

文章编号: 0258-7025(2005)08-1063-05

# 光弹调制器在偏振方向调制中的应用

曾爱军<sup>1,2</sup>, 王向朝<sup>1</sup>, 董作人<sup>1</sup>, 江晓军<sup>1</sup>, 黄立华<sup>1</sup>, 李代林<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 提出了一种将光弹调制器应用于偏振方向调制的方法,介绍了它的两种基本使用模式,利用琼斯矩阵对其偏振方向调制原理及其两种基本使用模式进行了分析。光弹调制器和1/4波片形成偏振方向调制器件时,光弹调制器处于两块透光轴相互垂直的1/4波片之间,且光弹调制器的振动轴分别和两块1/4波片的透光轴成 $\pm 45^\circ$ 角,线偏振光通过此器件其偏振方向被调制。实验验证了光弹调制器组合1/4波片调制偏振方向的原理。将光弹调制器应用在偏振方向的调制中,使现有偏振方向调制技术的光谱范围扩展到了紫外波段。

**关键词** 光电子学;偏振;偏振方向调制;光弹调制器;1/4波片

**中图分类号** O 436.3 **文献标识码** A

## Application of Photoelastic Modulator in Modulation of Polarization Direction

ZENG Ai-jun<sup>1,2</sup>, WANG Xiang-zhao<sup>1</sup>, DONG Zuo-ren<sup>1</sup>,  
JIANG Xiao-jun<sup>1</sup>, HUANG Li-hua<sup>1</sup>, LI Dai-lin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** In this paper, a method that the photoelastic modulator is used to modulate the polarization direction is proposed. The modulation principle and two modes of the modulation of the polarization direction are analyzed with Jones matrix. When the photoelastic modulator is placed between two quarter-wave plates whose transmission axes are perpendicular to each other and the angles between dynamically induced birefringent axis of the photoelastic modulator and transmission axes of the two quarter-wave plates are  $\pm 45^\circ$ , respectively, the polarization direction of the beam passing the photoelastic modulator and quarter-wave plates is modulated. In the experiment, the modulation principle is verified. Through the application of the photoelastic modulator, the modulation of polarization direction is extended to the ultraviolet band.

**Key words** optoelectronics; polarization; modulation of polarization direction; photoelastic modulator; quarter-wave plate

## 1 引言

在偏振光学中,最常用的偏振方向调制器件是基于法拉第效应的磁光调制器<sup>[1]</sup>。线偏振光经过磁光调制器后其偏振方向随着磁感应强度的变化而发生改变,进而被产生磁场的电流动态调制。磁光调制器现已广泛应用在生物化学、医药加工、糖业制造、几何测量和光调制技术等领域中<sup>[2~5]</sup>,实现了生命物质、药物、糖类的旋光性的高精度测量,提高了角度测量及其方位传递精度,改进了干涉仪的调制

方式。由于磁光调制器调制电流线圈的发热而产生温升,故磁光调制器的温度影响大<sup>[5]</sup>。同时,磁光调制器只能使用在可见光和红外波段。因此磁光调制器的应用具有一定的局限性,需要寻求一种新的偏振方向调制方法。

光弹调制器是一种基于光弹性效应的相位调制器件,具有全视场角大、驱动电压低、功耗小和使用波段宽等优点<sup>[6]</sup>,是高精度偏振调制和偏振检测技术的关键核心器件。特别是在紫外波段的偏振光谱

收稿日期:2004-10-20;收到修改稿日期:2005-01-07

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向(KGCX2-SW-602-6)资助项目。

作者简介:曾爱军(1975—),男,湖南人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要研究方向为精密光电检测技术与光学仪器。E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn

学领域,是目前唯一实用的偏振调制器件。在光弹调制器中,电压驱动的压电材料(如压电陶瓷)在各向同性的光学材料(如熔石英)上施加周期性变化的机械力使光学材料产生共振而形成周期性的光弹性效应,即该光学材料产生周期性变化的双折射,因此光通过光弹调制器后其相位延迟量被调制。可见光弹调制器本身不发热,故其温度影响小。一般情况下,光弹调制器峰值延迟量被调整为  $\lambda/2$  或  $\lambda/4$ ,即用可变  $1/4$  波片或半波片。光弹调制器最基本的使用模式有两种,即形成偏振态调制器和偏振态分析器。在光弹调制器的前面插入一个偏光镜,且使偏光镜的透光轴和光弹调制器的振动轴成  $45^\circ$  角,则形成了偏振态调制器。光束先后通过偏光镜和光弹调制器时,就可以产生随时间快速变化而被调制的偏振态。若在光弹调制器的后面放置一个偏光镜,

且使光弹调制器的振动轴和偏光镜的透光轴成  $45^\circ$  角,就形成了偏振态分析器,可以对入射在其上的光束的偏振态进行分析。

针对磁光调制器的缺点,本文提出了一种基于光弹调制器的偏振方向调制新方法。采用琼斯矩阵推导了光弹调制器结合  $1/4$  波片实现偏振方向调制的原理公式,并对此偏振方向调制器件的两种基本使用模式进行了分析,最后实验验证了此种调制技术的原理。

## 2 调制原理

在矩阵光学中,偏振器件对偏振光的偏振态变换特性可以用琼斯矩阵来描述。在波片所处的平面内设置平面坐标系  $xoy$ ,若波片的快轴与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ ,相位延迟量为  $\delta$  的波片的琼斯矩阵为<sup>[7]</sup>

$$G_{WP} = \cos(\delta/2) \begin{bmatrix} 1 - i \tan(\delta/2) \cos(2\theta) & -i \tan(\delta/2) \sin(2\theta) \\ -i \tan(\delta/2) \sin(2\theta) & 1 + i \tan(\delta/2) \cos(2\theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

若慢轴与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ ,只需要将公式(1)中的  $\theta$  取为负值即可。

光弹调制器对通过它的偏振光的相位进行调制,使其相位成为随时间变化的函数。在光弹调制器的振动轴及其垂直方向上,两偏振分量的相位延迟

量为<sup>[6]</sup>

$$\delta(t) = \delta_0 \sin(\omega t), \quad (2)$$

其中  $\omega$  为调制频率,  $\delta_0$  为峰值延迟量。根据波片的琼斯矩阵表示式(1),光弹调制器的琼斯矩阵可以写为

$$G_{PM} = \begin{bmatrix} \cos[\delta(t)/2] - i \sin[\delta(t)/2] \cos(2\theta) & -i \sin[\delta(t)/2] \sin(2\theta) \\ -i \sin[\delta(t)/2] \sin(2\theta) & \cos[\delta(t)/2] + i \sin[\delta(t)/2] \cos(2\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

旋光元件使偏振光的偏振方向发生改变,而不改变偏振光的偏振态,即偏振光的相位不变化。对于偏振方向旋转角度为  $\theta$  的旋光元件,其琼斯矩阵为<sup>[7]</sup>

$$G_{OR} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

可见,旋光元件的琼斯矩阵仅和偏振方向旋转角度有关,而和旋光元件的方位无关。磁光调制器是一种使偏振方向旋转角度动态变化的旋光元件,类似于公式(2),(3),只需要将公式(4)中的旋转角度改写为随时间变化的函数即可获得磁光调制器的琼斯矩阵。从公式(1),(4)的对比可知,要使光弹调制器应用在偏振方向的调制中,需要利用其他偏振元件和光弹调制器组合,消去琼斯矩阵中和方位角度

相关的部分并将其中的虚数部分转变成实数。由公式(1)可知,波片的琼斯矩阵包括相位延迟量和方位角度两个可变量,故利用两块波片和光弹调制器组合形成一种偏振方向调制器件是有可能的。同时, $1/4$  波片是最为常用的相位延迟器件。因此,本文提出了采用  $1/4$  波片和光弹调制器组合形成偏振方向调制器件。

在光弹调制器和  $1/4$  波片形成的偏振方向调制器件中,光弹调制器处于两块  $1/4$  波片之间,光弹调制器和  $1/4$  波片之间的位置排列如图 1 所示。为了简化计算过程,不妨建立图 1 所示的坐标系,即光束的传播方向为  $z$  轴,光弹调制器的振动轴为  $y$  轴,其垂直方向为  $x$  轴。在此坐标系中,光弹调制器的琼斯矩阵简化为

$$G_{PM} = \begin{bmatrix} \cos[\delta(t)/2] - i \sin[\delta(t)/2] & 0 \\ 0 & \cos[\delta(t)/2] + i \sin[\delta(t)/2] \end{bmatrix} \quad (5)$$

相应地,前后两块 1/4 波片的琼斯矩阵分别为

$$G_{QP1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 - i\cos(2\theta) & -i\sin(2\theta) \\ -i\sin(2\theta) & 1 + i\cos(2\theta) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$G_{QP2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 - i\cos(2\theta) & -i\sin(2\theta) \\ -i\sin(2\theta) & 1 + i\cos(2\theta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为前后两块波片的快轴和  $x$  轴的夹角。光弹调制器和两块 1/4 波片组合后的琼斯矩阵为

$$G_{WP0} = G_{QP2} \cdot G_{PM} \cdot G_{QP1}, \quad (8)$$

将公式(8)展开并化简得到矩阵  $G_{WP0}$  的表达式为

$$G_{WP0} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_1(t)/2][1 - i\cos(2\theta_2) - i\cos(2\theta_1) - \cos(2\theta_1 - 2\theta_2)] + i\sin[\theta_1(t)/2][-1 + i\cos(2\theta_2) + i\cos(2\theta_1) + \cos(2\theta_1 + 2\theta_2)] & \\ i\cos[\theta_1(t)/2][- \sin(2\theta_2) - \sin(2\theta_1) + i\sin(2\theta_1 - 2\theta_2)] + \sin[\theta_1(t)/2][- \sin(2\theta_2) + \sin(2\theta_1) + i\sin(2\theta_1 + 2\theta_2)] & \\ i\cos[\theta_1(t)/2][- \sin(2\theta_2) - \sin(2\theta_1) + i\sin(2\theta_1 - 2\theta_2)] + \sin[\theta_1(t)/2][\sin(2\theta_2) - \sin(2\theta_1) + i\sin(2\theta_1 + 2\theta_2)] & \\ \cos[\theta_1(t)/2][1 + i\cos(2\theta_2) + i\cos(2\theta_1) - \cos(2\theta_1 - 2\theta_2)] + i\sin[\theta_1(t)/2][1 + i\cos(2\theta_2) + i\cos(2\theta_1) - \cos(2\theta_1 + 2\theta_2)] & \end{bmatrix} \quad (9)$$

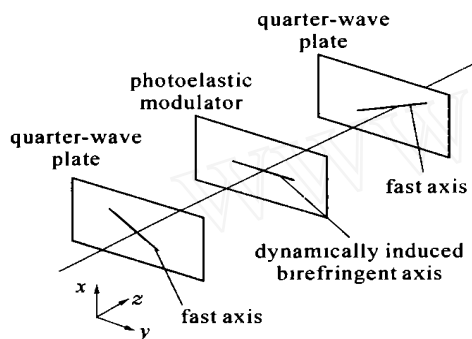


图1 偏振方向调制的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the modulation of polarization direction

在公式(9)中,当  $\theta_1$  取  $45^\circ$  而  $\theta_2$  取  $-45^\circ$  时可以消去矩阵中的虚数项,获得和光弹调制器方位角度无关的琼斯矩阵  $G_{OR1}$

$$G_{OR1} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_1(t)/2] & -\sin[\theta_1(t)/2] \\ \sin[\theta_1(t)/2] & \cos[\theta_1(t)/2] \end{bmatrix}. \quad (10)$$

将公式(10)和(4)对比可知,  $G_{OR1}$  是偏振方向调制器件的琼斯矩阵表达式,其偏振方向的旋转角度为光弹调制器产生的相位延迟量的一半,且偏振方向变化量的正负和光弹调制器相位变化量的正负相同。当  $\theta_1$  取  $-45^\circ$  而  $\theta_2$  取  $45^\circ$  时可以获得另一个调制偏振方向的琼斯矩阵  $G_{OR2}$

$$G_{OR2} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_1(t)/2] & \sin[\theta_1(t)/2] \\ -\sin[\theta_1(t)/2] & \cos[\theta_1(t)/2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos[-\theta_1(t)/2] & -\sin[-\theta_1(t)/2] \\ \sin[-\theta_1(t)/2] & \cos[-\theta_1(t)/2] \end{bmatrix}, \quad (11)$$

和公式(10)不同的是:偏振方向变化量的正负和光弹调制器相位变化量的正负相反。

从以上分析可以看出,光弹调制器和两块 1/4

波片组合可以形成一种偏振方向调制器件。在光弹调制器和 1/4 波片形成的偏振方向调制器件中,光弹调制器处在两块 1/4 波片之间,且两块 1/4 波片的快轴相互垂直,光弹调制器的振动轴和两波片的夹角分别成  $\pm 45^\circ$ 。光弹调制器适用从真空紫外到红外的光谱范围,而 1/4 波片可以工作在紫外波段,因此光弹调制器和 1/4 波片形成的偏振方向调制器件可以在紫外波段应用,扩展了现有偏振方向调制技术的使用光谱范围。

与光弹调制器作为相位调制器件的两种基本使用模式相对应,光弹调制器和 1/4 波片组成的偏振方向调制器件也可以分为两种基本使用模式,即和偏光镜相结合用作偏振方向调制器和偏振方向分析器。当作为偏振方向调制器时,需要在此偏振方向调制器件的前方插入偏光镜,使光束依次经过偏光镜、光弹调制器和 1/4 波片组成的偏振方向调制器件。通过偏光镜后的线偏振光可以用琼斯矢量表达为

$$E_{in1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中  $\theta_1$  为偏光镜透光轴和  $x$  轴的夹角,即线偏振光的偏振方向。此线偏振光通过光弹调制器和 1/4 波片组成的偏振方向调制器件后,其琼斯矢量表达式为

$$E_{out1} = G_{OR1} E_{in1} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_1 + \theta_1(t)/2] \\ \sin[\theta_1 + \theta_1(t)/2] \end{bmatrix}, \quad (13)$$

由公式(13)可以看出,出射的线偏振光的偏振方向以  $\theta_1$  为中心随函数  $\theta_1(t)$  动态变化,因此光束通过偏振方向调制器以后获得偏振方向被调制的线偏振光。

若在光弹调制器和 1/4 波片组成的偏振方向调制器件的后方放置偏光镜则形成了偏振方向分析

器。设偏光镜的透光轴和  $x$  轴的夹角为  $\alpha$ , 则它的琼斯矩阵为

$$G_{AN} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \\ \frac{1}{2} \sin(2\alpha) & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (14)$$

偏振方向分析器的琼斯矩阵为

$$G_{AL} = G_{AN} G_{OR1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos[\alpha - (t)/2] & \cos \alpha \sin[\alpha - (t)/2] \\ \sin \alpha \cos[\alpha - (t)/2] & \sin \alpha \sin[\alpha - (t)/2] \end{bmatrix}. \quad (15)$$

不妨设入射在该偏振方向分析器上的线偏振光为

$$E_{in2} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_3 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$\alpha_3$  为该偏振光的偏振方向。经过偏振方向分析器以后, 线偏振光用琼斯矢量表达为

$$E_{out2} = G_{AL} E_{in2} = \cos[\alpha_2 - (t)/2 - \alpha_3] \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

因此, 只要检测出偏光镜出射的光强就可以分析出入射线偏振光的偏振方向。

### 3 调制实验

实验光路如图 2 所示, 光源为半导体激光器, 其波长为 785 nm。激光束准直后依次经过起偏器、第一块 1/4 波片、光弹调制器、第二块 1/4 波片和检偏器, 从检偏器出射的光强被光电二极管接收。起偏器和检偏器的透光轴相互垂直, 起偏器的透光轴和光弹调制器的振动轴垂直, 第一、二块 1/4 波片的快轴和光弹调制器振动轴的夹角分别为  $-45^\circ$  和  $45^\circ$ 。光弹调制器为 Hinds 公司 PEM-90 系列的 /FS50 型光弹调制器, 调制频率为 50 kHz, 其光谱使用范

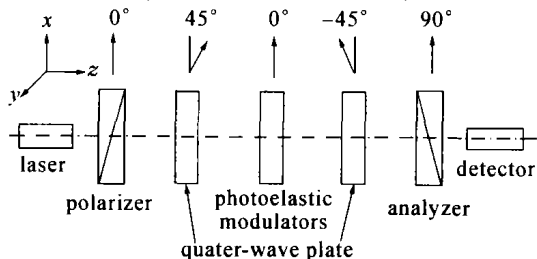


图 2 偏振方向调制的实验装置图

Fig. 2 Experiment setup of the modulation of polarization direction

围为 170 ~ 2600 nm。起偏器和检偏器都为格兰-泰勒棱镜, 1/4 波片为 700 ~ 1100 nm 波段内的消色差 1/4 波片, 探测器为光电二极管。

在图 2 中, 起偏器将入射光束变成线偏振光, 光弹调制器和两块 1/4 波片形成偏振方向调制器件, 它调制了入射到检偏器上的线偏振光的偏振方向, 使检偏器出射的光强按照马吕斯定律发生相应的变化。为了验证光弹调制器和 1/4 波片形成的偏振方向调制器件的调制原理, 下面利用偏振方向分析器的分析公式 (17) 来计算从检偏器出射的光强。由于起偏器和检偏器的透光轴相互垂直, 则有

$$\alpha_2 = \alpha_3 + 90^\circ, \quad (18)$$

代入公式 (17) 获得从检偏器出射的偏振光为

$$E_{out2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin[\alpha - (t)/2] \end{bmatrix}. \quad (19)$$

若从起偏器出射的光强为  $I_0$ , 光电二极管接收的光强为

$$I = I_0 \sin^2[\alpha - (t)/2] = \frac{I_0}{2} - \frac{I_0}{2} \cos[2(\alpha - (t)/2)]. \quad (20)$$

实际上, 公式 (19) 就是初始状态时起偏器和检偏器透光轴相互垂直情况下的马吕斯定律表达式。将 (2) 式代入公式 (20) 并进行傅里叶级数展开, 得到光电二极管接收的光强为

$$I = \frac{I_0}{2} [1 - J_0(\alpha_0) - 2J_2(\alpha_0) \cdot \sin t - 2J_4(\alpha_0) \cdot \sin t + \dots]. \quad (21)$$

光电二极管输出的探测信号经过前置放大电路后由与光弹调制器配套的信号调理器进行滤波, 从信号调理器输出的直流分量经过数据采集卡输入计算机, 而从信号调理器输出的交流部分经过锁相放大器得到二次谐波分量后再由数据采集卡输入计算机。计算机采集的直流分量和二次谐波分量分别为

$$V_{dc} = M_{dc} I_0 [1 - J_0(\alpha_0)] / 2, \quad (22)$$

$$V_{2f} = M_{2f} I_0 J_2(\alpha_0), \quad (23)$$

其中  $M$  为光电转换系数,  $M_{dc}$  和  $M_{2f}$  为直流分量和二次谐波分量的电路增益,  $J_k(\alpha_0)$ ,  $k = 0, 2$  分别为零阶、二阶贝塞尔函数。因此, 当光弹调制器的峰值延迟量变化时, 直流分量和二次谐波分量分别按照公式 (22) 和 (23) 变化, 即与光弹调制器峰值延迟量成零阶、二阶贝塞尔函数关系。

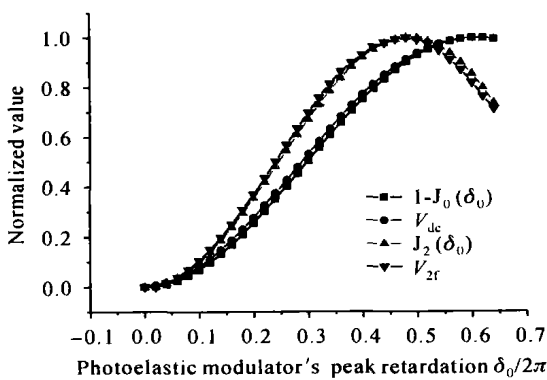
在实验过程中使光弹调制器的峰值延迟量从 0 逐步增加到 1.28, 峰值延迟量增加的步长为 0.04, 计算机采集的直流分量  $V_{dc}$  和二次谐波分量  $V_{2f}$  (单位为 V) 如表 1 所示。

表1 实验结果

Table 1 Experimental result

$\delta_0/2$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
$V_{dc}/V$	0	0.066	0.146	0.272	0.442	0.653	0.906	1.196	1.514	1.865	2.238
$V_{2f}/V$	0	0.005	0.141	0.344	0.609	0.93	1.308	1.736	2.204	2.716	3.257
$\delta_0/2$	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42
$V_{dc}/V$	2.632	3.037	3.458	3.881	4.302	4.722	5.128	5.526	5.899	6.252	6.580
$V_{2f}/V$	3.830	4.415	5.007	5.591	6.145	6.677	7.165	7.602	7.914	8.192	8.465
$\delta_0/2$	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64
$V_{dc}/V$	6.878	7.151	7.388	7.588	7.749	7.894	8.001	8.057	8.087	8.085	8.058
$V_{2f}/V$	8.625	8.750	8.801	8.734	8.596	8.346	8.018	7.659	7.216	6.726	6.274

为了便于说明实验过程中探测光强的直流分量、二次谐波分量与光弹调制器峰值延迟量的变化关系符合公式(22)和(23),分别作出函数  $1 - J_0(\delta_0)$ ,  $J_2(\delta_0)$  和  $V_{dc}$ ,  $V_{2f}$  归一化后的变化曲线如图3所示。从图3可以看出,  $V_{dc}$ ,  $V_{2f}$  的变化曲线分别和函数  $1 - J_0(\delta_0)$ ,  $J_2(\delta_0)$  很好地吻合,即探测光强与光弹调制器峰值延迟量的变化关系符合公式(21)。 $V_{dc}$ ,  $V_{2f}$  的变化曲线在峰值前均大于相应的贝塞尔函数值  $1 - J_0(\delta_0)$ ,  $J_2(\delta_0)$ , 在峰值后又均小于相应的贝塞尔函数值  $1 - J_0(\delta_0)$ ,  $J_2(\delta_0)$ , 这是由光弹调制器的标定误差所引起的,即光弹调制器的峰值延迟量产生了漂移而使变化曲线产生平移,只需要精确标定光弹调制器即可消除此项误差。可见,实验很好地验证了光弹调制器和  $1/4$  波片组成的偏振方向调制器件的调制原理。

图3  $1 - J_0(\delta_0)$ ,  $J_2(\delta_0)$ ,  $V_{dc}$  和  $V_{2f}$  的变化曲线Fig.3 Curves of  $1 - J_0(\delta_0)$ ,  $J_2(\delta_0)$ ,  $V_{dc}$  and  $V_{2f}$ 

## 4 结论

提出了一种光弹调制器组合  $1/4$  波片调制偏振方向的方法,用琼斯矩阵对其调制原理进行了分析。将光弹调制器处于两块透光轴相互垂直的  $1/4$  波片

之间,且使光弹调制器的振动轴分别和两块  $1/4$  波片的透光轴成  $\pm 45^\circ$  角,线偏振光通过后其偏振方向被调制。光弹调制器应用于偏振方向调制时,其两种基本模式分别形成偏振方向调制器和偏振方向分析器。实验验证了光弹调制器组合  $1/4$  波片调制偏振方向的原理,给出了相应的实验结果和数据曲线。采用光弹调制器和  $1/4$  波片的偏振方向调制技术弥补了磁光调制器的不足,拓宽了光弹调制器的应用领域,使现有的偏振方向调制技术的光谱范围扩展到了紫外波段。

## 参考文献

- Martin Gaugitsch, Hans Hauser. Optimization of a magneto-optical light modulator-part : modeling of birefringence and Faraday effect [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(12):2633 ~ 2644
- Chang Yue, Qian Xiaoling. A measurement technique of the tiny rotatory angle of polarization [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, **16**(4):375 ~ 379  
常悦,钱小陵. 光偏振的微小旋转角的测量技术[J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(4):375 ~ 379
- Henian Zhu, Liguang Liu, Yiwu Wen *et al.*. High-precision system for automatic null ellipsometric measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22):4536 ~ 4540
- Dong Xiaona, Gao Limin, Shen Xiaojun *et al.*. Passing azimuth vertically with the technique of magneto-optic modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11):1389 ~ 1391  
董晓娜,高立民,申小军等. 利用磁光调制实现方位角垂直传递[J]. *光子学报*, 2001, **30**(11):1389 ~ 1391
- Guo Jihua, Zhu Zhaoming, Deng Weimin. A novel magneto-optic modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1):110 ~ 113  
郭继华,朱兆明,邓为民. 新型磁光调制器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1):110 ~ 113
- J. Badoz, M. P. Silverman, J. C. Canit. Wave propagation through a medium with static and dynamic birefringence: theory of the photoelastic modulator [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(4):672 ~ 682
- Liang Quanting. *Physical Optics* [M]. The second edition. Beijing: China Machine Press, 1987. 323 ~ 331  
梁铨廷. *物理光学*[M]. 第二版. 北京:机械工业出版社, 1987. 323 ~ 331