

# 磁场调谐的啁啾光纤光栅延迟线

周建华, 任国荣, 杨健君, 周晓军

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

**【摘要】**利用 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$ 的磁致伸缩特性调谐线性啁啾光纤光栅延迟线, 将中心反射波长1 550 nm, 啁啾系数2.58 nm/cm, 长度60 mm, 3 dB带宽15.48 nm的线性啁啾光纤光栅两端牢固地粘在长度为70 mm、直径为8 mm的磁致伸缩棒上, 并置于一个均匀线圈磁场中, 当线圈电流从0 A增加到2 A时, 粘在磁致伸缩棒上的线性啁啾光纤光栅受到轴向应变, 反射谱向长波长方向平移了1.6 nm, 实现最大60 ps的时延调谐量, 这种装置可以使阵元间隔为0.006 m的四阵元光控相控阵雷达系统工作在25 GHz时, 实现 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的扫描。

**关键词** 啁啾光纤光栅; 磁致伸缩棒; 光控相控阵雷达; 实时延迟线; 调谐  
**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## Time-Delay Line of Chirped Fiber Grating Tuned by Magnetic Fields

ZHOU Jian-hua, REN Guo-rong, YANG Jian-jun, and ZHOU Xiao-jun

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** By using magnetostrictive characteristics of  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$  to tune the time-delay line of linear chirped fiber grating (CFG), the ends of linear CFG are pasted firmly to the magnetostrictive rod with length of 70 mm and diameter of 8 mm. The center wavelength of the grating is 1 550 nm, the FWHM bandwidth is 15.48 nm and its length is 60 mm. The magnetostrictive rod is laid into a uniform magnetic field of coil. When the current in the solenoid changes from 0 A to 2 A, the grating gets a axial strain and the spectrum shifts about 1.6 nm to the longer wavelength, consequently, the maximum time-delay change, 60 ps, is achieved. The setup can make a four-elements optical-controlled phased array antenna with the element spacing of 0.006 m realize the scanning angles from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ .

**Key words** chirped fiber grating; magnetostrictive rod; optically controlled phased array radar; true time delay; tuning

近年来, 光纤光栅因其优越的性能在光通信和传感技术等领域的应用引起了人们极大的兴趣<sup>[1-2]</sup>。尤其是光控相控阵雷达中的光纤光栅延迟线具有选频特性优良、工作波长可调、带宽调节范围大、附加损耗小、体积小、质量轻、安装灵活等优点, 也使其成了人们的研究热点。利用光纤光栅延迟线, 可以保证天线的波束指向保持稳定。通过在一定范围内对延迟线延时的连续调谐, 可以实现光控相控阵雷达的扫描方向的连续控制。有两种方案可以实现延时的连续调谐, 一种是采用可调谐光源和光纤光栅<sup>[3]</sup>; 另一种是采用固定波长光源, 通过改变啁啾光纤光栅的周期, 使光在光纤光栅中反射位置发生改变, 产生相对时延变化, 这种方案可以避免使用价格昂贵的可调谐光源和光滤波器, 大大降低成

本。本文采用由4个可调线性啁啾光纤光栅构成的实时延迟线系统<sup>[4]</sup>, 该系统通过对多个啁啾光纤光栅进行调谐实现雷达扫描。目前已经介绍过啁啾光纤光栅的一些调谐方法, 如用Newport调制器或悬臂梁将均匀光纤光栅啁啾化<sup>[6-9]</sup>, 通过调制啁啾率得到不同的时延, 但是这种方法要求非常平稳的操作平台, 不适用于同时调谐多个啁啾光纤光栅的系统; 也可用压电陶瓷调谐啁啾光纤光栅, 这种方法需要较高的电压; 或者用电磁铁调谐光纤光栅<sup>[10]</sup>, 这种方法在调谐的初始阶段存在振荡的情况。本文介绍用磁致伸缩棒 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$ 调制线性啁啾光纤光栅延迟线的方法, 将线性啁啾光纤光栅粘贴在磁致伸缩棒上, 利用棒的磁致伸缩效应, 通过外加磁场的变化调谐加在线性啁啾光纤光栅上的应力, 改变线性啁

收稿日期: 2008-01-28; 修回日期: 2008-10-09

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 周建华(1975-), 女, 在职博士生, 主要从事光电子技术方面的研究。

啁啾光纤光栅的时延特性, 从而实现光控相控阵雷达在一定角度范围内的扫描。这种方法具有很好的动态响应特性, 调谐范围大, 并且操作简单。

## 1 线性啁啾光纤光栅延迟线工作原理

假设 $N$ 阵元光控相控阵雷达的相邻阵元天线间隔为 $d(m)$ , 当主波瓣的波束指向角为 $\theta$ 时, 相邻阵元上的啁啾光纤光栅延迟线产生的延时差为<sup>[4-5]</sup>:

$$\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i = \frac{d \sin \theta}{c} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中  $\tau_i$  是第 $i$ 个信道的啁啾光纤光栅产生的时延;  $c$  是光在真空中的传播速度; 相邻阵元天线间隔取  $d = \lambda_{RF}/2 = c/(2f_{RF})$ ,  $f_{RF}(\lambda_{RF})$  是射频信号的频率(波长)<sup>[11]</sup>。

当均匀拉伸线性啁啾光纤光栅时, 其反射谱和时延谱发生平移, 如图 1 所示。独立调谐各阵元的线性啁啾光纤光栅, 以改变相邻阵元的时延差  $\Delta\tau$ , 从而改变相控阵雷达的扫描角  $\theta$ 。

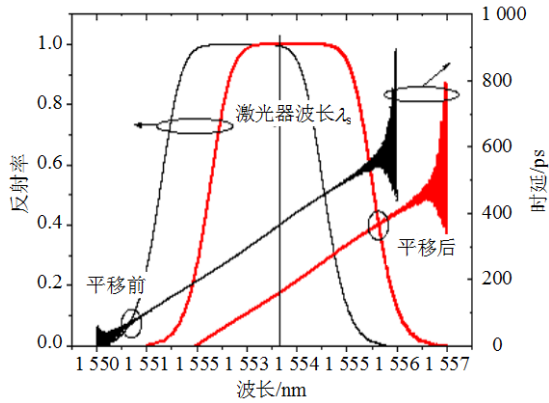


图1 平移前后的反射谱和时延谱



图2 粘接了线性啁啾光纤光栅的磁致伸缩棒

激光器的工作波长 $\lambda_0$ 应在无调谐时线性啁啾光纤光栅的 3 dB 带宽内, 在线性啁啾光纤光栅被调谐后(反射谱平移)仍应处在 3 dB 带宽内, 使波束在扫描过程中有较高的信噪比。

保持第一个阵元的线性啁啾光纤光栅的反射谱不变, 调谐其余  $N-1$  个线性啁啾光纤光栅, 使相邻阵元的时延差发生改变, 从而改变相控阵雷达的扫描角。如果每个阵元的线性啁啾光纤光栅初始参数

完全相同, 调谐线性啁啾光纤光栅的最大时延为  $\Delta\tau_{\text{shift}}$ , 相邻阵元的最大时延差为:

$$\Delta\tau_{\text{max}} = \frac{\Delta\tau_{\text{shift}}}{N-1} \quad (2)$$

因此系统能实现的最大扫描角为:

$$\theta_{\text{max}} = \arcsin\left(\frac{c\Delta\tau_{\text{max}}}{d}\right) \quad (3)$$

系统的扫描范围为  $[0, \theta_{\text{max}}]$ 。

线性啁啾光纤光栅的时延是波长的函数, 可近似表示为:

$$\tau(\lambda) = \frac{2n_{\text{eff}}(\lambda - \lambda_0)}{cC_{\text{chirp}}} \quad (4)$$

式中  $\lambda_0$  为线性啁啾光纤光栅的起始布拉格波长;  $n_{\text{eff}}$  为线性啁啾光纤光栅的有效折射率;  $C_{\text{chirp}} = d\lambda_B/dz$  是光栅啁啾系数, 表示布拉格波长沿光栅长度方向的变化率, 单位为 nm/cm, 对线性啁啾光纤光栅,  $C_{\text{chirp}}$  为常数, 可表示为:

$$C_{\text{chirp}} = \frac{\Delta\lambda_G}{L} \quad (5)$$

式中  $\Delta\lambda_G$  是线性啁啾光纤光栅的反射谱带宽;  $L$  是线性啁啾光纤光栅的长度。可见线性啁啾光纤光栅的时延特性是与波长近似呈线性关系的直线, 时延斜率(啁啾率、色散斜率)为:

$$\delta = \frac{2n_{\text{eff}}}{cC_{\text{chirp}}} \quad (6)$$

式(4)表明, 线性啁啾光纤光栅延迟线实现的延迟与微波频率无关, 应用在光控相控阵雷达中可以获得大的瞬时信号带宽。

当均匀拉伸线性啁啾光纤光栅时, 其周期发生均匀变化, 如果在拉伸过程中温度不变, 只考虑其轴向应变, 则线性啁啾光纤光栅的反射波长向长波长方向发生变化, 其变化量为:

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon \quad (7)$$

式中  $\lambda_B$  为线性啁啾光纤光栅的中心反射波长;  $P_e = 0.22$  为光纤的有效弹光系数;  $\varepsilon$  为啁啾光纤光栅的轴向应变, 定义为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (8)$$

由于线性啁啾光纤光栅的两端粘在磁致伸缩棒的两端, 所以啁啾光纤光栅的轴向应变等于磁致伸缩棒的形变。在均匀拉伸作用下, 线性啁啾光纤光栅的反射谱宽为:

$$\Delta\lambda_G = C_{\text{chirp}}L + C_{\text{chirp}}L(1 - P_e)\varepsilon \quad (9)$$

由于  $\varepsilon \ll 1$ , 所以式(9)第2项可以忽略, 啁啾光纤光栅的反射谱宽基本不变。由式(4)可得, 光纤光栅的反射波长平移引起的时延平移量为:

$$\Delta\tau = \frac{2n_{\text{eff}}}{cC_{\text{chirp}}} \Delta\lambda \quad (10)$$

因此, 均匀拉伸线性啁啾光纤光栅可以改变时延量, 当调谐控制器控制各相邻信道的线性啁啾光纤光栅产生的时延差发生变化, 就可以控制光控相控阵雷达的波束扫描方向发生相应的变化。

## 2 实验结果及分析

将线性啁啾光纤光栅粘贴在磁致伸缩棒上, 利用棒的磁致伸缩效应, 通过外加磁场的变化调谐加在线性啁啾光纤光栅上的应力, 粘结着光栅的磁致伸缩棒如图2所示, 磁场调谐啁啾光纤光栅的实验装置如图3所示。

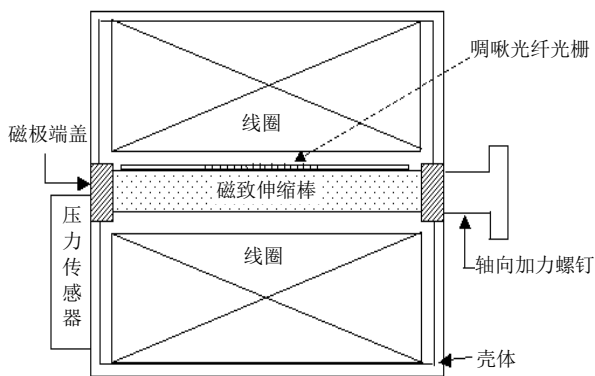


图3 磁场调谐实验装置

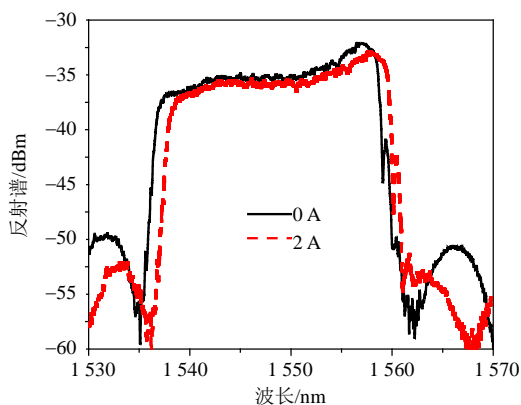


图4 电流为0 A和2 A时啁啾光纤光栅的反射谱

磁致伸缩系数  $\varepsilon$  与预加轴向压强和外加磁场强度有关<sup>[12-14]</sup>。对于图3所示的系统, 若预加轴向压强恒定, 在均匀磁场的作用下, 光纤光栅受到均匀的轴向应变, 其反射谱发生平移, 谱宽基本不会发生变化。调谐系统中所用的磁致伸缩棒的参数是: 长度70 mm, 直径8 mm。当磁场强度在0~70 kA/m时,

棒的磁致伸缩系数随磁场强度的变化比较明显, 因此设计了一个可以产生0~100 kA/m磁场强度连续变化的均匀磁场的线圈。线圈长度80 mm, 内径10 mm, 外径49.5 mm, 最大驱动电流2.5 A, 线圈匝数为4 819匝。在不同驱动电流下对线性啁啾光纤光栅的反射谱进行测量。粘在磁致伸缩棒上的啁啾光纤光栅参数为: 中心反射波长1 547.98 nm, 啁啾系数9.2 nm/cm, 3 dB带宽23.03 nm, 长度25 mm, 反射率78.77%。

图4是预加轴向压强为0, 驱动电流为0 A和2 A时, 用光谱分析仪(测量精度为0.05 nm)测出的线性啁啾光纤光栅的反射谱。表1是驱动电流从0 A增加到2 A过程中反射谱的变化, 可见中心反射波长从1 547.98 nm增加到1 549.11 nm, 实现了反射谱平移1.13 nm的调谐量。在2 A时, 磁致伸缩棒的轴向形变量约为934 ppm。在实验过程中, 反射谱宽基本保持不变, 与理论分析符合。

表1 均匀磁场调谐下啁啾光纤光栅反射谱

电流/A	反射谱宽/nm	中心波长/nm	反射谱平移量/nm
0	23.03	1 547.98	0
0.4	23.00	1 548.37	0.39
0.8	23.00	1 548.69	0.71
1.2	22.98	1 548.87	0.89
1.6	22.99	1 548.99	1.01
2.0	22.95	1 549.11	1.13

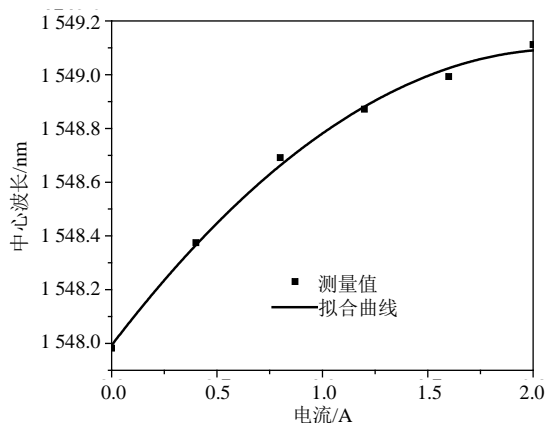


图5 啁啾光纤光栅的中心反射波长随驱动电流变化情况

由图5可见, 驱动电流为0~1.5 A时, 啁啾光纤光栅中心反射波长的平移量变化明显, 当驱动电流大于1.5 A后, 随驱动电流的增加而趋于平缓, 这与磁致伸缩棒的磁致伸缩系数随外加磁场强度的变化特性一致<sup>[15]</sup>。图6是根据反射谱计算出的线性啁啾光纤光栅调谐前后的时延谱, 时延最大调谐量

为 11.87 ps, 当系统工作在 25 GHz, 阵元间隔  $d = 0.006$  m 时, 能实现的扫描角范围为  $0^\circ \sim 11.42^\circ$ 。

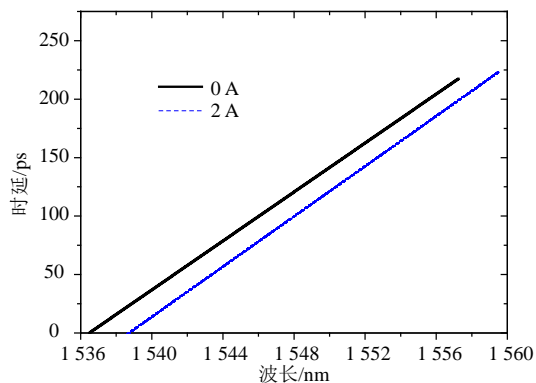


图6 电流为0 A和2 A时啁啾光纤光栅的时延谱

### 3 结 论

本文实验结果证实了磁场均匀调谐可使线性啁啾光纤光栅反射谱平移, 产生时延变化, 但是实验结果数据很小, 主要有两个方面的原因: 一是磁致伸缩棒的形变量不够大; 二是由于实验中所用的线性啁啾光纤光栅的啁啾系数太大(长度不够长, 并且其反射谱太宽)。可以给磁致伸缩棒预加轴向压强, 使其在磁场作用下有较大的轴向形变, 并且使用啁啾系数小的线性啁啾光纤光栅以实现大的扫描角。如使用中心反射波长为 1 550 nm, 啁啾系数为 2.58 nm/cm, 长度为 60 mm, 反射谱宽为 15.48 nm 的线性啁啾光纤光栅, 同样利用该装置, 当预加轴向压强为 6 MPa 时, 驱动电流从 0 A 增加到 2 A, 磁致伸缩棒的轴向形变量可达 1 300 ppm, 反射谱向长波长方向平移了 1.6 nm, 可以实现 60 ps 的时延调谐量, 该时延调谐量可以使四阵元系统工作在 25 GHz, 阵元间隔  $d = 0.006$  m 时, 实现  $0^\circ \sim 90^\circ$  扫描。

因此在均匀磁场作用下, 用磁致伸缩棒拉伸线性啁啾光纤光栅可以实现反射谱的平移, 从而改变线性啁啾光纤光栅的时延特性。通过调谐控制器控制相邻信道的线性啁啾光纤光栅对微波信号的时延差, 就可以实现对光控相控阵雷达扫描角的控制。由前面的分析可知, 如果磁致伸缩棒的伸缩系数更大, 或者线性啁啾光纤光栅的啁啾系数较小(即线性啁啾光纤光栅的长度长而反射谱较窄), 则在调谐过程中, 较小的驱动电流就可以使光控相控阵雷达实现较大范围的扫描。如果光控相控阵雷达工作在更低的频率, 要实现大范围的扫描, 就需要更大的时延调谐量, 因此要选用啁啾系数更小, 且伸缩系数更大的磁致伸缩棒进行调谐。此外, 由于该系统的工作电流较大, 磁场线圈长时间工作, 将使系统温

度上升而改变系统的性能, 因此必须添加温度传感器和一个冷却系统, 以监测和控制系统温度, 从而使该方法能在工程上得到真正的运用。

### 参 考 文 献

- [1] RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling. Recent advances in long-distance FBG sensor systems at UESTC[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2006, 4(3): 232-236.
- [2] 饶云江. 长周期光纤光栅研究现状分析[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(6): 873-884.  
RAO Yu-jiang. Recent progress in long-period fiber gratings[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005, 34(6): 873-884.
- [3] CORRAL J L, MARTI J, REGIDOR S, et al. Continuously variable true time-delay optical feeder for phased-array antenna employing chirped fiber grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1531-1536.
- [4] ITALIA V, PISCO M, CAMPOPIANO S, et al. Chirped fiber bragg gratings for electrically tunable time delay lines[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(2): 408-416.
- [5] 李 正, 孙雨南. 应用在相控阵雷达上的光学实时延迟线[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 381-388.  
LI Zheng, SUN Yu-nan. Optical true-time delay for phased array antenna system[J]. Optical Technique, 2006, 32(3): 381-388.
- [6] LIU Yun-qi, YANG Jian-liang, YAO Jian-ping. Continuous true-time-delay beamforming for phased array antenna using a tunable chirped fiber grating delay line[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(8): 1172-1174.
- [7] QIN Zi-xiong, ZENG Qing-ke, FENG De-jun, et al. A novel strain method for precisely adjusting the grating chirp and center wavelength[J]. Smart Materials and Structures, 2000, 9(6): 985-989.
- [8] 余有龙, 刘治国, 董孝义, 等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐[J]. 光学学报, 1999, 19(5): 621-625.  
YU You-long, LIU Zhi-guo, DONG Xiao-yi, et al. Linear tuning of fiber bragg grating based on a cantilever[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(5): 621-625.
- [9] 秦玉文, 赵玉成, 张劲松, 等. 均匀光纤光栅Chirp化及其用于色散补偿实验研究[J]. 中国激光, 1999, 26(10): 935-939.  
QIN Yu-wen, ZHAO Yu-cheng, ZHANG Jin-song, et al. Experimental investigation on uniform fiber bragg grating chirplization and its application in dispersion compensation[J]. Chinese Journal of Laser, 1999, 26(10): 935-939.
- [10] 辛 雨, 余重秀, 吴 强, 等. 光纤光栅的几种调谐方法[J]. 光通信研究, 2002, (5): 51-54.  
XIN Yu, YU Chong-xiu, WU Qiang, et al. Several tuning methods of fiber grating[J]. Study on Communications, 2002, (5): 51-54.
- [11] LEE Gab-yong, CHOI Yeon-bong, SHIN Jong-dug, et al. Optical true time-delay feeder for linear phased-array

- antennas implemented with chirped fiber gratings[C]//In: The 14th Annual Meeting of the IEEE, [S.l.]: IEEE, 2001: 255-256.
- [12] 刘德忠, 费仁元, 李剑锋, 等. 磁致伸缩微动驱动器的研制[J]. 北京工业大学学报, 2002, 28(4): 405-408.  
LIU De-zhong, FEI Ren-yuan, LI Jian-feng, et al. Development of magnetostrictive micro-actuator[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2002, 28(4): 405-408.
- [13] 宁提纲, 裴丽, 简水生. 应变对啁啾光纤光栅特性影响的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1011-1014.  
NING Ti-gang, PEI Li, JIAN Shui-sheng. Study on strain effect of chirped FBG characterization[J]. Chinese Journal of Laser, 2002, 29(11): 1011-1014.
- [14] 赵岭, 蔡海文, 李琳, 等. 光纤光栅电磁调谐技术的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(4): 313-316.  
ZHAO Ling, CAI Hai-wen, LI Lin, et al. A tuning scheme for fiber bragg grating by electromagnetic force[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(4): 313-316.
- [15] 李明范, 项占琴, 吕福在. 超磁致伸缩换能器磁路设计及优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(2): 192-196.  
LI Ming-fan, XIANG Zhan-qin, LÜ Fu-zai. Magnet circuit design and optimization of giant magnetostrictive transducer[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2006, 40(2): 192-196.

编辑 漆蓉

· 科研成果专利介绍 ·

## 带版权保护的数码音乐播放机

带版权保护的数码音乐播放机在主机内设置版权保护模块, 其输入端与微控制器的输出端相连, 输出端与解码模块相连。该模块由信息存储模块、信息识别模块和解密模块3部分组成, 与远端服务器和个人计算机终端相关联。信息存储模块内存储有多组信息, 特别是与远端服务器加密密钥库内唯一对应的加密密钥编号; 信息识别模块将数码文件中的识别信息与信息存储模块中的相应信息进行比较; 解密模块用信息存储模块中加密密钥编号所确定的加密密钥相对应的解密密钥对数码音乐进行解密。该播放机结构简单、使用方便、安全性高, 用集成、固化在主机内的硬件信息作为密码的信息, 唯一的播放机识别唯一的加密音乐, 无法非法破解, 版权保护效果好。

## 一种具有窗口的双介质SOI耐压结构及其SOI功率器件

具有窗口的双介质SOI耐压结构及其SOI功率器件是一种用于功率器件的具有窗口的双介质层SOI耐压结构以及采用具有窗口的双介质层SOI耐压结构的SOI功率器件, 其特征是, 耐压层结构含有两层介质层, 两介质层之间填充半导体或半绝缘材料, 且第一层介质有窗口。当器件加上反偏电压时, 中间层上下界面形成的界面电荷提高了第二层介质的电场强度, 窗口的存在调制了漂移区电场, 因而器件耐压大大提高。窗口的存在提供了热传导的路径, 使得该器件结构的自热效应主要取决于第二层介质的厚度, 而第二层介质在不击穿的情况下可以较薄, 所以实用新型提出的器件结构能够缓解自热效应。