率传感器结构简单,响应频带宽,可以传感空间电磁场的坡印亭矢量,但所用的两个环形天线会对被测电磁场产生微小干扰,且需要工作电源。文献[62]报道了一种简单的光纤电功率传感器。

综合上述情况,光学电功率传感器的主要技术特点如下。

1)采用光学介质传感电功率,在不需要金属天线介入的情况下,光学传感探头对被测电功率或坡印亭矢量的干扰很小。

2)通过合理选择传感晶体种类、优化设计传感头结构和尺寸等参数,根据不同测量场合的要求,易设计出具有较高测量灵敏度和较大测量范围的电功率传感器。

3)采用光载波和光学介质实现电功率传感,与以往电气电子测量方法相比,传感器因其响应频带更宽,能够适用于射频微波功率、脉冲功率,及太赫兹辐射功率的传感与测量。

4)采用光纤传输电功率传感信号,响应速度快,且光传感信号的抗电磁干扰能力和电气绝缘能力强,易实现电功率的远距离传感。

5)直接调制型光学电功率传感器的系统结构更加简单,从而有利于减小测量不确定度。

4 光学电功率传感器的主要问题、方法及研究方向

4.1 直接调制型光学电功率传感信号的特殊性及其检测方法

对于单晶体型电功率传感器,被测电功率所对应的电场、磁场将在传感晶体所在区域产生坡印亭矢量,从对光载波调制的角度而言,直接调制型光学电功率传感信号实际上是由坡印亭矢量对光载波调制产生;对于利用两块光学介质实现的光学电功率传感信号,则可以视为被测电压 $u(t)$ 、电流 $i(t)$ 依次调制光载波的结果;或者从动态光学偏置的角度来理解电功率传感信号,将其视为光偏置受被测电流(电压)调制的电压(电流)传感信号。

根据文献[25],通常光强度调制型单光路电功率传感信号可表示为

$$I_o(t) = 0.5I_i[1 \pm k_0\Gamma(t)\Phi(t)] = 0.5I_i[1 \pm k_0k_1k_2u(t)i(t)] = 0.5I_i[1 \pm k_0k_1k_2P \mp k_0k_1k_2S\cos(2\omega t - \varphi)], \quad (2)$$

式中, I_i 为入射光载波强度, k_0 通常为小于 1 的系数(文献[25]所述的基于闪烁锗酸铋单晶的电功率传感器,在被测电压和电流数值均较小的条件下, $k_0 \approx 1$), $\Gamma(t) = k_1u(t)$ 为电光相位延迟, $\Phi(t) = k_2i(t)$ 为磁光旋转角,“ \pm ”对应于不同偏振分量的输出单光路传感信号(例如 I_{ox} 和 I_{oy}), k_1 、 k_2 为与光学介质参数和测量灵敏度有关的系数。根据 Pockels 效应和 Faraday 效应机理,一般而言, $k_1 \ll 1$, $k_2 \ll 1$ 。

由(2)式可见,不同于以往光学电压、电流传感信号,光学电功率传感的测量灵敏度正比于系数 k_1 和 k_2 的乘积,因此其数值更小,导致电功率传感信号更加微弱和难以检测,这是光学电功率传感信号的特殊性之一;此外,由(2)式可知,被测有功功率 P 包含在单光路传感信号 $I_o(t)$ 的直流分量之中,且其系数 $k_0k_1k_2 \ll 1$,因此当光载波信号强度 I_i 波动时,将难以区分并准确获取有功功率信号,这是光学电功率传感信号的另一特殊性。

为了获取有功功率传感信号,现有文献一般采用双光路检测法并结合除法运算电路。例如,文献[23-25]利用光电检测和运算电路,从与 $m = (I_{ox} - I_{oy}) / (I_{ox} + I_{oy})$ 成正比的输出电压信号中获得有功功率信号。但此方案在实施过程中需要调节两路传感信号的放大倍数并使其保持相等,同时需要利用除法运算电路来抑制光强度波动引起的输出信号漂移,否则会产生较大的测量不确定度,甚至难以获取有功功率信号。

为了避免上述双光路检测法中双信号通道增益系数不一致而导致的测量不确定度,可以采用时分复用且偏振态脉冲调制的光载波取代以往偏振态恒定的光载波,并实现电功率信号的单光路分时检测[63-64]。这种传感信号检测方案已被成功应用于光学电压、电流传感器,例如,采用 x 、 y 线偏振态时分复用且脉冲调制的光载波实现了直流、工频电流传感信号的单光路检测[65],采用左、右旋圆偏振态时分复用且脉冲调制的光载波实现了直流、工频电压传感信号的单光路检测[66],采用线偏振和圆偏振态时分复用且脉冲调制的单路光载波实现工频电流和

电压的同时传感[38,43]。理论上,这种单光路分时检测方案也可以用于获取有功功率传感信号,但尚需进一步实验研究。

4.2 传感介质的选择与多重光学效应

文献[26]初步分析讨论了可以用于电功率传感的各种晶体,此外,根据 2.2.1 节所述的直接调制型电功率传感机理,对于单晶型电功率传感器,其所用的传感晶体主要包括两类,一是兼具电光和磁光效应的晶体,二是可以实现电光乘法器的电光晶体。

根据文献[25],对于利用前一类晶体的电功率传感器,(2)式中的系数 k_0 为

$$k_0 = (\sin \theta / \theta)^2, \quad (3)$$

式中 θ 称为与晶体的椭圆双折射对应的合成相位延迟角, $\theta = \sqrt{(0.5\Gamma)^2 + \Phi^2}$ 。由(2)、(3)式可见,实现电功率传感的一个必要条件是被测电压、电流的幅值应满足小信号近似条件,即 $|\Gamma| \ll 1$, $|\Phi| \ll 1$, 从而 $\theta \ll 1$ 且 $k_0 \approx 1$;同时,晶体不应存在自然旋光性。如果晶体存在自然旋光性,其旋光作用将与法拉第磁光效应叠加,一般而言,晶体自然旋光率远大于其磁光 Verdet 常数,此时将不满足上述条件 $|\Phi| \ll 1$ 和 $\theta \ll 1$ 。当 θ 的数值逐渐增大时,电功率传感信号将逐渐失真,且其测量灵敏度也越来越低,以至于难以获取电功率信号,因而具有自然旋光性的晶体不宜直接用于电功率传感器。根据上述分析,43 m 点群的立方晶体可以用于电功率传感(m 表示晶体具有对称面),除了已经过实验研究的闪烁锗酸铋晶体以外,还包括 ZnTe、ZnSe 等半导体晶体;此外,3 m 点群的偏硼酸钡 (β -BaB₂O₄, BBO) 晶体也兼具 Pockels 电光效应和 Faraday 磁光效应[67],但 ZnTe、ZnSe 和 BBO 晶体能否用于电功率传感尚待进一步理论分析和实验研究。

第二类传感晶体是可以实现电光乘法器的晶体,主要是指具有双横向 Pockels 效应的晶体,包括 $\bar{4}3m$ 、3 m 点群的电光晶体[68-69],例如:LN、BBO 以及 BGO₁₂ 晶体等,其中利用 LN 晶体的电功率传感器已经过实验验证[32]。此外,双横向电光 Kerr 效应也可以用于实现电光乘法器[35-36],因而理论上也可以用于电功率传感;典型晶体是立方相的钽铌酸钾(KTa_{1-x}Nb_xO₃, KTN)晶体,属于 $m\bar{3}m$ 点群,不存在线性电光效应,且其电光 Kerr 系数很大,可达到 $2.24 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$ [70],但其能否适合于电功率传感尚待进一步分析研究。

对于晶型电功率传感器,从提高电功率传感灵敏度的角度而言,应尽可能选用电光系数和 Verdet

常数较大的光学介质作为传感元件。近年来,光子晶体技术、微纳米以及超材料技术迅速发展,为选择高灵敏度的电功率传感介质提供了新途径。例如,采用光子晶体结构的钛酸钡(BaTiO_3)电光波导调制器,由于存在慢光效应,其 Pockels 效应得到显著增强,其有效电光系数可达 $60\sim 110 \text{ pm/V}^{[71]}$;一种含有石墨烯薄膜的层状一维光子晶体的 Faraday 效应也能显著增强^[72]。

选择传感晶体时需要考虑其多重光学效应及其相互影响,选择的基本原则是晶体的主效应(例如线性电光效应、法拉第磁光效应)较强且不存在次效应;如果次效应不可避免,则选择次效应很弱或可以被抑制和补偿的晶体。文献[73]给出了晶体存在多重光学效应时的一般分析方法,可供选择晶体时参考。

4.3 温度漂移及其抑制方法

由于电功率传感涉及到电压和电流两个变量,因而与光学电压、电流传感器相比,原则上,光学电功率传感信号的温度漂移问题更加严重,其影响因素也更加复杂。文献[13, 17-18]已经对光学电压、电流以及电功率传感信号的温度稳定性影响因素作了初步分析和讨论,其中有些影响因素是三种传感器共同存在的,其抑制及补偿方法也可以相互借鉴。对于晶体型电功率传感器,传感信号产生温度漂移的主要因素及其抑制方法如下。

1) 传感晶体中各种光学次效应的影响。电功率传感器的主效应是电光效应和磁光效应,但所用传感晶体也同时存在一些次效应,例如:弹光效应、热光效应、压电效应等,有些晶体还存在热电效应和光折变效应;文献[73]分析讨论了各种次效应对主效应的影响。对于晶体型光学电压传感器和电光调制器,已有许多学者提出各种抑制温度漂移的方案,例如:通过截取晶体长度为某一优化值^[74],或者选取通光方向与晶体光轴方向的夹角为某一优化值^[75],或者采用实时测量传感单元温度的方法^[76],均可以有效降低或补偿传感器输出信号的温度漂移,此外,文献[77]研究报道了如何去除弹光双折射对光学器件性能影响的一般方法,在电功率传感器设计中可以考虑借鉴上述方法。

2) 对于光强度调制型电功率传感器,由于被测有功功率为直流信号,当光源光强度、光波长等参数产生漂移,以及传感光路中光学器件的光损耗、器件之间的光耦合系数等因温度变化而改变时,将难以有效区分和检测有功功率信号,从而引起有功功率

测量不确定度。理论上,可以采用时分复用、偏振脉冲调制的单光路检测法获取有功功率信号,但尚待进一步实验研究;因此,直流电功率、有功功率传感信号检测问题仍然是未来光学电功率传感器研究的重点问题之一。

4.4 微波功率与坡印亭矢量传感器研究

除了可以用于工频电功率测量以外,光学电功率传感还可以用于微波功率测量、坡印亭矢量测量以及太赫兹辐射功率探测等。特别是高功率微波源具有输出功率高、脉冲宽度窄、重复频率低且对周围环境电磁场干扰严重等特点,常规微波测量设备难以准确测量其参数;除了高功率微波以外,还有采用光电振荡器测量低功率射频信号的研究报道^[78]。对于空间电磁场坡印亭矢量的测量,如果采用金属天线耦合空间电磁场量,则金属天线将干扰被测场量,从而引起较大的测量误差;如果采用光学晶体探头,由于晶体具有很好的电介质绝缘特性,其对被测坡印亭矢量的影响是可以忽略的,上述文献报道的单晶体型工频电功率传感器原则上均可以用于坡印亭矢量传感,但其实际可行性尚需进一步分析研究。

由于非正弦以及谐波信号功率不同于工频电功率,其有关概念和理论相对复杂且仍在继续研究之中^[79-80],同时宽频带、高幅值的瞬态脉冲电磁信号测量本身仍然存在许多难点和挑战,因而研究可用于测量非正弦及谐波信号功率、微波及脉冲电磁场功率、以及太赫兹辐射功率的光学电功率传感器是本领域未来重要研究方向之一。

5 结 论

光学电功率传感器具有测量范围大、响应频带宽、电气绝缘能力强等优点,在智能电网、电磁兼容及微波工程,以及太赫兹技术等领域具有广泛的应用前景。对于单晶体型电功率传感器,由于电功率传感涉及电压(电场)、电流(磁场)两个量,因而通常需要传感晶体兼具电光、磁光效应,或者具有双横向线性或二次电光效应,从而能够实现电功率信号对光载波的直接调制;选择传感晶体除了考虑电功率测量范围和灵敏度以外,还必须考虑晶体可能存在的多重光学效应及其相互影响,同时应避免或抑制弹光效应、热光效应等对传感器温度稳定性的影响;随着可调谐光子晶体等新材料的发展,未来可研究和选择综合性能更好的新型光学介质用于电功率传感。

与传统光学电压、电流传感信号相比,光学电功

率传感信号更加微弱,测量灵敏度更低;且其有功功率信号为直流信号,易与光载波强度波动混淆;加之其他各种因素引起的传感信号温度漂移等问题,光学电功率传感信号的获取与检测具有一定难度。

由于高功率微波和强电磁脉冲功率测量等技术领域尚存在许多难点和问题,考虑光学电功率传感器本身的技术优势,研究采用光学与光子技术实现微波、电磁脉冲功率,以及太赫兹辐射功率的准确测量将是未来重要研究方向之一。

致谢 感谢清华大学廖延彪教授对本文提出宝贵意见和建议。

参 考 文 献

- [1] Morello R, Capua C D, Fulco G, *et al.* A smart power meter to monitor energy flow in smart grids: the role of advanced sensing and IoT in the electric grid of the future[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(23): 7828-7837.
- [2] Liang X D, Qiu A C, Sun C X, *et al.* Canon of China electrical engineering: fundamental of modern electrical engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 85-86, 305-307, 659-667.
梁曦东, 邱爱慈, 孙才新, 等. 中国电气工程大典: 现代电气工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 85-86, 305-307, 659-667.
- [3] Webster J G, Eren H. Measurement, instrumentation, and sensors handbook: power measurement [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [4] Fang W H, Wen X, Zhang L, *et al.* Review on developments of high-power microwave measurement and calibration[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2013, 33(3): 1-6.
方维海, 温鑫, 张璐, 等. 大功率微波测量校准技术发展综述[J]. *宇航计测技术*, 2013, 33(3): 1-6.
- [5] Li Y M, Xing J Q, Wang L. High power microwave measurement based on microwave photonics[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2016, 28(3): 033028.
李义民, 邢建泉, 王兰. 基于微波光子学的高功率微波测量[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(3): 033028.
- [6] Pan S, Yao J. Photonics-based broadband microwave measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3498-3513.
- [7] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 电气科学与工程学科发展战略研究报告(2016-2020) [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 285-286.
- [8] Zhang B, Shu X J, Huang R H. The development of inductive and resonant wireless power transfer technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(18): 3-17.
张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(18): 3-17.
- [9] Gao J X, Wu X S, Gao W, *et al.* Review on inductive contactless power transfer technology[J]. *Journal of Power Supply*, 2017, 15(2): 166-178.
高键鑫, 吴旭升, 高崑, 等. 电磁感应式非接触电能传输技术研究综述[J]. *电源学报*, 2017, 15(2): 166-178.
- [10] Deng Y Q, Sun Q, Yu J, *et al.* Progress of terahertz radiometry and international comparison[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0314001.
邓玉强, 孙青, 于靖, 等. 太赫兹辐射功率计量研究进展与国际比对[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0314001.
- [11] Naftaly M, Clarke R G, Humphreys D A, *et al.* Metrology state-of-the-art and challenges in broadband phase-sensitive terahertz measurements [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(6): 1151-1165.
- [12] Cui X, Li C S, Zhang W D, *et al.* Development in research on optical electric power transducers [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 1998, 25(4): 1-5.
崔翔, 李长胜, 张卫东, 等. 光纤电功率传感器研究进展[J]. *华北电力大学学报*, 1998, 25(4): 1-5.
- [13] Li C S, Yoshino T, Cui X. Review and prospect of optical electric-power sensor[C]. *SPIE*, 2002, 4920: 1-8.
- [14] Blake J N, Rose A H. Optical current sensors in the modernization of the electric power grid: digital substation challenges[C]. *SPIE*, 2014, 9157: 9157C6.
- [15] Kurosawa K. Development of fiber-optic current sensing technique and its applications in electric power systems[J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(1): 12-20.
- [16] Wang R, Xu S, Li W, *et al.* Optical fiber current sensor research: review and outlook[J]. *Optical Quantum Electronics*, 2016, 48: 442.
- [17] Li C S, Wang W Q. Review of optical voltage sensor based on electroluminescent effect[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 30-40.
李长胜, 王伟岐. 基于电致发光效应的光学电压传感器[J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 30-40.
- [18] Li C S. Optical voltage sensors: principle, problem and research proposal[C]. *SPIE*, 2016, 10158: 101581N.
- [19] Rizzoni G. Fundamentals of electrical engineering [M]. Wu W, Transl. Beijing: Tsinghua University

- Press, 2009: 294-295, 301-302.
- Rizzoni G. 电气工程原理[M]. 伍微, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009: 294-295, 301-302.
- [20] Power system instrumentation and measurement committee. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions: IEEE Std 1459™—2010[S]. New York: The IEEE, 2010.
- [21] Zhao J, Chen J, Qiao S. Optical method for measuring electric power[C]. SPIE, 1996, 2899: 589-593.
- [22] Zhao J L, Chen J S, Qiao S. Study on the optical methods for measuring electric power[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(1): 65-69.
赵军良, 陈纪东, 乔松. 光测电功率的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(1): 65-69.
- [23] Yao R Y, Cui X, Li C S. Theoretical and experimental research on an optical electric power sensing system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 12-14.
姚若亚, 崔翔, 李长胜. 光电功率传感系统的原理与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 12-14.
- [24] Li Y Q, Li C S, Yoshino T. Optical electric-power-sensing system using Faraday and Pockels cells[J]. Applied Optics, 2001, 40(31): 5738-5741.
- [25] Li C S, Cui X, Yoshino T. Optical electric-power sensor by use of one bismuth germanate crystal[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1328-1333.
- [26] Fujii Y, Hayashi J. Electric voltage, current and power sensor by using one crystal[J]. Review of Laser Engineering, 1984, 12(4): 36-42.
藤井阳一, 林淳. 单一结晶による电压. 电流. 电力センサー[J]. レハザへ研究, 1984, 12(4): 36-42.
- [27] Dong X Y, Sheng Q Q, Zhang J Z. Study of a multifunctional optical fiber sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1988, 10(3): 12-16.
董孝义, 盛秋琴, 张建忠. 多功能光纤传感器的研究[J]. 压电与声光, 1988, 10(3): 12-16.
- [28] Cui X, Li C S. The optical propagation property of BSO crystal under simultaneously applied electric and magnetic fields and its application in the electric power sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, A24(4): 347-351.
崔翔, 李长胜. 电场和磁场同时作用下 BSO 晶体的光学传输特性及其在电功率传感中的应用[J]. 中国激光, 1997, A24(4): 347-351.
- [29] Miyashita H, Fujii Y. Measurement of current, voltage and power using single quartz crystal[C]. Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Optical Fiber Sensors, 2002: 491-494.
- [30] Li C S. Linear electrooptic and electrogyration intensity modulation using crystalline quartz[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0123002.
李长胜. 利用石英晶体的线性电光和电致旋光强度调制[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0123002.
- [31] Li C S, Cui X. Electro-optic crystal multiplier and its application[J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, A24(12): 1079-1084.
李长胜, 崔翔. 电光晶体乘法器及其应用[J]. 中国激光, 1997, A24(12): 1079-1084.
- [32] Li C S, Cui X, Yoshino T. Measurement of ac electric power based on dual transverse Pockels effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2001, 50(5): 1375-1380.
- [33] Izutsu M, Haga H, Sueta T. Picosecond signal sampling and multiplication by using integrated tandem light modulators[J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(3): 285-289.
- [34] Li C S. Electrooptic crystal multiplier based on two cascaded Pockels crystals[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 521-523.
- [35] Li C S. Proposal for electro-optic multiplier based on dual transverse electro-optic Kerr effect[J]. Applied Optics, 2008, 47(30): 5701-5705.
- [36] Li C S. Dual transverse electrooptic Kerr effect[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1671-1674.
李长胜. 双横向电光克尔效应[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1671-1674.
- [37] Li C S, Yoshino T. Simultaneous measurement of current and voltage by use of one bismuth germanate crystal[J]. Applied Optics, 2002, 41(25): 5391-5397.
- [38] Li C S, Cui X. An optical voltage and current sensor with electrically switchable quarter waveplate[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 126: 62-67.
- [39] Li C S, Cui X. Coupled-wave analysis on the electro-optic and magneto-optic interaction in BSO crystal and its application to sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(2): 122-126.
李长胜, 崔翔. 硅酸铋晶体内电光、磁光相互作用的耦合波分析及其传感应用[J]. 光子学报, 1998, 27(2): 122-126.
- [40] Li C S, Zeng Z, He X L. Simultaneous measurement of alternating voltage and current using single bismuth silicate crystal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 3036-3041.
李长胜, 曾张, 何小玲. 利用单块硅酸铋晶体同时测

- 量交流电压和电流[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3036-3041.
- [41] Rogers A J. Method for simultaneous measurement of current and voltage on high voltage lines using optical techniques [J]. Proceedings of the IEEE, 1976, 123: 957-960.
- [42] Wang Z B, Liao Y B, Lai S R, *et al.* A novel method for simultaneous measurement of current and voltage using one low-birefringence fiber[J]. Optics & Laser Technology, 1998, 30: 257-262.
- [43] Yang Z, Li C S, Zhang W D, *et al.* Novel multifunction optical fiber sensing system for simultaneous measurement of current and voltage [C]. SPIE, 1998, 3555: 57-62.
- [44] Ferrari J A, Flores J L, Dultz W, *et al.* Optical current and voltage sensor using differential spectroscopy[J]. Optical Engineering, 2009, 48(5): 054401.
- [45] Fusiek G, Niewczas P, McDonald J R. Feasibility study of the application of optical voltage and current sensors and an arrayed waveguide grating for aero-electrical systems[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2008, 147: 177-182.
- [46] Lee D J, Kwon J Y, Kang N W, *et al.* Calibrated 100-dB-dynamic-range electro-optic probe for high-power microwave applications [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14437-14450.
- [47] Kim S, Hong Y P, Yang J E, *et al.* Two-tier calibrated electro-optic sensing system for intense field characterization of high-power W-band gyrotron [J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10547-10555.
- [48] Zhang X, Hosseini A, Subbaraman H, *et al.* Integrated photonic electromagnetic field sensor based on broadband bowtie antenna coupled silicon organic hybrid modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3774-3784.
- [49] Suzuki E, Arakawa S, Ota H, *et al.* EO probe for simultaneous electric and magnetic near-field measurements using LiNbO₃ with inverted domain [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005, 53(2): 696-701.
- [50] Suzuki E, Arakawa S, Ota H, *et al.* Optical magnetic field probe working up to 15GHz using CdTe electrooptic crystals[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(2): 344-351.
- [51] Suzuki E, Arakawa S, Takahashi M, *et al.* Visualization of Poynting vectors by using electro-optic probes for electromagnetic fields[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008, 57(5): 1014-1022.
- [52] Drexler P, Fiala P. Methods for high-power EM pulse measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(7): 1006-1011.
- [53] Chen C C, Whitaker J F. An optically-interrogated microwave-Poynting-vector sensor using cadmium manganese telluride[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12239-12248.
- [54] Auchterlonie L J, Harris A J, Sacco M J. A novel intrinsic multimode fiber-optic sensor for the detection or monitoring of microwave power[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(7): 888-894.
- [55] Schmau B B, Marz M, Ernst J. A fiber-optic sensor for microwave field measurements[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(8): 4031-4033.
- [56] Grasso S, Bellucci M, Cocorullo G, *et al.* Thermo-optic design for microwave and millimeter-wave electromagnetic power microsensors[J]. Applied Optics, 2002, 41(18): 3601-3612.
- [57] Cheng C H, Lin L M, Liu W F. Measurement of electric power using an optical fiber grating[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2009, 51(10): 2438-2441.
- [58] Cheng C H, Chang M C, Liu W F. Electrical power sensor based on fiber Bragg grating and piezo-electric transducer[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2255-2262.
- Cheng C H, Chang M C, Liu W F. 基于光纤布拉格光栅和压电转换器的电功率传感器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2255-2262.
- [59] Cheng C H, Chang M C, Liu W F. Measurement of active power using fiber Bragg grating and a piezo-electric transducer[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2013, 55(3): 682-686.
- [60] Cheng C H, Cheng K L, Liu W F. A reactive power sensor based on fiber Bragg grating and a piezoelectric transducer[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2013, 55(7): 1692-1696.
- [61] Driver L D, Kanda M. An optically linked electric and magnetic field sensor for Poynting vector measurement in the near fields of radiating sources [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1988, 30(4): 495-503.
- [62] Greason W D, Kucеровsky Z, Bulach S, *et al.* Noninvasive optoelectronic system for measurement of electrostatic discharge (ESD)-induced phenomena [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1997, 33(2): 435-443.
- [63] Li C S, Cui X. Pulse-controlled polarization converter and its applications[J]. Acta Photonica Sinica, 1997, 26(10): 929-934.

- 李长胜, 崔翔. 脉冲式可控偏振态变换器及其应用[J]. 光子学报, 1997, 26(10): 929-934.
- [64] Li C S. Stepped polarization states: representation and its applications to optical sensing and measurement[J]. Optics Communications, 2008, 281: 2033-2039.
- [65] Li C S, Yoshino T, Cui X. Magneto-optic sensor by use of time-division-multiplexed orthogonal linearly polarized light[J]. Applied Optics, 2007, 46(5): 685-688.
- [66] Li C S, Cui X, Yamaguchi I, *et al.* Optical voltage sensor using a pulse-controlled electrooptic quarter waveplate[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, 54(1): 273-277.
- [67] Li C S, Song N F, Zhang C X. Verdet constant measurements of β -bariumborate and lead molybdate crystals[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(9): 1991-1997.
- [68] Li C S. Complete polarization conversion using one crystal with dual transverse Pockels effect[J]. Applied Optics, 2008, 47(13): 2241-2251.
- [69] Li C S. Crystals modulated by two parameters and their applications[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(7): 074207.
李长胜. 晶体的双参量调制及其应用[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 074207.
- [70] Liu B, Wang X P. Progress on application of quadratic electro-optic effect of KTN crystals[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2012, 24(2): 261-266.
刘冰, 王旭平. 钽铌酸钾晶体二次电光效应的应用研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(2): 261-266.
- [71] Girouard P, Liu Z, Chen P, *et al.* Enhancement of the Pockels effect in photonic crystal modulators through slow light[J]. Optics Letters, 2016, 41(23): 5531-5534.
- [72] Ardakani A G. Strong enhancement of Faraday rotation using one-dimensional conjugated photonic crystals containing graphene layers[J]. Applied Optics, 2014, 53(36): 8374-8380.
- [73] Liao Y B. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 137-155.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 137-155.
- [74] Mitsui T, Hosoe K, Usami H, *et al.* Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(1): 87-93.
- [75] Xie N, Xu Q, Ma J, *et al.* Thermally insensitive design for LiNbO₃ electro-optical modulator under dynamic electric field[J]. Journal of Optics, 2014, 16(8): 085201.
- [76] Zheng X P, Liao Y B. A technique for fiber optic voltage sensors to realize temperature compensation[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2000, 83(3): 342-346.
- [77] Li C S, Chen J. How to eliminate unwanted elastooptical birefringence from optical devices[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(3): 037801.
李长胜, 陈佳. 去除光学器件的弹光双折射的方法[J]. 物理学报, 2016, 65(3): 037801.
- [78] Zou X, Liu X, Li W, *et al.* Optoelectronic oscillators (OEOs) to sensing, measurement, and detection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52(1): 0601116.
- [79] Kukacký A L, Kraus J, Kolár M, *et al.* Review of AC power theories under stationary and non-stationary, clean and distorted conditions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(1): 221-231.
- [80] Lin H X. General situation & development of power theory[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(4): 32-40.
林海雪. 电功率理论的概况与发展[J]. 供用电, 2016, 33(4): 32-40.