

## Development of a Dynamic Driving Circuit for MEMS Programmable Grating \*

L I A N G Q i n g , Y U A N W e i - z h e n g \* , Y U Y i - t i n g , Q I A O D a - y o n g

(Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract :** The performance of MEMS programmable grating depends on the performance of the driving circuit to a very large extent. This paper has extracted the equivalent capacitance of the MEMS programmable grating based on its work characteristics and structure parameters, and developed an innovative dynamic driving circuit for MEMS programmable grating by using high-voltage amplifier. For avoiding self oscillation, two methods: frequency compensation and feedback capacitance respectively, have been adopted, which effectively improved the stability of the circuit. The dynamic performance of the circuit had been tested in oscillograph, which matched the PSPICE10 simulation results very well. This driving circuit has high voltage output range (0 ~ 180 V), high frequency response (10 kHz) and a driving ability in wide capacitive load range (1 ~ 1 000 pF). It is appropriate for controlling MEMS programmable grating in complicate and dynamic conditions.

**Key words :** MEMS programmable grating; high-voltage amplifier; driving circuit; self oscillation  
**EEACC :** 1200

## MEMS 可编程光栅动态驱动电路的研制 \*

梁 庆,苑伟政\*,虞益挺,乔大勇

(西北工业大学陕西省微/纳米系统重点实验室,西安 710072)

**摘 要 :** MEMS 可编程光栅的工作性能很大程度依赖于驱动电路的性能。本文根据 MEMS 可编程光栅的工作特点及结构参数,提取出光栅的等效电容值,并采用集成高压运放研制出一种新型的 MEMS 可编程光栅的动态驱动电路。为了避免自激振荡的发生,电路中采用了频率补偿和并联反馈电容的方法,有效提高了电路的稳定性。实际电路经过测试,其动态性能与 PSPICE10 仿真的结果非常吻合。该动态驱动电路具有高的电压输出范围 (0 ~ 180 V),较高的频率响应 (10 kHz),大范围容性负载能力 (1 ~ 1 000 pF),完全能够满足 MEMS 可编程光栅动态复杂控制的需要。

**关键词 :** MEMS 可编程光栅; 高压运放; 驱动电路; 自激

**中图分类号 :** TN721

**文献标识码 :** A

**文章编号 :** 1004-1699(2008)04-0680-04

MEMS 可编程光栅采用硅微加工工艺制作,它可以在外力作用下,使光栅的某些特征参数(如周期,光栅常数等)发生改变,从而可以实时的改变光栅的工作性能,实现光栅的可编程应用。基于其独特的优势,MEMS 可编程光栅已经用于光通信、高清显示设备、光谱分析等领域。MEMS 可编程光栅的驱动方式有多种,利用静电驱动的 MEMS 可编程光栅,由于其工艺容易实现,能耗低,频率响应高,因此成为最常用的驱动方式。著名的光栅光阀

(GLV)<sup>[1-2]</sup>和气体探测器(Polychromix)<sup>[3-4]</sup>就是采用静电驱动工作的。

然而,采用静电驱动的 MEMS 可编程光栅也存在某些不足之处<sup>[5]</sup>。由于静电驱动的能量密度较小,当微结构需要比较大的工作位移(微米量级),就必须增大驱动电压,驱动电压甚至达到上百伏。当微结构受静电力作用,会由于机械结构特有的惯性作用而产生阻尼振荡<sup>[6]</sup>,增大了系统的延迟。实际工作时,光栅等效电容也会随着光栅梁位移的改变

基金项目:西安应用材料基金资助项目(XA-AM-200610);西北工业大学博士论文创新基金资助项目(CX200611)

收稿日期:2007-09-30 修改日期:2008-02-27

而变化,导致驱动电路容性负载的变化。这些问题都给驱动电路的设计带来了困难。

因此, MEMS 可编程光栅的工作性能,很大程度上依赖于驱动电路的性能。鉴于目前国内并没有成熟的、可实际应用的 MEMS 可编程光栅及相应驱动电路,本文采用高压运放作为核心电路元件,研制出一种新型的 MEMS 可编程光栅的动态驱动电路,对 MEMS 可编程光栅的实用化具有重要意义。

### 1 光栅等效电容提取

本文参考的 MEMS 可编程光栅采用硅表面微加工工艺制作而成。通过对光栅结构加载驱动电压,每一个光栅梁单元都可以在静电力作用下通过引线连接实现可编程控制。改变驱动电压大小,就可以控制光栅梁的运动位移大小。因此,每个光栅梁单元都可视为一个可变电容。图 1 是光栅梁的结构简化示意图,其基本结构尺寸如下:  $gap = 3 \mu\text{m}$ ;  $w_{\text{grating}} = 20 \mu\text{m}$ ;  $l_{\text{grating}} = 600 \mu\text{m}$ ;  $l_{\text{electrode}} = 100 \mu\text{m}$ 。

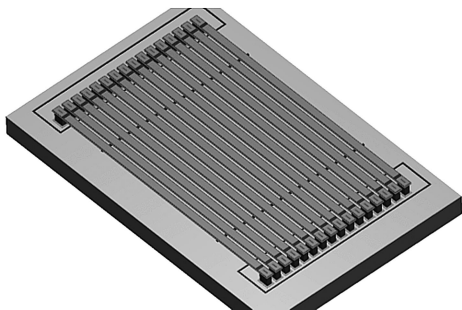


图 1 光栅梁单元的结构示意图(连续 16 个单元)

其中,  $gap$  为光栅梁与下极板的初始空气间隙,  $w_{\text{grating}}$  为光栅梁的梁宽;  $l_{\text{grating}}$  为光栅梁的长度;  $l_{\text{electrode}}$  为光栅梁正下方所对的下电极的长度,下电极宽度与梁宽相等。

本文应用中,整个光栅被定义成多个像素,每个像素由  $8 \times 12$  个光栅梁并联组成。一次信号周期只驱动一个像素工作。因此,根据光栅梁的结构参数,在未考虑电容边缘效应的情况下,一个光栅像素在未施加电压时的等效初始电容  $C_{\text{gra}}$  为:

$$C_{\text{gra}} = \frac{\epsilon_0 A}{gap} \quad 1.13 \text{ pF} \quad (1)$$

其中,  $gap$  如前文所述;  $A$  为一个像素单元与下极板之间的正对面积;  $\epsilon_0$  为真空介电常数,等于  $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。随着驱动电压的加大,光栅等效电容会随着光栅梁与下电极之间空气间隙的减小而变大。因此,采用静电驱动可编程光栅的一个明显特点是

电路的容性负载很小,电容通常只有皮法级,但电容值是随电压变化的。

### 2 驱动电路的设计

驱动电路采用高压运放作为核心元件。采用集成高压运放具有比分立元件很大的优势,它具有:a)集成度高,稳定性好;b)精度高,纹波小;c)电路设计简单等优点,减小了电路发生自激振荡的可能。集成高压运放输入端的差分输入和恒流源大大减少了由于温漂带来的非线性误差,为实际电路的搭建提供了方便。由于 MEMS 可编程光栅等效于容性负载,因此功率损耗也是一个不容忽视的问题。集成高压运放具有极小的静态电流的特点,减小了驱动电路的功率损耗,避免了驱动大负载时因高温而意外烧毁的可能。

#### 2.1 高压运放的参数选择

本文设计的驱动电路要求输出对输入的放大倍数为 50,输出电压峰值达到 180 V,频率响应至少达到 10 kHz。因此高压运放的选择是非常关键的。选择高压运放的相关参数包括:

(1) 确定电路容性负载,由式(1)所得驱动 MEMS 可编程光栅的等效电容  $C_{\text{gra}} = 1.13 \text{ pF}$ ,因此,为保守考虑设定驱动电路容性负载  $1 \text{ pF} \leq C_L \leq 1000 \text{ pF}$ 。

(2) 计算输入信号处于最大频率和输出处于峰值电压时的大信号响应,即电压转换速率。给定信号频率  $f_{\text{max}} = 20 \text{ kHz}$ ,输出峰值  $|V_{\text{out}}| = 180 \text{ V}$ ,跟随正弦波信号所需要的转换速率  $SR$ :

$$SR = 2 f_{\text{max}} V_{\text{out}} (1 \times 10^{-6}) \quad 23 (\text{V}/\mu\text{s}) \quad (2)$$

(3) 计算驱动负载所需要的驱动电流  $I_{\text{op}}$ 。在容性负载情况下,  $Z_c$  为信号输入频率处于最大  $f_{\text{max}}$  时的容性阻抗,则驱动 MEMS 可编程光栅的电流:

$$I_{\text{op}} = \frac{V_{\text{out}}}{Z_c} = \frac{V_{\text{out}}}{\frac{1}{2 f_{\text{max}} C_L}} \leq 22.5 \text{ mA} \quad (3)$$

(4) 计算在最坏情况下高压运放的内部耗散功率  $P_{\text{dis}}$ ,包括输出晶体管的一阶导通耗散功率  $P_{\text{outmax}}$ ,以及运放的静态耗散功率  $P_{\text{dq}}$ 。对于容性负载的应用:  $+V_s$  和  $-V_s$  分别为正负电源电压,分别设为 190 V 和 -10 V。  $V_s$  选择正、负电源两者中具有较大绝对值电压作为其电压值,此文中选择 190 V。  $I_q$  为运放的静态工作电流,设定为 2.5 mA。针对容性负载的应用<sup>[7]</sup>:

$$P_{\text{dis}} = P_{\text{outmax}} + P_{\text{dq}} = \frac{4 \times V_s^2}{2 Z_c} + I_q \times [(+V_s) - (-V_s)] \leq 3.4 \text{ W} \quad (4)$$

根据上述相关参数, APEX 公司的 AP69 高压运放非常适合本文的应用。AP69 高压运放具有非常优异的性能:宽范围的输出电压,峰峰值最高可达 200 V;较小的静态电流,小于 1 mA;高于 200 V/ $\mu$ s 的电压转换速率;输出电流约 50 mA,等等。驱动电路原理图如图 2。

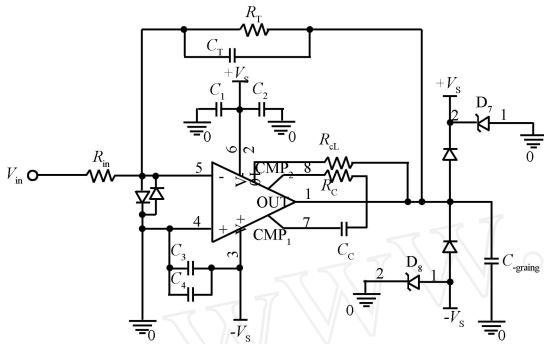


图 2 驱动电路原理图

### 2.2 驱动电路的稳定性问题

采用集成运放的驱动放大电路必须解决电路自激振荡的问题。自激振荡产生的条件是:环路增益等于 1,即  $|A \times F| = 1$ , 及  $a + f = (2n + 1) \times 180^\circ, n = 0, 1, 2 \dots$ 。A 为开环放大倍数, F 为反馈系数, a、f 分别为 A、F 的相角。为了避免自激振荡的发生,电路采用了两种补偿方法。一种是通过高压运放外接  $R_c C_c$  网络进行频率补偿。另一种是在反馈电阻两端并联反馈电容,这样既能防止寄生电容和容性负载可能引起的自激振荡,又能改善系统的瞬态响应。在图 3 中可以看到,未并联反馈电容的放大电路的闭环增益曲线  $1/\beta_1$  是一条直线,与高压运放的开环增益曲线  $A_{ol}$  的夹角约为  $45^\circ$ ,电路处于临界稳定,可能会发生振荡<sup>[8]</sup>。经过并联反馈电容补偿后的闭环增益曲线  $1/\beta_2$  与开环增益曲线  $A_{ol}$  的夹角小于  $45^\circ$ ,因此电路不会发生自激振荡。图 4 中也可以看到,经过并联反馈电容  $C_f$  补偿以后,放大电路相位曲线在频率 10 kHz ~ 100 kHz 处具有一个明显的上升峰,该上升峰增加了系统的相位裕度,提高了电路的稳定性。

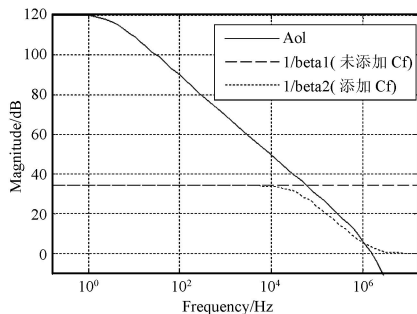


图 3 驱动电路的波特图

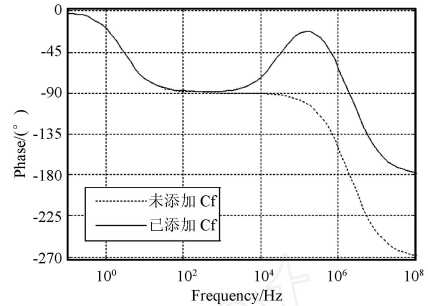


图 4 驱动电路的相位曲线图

### 2.3 驱动电路 PSPICE 仿真

为了验证电路设计的正确性,本文采用 PSPICE10 对电路进行了性能仿真,输入分别采用正弦和方波信号,仿真结果如图 5、图 6。输入正弦频率 10 kHz,峰峰值为 3.6 V 时,仿真得到输出电压为 -179.498 V,输出为输入电压的 50 倍,频率也为 10 kHz。输入方波频率 10 kHz,脉冲峰值为 3.6 V 时,输出脉冲达到 -180.192 V,频率也为 10 kHz。可见,对于这两种输入信号,输出都能够很好的跟随输入信号。因此,从理论上来说,电路的设计是完全符合要求的。

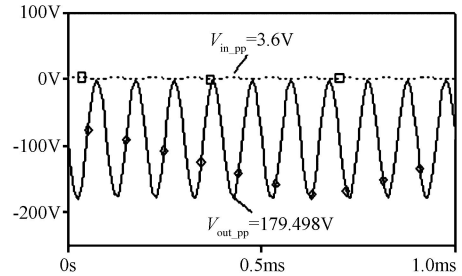


图 5 正弦输入的输出响应仿真

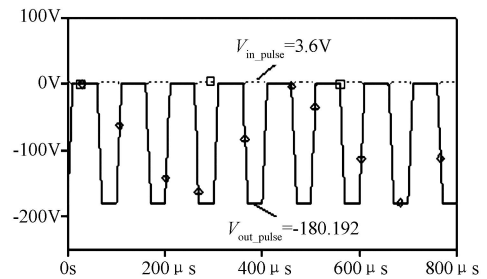


图 6 方波输入的输出响应仿真

## 3 实验结果

实际电路采用信号发生器对其动态性能进行测试。采用陶瓷电容代替光栅作为负载,负载电容范围为 1 ~ 1 000 pF。测试结果显示,当输入正弦频率为 10 kHz 时,电路的动态性能与 PSPICE 仿真的结果完全吻合,输出电压峰峰值达到 180 V,频率 10 kHz。当正弦频率为 20 kHz 时,虽然输出频率也为 20 kHz,但输出峰峰值仅为 128 V,交流放大倍数不

到 50,这说明电路在频率 20 kHz 处的闭环增益不到 50,而该频率正好位于图 3 中闭环增益曲线 1/ 2 的下降段,这说明实际测试结果与理论计算是相吻合的。测试还发现,由于电路容性负载较小,对于同样的输入条件下,输出几乎不受负载变化的影响,因此非常适合驱动负载可变的 MEMS 可编程光栅。

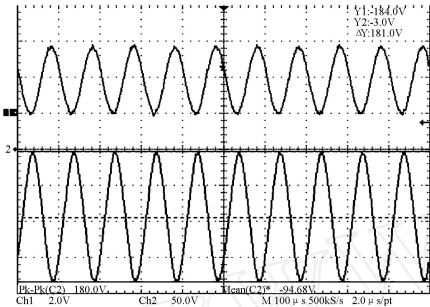


图 7 正弦输出响应 ( $V_{pp} = 180\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$ )

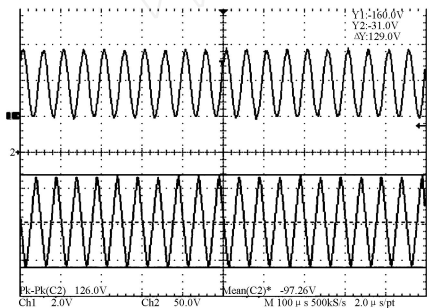


图 8 正弦输出响应 ( $V_{pp} = 128\text{ V}$ ,  $f = 20\text{ kHz}$ )

#### 4 结束语

本文采用高压运放研制的 MEMS 可编程光栅的驱动电路性能优良:具有高的电压输出范围(0 ~ 180 V),较高的频率响应(10 kHz),大范围容性负载能力(1 ~ 1000pF)等优点,完全能够满足驱动

MEMS 可编程光栅的实际需要,也为 MEMS 可编程光栅的动态复杂控制提供了可能。同时本文利用理论计算、软件仿真与实际电路测试相结合的方法,对多种 MEMS 传感器驱动电路的设计提供了较大的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] Bloom D M. The Grating Light Valve :Revolutionizing Display Technology[J]. Proceedings of SPIE,1997 ,30(13) :512-516.
- [2] Jahja I. Trisnadi, Clinton B. Carlisle, Robert Monteverde. Overview and Applications of Grating Light Valve Based Optical Write Engines for High-Speed Digital Imaging [J]. Proceedings of SPIE,2004 ,Vol. 5348 :52-64.
- [3] M. A. Butler, E. R. Deutsch, S. D. Senturia, et, al. A MEMS Based Programmable Diffraction Grating for Optical Holography in the Spectral Domain [C]// IEEE International Electron Devices Meeting IEDM , 2001 ,4 :909-912.
- [4] Michael B. Sinclair, Kent B. Pfeifer, Michael A. Butler, et, al. A MEMS-Based Correlation Radiometer [J]. Proceedings of SPIE,2004 ,Vol. 5346 :37-47.
- [5] John H. Comtois, M. Adrian Michalick, Carole Craig Barron. Fabrication Micro-Instruments in Surface Micromachined Polycrystalline Silicon [C]// Proceedings of the 43rd International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, 1997 :169-179.
- [6] Alexander Payne, Wilhelmus De Groot, Robert Monteverde, et, al. Enabling High Data-Rate Imaging Applications with Grating Light Valve Technology [J]. Proceedings of SPIE, 2004 ,5348 : 76-88.
- [7] Apex Microtechnology. Drive Capacitive Loads [EB/OL]. <http://www.apexmicrotech.com>.
- [8] 王宏,钟朝位,张树人. 压电陶瓷驱动器线性动态驱动电源的研制[J]. 压电与声光,2004 ,26(3) :189-191.



梁 庆(1982-) ,男,四川泸州,硕士,主要从事微纳米加工工艺和技术以及微系统控制技术研究,liangqing@mail.nwpu.edu.cn.



苑伟政(1961-) ,男,博士,教授,博士生导师。现任西北工业大学精密机电与生物医学工程系主任,微/纳米系统实验室主任,现代制造工程研究所所长,主要从事微机电系统与微/纳米制造技术等方面的研究工作,mems@nwpu.edu.cn.