

基于萨尼亚克光纤干涉仪的相位调制器半波电压的测量方法

魏正军 李华锜 王金东* 刘颂豪

(华南师范大学信息光电子科技学院光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 铌酸锂行波相位调制器在光纤通信和相位编码光纤量子密钥分发等领域有着广泛的应用,其半波电压参数的测量会受到一系列因素的影响而带来误差,该误差直接影响了所应用系统的整体性能。针对行波相位调制器在相位编码量子密钥分发系统中的应用模型,提出了一种基于萨尼亚克光纤干涉环的相位调制器半波电压的测量方法,由于测量装置采用了和应用模型相同的调制方式,所以测量数据具有较高的可靠性。实验针对住友公司的行波相位调制器实现了 10 mV 精度的半波电压测量,将之应用于差分相位编码量子密钥分发系统,得到了比采用传统的极值法测量得到的半波电压更低的误码率,为量子密钥分发系统中相位调制器半波电压的准确测量和相位电压的准确加载提供了一种有参考价值的实验方法。

关键词 测量;量子密钥分发;相位编码;相位调制器;半波电压

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0612006

A New Method to Measure Half-Wave Voltage of Phase Modulator Based on Sagnac Optical-Fiber Interferometer

Wei Zhengjun Li Huazeng Wang Jindong Liu Songhao

(Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information Photoelectric Science and Technology and Laboratory of Quantum Information Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract LiNbO₃ traveling-wave phase modulator can be used in many fields, such as optical fiber communication, phase-coding quantum key distribution system, and so on. The measurement precision of the half-wave voltage seriously affects the performance of its applied system. A new method is proposed to measure the half-wave voltage based on the Sagnac optical-fiber interferometer according to the phase modulator's applying model in quantum key distribution system. The data should be reliable compared with other methods because the same modulating pattern is adopted as the quantum key distribution system. This method is demonstrated experimentally with the precision of 10 mV by measuring the half-wave voltage of the phase modulator from Sumitomo corporation, which is used in the differential phase shift quantum key distribution system, and the obtained quantum bit error rate is lower than that of the conventional extreme measure method. This method can be helpful to measure the half-wave voltage of the phase modulator and the loading of phase voltage in the quantum key distribution system.

Key words measurement; quantum key distribution; phase-coding; phase modulator; half-wave voltage

OCIS codes 120.5790; 270.5568; 270.5565; 060.5060; 060.2330

1 引言

铌酸锂相位调制器在光纤通信和相位编码光纤量子密钥分发等领域被广泛采用^[1~3]。在实际应用

过程中,需要对相位调制器的半波电压等参数进行精确测量,尤其是在利用相位量进行信息表示的量子密钥分发等领域,相位调制器半波电压的测量非

收稿日期: 2011-02-17; 收到修改稿日期: 2011-03-07

基金项目: 广州市科技支撑计划(2008Z1-D501)和广东省工业攻关项目(2007B010400009)资助课题。

作者简介: 魏正军(1977—),男,博士,助理研究员,主要从事光电探测和量子保密通信领域等方面的研究。

E-mail: weizjweizj@126.com

* 通信联系人。E-mail: jindongwqkd@126.com

常重要,其测量精度也直接影响了应用系统的整体性能。

目前3种常用的半波电压的测量方法为光通信模拟法,极值测量法和倍频调制法^[4~6]。由于相位调制器的半波电压在量子密钥分发领域中需在不同调制速率的矩形波电压下进行调制,与以上几种测量方法的调制原理不同,所以以上几种方法测量得到的半波电压数据的可靠性和准确性在量子密钥分发系统中需要进一步提高,最终半波电压测量值的准确与否需要通过量子密钥信息加载的误码率或相同条件下光学干涉条纹的干涉对比度来判定。在实验工作中发现采用极值法测出的半波电压的数据用于量子密钥分发系统时有较高的误码率,因此,要得到量子密钥分发系统中所用半波电压的准确测量值以获得较小的误码和较高的干涉对比度,需要在半波电压的测量过程中采用和量子密钥分发相位编码相同的电压调制方式。

本文提出一种基于萨尼亚克光纤干涉仪的半波电压的测量方法,在半波电压的测量过程中,采用和相位编码量子密钥分发系统相同的相位调制方式,得到精度为10 mV的半波电压数据。由于萨尼亚克光纤干涉仪可以实时、自动地补偿相互干涉的两路光的偏振状态,因此可以得到较高的光学干涉对比度和稳定的干涉图样。利用该方法还可以通过改变调制电压的矩形波频率方便地得到不同量子密钥信息调制速率下的半波电压数据,为基于相位编码的量子密钥分发系统中相位调制器半波电压的测量提供了一种具有较高实用价值的方法。

2 常见的半波电压测量方法

目前常见的3种测量电光调制晶体半波电压的方法是光通信模拟法,极值测量法和倍频调制法^[4~6]。

光通信模拟法是将调制信号转换为声音信号,在外调输入处连接收音机,当调制的正弦信号被切断时,输出信号通过功率输出端口的扬声器播放,音量由解调幅度控制,在直流电压逐渐增大的过程中,声音会出现两次音量最小并失真的现象,这两次电压的差值即为所测量的半波电压。该方法的优点是测量简单,但是由于在测量过程中对于最小值的判断过于粗糙,所以测量数据的精度不高。

极值测量法的基本原理是不在相位调制器上加调制信号,只加载一个直流电压,当逐渐改变所加载直流电压的大小时,可以通过所设计的干涉仪光

路的输出光强的大小来判断极值点,相邻极大值和极小值所对应的直流电压之差即为半波电压。这种测量方法相对也比较简便,但是由于光源等因素的不稳定性,使得这种方法的测量精度有限。

倍频调制法的基本原理是同时加载直流电压和交流信号,当直流电压调到输出光强出现极值所对应的电压值时,输出的交流信号将出现倍频失真,出现倍频失真所对应的直流电压之差即为半波电压。

以上3种方法一般用来测量铌酸锂电光调制晶体的半波电压,并且在测量时一般通过两个偏振分量之间的相位差所决定的输出光的偏振状态来判断。在光纤通信和光纤量子密钥分发系统中常用的光纤行波铌酸锂相位调制器一般是通过在调制器的出口设置偏振片将其中一个方向的偏振光吸收掉,只考虑另外一个分量的相位随外加调制电压的变化关系,因此,在这种行波相位调制器半波电压的测量中,一般采用构建光纤干涉仪来完成半波电压的测量。最常见的光纤干涉仪为马赫-曾德尔干涉仪,对于以上提到的极值测量法,其精度容易随光源输出光强的变化而变化,所以可以加载一个较低频率的锯齿波来进行半波电压的测量,通过调节这个锯齿波的周期、使之远远小于光源的变化周期即可在一定程度上提高测量精度。但是和以上的3种方法一样,采用的调制方式为正弦调制或锯齿波调制,与量子密钥分发系统中的矩形波调制方式不同。在此采用矩形波调制方式利用光纤干涉仪进行半波电压的测量。在选择光纤干涉仪方面,由于存在光纤随机双折射的影响,一般的光纤干涉仪都会存在偏振态的变化问题,要得到高的干涉对比度和稳定的干涉图样需要进行复杂的光学控制,而干涉对比度的降低和干涉图样的不稳定会在一定程度上影响半波电压的测量精度,萨尼亚克光纤干涉仪可以自动补偿光纤随机双折射和外界环境引起的偏振和相位的缓慢变化^[7~9],也有文献将其用作相位偏置技术的方案^[10],所以在实验中选择具有高稳定性的萨尼亚克光纤干涉仪来对相位调制器的半波电压进行测量,以获得最小的系统误码率和最大的干涉对比度。

3 基于萨尼亚克光纤干涉仪的相位调制器半波电压的测量方法

图1是基于萨尼亚克光纤干涉仪相位调制器半波电压测量方法的装置图。图中1550 nm的连续激光通过隔离器(ISO)后进入一个2×2的50:50

的分束耦合器(BS),分束耦合器的另外两端直接进行连接,在非对称位置插入一个铌酸锂相位调制器(PM)构成萨尼亚克干涉环,其总长度为 L 。入射BS的连续激光被等光强地分为两束,分别沿顺时针和逆时针方向通过萨尼亚克光纤环。这两束光通过萨尼亚克环进行不同时域的相位调制后,返回到BS处进行干涉,干涉输出的结果在BS另一侧的端口输出,输出的光信号经过光电转换后进入示波器进行分析。输出光信号的强度取决于相互干涉的两束光的相位差,之所以将相位调制器置于萨尼亚克环非对称的位置,是为了在不同时域上得到不同相位差的干涉输出。在实际实验中,相位调制器位于萨尼亚克环的时间不对称度必须大于所加载矩形波电压信号的上升和下降时间,即光脉冲通过相位调制器将萨尼亚克环分开的两段光纤的时间差必须大于

所加载电压信号的上升和下降时间,以保证测量结果的准确性。

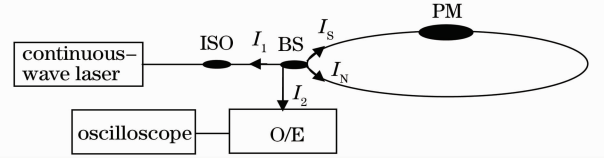


图1 基于萨尼亚克光纤干涉仪的相位调制器半波电压的测量装置图

Fig. 1 Scheme of the setup to measure the half-wave voltage for the phase modulator based on Sagnac optical-fiber interferometer

在以上测量装置中,连续激光分别沿逆时针和顺时针方向通过相位调制器,如果在相位调制器上加载一个周期性的矩形波电压信号

$$\begin{cases} V_m(t) = V, & t_1 < t < t_1 + \Delta t \\ V_m(t) = 0, & 0 < t < t_1, t_1 + \Delta t < t < t_1 + T, \\ V_m(t) = V_m(t + T) \end{cases}$$

式中 Δt 为所加电压信号高电平所占据的时间, T 为矩形波电压信号的周期。在所加载矩形波电压信号的作用下,由于萨尼亚克环的不对称性,顺时针和逆时针两束光分别在不同的时域被同一个矩形电压调制了相位信息,其分布如图2所示。为了表达方便,将第一个周期内的相位分布表达为

$$I_S = I_r \exp[i(\varphi_0 + \varphi_r)] \quad 0 < t < t_1, t_1 + \Delta t < t < T, \quad (1)$$

$$I_S = I_r \exp[i(\varphi_0 + \varphi_r + \varphi_m)] \quad t_1 < t < t_1 + \Delta t, \quad (2)$$

$$I_N = I_t \exp[i(\varphi_0)] \quad 0 < t < t_1 + \tau, t_1 + \Delta t + \tau < t < T, \quad (3)$$

$$I_N = I_t \exp[i(\varphi_0 + \varphi_m)] \quad t_1 + \tau < t < t_1 + \Delta t + \tau, \quad (4)$$

式中 I_S 为顺时针光信号的表达式, I_N 为逆时针光信号的表达式, r 为分束耦合器的反射系数, t 为分束耦合器的投射系数,在实验中选择了50:50的分束耦合器,因此 $r = t = 1/2$ 。 φ_0 为光场的初始相位, φ_m 为相位调制器电压信号调制的相位,且满足 $\varphi_m = KV$ (K 为相位调制系数), φ_r 为光经过分束耦合器反射时产生的附加相位。 τ 为两路光到达相位调制器的时间差,由相位调制器分开的两端光纤的长度差 l 所决定: $\tau = l/c$, c 为光速。

顺时针和逆时针的两束光经过萨尼亚克环的传输后,在 $t = L/c$ 时刻再次到达分束耦合器进行叠加干涉,干涉后的输出 I_1 和 I_2 分别从分束耦合器的两个端口输出,其中 I_1 可以通过光纤环形器输出,形成和 I_2 互补的光强输出。在实验中,只需要通过一束光的检测即可完成半波电压的测量,因此,反向传输的 I_1 被光纤隔离器吸收。根据(1)~(4)式,可以推导出 I_2 在第一个矩形波调相电压的作用下干涉输出结果的表达式为

$$I_2 = I[1 + \cos(\varphi_r - \varphi_r')], \quad 0 < t < \frac{L}{c} + t_1, \quad t > \frac{L}{c} + t_1 + \Delta t + \tau \quad (5)$$

$$I_2 = I[1 + \cos(\varphi_r + \varphi_m - \varphi_r')], \quad \frac{L}{c} + t_1 < t < \frac{L}{c} + t_1 + \tau \quad (6)$$

$$I_2 = I[1 + \cos(\varphi_r - \varphi_r')], \quad \frac{L}{c} + t_1 + \tau < t < \frac{L}{c} + t_1 + \Delta t \quad (7)$$

$$I_2 = I[1 + \cos(\varphi_r - \varphi_m - \varphi_r')], \quad \frac{L}{c} + t_1 + \Delta t < t < \frac{L}{c} + t_1 + \Delta t + \tau \quad (8)$$

式中 φ_r 为逆时针方向的传输光在分束耦合器上再次反射引入的附加相位。

通过(5)~(8)式可以看出,输出光强的特点是,每个加载矩形电压脉冲的前后分别产生一个激光脉冲,前一个激光脉冲的光强由所加载的调制信号高电平电压对应的相位决定,后一个激光脉冲的干涉输出光强所对应的相位差和前一个激光脉冲所对应的相位差刚好大小相同、正负相反。为了更清晰地表达相位分布和输出光强的时序关系,给出如图2所示的两束光相位信息和输出光强在时域上的分布关系,对图中输出光强分布曲线的坐标进行了 L/c 的平移,以便更好地说明输出光强前后两个脉冲的物理意义。

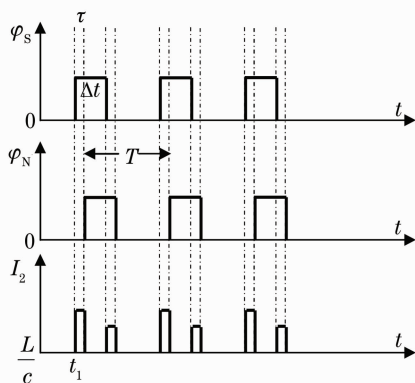


图2 相干涉的两束光相位信息在时域上的分布和输出光强的示意图

Fig. 2 Phase distribution in time domain and output optical intensity of the coherent laser

根据该装置的输出特点,可以不断改变矩形波高电平电压的数值 V ,即改变两束干涉光的相位差 φ_m ,当输出光强出现最大和最小值时,记录下所加载的电压大小,相邻两个光强极值所对应电压的差值即为半波电压。然而在实际实验中,为了克服如极值测量法中的光学不稳定性之类的影响,需要在尽量短的时间内完成半波电压的测量,以避免外界因

素对测量结果的影响。因此,利用嵌入式系统通过电脑程序产生一个幅度可变的矩形波电压信号,调制信号的低电平电压输出设置为 -4 V ,高电平输出电压分别按照程序输出为 -4 V , $-4\text{ V} + \delta$, $-4\text{ V} + 2\delta$, $-4\text{ V} + 3\delta, \dots, \delta$ 取 10 mV ,当 $-4\text{ V} + n\delta$ 的取值大于 4 V 时循环以上赋值。按照以上的电压赋值,最大电压和最小电压之间的差值为 8 V ,根据所用相位调制器的半波电压测试数据的大致范围,保证了所加载的最大电压大约为2倍的半波电压,这样肯定可以出现连续的2个极值点,确保可以完成半波电压的测量。

实验中采用住友公司的 1550 nm 铌酸锂行波相位调制器,光电转换器采用泰克公司的 P6703B 光电探头(带宽 1.2 GHz),示波器采用力克公司的带宽为 1 GHz 的 104MXI 实时示波器,通过以上程序对电压进行赋值,得到了如图3所示的干涉图样。该图样是利用示波器采集的光电转换后的光强分布,通道 C2 的图样很清晰地显示出输出光强随相位差发生周期性变化,其中图样包络之所以没有发生从小到大、然后从大到小的变化,是因为当电压一直加载到发生第二次干涉相消时,矩形波电压的过渡时间会使得输出光强有个尖峰脉冲出现,该尖峰脉冲影响了包络的形状。为了更清晰地看到输出光强随所加载相位电压差的变化,将输出的干涉图样进行了局部放大,如图3中的 Z1 通道。从 Z1 通道的干涉图样可以看到两个特点,1)每个相位调制器的调制电压脉冲对应一前一后2个光脉冲输出,2)分别观察前脉冲或后脉冲,其光强输出都随着所加载的相位电压的变化而变化。图3中输出光脉冲的稳态部分(即凹下的部分)即为所加载相位电压差所对应的光强输出,光脉冲的前后尖峰为调制电压的过渡时间造成的过渡光强的输出,这个现象也就是在装置中一定要求时间的不对称度必须大于调制电压上升下降时间的原因。

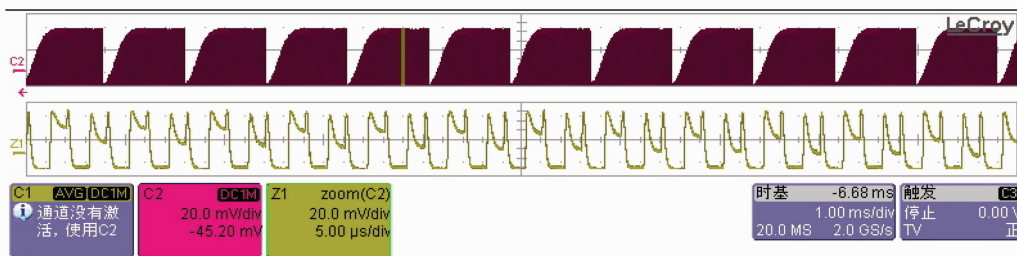


图3 萨尼亚克光纤干涉仪测量装置输出的干涉图样

Fig. 3 Interference pattern from the Sagnac optical-fiber interferometer

根据以上干涉图样的输出,如果以前脉冲为测量对象,那么相邻两个前脉冲的相位差的变化为 10 mV。在干涉图样中,根据出现最大干涉光强和最小干涉光强的数值,得到输出干涉图样的干涉对比度达到 98.3%。根据出现最大干涉光强和最小干涉光强的输出位置,可以计算出最大光强和最小光强的脉冲间隔数目,而每间隔一个脉冲,就表示相位电压差为 10 mV,将最大光强和最小光强输出的脉冲序号相减,然后乘以 10 mV,即可得到相位调制器的半波电压。按照以上方法,改变调制频率,可以得到不同频率下的半波电压的测量数据。通过对住友公司 1550 nm 的铌酸锂行波相位调制器在 100~500 kHz 进行测量后,得到如表 1 所示的实验结果。

表 1 半波电压的测试数据表

Table 1 Experimental results of the half-wave voltage

Operation frequency /kHz	Half-wave voltage /V
100	3.783
150	3.810
200	3.861
250	3.823
300	3.810
350	3.855
400	3.760
410	3.860
450	3.950
500	3.900

行波相位调制器的半波电压会随着调制频率的增加在一定程度上增加,目前量子密钥分发系统采用的红外单光子探测器由于较高的后脉冲率,工作速率被限制在兆赫兹以下的量级,所以在实验中主要进行了 100~500 kHz 工作频率的测量。通过测量的实验结果,对半波电压的变化趋势进行了分析,画出了如图 4 所示的半波电压随工作频率变化的曲

线图,从中可以看出,随着工作频率的增加,半波电压也呈现出了总体上升的趋势。

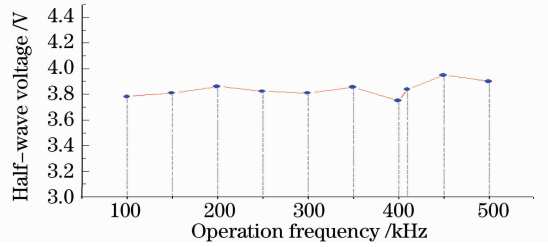


图 4 半波电压随工作频率的变化关系

Fig. 4 Relation between the half-wave voltage and the operation frequency

4 实验结果对比与分析

以上通过基于萨尼亚克光纤干涉仪的方法测量了用于量子密钥分发系统的铌酸锂行波相位调制器半波电压的数据,接下来以差分相位编码系统为例,针对量子密钥分发系统的可靠性将该数据与其它测量方法得到的数据进行对比。

图 5 是基于强度调制弱相干光的差分相位编码量子密钥分发系统。半波电压数据的偏差对量子密钥分发系统的误码率有一定的影响。假设半波电压测量数据和最优化半波电压数据之间的偏差为 ΔV ,则由于此偏差产生的相位偏差为

$$\Delta\varphi = (\Delta V/V_\pi)\pi,$$

在差分相位量子密钥分发系统中,从光学系统的角度考虑,如果两个相干光的单光子概率幅脉冲之间的相位差为 π ,则干涉输出的单光子会全部从对应的单光子探测器输出并形成密钥信息。如果存在相位偏差,则发送端调制的相位信息会有一定概率进入另外一个探测器形成误码。系统误码 R_{QBE} 和相位偏差 $\Delta\varphi$ 之间的关系为^[11~13]

$$R_{\text{QBE}} = \sin^2(\Delta\varphi/2), \quad (9)$$

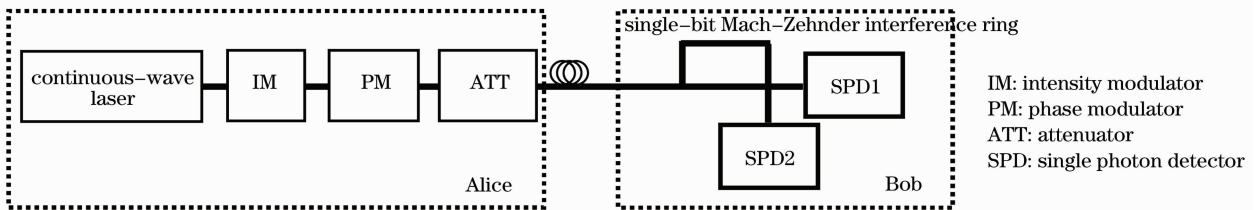


图 5 基于强度调制弱相干光的差分相位编码量子密钥分发系统

Fig. 5 Differential phaseshift quantum key distribution system based on the intensity-modulated weak coherent laser

如果不考虑由于电路问题引起的加载电压的偏差,则半波电压的偏差 ΔV 与系统误码率之间的关系为

$$R_{\text{QBE}} = \sin^2[\Delta V\pi/(2V_\pi)]. \quad (10)$$

首先按照常用的极值法构建了马赫-曾德尔干涉仪对系统所用的相位调制器进行了半波电压的测试,得到的结果是 4.1 V,在差分相位编码量子密钥

分发系统平台上,利用该半波电压的数据进行了误码测试,得到的误码率结果是 8.5%,显然是偏高的。考虑到其它因素对误码率的影响,在相同的情况下利用本文的提出的萨尼亚克干涉的方法对 259.7 kHz 工作频率下的半波电压进行了测量,得到的结果是 3.8 V,在差分相位编码系统中用相同的频率进行了误码测试,得到的误码率是 5.87%。虽然量子密钥分发系统可能由于其它因素使得误码率偏高,但是在相同的情况下对比不同测量方法得到的半波电压数据引起的误码率可以说明,采用本文提出的萨尼亚克干涉仪方法得到的半波电压的数据可以提高半波电压测量的准确性和可靠性,减小量子密钥分发系统中两个单光子概率幅脉冲的相位偏差,降低系统误码率。

由于采用了和量子密钥分发系统相同的电压调制方式,所以得到的半波电压的数据对于量子密钥分发的相位加载具有较高的可靠性。由于萨尼亚克光纤干涉仪可以自动补偿偏振态的变化而避免干涉条纹的恶化,所以实验中得到了非常稳定的干涉图样。因为量子密钥分发目前采用的基于雪崩光电二极管的红外单光子探测器产品的最高工作频率为几兆赫兹,并且也由于采用的嵌入式控制系统的调制速率的限制,实验中主要针对 100~500 kHz 进行了半波电压的测量,但是这种方法本身也可以测量更高工作频率下的半波电压的数据。实验得到的半波电压的测量结果随着工作频率的增加呈现总体上升的趋势,这与相关文献的理论和实验数据相符^[6]。关于测量精度的问题,可以通过程序继续增加测量精度,但是由于干涉曲线在波峰和波谷处变化比较缓慢,所以当增加测量精度时,可能会带来判断极大值和极小值的困难。

5 结 论

提出了一种基于萨尼亚克光纤干涉仪的相位调制器半波电压的测量方法。和其他常见的半波电压的测量方法不同的是,该方法由于采用了与相位编码量子密钥分发系统相同的调制方式,所以得到的半波电压的数据具有较高的可靠性。实验对住友公司的铌酸锂行波相位调制器在不同工作频率下的半波电压进行了精度为 10 mV 的测量,得到了稳定的干涉图样,干涉对比度达到了 98.3%;根据干涉图样,得到了不同频率下的半波电压的测量数据。利

用测得的半波电压,在差分相位编码系统中进行了误码率测试,得到了 5.87%的系统误码率。该方法可以为相位编码量子密钥分发系统中相位调制器半波电压的测量提供一种具有实用价值的测量方案。

参 考 文 献

- 1 J. D. Wang, Z. J. Wei, H. Zhang *et al.*. Efficient quantum key distribution via single-photon two-qubit states[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2009, **43**(9): 095504
- 2 N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel *et al.*. Quantum cryptography [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, **74**(1): 145~195
- 3 H. Takesue, E. Diamanti, C. Langrock *et al.*. Differential phase shift quantum key distribution experiment over 105 km fibre[J]. *New J. Phys.*, 2005, **7**(1): 232
- 4 J. Sun, H. W. Mou, S. Q. Liu *et al.*. Study on measuring half-wave voltage in electro-optic modulation [J]. *College Physics*, 2008, **27**(10): 40~43
孙 鉴, 牟海维, 刘世清 等. 电光调制中半波电压测量方法的研究[J]. *大学物理*, 2008, **27**(10): 40~43
- 5 M. L. Guo, X. F. Han, M. L. Zhang. Frequency doubling method for half-wave voltage measurement based on electro-optical modulation[J]. *J. Appl. Opt.*, 2010, **31**(1): 106~109
郭明磊, 韩新风, 章毛连. 电光调制晶体半波电压倍频测量方法的讨论[J]. *应用光学*, 2010, **31**(1): 106~109
- 6 O. Satoshi, K. Tetsuya, L. Masayuki. Measurement of chirp parameters and halfwave voltages of Mach Zehnder-type optical modulators by using a small signal operation[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5): 682~684
- 7 G. Wu, Y. C. Zhou, H. P. Zeng. The single photon interference with differential phase shift modulate in the Sagnac interferometer[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(13): 1393~1397
吴 光, 周春源, 曾和平. Sagnac 干涉仪中差分相位调制的单光子干涉[J]. *科学通报*, 2003, **48**(13): 1393~1397
- 8 J. Bogdanski, J. Ahrens, M. Bourenane. Sagnac quantum key distribution over telecom fiber networks [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(6): 1231~1236
- 9 B. Qi, L. L. Huang, H.-K. Lo *et al.*. Quantum key distribution based on a Sagnac loop interferometer and polarization-insensitive phase modulators [C]. 2006 IEEE International Symposium on Information Theory, Seattle, USA, 2006, 2090~2093
- 10 Song Zhangqi, Wang Xin, Cao Chunyan *et al.*. Fiber optic hydrophone based on Sagnac interferometer with saw-tooth wave phase biasing technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 957~961
宋章启, 王 鑫, 曹春燕 等. Sagnac 光纤水听器锯齿波相位偏置技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 957~961
- 11 M. Vadim, B. Alexei, R. H. Dag. Real-time phase tracking in single-photon interferometers[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(22): 4385~4392
- 12 W. Chen, F. Z. Han, X. F. Mo *et al.*. Active phase compensation of quantum key distribution system[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(9): 1310~1314
- 13 Wang Jindong, Qin Xiaojuan, Wei Zhengjun *et al.*. An effective active phase compensation method for quantum key distribution system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 281~286
王金东, 秦晓娟, 魏正军 等. 一种高效量子密钥分发系统主动补偿方法[J]. *物理学报*, 2010, **59**(1): 281~286