

## 摘 要

基于非硅基微加工技术设计研制了两类光无源器件——光开关及可调光衰减器，主要利用有限元软件 ANSYS 和材料力学对一系列器件进行了状态模拟及理论分析，并分别报告了器件的性能测试。

本文主要分成五大部分。第一部分主要研究了现有光开关及可调光衰减器的实现技术，对各种技术的优点及缺点进行了分析，并对光开关及可调光衰减器技术发展现状进行了概述。

第二部分主要是光纤直接耦合器件设计前期准备，详细分析了光纤直接耦合的回波损耗、插入损耗及精密校准问题。

第三部分主要提出了一种利用光纤直接耦合原理制作的微加工型光开关。该器件使用电磁微线圈驱动一封装在微加工柔性框架上的活动光纤，使其对准另两根固定光纤，实现光路转换。驱动电压为 5V，开关时间小于 2ms，插入损耗达到 0.9dB~1.1dB。器件构造工艺采用了 CNC 雕刻技术和 EDM 技术。

第四部分主要提出了一种利用光纤直接耦合原理制作的微加工型可调光衰减器。该器件采用电磁微线圈驱动柔性框架上的活动光纤微位移实现信号功率衰减变化，驱动电压为 0~8V，工作范围 0~65dB，动态时间响应小于 2.3 ms。器件构造工艺主要使用了 CNC 高精度雕刻和激光点焊封装技术。

第五部分主要介绍了一种亚毫秒级微加工型 1×2 光开关阵列。该阵列运用电磁驱动摆杆上的微镜移动实现了驱动电压 5V 下，开关时间小于 750 $\mu$ s，插入损耗 0.6dB~0.8dB，串扰<-70dB。其具有结构简单、成本低廉、可大规模集成的特点，能很好地解决智能光网络节点连接设备 OADM 快速信号转换和串扰问题。

论文最后对三种器件进行了优缺点分析，提出了三种新的理念和设计方案。

关键词：光无源器件；光开关；可调光衰减器；微加工

## Abstract

The thesis presents two kinds of optical passive devices as optical switch and variable optical attenuator based on non-silicon-micromachining technics. The devices were generally simulated and analyzed by ANSYS and mechanics of materials. Moreover, experimental results of each device were reported .

The content of this thesis is primarily classified into five parts. ①The first part summarizes the modern technologies and development for optical switches and variable optical attenuators, involving the pros and cons of them. ②The second part is the arrangement for the design of direct-coupled optical switches and variable optical attenuators, analyzing return loss, insertion loss and precise calibration of them. ③When it comes to the third part, a design of micromachining based  $1 \times 2$  direct-coupled fiber switch is introduced. CNC engraving and EDM techniques were used to fabricate a switch sample where a movable fiber mounted on a micro-machined flexure is driven electromagnetically, and output light beam is directly coupled to two other fiber end surfaces; the switch features a low driven voltage(5V), fast switch(<2ms) and low insertion loss(0.9dB~1.1dB). ④In the fourth part, a design of micromachining based direct-coupled variable optical attenuator (VOA) is presented. The device operates by misaligning a fiber-to-fiber coupling through a lateral displacement of one of the fibers mounted on a micro-machined flexure driven electromagnetically. The VOA was fabricated using CNC engraving and laser spot welding technologies and features a fast dynamic response (<2.3 ms), great dynamic range (0~65dB) and wide bandwidth. ⑤The fifth part contributes to the design of optical an array of  $1 \times 2$  switches for intelligent optical network (ION), by utilizing a micromachined wedge-shaped double side micro-mirror for the change in optical beam path of input light. Performance of the switch array prototype was reported, featuring a fast switch time of less than  $750\mu\text{s}$  and extremely low cross-talk <-70dB with an insertion loss of between 0.6 and 0.8 dB.

The final part of this thesis presents the pros and cons of the above experimental sample devices, putting forward three new ideas based on the former experience and reference.

**Keywords:** Optical passive device; Optical switch; Variable optical attenuator

## 第1章 引言

美籍华人高锟 (K.C. Kao) 在 1966 年发表的论文《光频介质纤维表面波导》中提出利用光纤传递信息设想<sup>[1]</sup>。此后 1970 年康宁公司制成了第一根低损耗 (20dB/km) 的石英光纤。这一惊人之举启动了通信技术的革命, 推动了信息化进程, 激发了人们对全光信息高速公路的无限想象。时至今日, 光传输系统已成为架构核心网的基础。

### 1.1 WDM 全光网概述

三网 (电信网、计算机网、广播电视网) 高速增长并融合的趋势, 提出了对通信带宽的巨大需求。而光纤中近 30 THz 的巨大潜在带宽容量, 使光纤通信成为支撑 NGN (Next Generation Network) 最重要的技术之一。目前为增加光纤网络的容量及灵活性, 提高传输速率和扩容而提出的光复用技术有三种: 波分复用 (WDM)、时分复用 (TDM)、空分复用 (SDM)。其中 WDM 技术最为成熟有效。WDM (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 是在一根光纤中同时传输多个波长光信号的技术。其基本原理是将多种不同频率的光载波信号在发送端经复用器 (Multiplexer) 汇合, 并耦合到同一根光纤中进行传输; 在接收端, 经解复用器 (Demultiplexer) 将各种波长的光载波分离, 然后由光接收机作进一步处理以恢复原信号。

但以 WDM 技术为基础的通信网络节点如果仍使用电子器件, 在适应高速、大容量的需求上将存在着诸如带宽限制、时钟偏移、严重串话、高功耗等缺点, 也就是“电子瓶颈”现象。针对这一问题, 人们提出了 WDM 全光网的概念。WDM 全光网的实现牵涉到几个关键技术的应用, 如:

- ① 以 EDFA (掺铒光纤放大器) 为代表的成熟光放大器技术, 解决了传统光纤传输系统中 O/E/O 再生中继器的电子瓶颈及光功率受限问题, 并节省了众多线路设备, 提高了经济效益, 实现了信号在线路中的透传。
- ② 光波分复用器和解复用器是 WDM 系统中的关键部件, 复用器可以将不同波长光源信号耦合在一起经一根光纤传输。而解复用器和复用器相比较是互易的, 它将一根光纤上的多个波长信号分解成单个波长信

号输出。就目前常见光波分复用器和解复用器主要有光栅型和介质膜滤波器型。

- ③ 全光节点可分为网络节点和接入节点, 主要由可重构的光交叉连接器 (Optical Cross Connect, OXC) 和光分插复用器 (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) 组成。OXC 实现了光路由及不同波长信号的重新配置, 光开关矩阵是其核心技术, 今后 OXC 发展方向将是成熟的 3D 微电子机械系统 (MEMS)。OADM 主要功能是直接在光路中选择性地分出或插入一个或多个波长, 而不影响其他光路的透明传输。其成熟的商用发展方向将基于光开关和可调光衰减器建立的连接设备, 可动态重构光网络及合理分配网络的波长资源。
- ④ 不断发展完善中的全光网管理技术。随着光纤通信技术不断深入, 相继发展起来全光网类型有: ASON 自动交换光网、ION 智能光网、LOBS 光突发交换网、MPLS 多协议波长标签交换光网、Packet over WDM 光分组交换网。这些不同类型全光网络对网管技术提出了很高要求, 都需要合理管理光网络的通信器件状况, 工作状况, 技术性能, 异常告警状况及恢复运行等。

## 1.2 光无源器件——光开关和可调光衰减器实现原理

光开关 (Optical Switch) 和可调光衰减器 (Variable Optical Attenuator, VOA) 是组成 WDM 全光网络的重要的光无源器件<sup>[2]</sup>, 常见应用于全光网节点设备中。

### 1.2.1 光开关技术应用

光开关, 顾名思义在光网络中起到非常重要的切换光路作用。除了在 OADM 和 OXC 节点设备中用于光交换外, 光开关还用于网络自动保护转换、恢复和多光源 / 探测器切换; 在光路测试监控系统中还可以用于多光路选择, 使原来手工跳线插拔过程转为智能电控化, 是现代多路光遥控、遥感中不可或缺的器件。

光开关的成品根据工作原理的不同可以分为液晶型, 波导型, 微加工型, MEMS 型等<sup>[3-6]</sup>。

液晶型光开关是利用电光效应对传输光偏振态控制来实现光路转换。首先输

入光信号经过一个偏振光束分离器后两个偏振态分离，然后运用液晶片加压和未加压对光束偏振态分别进行 90 度或 0 度调制，最后通过一个偏振光束合成器后光信号得到还原，则构成光开关，其工作原理图如图 1.1 所示：

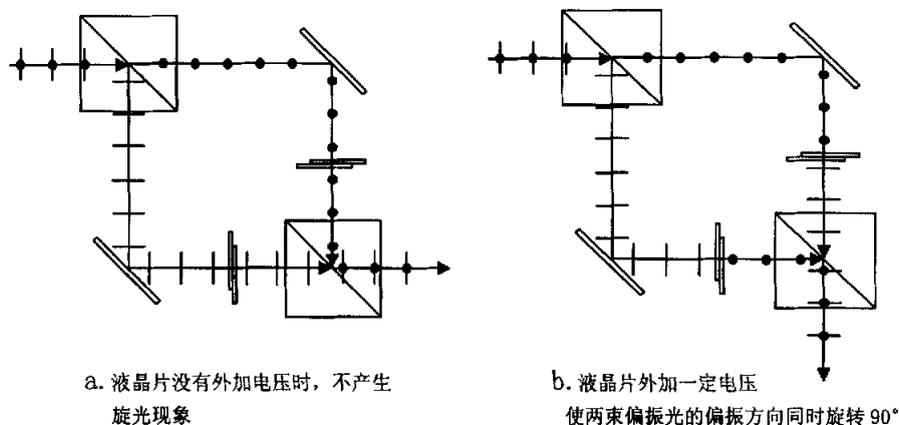


Fig.1.1 Principle of Liquid Crystal optical switch (1×2)

液晶光开关的优点正如 Spectra Switch 公司的 Hubert Kostal 指出：“与那些有移动部分的光开关相比，液晶光开关具有几乎无限的使用寿命。”此外液晶光开关还具有驱动功率低，无偏振依赖性和可靠性高等优点，但是由于液晶光开关是偏振调制，所存在的串扰较大。一般机械式光开关的串扰值小于-80dB，而液晶光开关大于-35dB。同时器件复杂的光路元件结构对精度提出了高要求，并导致产品体积偏大，无法降低产品成本。此外环境温度及湿度对液晶光开关插入损耗影响也较大且器件的切换速度始终维持在毫秒量级。



Fig.1.2 2×2 WaveWalker™ of SpectraSwitch

目前国际上低端口液晶光开关产品可以美国 SpectraSwitch 公司的 2×2

WaveWalker™为代表,如图 1.2 所示。该产品插入损耗在 1.0dB 左右,开关时间为 4ms,外形尺寸为  $100 \times 25 \times 9 \text{ mm}^3$ 。该类开关中的高端产品也有问市,如美国 Corning 公司 40×40 信道可选波长交叉连接开关(wavelength selectable cross-connect)。

波导型光开关是根据在电场、磁场、声波或热的作用下,特种材料介电常数或折射率发生变化的物理效应,对波导中的光波进行调制,从而达到光信号的切换或开关。这一类器件以马赫-曾德干涉仪型(MZI)开关和热光效应开关为代表。MZI 光开关基本原理如图 1.3 所示,它由两个 3dB 耦合器和两个波导臂组成,即在波导两端分别连接一个 3dB Y 型分束器,然后在铌酸锂  $\text{LiNbO}_3$  衬底上制作一对平行光波导。通过波导两侧和中间表面电极作用,改变波导臂的折射率,从而使光程相应变化以达到相干增强或相消,实现开关目的。而热光效应光开关基本原理如图 1.4 所示,这是一个  $1 \times 2$  的光开关,在硅基底上生成矩形波导基础上表面沉积 Ti 或 Cr 以形成微加热器。当对其一个分支加热时,相应的波导折射率就会发生改变,从而阻止光沿着这个分支传输,实现光路切换。

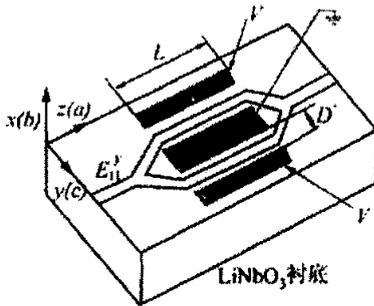


Fig.1.3 Sketch of MZI switch

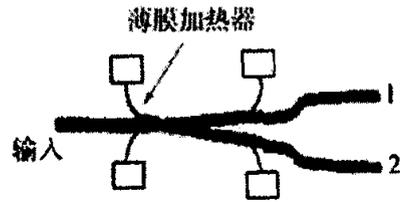


Fig.1.4 Structure of thermal-optic switch ( $1 \times 2$ )

波导型光开关具有较高的响应速度,可达纳秒量级且利用微电子技术,可高密度集成的优点,但是,插入损耗大(一般  $3 \sim 4 \text{ dB}$ )及串扰太大,消光比低( $30 \text{ dB}$ 左右),功率和发热量过高等缺点制约了其商用发展。

微加工型光开关则是目前较为成熟,广泛运用于商用的低端口通信器件。其较好的商用产品代表如图 1.5 所示我们研制的  $1 \times 8$  光开关,运用了如图 1.6 线圈电磁驱动微反射镜转动而切换光路的专利技术。微加工型光开关尽管开关时

间偏长(一般在 10ms 左右, 图 1.5 所示光开关可小于 2 ms), 体积偏大(图 1.5 所示光开关仅为  $50 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$ ), 可扩展性较差(理论上至多可扩展为  $8 \times 8$  类型的光开关)但其串音小, 重复性好, 插入损耗低, 与使用的光波长、偏振态无关, 不受系统采用的数据格式的限制, 价格相对便宜, 在当前全光网络组建的初始实验阶段, 仍有不可替代的作用。此外, 由于微加工型光开关的性价比较高, 因而在对开关速率要求不高的其它非通信光网络系统如光测试系统、光纤系统和光器件调试系统中仍处于主流地位。

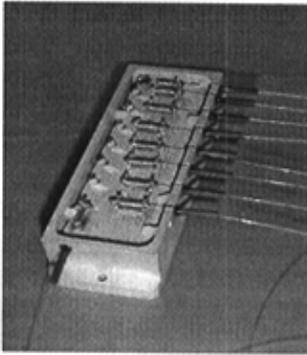


Fig.1.5 Product of a 1×8 optical switch

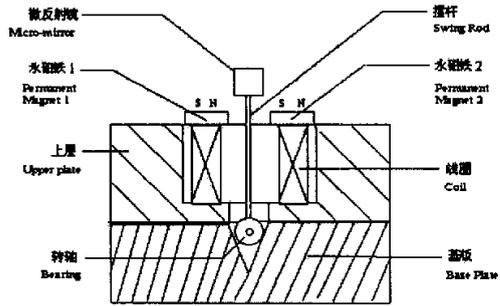
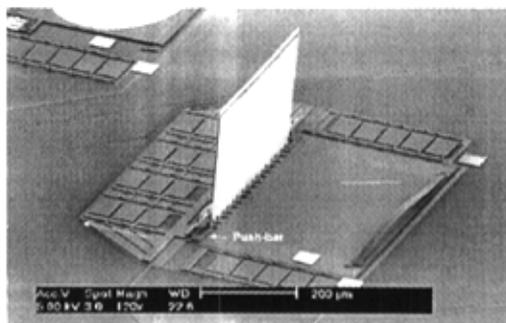


Fig. 1.6 principle of a 1×8 optical switch

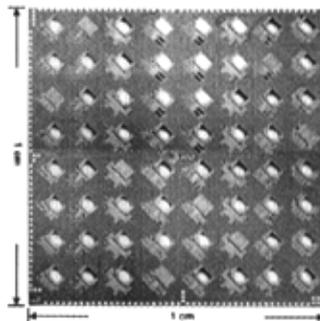
微机电系统 (Micro Electro-Mechanical Systems : MEMS) 光开关技术借鉴了超精密机械加工工艺和半导体工业中集成电路 (IC) 加工技术而发展起来。在光通信领域, 此类器件正受到业内广泛推崇。其基本原理通过静电、磁、压电或热驱动微镜或者光纤本身发生偏移, 以改变输入光的传播方向, 从而实现开关功能。1998 年美国 AT&T Labs-Research 发布了一种基于垂直微反射镜阵列技术的光开关阵列。图 1.7 是其微反射镜单元照片, 微镜是由微铰链连接在基板上, 并由微推动杆驱动微镜处于垂直或者躺倒的状态。将这种微反射镜单元集成为微反射镜阵列, 并配以输入输出光纤准直器阵列, 就组成了光开关阵列。如图 1.8 所示微反射镜单元构成的一个  $8 \times 8$  微反射镜阵列, 其尺寸仅为  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 。

MEMS 技术与其他类型开关相比利用类似 IC 的工艺成批加工生产从而降低成本, 这很具有竞争力; 尽管切换速度较慢, 达到毫秒量级, 但它与光信号的格式、波长、协议、调制方式、偏振、传输方向等均无关, 而且在损耗、扩展性方面都要优于其他类型的光开关, 与未来光网络发展所要求的透明性和可扩展等趋

势相符合。基于这些优点，利用 MEMS 技术制作的光开关及阵列将成为未来核心光交换器件中的主流。

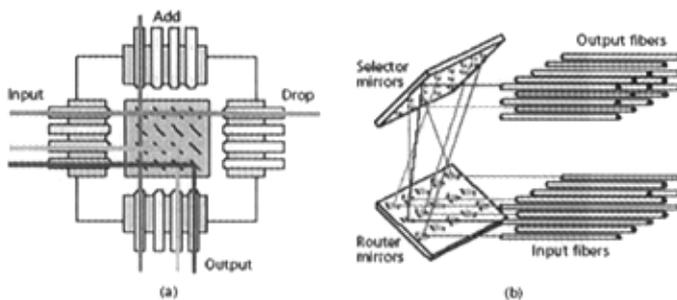


**Fig.1.7** Photograph of a vertical micro-mirror



**Fig.1.8** Photograph of a 8×8 micro-mirrors array

由于 2D MEMS 的端口受限，又出现了如图 1.9 所示的 3D MEMS 解决方案，它突破了二维方案的端口限制，实现了 256×256、1152×1152 等高端口的光交叉互连。可以说，3D MEMS 技术将成为未来光交换的核心技术。



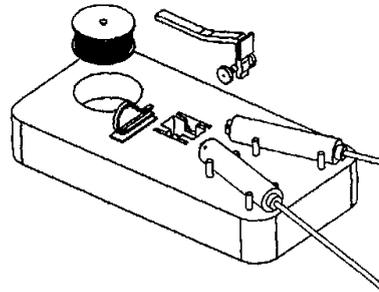
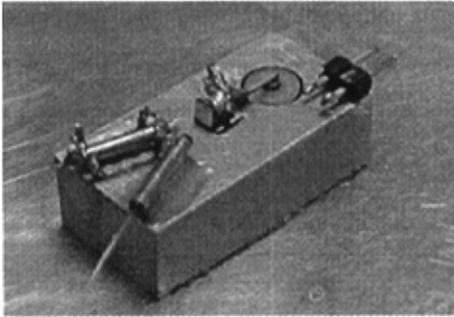
**Fig. 1.9** MEMS approaches for optical crossconnect switching: a) 2D MEMS technology; b) 3D technology.

## 1.2.2 可调光衰减器技术应用

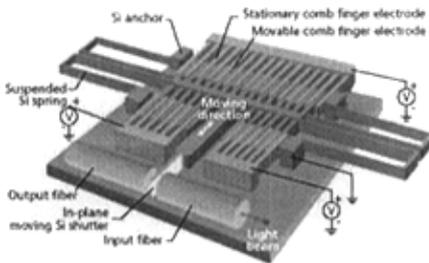
可调光衰减器 (VOA) 作为另一种重要的光纤无源器件，实现了光信号的可调控衰减。在光放大器、光线路路系统、OADM/OXC、光波分复用器和解复用器中应用，平衡了各信道的功率，达到增益平坦，动态增益平衡及传输功率均

衡的效果。可调光衰减器与光开关相比较，其实现方式和结构相似，根据工作原理的不同也可以分为液晶型，波导型，微加工型，MEMS 型等。这里将不再赘述其各类 VOA 工作原理，将重点介绍主流具有特色的 VOA<sup>[7-8]</sup>。

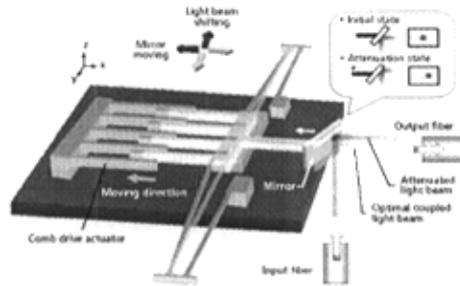
微加工型 VOA 成本低，性能较好，是目前较为成熟，广泛运用于商用的低端口通信器件。这类较好的商用产品如图 1.10 所示我们研制的微机械 VOA。其工作原理如图 1.11 所示当电磁线圈加载直流电压时，线圈的铁芯被磁化，对悬空在线圈上边的软磁质摆杆产生吸引力。摆杆同时受到磁场力和弹簧回复力的作用，最终摆动一定的角度而达到平衡位置，微反射镜角度随之改变，造成了输入光纤准直器与输出光纤准直器之间的耦合效率降低，从而达到光信号衰减的目的，也实现了通过调节线圈加载电压的大小，可实现光信号的可调衰减。



**Fig. 1.10** Photograph of micromachining VOA **Fig.1.11** Exploded view of micromachining VOA



**Fig.1.12** MEMS VOA using shutter



**Fig.1.13** MEMS VOA using mirror

而 MEMS 型 VOA 由于具有可调衰减精度高，性能优越，易于实现大规模生产等优点受到了业内人士广泛推崇。MEMS 型 VOA 按实现方式的不同可分为：挡片式和微反射镜式。其原理分别如图 1.12 和 1.13 所示，利用不同电压下静电

梳状结构驱动力和弹簧片的回复力相互作用，分别使挡片或微反射镜移动，从而实现了光可调衰减。

### 1.3 光无源器件发展现状

光无源器件未来技术将微机械电子系统(MEMS)与光器件融合于一体，朝着微型化，智能化，低成本化方向发展。但是，基于硅刻蚀技术发展起来的 MEMS 光器件也有很多让人置疑的缺点。这种技术工艺流程主要包括氧化，光刻，腐蚀，光刻，溅射等。通常一个器件的制作成功要经历 50 多层掩膜及刻蚀过程，其间工艺过程要求极高，定位精度也不易于控制，从而也导致了成品率低，成本拉高。正是因为这些不稳定因素导致了率先将 MEMS 技术商用化的美国著名公司 OMM 在 2003 年 3 月因缺少资金投入迅速倒闭。而光无源器件业内排名第一的美国公司 DiCon Fiberoptics Inc 经过不懈努力在 2004 年 2 月正式发布基于 3D MEMS 技术的 1×8 光开关如图 1.14 所示。



Fig.1.14 3D MEMS 1×8 optical switch

光无源器件业经历 2002 年的洗礼——出货量仅为 2000 年的五分之一后，笔者认为在保证性能稳定的前提下如何进一步减少光通信器件制作成本，降低其结构、工艺的复杂性，及提高成品率将成为光无源器件市场化战略的关键。硅基 MEMS 光器件实现技术已经相当成熟，除了高投入低产出的巨大缺点外，还缺乏创新。因而，笔者着重于利用非硅基微加工技术，结合 MEMS 光器件技术实现特点和传统机械的技术优势对光开关及光衰减器进行研究，先后设计，研制与分析了一种光纤直接耦合微加工型光开关，一种光纤直接耦合微加工型可调衰减器和一种亚毫秒光开关阵列。

## 第2章 光纤直接耦合器件初步设计

本文所述的前两种新型光开关和可调光衰减器均采用了光纤直接耦合原理，避免使用光纤准直器，微反射镜等光学器件所带来的插入损耗（0.4~0.8dB），降低了成本，简化了器件结构，但也需要分析两个重要的问题——光纤直接耦合的回波损耗和插入损耗。

### 2.1 回波损耗

由于回返光对通信系统的影响是巨大的，它会引起激光器相对强度噪声、非线性啁啾及激射漂移，使通信系统性能恶化。在光器件参数中影响系统性能的一个重要指标是回波损耗（Return Loss）。光开关及可调光衰减器中的回波损耗是指器件中光反射功率  $P_{echo}$  与输入功率  $P_{in}$  的比值，在通信技术中我们通常用分贝（dB）来测量它：

$$RL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{echo}}{P_{in}}$$

高性能的光开关及可调光衰减器的回波损耗要小于-40 dB，而引起回波损耗的主要因素可分为第一级反射影响和第二级反射影响。

#### 2.1.1 第一级反射

第一级反射影响是由于输入光纤耦合端面与空气介质折射率失配导致一部分光信号沿输入路径反射回去的。根据在单模光纤中传输的光线入射到纤芯与空气界面时，入射角度很小，可近似按正入射处理，则菲涅耳公式可知功率反射系数  $R$  可表示为：

$$R = \left( \frac{n - n_0}{n + n_0} \right)^2$$

其中  $n$  为光纤纤芯折射率， $n_0$  为空气折射率；这样由此产生的回波损耗  $RL_1$  为：

$$RL_1 = 10 \log_{10} \left( \frac{n - n_0}{n + n_0} \right)^2$$

由此可知光无源器件回波损耗大小取决于折射率失配程度，失配越严重，回波损耗越低，回程光也就越大。

### 2.1.2 第二级反射

输入光纤透射出来的传导光经过空气隙后入射到输出光纤，在输出光纤耦合端面上也将发生菲涅耳反射。反射光透过输入光纤，将沿输入路径反射回去。用公式表达则为：

$$P_r = \eta^2 T^2 R P_i + R P_i$$

式中  $P_r$  为沿输入路径反射的光功率， $P_i$  为输入光功率， $\eta$  为一次经过空气隙的光衰减系数， $T$  为界面透射系数， $R$  为界面反射系数。由此可得总回波损耗  $RL$  为：

$$RL = 10 \log_{10} R [1 + \eta^2 (1 - R)^2]$$

又  $RL = RL_1 + RL_2$ ， $RL_2$  为第二级反射引起的回波损耗，因而

$$RL_2 = 10 \log_{10} [1 + \eta^2 (1 - R)^2]$$

由此可见第二级反射引起的回程光大小与空气隙长度有关，空气隙长度越长， $\eta$  衰减系数就越大，第二级反射对回波损耗影响就越小。

根据实际使用的单模光纤纤芯折射率  $n_1 = 1.4692$ ，可以得出  $RL_1$  为  $-14.424\text{dB}$ ，由此可以得出  $RL < -14.424\text{dB}$ ，其中第二级反射也起了一定影响。在器件设计过程中不能简单的增大耦合光纤空气间隙来减小回波损耗。其实，空气隙增长对输入输出光纤耦合效率和器件插入损耗影响将更大。通常通过对光纤镀足够的抗反射膜和恰当的抛光及装配工艺，整个器件回波损耗可小于  $-50\text{dB}$ 。

## 2.2 插入损耗

### 2.2.1 插入损耗产生及避免方法

插入损耗 (Insertion Loss) 是指器件中光输出功率  $P_{out}$  与输入功率  $P_{in}$  的比值，它也是衡量光无源器件的最重要技术指标之一。在通信技术中我们通常用分贝 (dB) 来测量它：

$$IL(\text{dB}) = -10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

器件中插入损耗产生的主要因素可分为三种：①光纤固有传输损耗②菲涅耳

反射损耗和③ 光纤与光纤间的模场失配损耗。

光纤固有传输损耗是光纤链路传递信号本身带来的衰减。损耗的大小和光纤的技术参数如光纤的数值孔径，光纤的材质和纤芯包层的同心度等有关，也和单模或多模光纤的选取有关。多模光纤在传输信号过程中将引入模间色散，而单模光纤正好避免了这一点。因此为了尽可能的减少光纤固有传输损耗，本文的光开关和 VOA 研制过程中所采用的光纤都是高质量单模光纤。

其次，光纤耦合时一部分光线将在耦合端发生偏折或散射。这个现象也就是菲涅耳反射损耗。为了降低这种损耗，光纤耦合端面除了保证垂直于光纤轴平面外还可以采用镀增透膜，加匹配液等方法。

第三种损耗是光纤直接耦合器件插入损耗产生的主要因素。而造成模场失配损耗的主要原因是机械对准误差——横向误差，纵向误差，角度误差（如图 2.1 所示）。在单模光纤直接耦合器件设计过程中，我们首先应该避免输入输出光纤规格不同所引起的模场失配原因。进一步考虑到单模光纤纤径只有 125 $\mu\text{m}$ ，纤芯

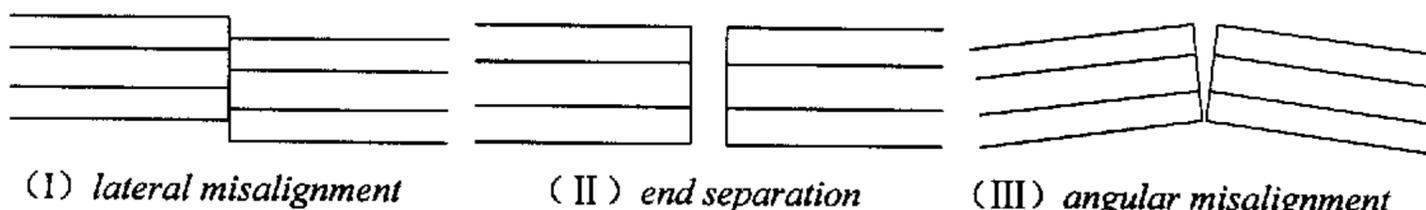


Fig.2.1 Direct-coupled fibers

则不到 10 $\mu\text{m}$ 。这些都对如何对准和置放输入输出光纤提出了很高要求。因此我们在保证加工精度基础上，置放光纤的凹槽设计成 V 型将更稳定有效。

## 2.2.2 光纤直接耦合原理及插入损耗的计算

由两光纤中模场分布的重叠积分可以计算出耦合效率  $\eta_c$ ，

$$\eta_c = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} E_{in} E_{out} r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} |E_{out}|^2 r dr * \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} |E_{in}|^2 r dr} \quad (2-1)$$

式中， $E_{in}$  和  $E_{out}$  分别是入射光纤和出射光纤中的电场强度分布，基于电磁场理论可推得的模场可近似为高斯分布。通常光纤出射处的模场为圆形，其横向场分布可表示为：

$$E(r) = \frac{2}{\omega_0} \exp(-r^2/\omega_0^2)$$

其中  $\omega_0$  为光纤中的模半径。

基于单模光纤模场的高斯光束模型, Nemota 和 Makimoto 导出了单模阶跃型光纤的耦合损耗计算公式<sup>[9]</sup> (用分贝表示), 其中考虑了两根单模光纤有不同的模场直径 (这是一个固有的因素), 同时还有横向、纵向角度偏差和反射 (这些都是外在因素) 等因素, 即:

$$L_{SM:ff} = -10 \log \left[ \frac{16n_1^2 n_3^2}{(n_1 + n_3)^4} \frac{4\sigma}{q} \exp\left(-\frac{\rho\mu}{q}\right) \right] \quad (2-2)$$

可得机械对准误差主要计算公式:

$$L_s = -10 \log \frac{64n_1^2 n_3^2}{(n_1 + n_3)^4 (G^2 + 4)} \quad (2-3)$$

$$L_d = -10 \log \left\{ \exp \left[ -\left( \frac{d}{\omega} \right)^2 \right] \right\} \quad (2-4)$$

$$L_\theta = -10 \log \left\{ \exp \left[ -\left( \frac{\pi n_2 \omega \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \right\} \quad (2-5)$$

其中,  $\rho = (k\omega_1)^2$ ,  $q = G^2 + (\sigma + 1)^2$ ,  $\sigma = (\omega_2/\omega_1)^2$ ,  $k = 2\pi n_3/\lambda$ ,  $G = \frac{s}{k\omega_1^2}$ ,

$\mu = (\sigma + 1)F^2 + 2\sigma FG \sin \theta + \sigma(G^2 + \sigma + 1)\sin^2 \theta$ ,  $F = \frac{d}{k\omega_1^2}$

式中:  $L_s, L_d, L_\theta$  分别表示光纤端面纵向偏移为  $s$ 、横向错位为  $d$ 、角度对准误差为  $\theta$  的损耗,  $n_1$  为光纤纤芯的折射率,  $n_3$  为光纤端面间介质的折射率,  $\lambda$  为光源的波长,  $\omega_1$  为发送光纤的模场半径,  $\omega_2$  为接收光纤的模场半径。

根据公式 (2-3)、(2-4)、(2-5) 及实验所用单模光纤系列技术参数如下: 工作波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ; 纤芯折射率  $n_1 = 1.4692$ ; 模场半径  $\omega = 4.65 \mu\text{m}$ ; 包层折射率  $n_2 = 1.4634$ ; 光纤端面间空气折射率  $n_3 = 1.0$  得到如图 2.2、2.3、2.4 所示分别为光纤端面纵向偏移  $s$ 、横向错位  $d$ 、角度对准误差  $\theta$  与损耗之间的关系, 从图

中可以看出光纤耦合损耗受光纤端面横向错位和角度对准误差影响甚于受纵向偏移的影响，而且随着横向错位，纵向偏移和角度对准误差增大，光纤耦合损耗增幅也趋于增大。

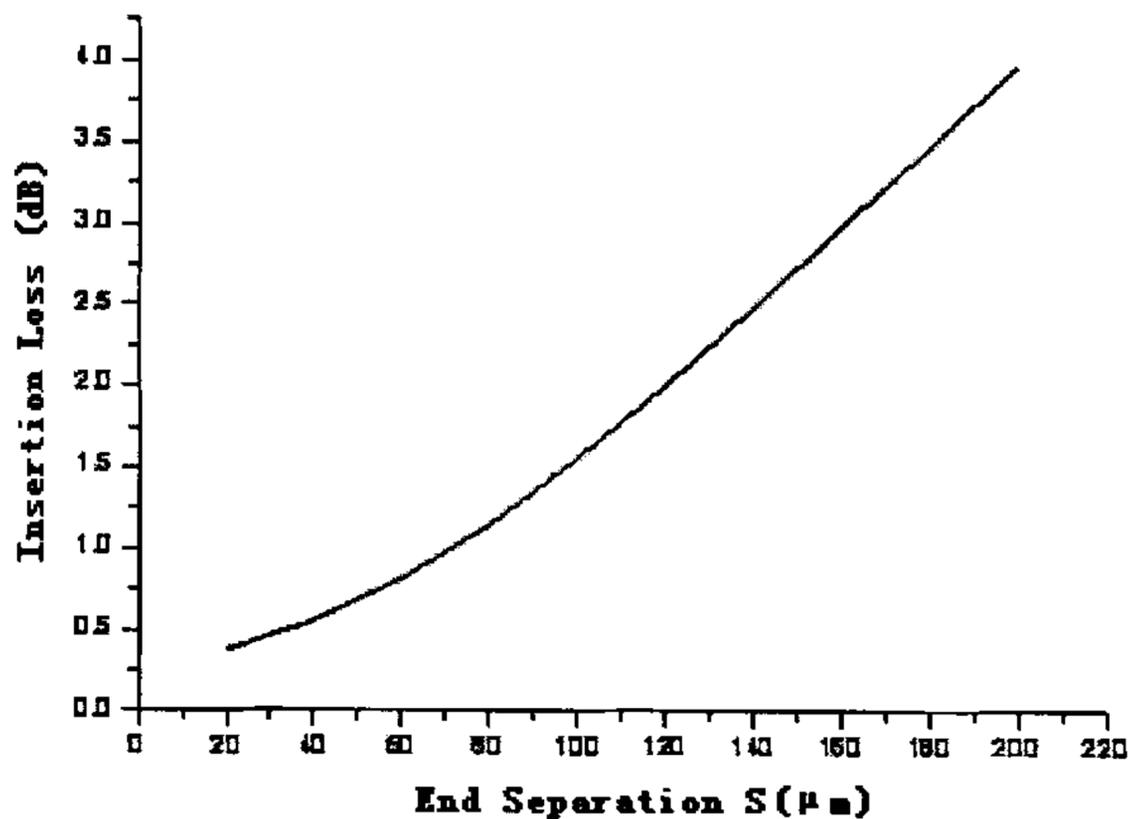


Fig.2.2 Insertion loss as a function of end separation

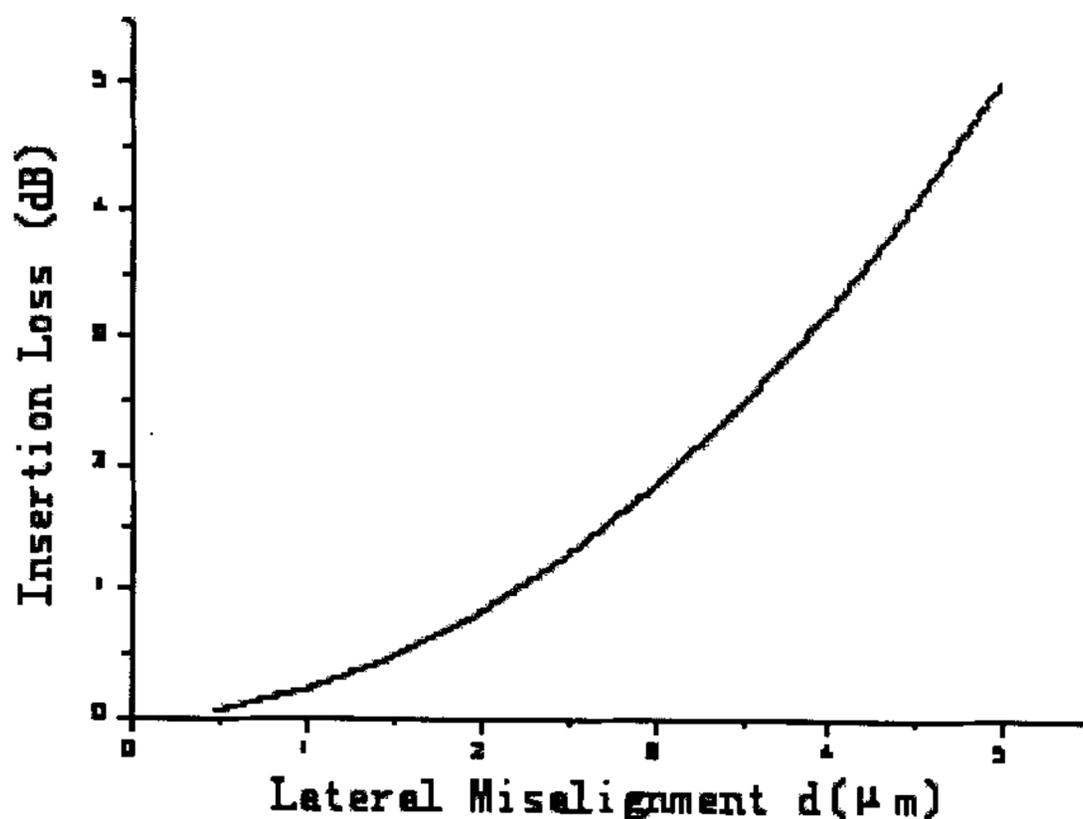


Fig.2.3 Insertion loss as a function of lateral misalignment

进一步可以得出，在没有上述第一种和第二种损耗的情况下，光纤横向错位  $d \leq 2\mu\text{m}$ ，纵向偏移  $s \leq 80\mu\text{m}$ ，角度误差  $\theta \leq 2^\circ$ ，器件插入损耗才可能小于 1dB。在

实验中，笔者发现在利用 EDM 技术加工的 V 型槽内直接对准两根裸光纤，插入损耗可低于 0.5dB。这一重大成功证明了利用微加工技术制作光纤直接耦合光开关及可调光衰减器的可行性。

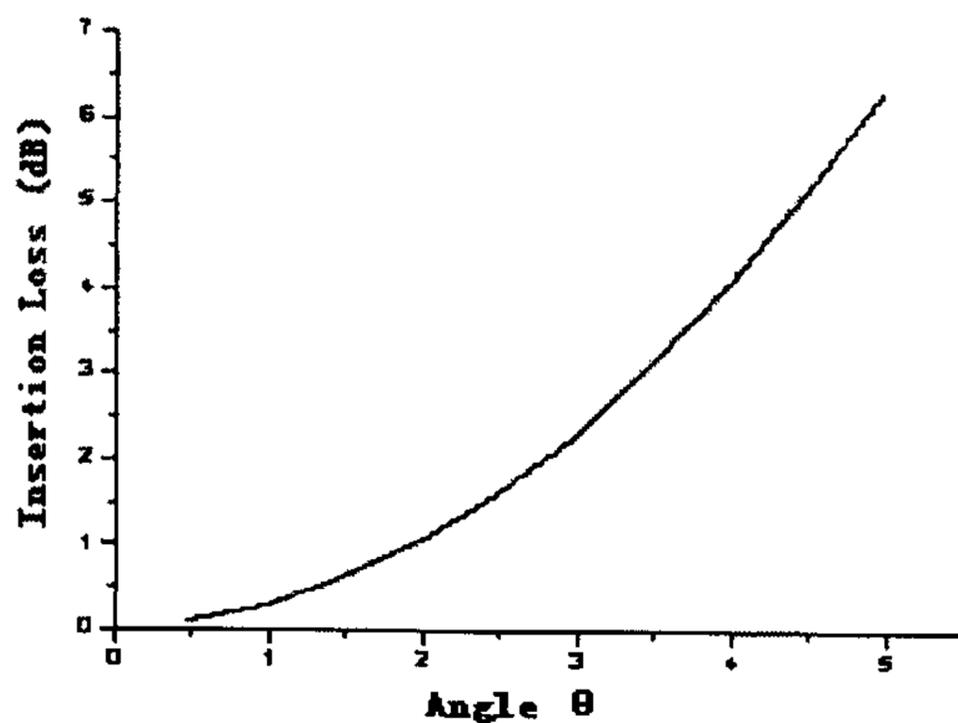


Fig.2.4 Insertion loss as a function of angular misalignment

### 2.3 光纤耦合精密校准装置

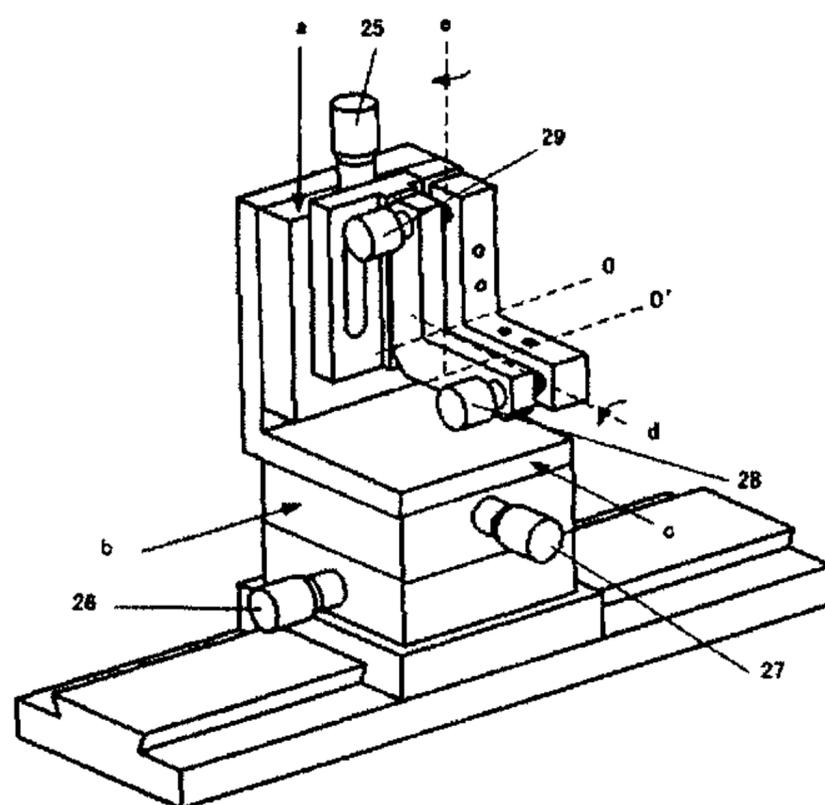


Fig.2.5 Traditional optical adjustment

在微加工型光开关及可调光衰减器制作过程中光纤校准是非常重要的，将直接影响到器件的性能指标。传统的五维光学调节架（图 2.5 参照）进行光学调节时，放置在 V 型槽内的输入光纤沿  $o'$  轴向放置。调节架一共有 5 个调节旋钮，其中 25、26、27 用于实现沿 a、b、c 三个方向上的平移调节。28、29 用于实现绕 d、e 轴向摆动的调节。注意到 28、29 调节实现的转动轴  $o$  与耦合光纤中心轴  $o'$  有一段距离  $oo'$ （图 2.5 参照），当调节 28 或者 29 旋钮时，将引导耦合光纤出射端点的大幅摆动。而光纤准直器的插入损耗对位移和角度的偏差敏感度并不一致，角度偏差对插入损耗的影响远远大于位移偏差对插入损耗的影响。因此，五维光学调节架应用于光纤直接耦合的对准调节难度很大。

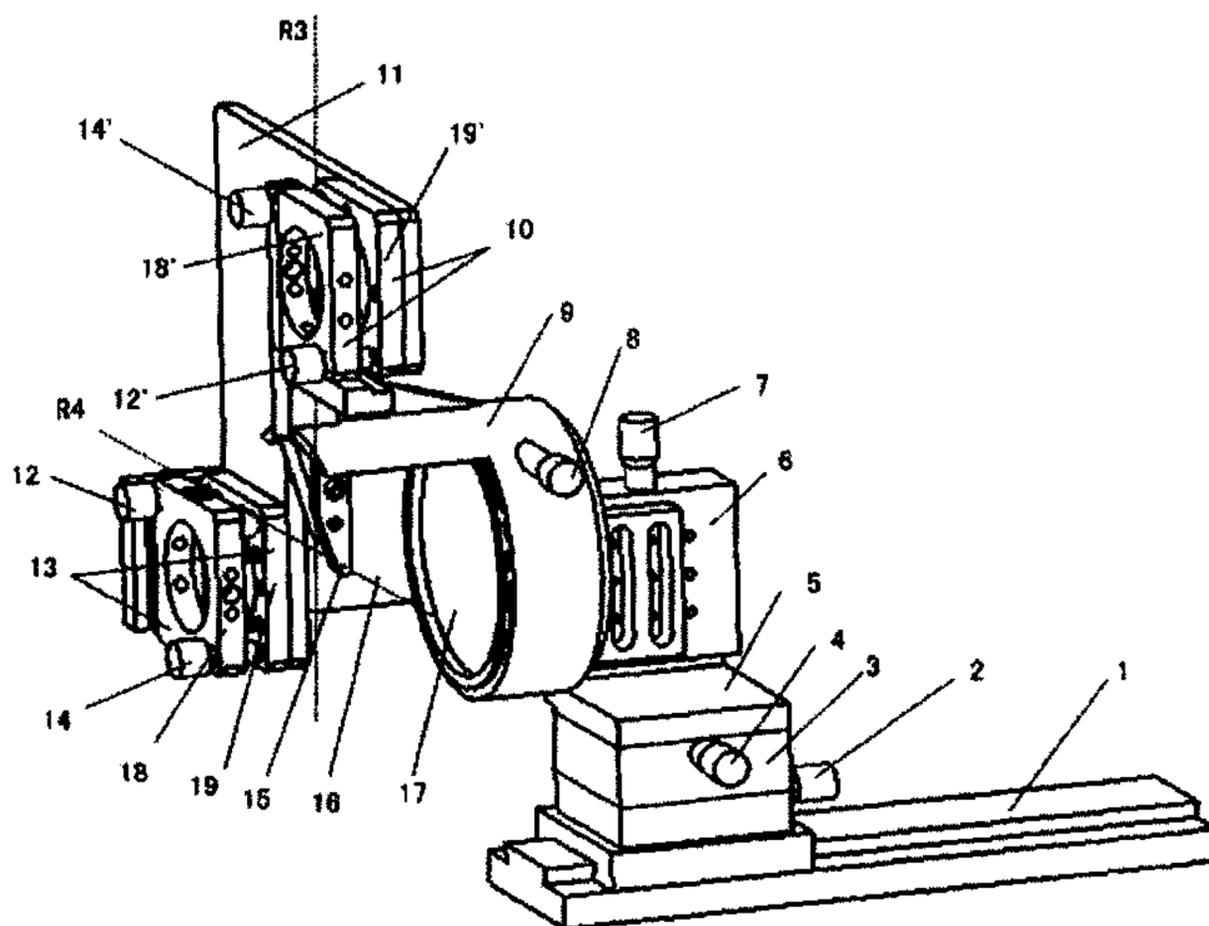


Fig.2.6 New optical adjustment

因而，笔者使用了一种全新的光纤耦合阵列专用对准装置来校准光路。如图 2.6 所示。进行调节操作时，放置在 V 型槽内的输入光纤被夹具 15 夹紧，使得  $A'$  的出射端点处于 R3 和 R4 两轴的交点处。其中与夹具固定在一起的小套筒 17 与大套筒 9 同心安装，通过调节旋钮 6，使得小套筒 17 绕轴心旋转，由于夹具 15 的夹紧位置通过套筒中心，这样即实现了准直器绕轴转动调节的自由度。

上述套筒及夹具组成的旋转调节模块被固定在摆动调节模块 10 的活动块 18' 上, 调节旋钮 12', 改变与旋钮 12' 一体的顶针长度, 使得活动块绕由钢珠和顶针组成的 R3 轴转动, 即实现了准直器绕其出射端点在水平平面上的摆动自由度。旋转调节模块及摆动调节模块通过连接板与摆动调节模块 13 的活动板 19 固定, 调节旋钮 14, 改变与旋钮 14 一体的顶针长度, 使得活动块绕由钢珠和顶针组成的 R4 轴转动, 即实现了准直器绕其出射端点在竖直平面上的摆动自由度。上述的三个调节模块通过连接板 16 与平移调节架的竖直平移滑块 6 固定, 通过调节旋钮 7、4、2 分别使滑块 6、5 和 3 沿所在平面滑动, 即可分别实现了输入光纤在上下, 左右和前后三个方向上的平移自由度。整个调节装置通过一个梯形导轨被安放在滑动座 1 上, 通过在导轨上的滑动可以改变调节装置的初始位置。

因而, 分别调节 8、12'、14、7、4 和 2 六个旋钮, 可实现一个沿准直器光轴方向转动, 两个正交方向上绕其出射端点的摆动和三个相互正交的方向上的平移共六个分解的调节自由度。在实际的光纤直接耦合器件的光纤位置校准与封装过程中, 我们实现了最小插入损耗可达到 0.8dB, 而带有准直器的光纤校准中, 最小插入损耗更是达到了 0.6dB。

## 第3章 光纤直接耦合微加工型 $1 \times 2$ 光开关

### 3.1 技术背景

随着光纤通信技术迅猛发展,新型光开关成品不断出现,其中高端口产品中以 MEMS (micro-electro-mechanical systems) 光开关最为成熟,而低端口以传统机械式为主。目前 MEMS 开关的实现大都是基于硅微加工技术,通常需使用数十层掩膜的刻蚀技术,工艺较复杂,成品率低,造价较高。而传统机械式具有可靠性好,通道隔离度高,低插入损耗等优点,但成本较高,且不能扩展为开关阵列。

最早基于 MEMS 硅刻蚀技术制作的一种光纤直接耦合光开关原理参照<sup>[10]</sup>如图 3.1 运用了硅材料的热效应。当以镍为主的发热器 1 通电发热,放置输入光纤的硅夹具受热膨胀发生横向微位移,使得输入光纤和另一个输出光纤耦合;反之,发热器 2 通电发热,将使硅夹具反方向横向微位移,从而使输入光纤回到原来位置。此开关尽管在结构上有独到之处,但是由于采用了热驱动,因此开关时间很慢,达到 100ms;其插入损耗也不低,在 2.5dB 左右;信道串扰则达到 -60dB。

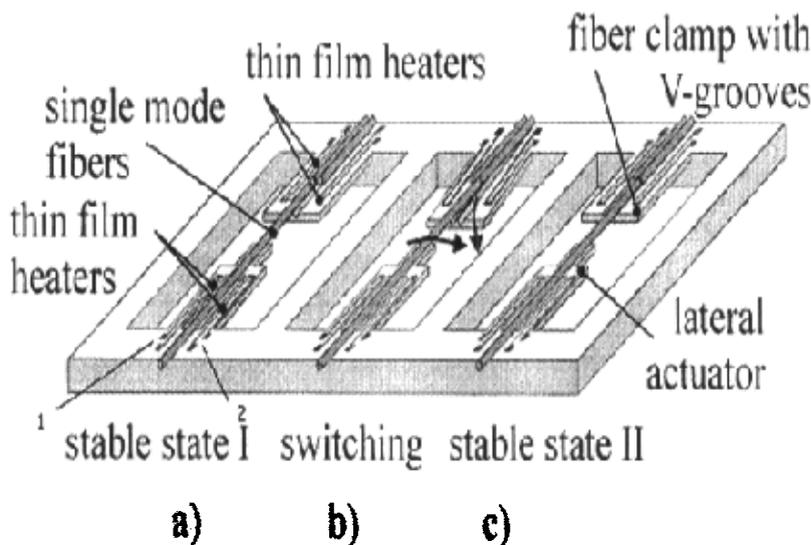


Fig.3.1  $1 \times 2$  direct-coupled MEMS switch

而本章介绍的一种新型铝基底  $1 \times 2$  微加工型光开关。其开关时间小于 2ms,

插入损耗最小可达 0.9dB，回波损耗为-47dB。与现有各类（使用光纤准直器的非直接耦合）的光开关相比，突出优势在于：①成本低，没有光纤准直器，微反射镜等光学器件；②工作行程大，驱动电压小（<5V），能耗低；③工艺简单，设计新颖，在非硅基底上采用 EDM 技术和 CNC 雕刻技术，摆脱了硅的复杂微加工工艺，成品率高，能够实现大批量生产。

## 3.2 器件设计与制作

器件最初设计结构如图 3.2 所示，结合了 MEMS 型 1×2 单模光开关光路切换实现特点和微加工的技术优势，将尺寸大小定制为 31×11×5 mm<sup>3</sup>，器件主体形状选用 CNC（Computerized Numerical Control）雕刻技术。

CNC 雕刻是一种极具吸引力的微加工技术。这种技术集数控技术（NC 技术）、精密制造技术、计算机辅助设计技术（CAD 技术）、计算机辅助制造技术（CAM 技术）于一体，代表了最先进的雕刻技术。CNC 雕刻系统从功能上可以分为两个相对独立的部分组成：①CAD/CAM 雕刻软件。这个软件用于雕刻产品图文设计、形体造型以及计算雕刻产品加工刀具路径数据，输出可由 CNC 雕刻机识别、解释并最终完成产品雕刻加工的 NC 代码。②CNC 雕刻设备，也就是通常所说的精雕机，是 CNC 雕刻具体实现部分，可以解释由雕刻 CAD/CAM 软件输出的 NC 加工代码，执行微加工代码所描述的各种复杂加工动作，完成雕刻产品加工。

其专业优势具体表现为：①运用小刀具进行精细雕刻。CNC 雕刻对象往往图案复杂、细节丰富造型独特、成品精细，如果要实现这样的加工要求，则必须使用小尺寸刀具为基本加工刀具，很多情况下，雕刻刀具刀尖直径不足 0.5 mm 甚至到 0.1 mm。②使用高速精密主轴电机。在 CNC 雕刻过程中，为保证刀具切削线速度和切削能力刀具旋转速度可达 24000 转/分钟且旋转精度在微米量级。③机床结构轻型精密。为了适应在模具加工领域的应用，在导轨、防护、冷却等多个部件和结构上均进行了特殊设计和处理。④控制系统高效平稳。精雕控制系统采用了先进的微步细分控制技术和高速驱动控制算法，机床运动高效平稳，分辨率可达 0.003 mm/步。此外，部分机型使用了伺服驱动单元，机床运动各项指标又有大幅度提高。⑤控制软件功能强大。其控制软件工作界面灵活便捷，功能

丰富,实现了多项独具特色的雕刻管理功能,如选择雕刻功能、雕刻时间计算功能等。适合单件或批量产品雕刻。⑥以完整精雕雕刻系统作为依托。根据小刀具雕刻基本特点,结合当前制造业先进的高速铣削理念,提出小刀具高速雕刻的思想,在实际加工中表现为“高转速、快进给、小进给、匀切削、稳切削、高效率”。

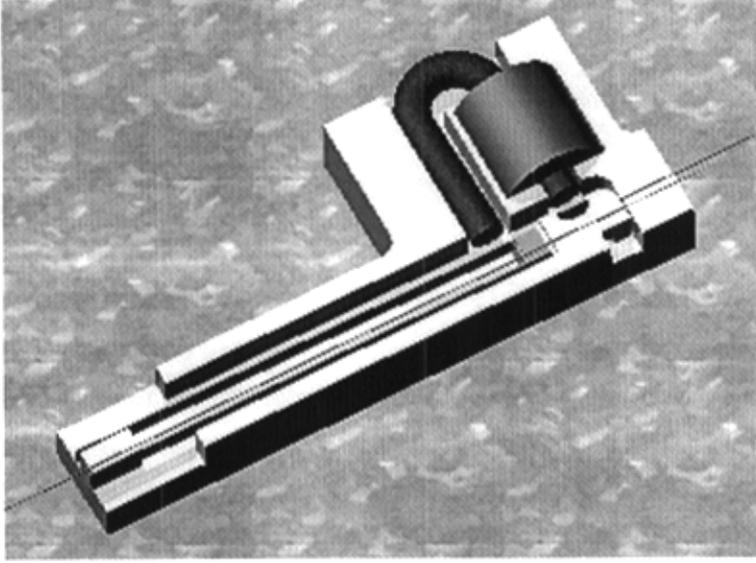
器件中的铁芯采用了“U”形设计,用以减少漏磁。此外铁芯和衔铁都是由软磁材质构成,所以磁滞现象可以忽略。而铝质小滑块底面内凹设计和双簧片设计则分别为了减少摩擦和增加滑块移动的稳定性。进一步为了减少机械对准误差,用于对准的光纤采用超声波切割机对光纤纤芯进行切割,并用光纤熔接机观察两对准光纤端面以保证其平整。

放置光纤的小槽则使用了高精度对准的“V”型槽,其雕刻过程采用了EDM(electrical discharge machining)技术。在上一章提到的实验“在利用EDM技术加工的V型槽内直接对准两根裸光纤,插入损耗可低于0.6dB。”说明将EDM技术用于光纤直接耦合光开关高精度加工是切实可行的。

EDM是除CNC雕刻技术外另一种极具吸引力的微加工技术,它是二十世纪四十年代由前苏联科学家拉扎连柯根据有害的电腐蚀现象发明的。这是一种直接利用电能和热能进行加工的新工艺,与金属切削加工的原理完全不同。加工过程中工具与工件不接触,而是靠工具和工件之间在放电间隙约为0.01mm下,不断的脉冲性火花放电,产生局部、瞬时高温把金属蚀除掉。由于放电过程中可见到火花,故称之为电火花加工。它可用于任何电导材料的加工,包括钢铁、石墨、硅和磁性材料甚至永磁体。作为硅蚀刻工艺以外的一种竞争性技术,它通过使用成型模具,可批量生产各种微型结构的加工件,从而大幅度降低生产成本,提高成品率。

EDM系统结构中主机主轴采用了高精度的直线滚动导轨,采用先进的直流伺服电机驱动给加工,噪音小、精度高、使用寿命长。主机X、Y轴采用先进的贴塑导轨,进给采用高精度滚珠丝杆,即使长时间工作于荷重极限,也能保持极低轨道面磨损,维持最佳精度且移动轻便。配用了三轴光栅尺具有深度控制、上下合模加工、自动分中、加工自由移动复位等保证精度达微米量级,提高了加工精度和竞争。其具体特点包括:①操作简单。只要输入各级加工电流值和加工深度,其余均由电脑自动完成设置。②程序修改容易。在加工过程中可以任意修改。③积炭自动检测功能。以人工智能方式调整,以获得最佳工作状态和效率。④加

工速度快。由电脑监控实际加工状况，自动调整效率。⑤镜面修细快。采用石英振荡方式，振荡频率稳定，加工面均匀光滑。⑥具有二段排渣功能，放电时机头快速下降，当接近工件时，自动缓慢，可以防止损坏模具，排渣时，机头缓慢离开模具，然后快速回升，有利于快速排渣。二段排渣距离可以随时设定。⑦加工放电的频率设计为  $1\mu\text{s}\sim 999\mu\text{s}$ 。⑧具有断电记忆能力，停电时加工参数可以保存 6 个月以上。



**Fig.3.2** *1×2 micromachining based direct-coupled optical switch*

此光开关结构如图 3.2 所示，当小线圈通电产生磁场，镶嵌在小滑块中间位置的衔铁就受到铁芯吸引，带动滑块移动，受平行四边型柔性框架（Flexure）限制和双挡壁定位，确保活动光纤角度不变，从而使输入光纤对准其中一根固定光纤，实现光路转换。相反，线圈断电时，小滑块则在双簧片回复力作用下回移，使输入光纤对准初始输出光纤。此器件制作关键在于：①滑块与铁芯适当距离内移动，这点需要考虑到 V 型槽加工深度和相邻 V 型槽之间的间距。②滑块能自如地被电磁驱动和弹簧回复，保证电磁驱动力  $F_1 > \text{弹簧回复力 } F_2 \gg \text{滑块与基板摩擦力 } f$ 。③为减少器件的插入损耗根据光纤直接耦合原理，必须保证光纤横向错位，纵向偏移，角度误差在要求范围之内。因此，用于固定光纤的 V 型槽的加工精度和对准精度要求极高。

### 3.3 器件理论分析

#### 3.3.1 驱动系统电磁场分析

为了设计得到 5 伏驱动电压的光纤直接耦合光开关, 必须研究低电压下衔铁不同位置受电磁力情况。我们使用 ANSYS 软件对线圈和衔铁区域进行了有限元分析 (FEA)。ANSYS 磁场分析的有限元公式是由磁场的 Maxwell 方程组导出, 将标量势、矢量势或边界通量引入 Maxwell 方程组中并考虑其电磁性质关系, 得出有限元分析的方程组<sup>[11]</sup>。其具体分析过程如下:

- ① 建立物理环境: 定义分析类型为基于节点的磁场分析; 绘制三维铁芯、衔铁、线圈模型, 由于不封闭的驱动系统带有空气隙的磁路, 所以我们对一定范围内的空气也进行了建模; 并在磁性区域和空气区域设置单元类型为 SOLID96, 对于电流激励区域, 选择单元类型为 SOURC36。
- ② 指定材料特性: 在这个磁场分析中, 有以下材料区域: 空气, 磁透性材料, 电流传导区域。每种类型的材料区域都有特定的材料特性空气区域相对磁导率为 1.0; 由于导磁材料软铁为非线性材料, 因此在 ANSYS 材料定义中输入了 B-H 曲线如图 3.3 所示。

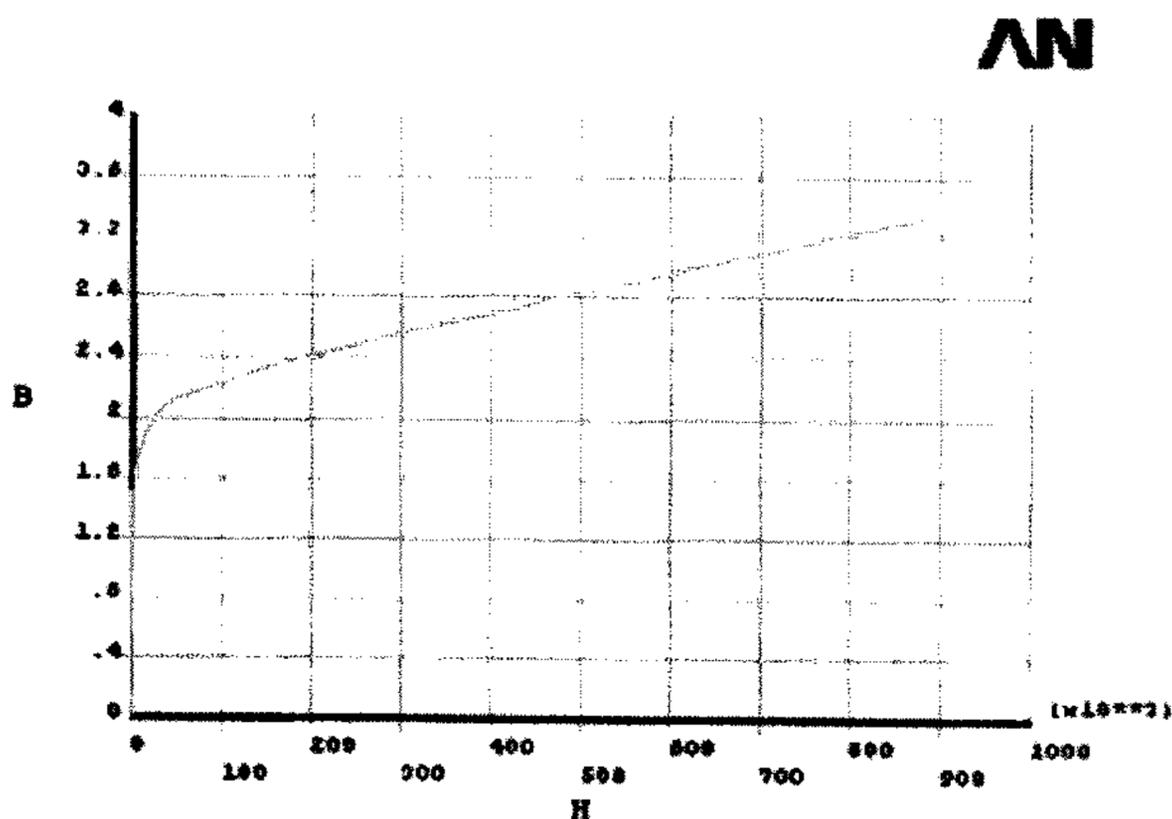


Fig.3.3 B as a function of H

### 3.3 器件理论分析

#### 3.3.1 驱动系统电磁场分析

为了设计得到 5 伏驱动电压的光纤直接耦合光开关, 必须研究低电压下衔铁不同位置受电磁力情况。我们使用 ANSYS 软件对线圈和衔铁区域进行了有限元分析 (FEA)。ANSYS 磁场分析的有限元公式是由磁场的 Maxwell 方程组导出, 将标量势、矢量势或边界通量引入 Maxwell 方程组中并考虑其电磁性质关系, 得出有限元分析的方程组<sup>[11]</sup>。其具体分析过程如下:

- ① 建立物理环境: 定义分析类型为基于节点的磁场分析; 绘制三维铁芯、衔铁、线圈模型, 由于不封闭的驱动系统带有空气隙的磁路, 所以我们对一定范围内的空气也进行了建模; 并在磁性区域和空气区域设置单元类型为 SOLID96, 对于电流激励区域, 选择单元类型为 SOURC36。
- ② 指定材料特性: 在这个磁场分析中, 有以下材料区域: 空气, 磁透性材料, 电流传导区域。每种类型的材料区域都有特定的材料特性空气区域相对磁导率为 1.0; 由于导磁材料软铁为非线性材料, 因此在 ANSYS 材料定义中输入了 B-H 曲线如图 3.3 所示。

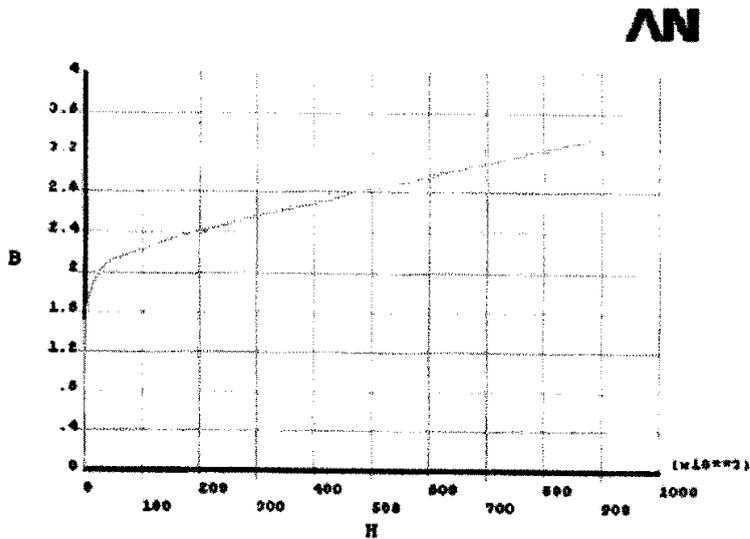


Fig.3.3 B as a function of H

- ③ 模型网格划分：如图 3.4 所示通过划分网格，实现连续体的离散化，将给定的物理系统分割为相应的有限单元系统。网格的大小、形状控制对于求解的准确程度至关重要。通常划分的区域越多，则解的精度越高，当然计算量也越大，计算时间也越长。划分单元的大小可以不同，视具体情况而定，在场分布比较密的区域，那么采用较小的单元以更多的单元划分密的区域。

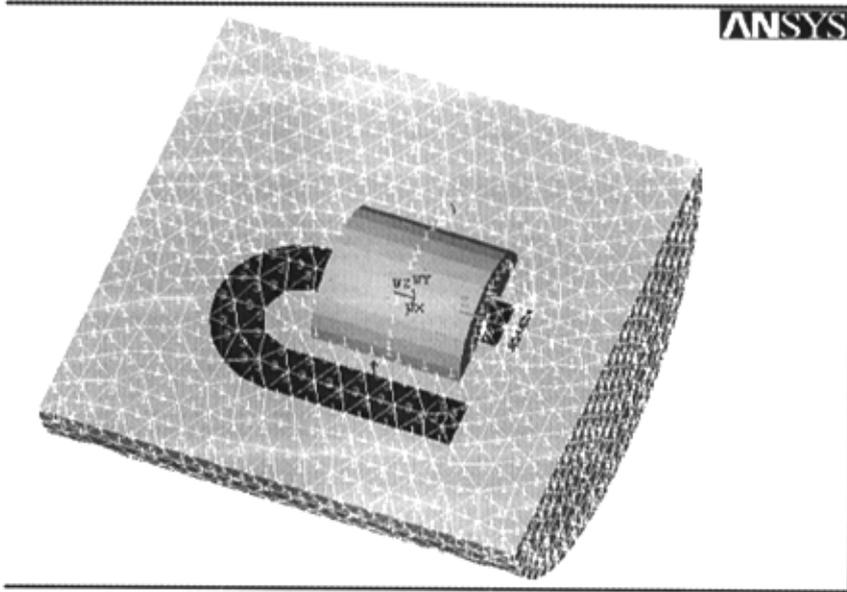


Fig.3.4 3D modeling and partition mesh

- ④ 施加磁矢量边界条件：加载磁力线平行边界条件使磁力线与导体表面平行；自动加载磁力线垂直边界条件；加载磁力线远场边界条件为零。
- ⑤ 施加磁动势边界条件：单连通区域的电磁驱动模型里，铁的磁导率接近于无穷，绝大部分的 MMF 降发生在铁心的空气间隔区，铁磁区磁动势( $MMF = \int Hdl$ )降几乎为零。因而对铁芯节点施加磁动势边界条件，即  $MAG=0$ 。
- ⑥ 施加载荷：向线圈施加源电流密度；对衔铁施加力标志，并加虚位移和 Maxwell 面标志，指定其为进行磁力计算的部分。
- ⑦ 模型求解：定义问题类型为静磁场求解，求解方法为差分势场法

(DSP)。DSP 是三种标量势场公式法之一，适用于铁磁性区域为单连通的模型。

- ⑧ 经过 ANSYS 计算，在 5 伏驱动电压下，衔铁和铁芯间隙为  $300\mu\text{m}$  时得出了图 3.5 所示 H 磁通量密度分布状况，由图可看出“U”形铁芯造成了一定的磁力线回路，减少了漏磁且靠近铁芯端，磁场驱动力越来越大。进一步，一半衔铁受到小线圈磁场作用力也可以计算出来，情况如表 3.1 所示，其中衔铁和铁芯垂直距离方向即 Z 方向，“arm”代表一半衔铁。

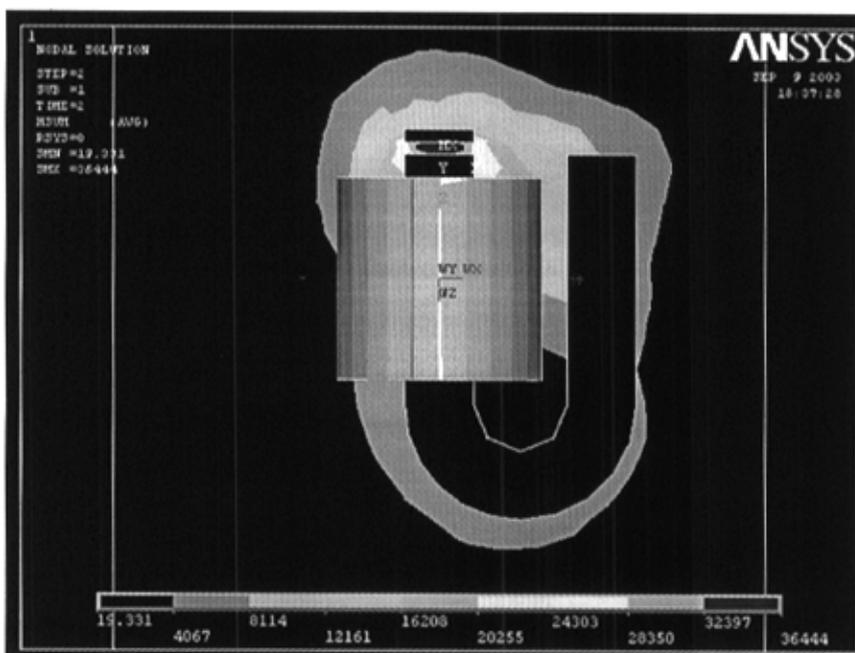


Fig3.5 3D static magnetic field flux intensity

表 3.1 The calculated result by ANSYS

SUMMARY OF FORCES BY VIRTUAL WORK			
	Load Step Number:	2.	
	Substep Number:	1.	
	Time:	0.2000E+01	
	Units of Force:	(N)	
Component	Force-X	Force-Y	Force-Z
arm	0.72705E-04	0.82232E-03	0.81301E-03

**SUMMARY OF FORCES BY MAXWELL STRESS TENSOR**

Units of Force: (N)

Component	Force-X	Force-Y	Force-Z
arm	0.88253E-05	-0.40908E-04	0.95192E-03

从中可以得出基于虚功法整个衔铁 Z 方向受力为 1.62602mN，基于 MAXWELL 法整个衔铁 Z 方向受力为 1.90384mN。进一步，我们计算了衔铁和铁芯不同间隙下的 Z 方向受力情况，如图 3.6 可以看出随着空气间隙缩小，电磁力增幅越来越大。

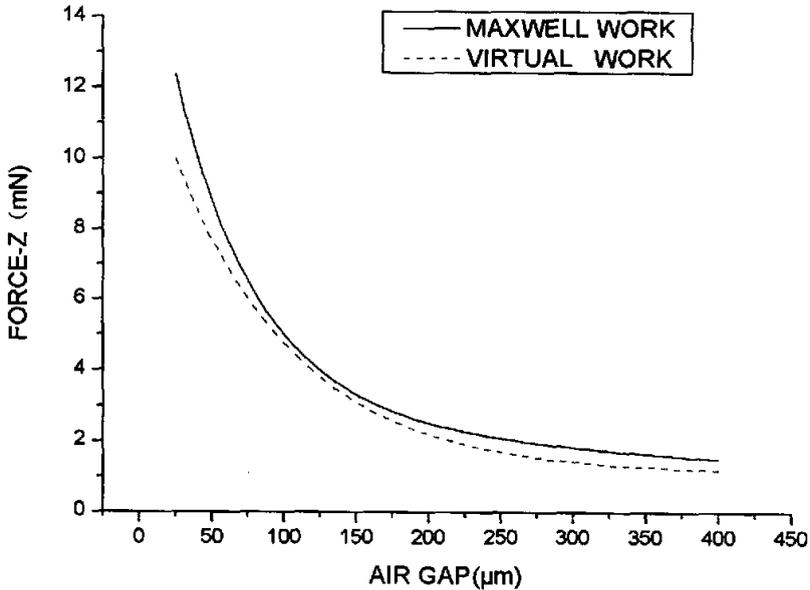


Fig.3.6 The attracting force exerted on flexure as a function of air gap

### 3.3.2 弹性框架性能分析

柔性框架双簧片是 0.1mm 厚度，弹性优良的不锈钢，采用 0.3mm 直径销钉固定在小滑块上。考虑到互相平行对称的弹簧悬臂长为 20mm，小滑块在 300 μm 以内的偏移。因此，将簧片简化为悬臂梁考虑，根据单个簧片末端的位移关于施加力大小和悬臂长度的函数：

$$y(L) = \frac{FL^3}{3EI} \quad (3-1)$$

其中  $L$  是簧片的长度,  $F$  是施加的力,  $I$  是梁横截面的转动惯量矩。对于我们用的不锈钢簧片, 弹性模量  $E$  为 73GPa, 又

$$I = ab^3/24 \quad (3-2)$$

其中  $a$  是簧片宽度,  $b$  是簧片厚度, 由(3-1)和(3-2)可得

$$F = \frac{ab^3E}{8L^3} y(L) \quad (3-3)$$

将数据代入(3-3)可求得双簧片产生 300 $\mu$ m 位移至少需要施加 0.684mN 的力。

研究表明,在 5V 电压下, 小线圈产生的电磁力足够使双簧片完成 300 $\mu$ m 位移。而实验中, 我们发现在电磁力作用下, 簧片位移在 1mm 左右也活动自如, 我们认为造成这一现象的重要原因在于, 随着簧片向铁芯靠拢, 其间隙减小, 电磁力急剧增加, 这样造成了簧片的工作行程增大。

### 3.4 性能测试



**Fig.3.7** A photo of the 1×2 fiber optic switch

在实验过程中, 我们发现图 3.1 器件在主体基板和滑块上加工 V 型槽并放置

光纤不易于校准光纤耦合,其插入损耗结果也不够理想,高达 1.8dB,因此根据上述理论分析和优化,对结构进行改进。在置放光纤位置激光点焊两个经过校准定位的高精度 V 型槽贴片,再固定光纤得到工作较为理想的  $1 \times 2$  光开关,如图 3.7 所示。

其中激光点焊技术与传统机械加工比较有以下优势:加工速度快;热变形及热影响区小(适合加工高熔点、高硬度、特种材料);可对零部件进行局部热处理;可对复杂形状零件、微小件加工和在真空中进行加工;加工无噪音、对环境无污染;与自控、计算机技术结合,易实现自动化;由于加工方法先进,可改进现有产品结构、材料。

进一步,笔者使用了 1310nm 波长的单模输入光源和信息产业部电子 41 研究所 AV6332 型回波损耗测试仪测量了图 3.7 器件的插入损耗和开关时间,结果得到插入损耗 0.9dB~1.1dB,回波损耗-47dB,开关时间小于 2ms。图 3.8 给出了开关响应时间测试结果。

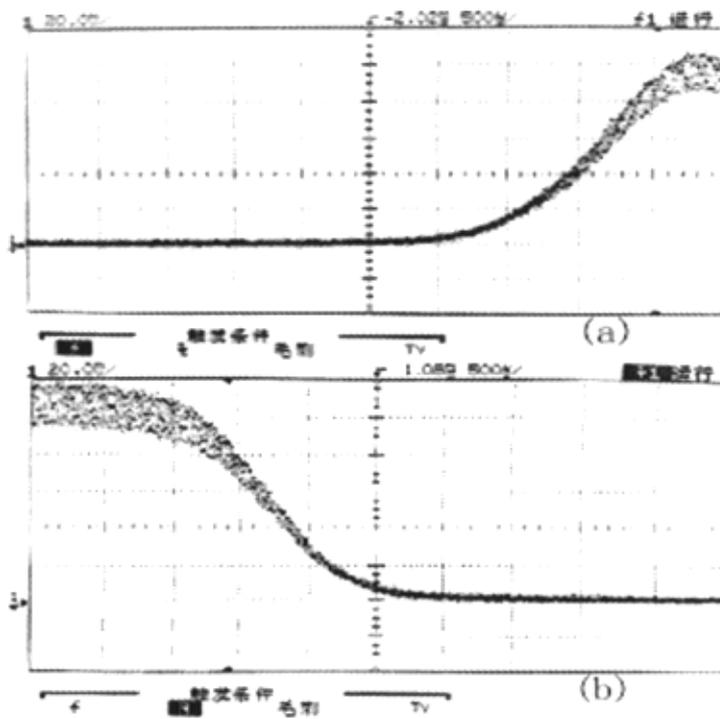


Fig3.8 Switching response of the  $1 \times 2$  optical Switch, (a) rising time (b) falling time

### 3.5 本章小结

新型  $1 \times 2$  光纤直接耦合微加工型光开关, 采用了 EDM 技术和 CNC 雕刻技术, 经理论分析和优化并对其性能进行了测试。结果表明, 该器件开关时间小于 2ms, 插入损耗为 0.9dB~1.1dB, 回波损耗为 -47dB。与国外采用热驱动原理的 MEMS 光纤直接耦合光开关相比, 尽管可扩展性不强, 但是成本低, 设计新颖, 工艺简单, 开关速度快, 通道隔离度高, 易于大批量生产, 插入损耗仍有降低到 0.9 dB 以下的潜力。

## 第4章 光纤直接耦合微加工型可调衰减器

### 4.1 技术背景

可调光衰减器 (Variable Optical Attenuator) 是光纤通信系统中重要的光无源器件。近几年, VOA 设计不断推陈出新, 实现方式各有所长, 其中 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 产品以小体积、低插损、高精度, 较好的稳定性等优点受到用户青睐, 但是 MEMS 技术复杂工艺, 低成品率和较高的成本直接影响了这种 VOA 普及。利用光纤直接耦合原理制作的 MEMS 型 VOA<sup>[12]</sup> 如图 4.1 所示。沿圆周放置的 SDAS (Scratch Drive Actuators) 受静电驱动使凸轮转动体 (Rotor) 顺时针转动, 从而导致输入光纤发生横向位移, 实现光衰减量可调变化。在这种结构中, 凸轮微发动机最大转速达 7.17rpm, 可控耦合效率为 12.5mdB/step。此器件之所以能达到如此高精度的衰减可调, 除了加工精度高外还有一个重要原因就是采用了不常见的特种光纤 (直径  $50\mu\text{m}$ ) 做为输入输出光纤。此外, 凸轮微发动机的硅刻蚀过程非常繁复, 有数十道工序参照图 4.2, 成品率高低可想而知。

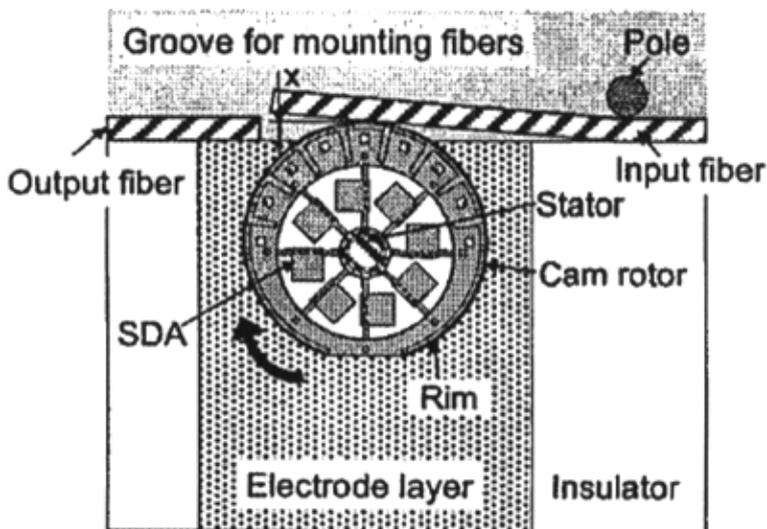


Fig.4.1 Principle of direct-coupled MEMS VOA

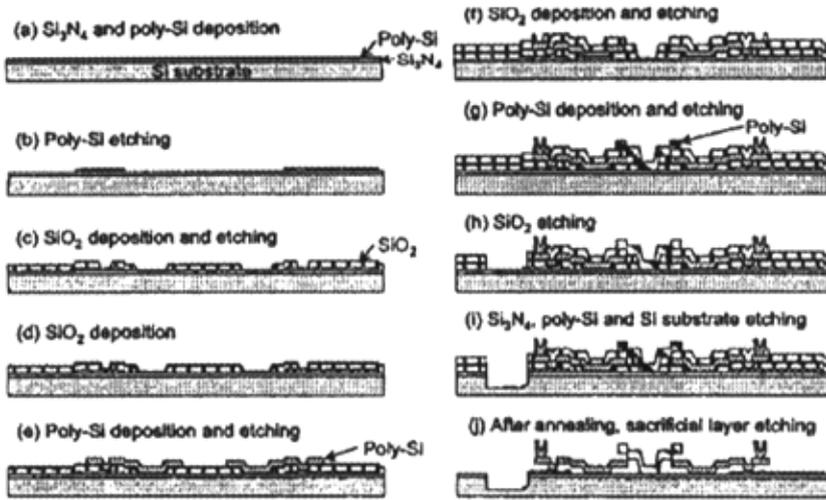


Fig.4.2 Process flow of the VOA

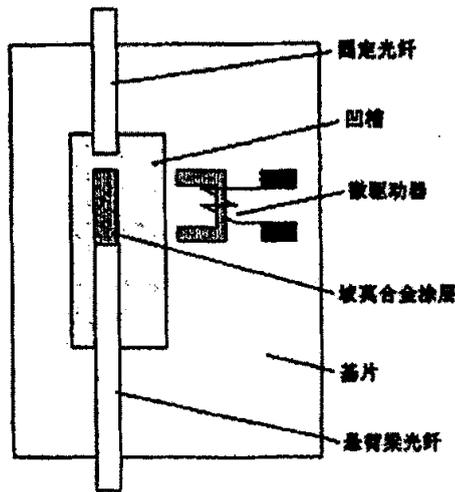


Fig.4.3 Principle of another direct-coupled VOA

国内探讨利用光纤直接耦合原理制作微加工型可调衰减器方兴未艾。如图 4.3 所示为一种尚在理论研究中的光纤横向偏移型 VOA<sup>[13]</sup>。该器件理想工作时，悬臂梁光纤弹性回复力与微磁驱动器对光纤端面坡莫合金涂层磁性吸引力共同作用于活动光纤，使其发生横向偏移，从而实现光功率可调衰减。笔者认为这种微加工型 VOA 结构较为新颖，但是仍存在两大问题难以解决：①光纤材质、外

形、内部结构的确立是以传输光信号为目的，并非弹性回复，将大致圆柱体外形的光纤用作专业弹片能否保证稳定的弹性有待商榷。②微磁驱动器对呈圆柱体分布的合金涂层磁性吸引力难以驱动悬臂梁光纤——光纤弹性模量较大，达到 72000Gpa。

因而，笔者结合国内外同类产品技术经验，基于 CNC 高精度雕刻和激光点焊技术研制了一种新型光纤直接耦合的 VOA。其工作范围为 0~65dB，响应速度小于 2.3ms，插入损耗 0.8 dB 左右。与 MEMS 型 VOA 相比，其突出特点在于：摆脱了硅的多层复杂刻蚀，工艺简单，设计新颖，成本低，成品率高，更适于大批量生产。

## 4.2 VOA 设计

光纤直接耦合 VOA 通过机械对准误差来实现信号衰减的方式可以有三种①纵向偏移(end separation)，②角度误差(angular misalignment)，③横向错位(lateral misalignment)。前两种方式制作衰减器有很高的精度要求和实现难度。目前，国际上尚未出现前两种方式制作的 VOA。本文器件也是通过第三种方式来实现信号衰减的。

根据第 2 章 (2-4) 式得出详细的器件损耗随单模光纤横向位移变化的曲线如图 4.4 所示，单模光纤横向位移越大，插入损耗增幅越大。起先考虑到将 VOA 工作范围设计在 0~50dB，因此我们将器件横向微位移设计在 16 $\mu$ m 左右。

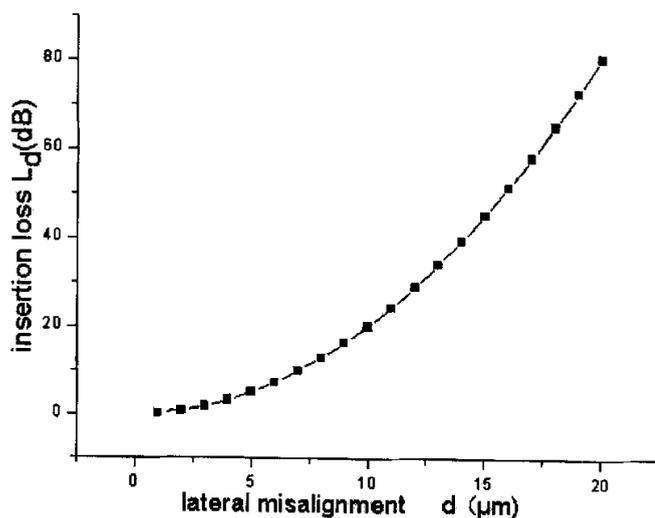


Fig.4.4 The insertion loss as a function of lateral misalignment

形、内部结构的确立是以传输光信号为目的，并非弹性回复，将大致圆柱体外形的光纤用作专业弹片能否保证稳定的弹性有待商榷。②微磁驱动器对呈圆柱体分布的合金涂层磁性吸引力难以驱动悬臂梁光纤——光纤弹性模量较大，达到72000Gpa。

因而，笔者结合国内外同类产品技术经验，基于CNC高精度雕刻和激光点焊技术研制了一种新型光纤直接耦合的VOA。其工作范围为0~65dB，响应速度小于2.3ms，插入损耗0.8dB左右。与MEMS型VOA相比，其突出特点在于：摆脱了硅的多层复杂刻蚀，工艺简单，设计新颖，成本低，成品率高，更适于大批量生产。

## 4.2 VOA 设计

光纤直接耦合VOA通过机械对准误差来实现信号衰减的方式可以有三种①纵向偏移(end separation)，②角度误差(angular misalignment)，③横向错位(lateral misalignment)。前两种方式制作衰减器有很高的精度要求和实现难度。目前，国际上尚未出现前两种方式制作的VOA。本文器件也是通过第三种方式来实现信号衰减的。

根据第2章(2-4)式得出详细的器件损耗随单模光纤横向位移变化的曲线如图4.4所示，单模光纤横向位移越大，插入损耗增幅越大。起先考虑到将VOA工作范围设计在0~50dB，因此我们将器件横向微位移设计在16 $\mu\text{m}$ 左右。

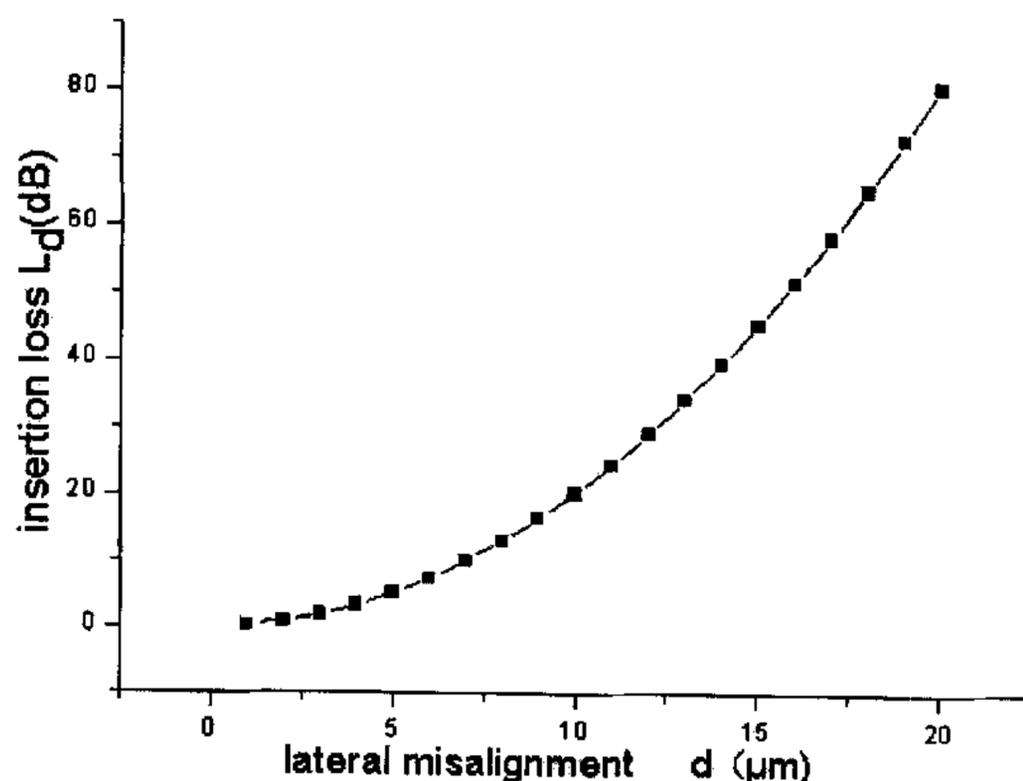


Fig.4.4 The insertion loss as a function of lateral misalignment

VOA 理想结构设计为如图 4.5 所示。承载活动光纤 I 的柔性薄片 II (flexure) 一端固定，耦合端口自然伸屈，并保证耦合端离器件上表面距离约  $16\mu\text{m}$ 。当小线圈 IV 通电产生磁场，固定在柔性薄片上的衔铁 III 就受到铁芯吸引，从而带动活动光纤微位移。在不同的通电电压下，线圈磁场力的强弱和簧片的回复力大小决定了柔性薄片微位移量，也实现了器件光衰减量大小的可调变化。

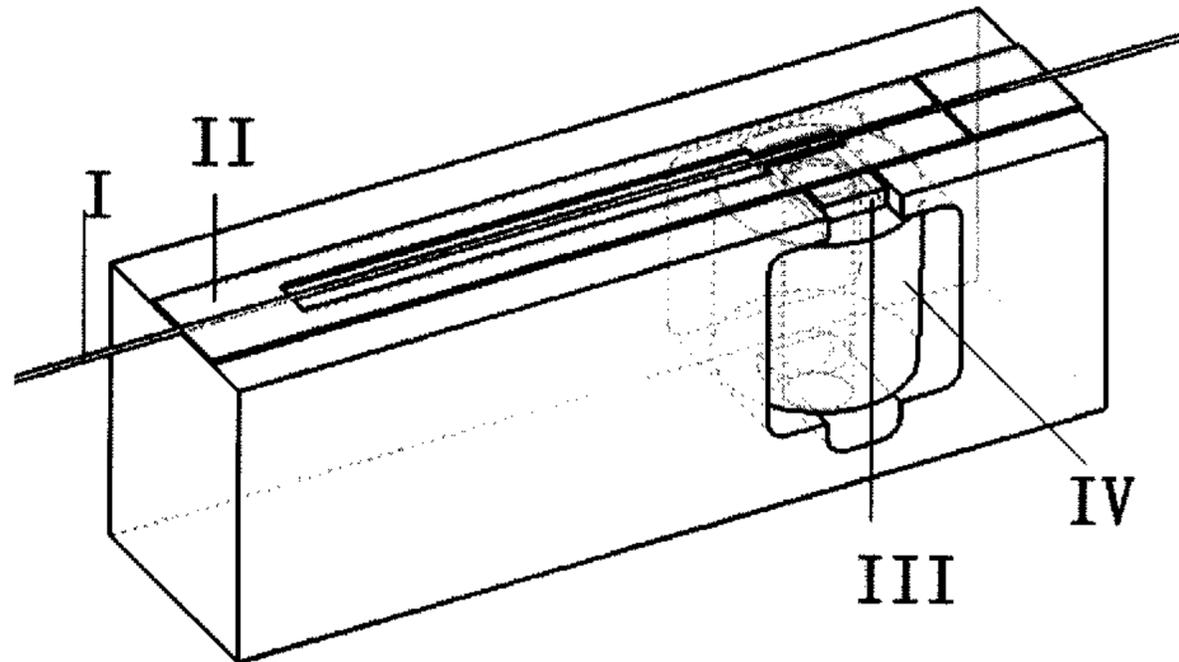


Fig.4.5 A design of micromachining based VOA

根据如图 4.5 结构，将柔性薄片简化为悬臂梁问题考虑，因而弹性回复力与衔铁所受磁性吸力  $F_1$  共同作用下，活动光纤耦合端面将停留在偏移量为  $f$  的位置，用公式表达为：

$$f = \frac{a^2 (3l - a) F_1}{6EI} \quad (4-1)$$

其中  $l$  为柔性薄片总长， $a$  为磁力等效集中载荷作用点到薄片固定支点的距离， $E$  是薄片的杨式模量， $I = bc^3/24$  为薄片的转动惯量矩； $b$  是薄片宽度， $c$  是薄片厚度。从式中可以看出，柔性薄片越长，力作用点离自由端越近，产生同样偏移量所需驱动力就越小。但也需要考虑到其他因素如：尺寸限制，柔性薄片自重影响，抗振性及相应特性。

为了简化问题，不考虑漏磁通和空气隙磁通则磁力  $F_1$  与电流  $i$ ，线圈匝数  $N$ ，铁芯横截面  $S$ ，铁芯总长  $L$  及气隙长度  $\delta$  之间函数关系为：

$$F_1 = \frac{1}{4} (iN)^2 \mu_0 \mu_r^2 \frac{S}{(\mu_r \delta + L)^2} \quad (4-2)$$

式中  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_r$  为铁芯相对磁导率。据(4-1)和(4-2)两个公式, 为达到器件以最小驱动功耗来实现光纤耦合端最大微位移, 首先应实现器件最小驱动功耗, 其方法有二: ①减小驱动电流, 这是较显著和主要方法了; ②减小器件阻抗, 而其阻抗主要来源于线圈阻抗。

其次应考虑如何用最小驱动功耗实现最大磁力, 其方法有四: ①小线圈匝数的平方与磁力成正比, 增大小线圈的匝数可以显著改变磁力, 但这样也会带来其他问题一是器件阻抗增大; 二是线圈尺寸过大, 出于工艺要求和线圈电阻的考虑, 线圈的匝间距和线宽都不可能无限减小, 因此增加匝数必将增大线圈尺寸; 三是降低成品率, 因为任一匝在微加工过程中形成开路则整个线圈不通, 所以匝数增加就会增大线圈不通概率, 降低成品率; ②铁芯横截面积也和磁力成正比, 增大磁力应从增大铁芯横截面直径入手, 但是铁芯横截面增大受微加工工艺影响, 而且势必使磁力等效作用点在某种程度上远离柔性薄片自由端, 减弱驱动力作用效果; ③减小铁芯长度, 将增大磁力, 其原因为减小铁芯总长度将使铁芯磁阻减小, 从而降低磁路总磁阻增大磁通; 另一方面减小了磁能在铁芯中分布的比例, 从而增大了磁能分布在气隙中可做功比例。但是过分减小铁芯长度所带来的漏磁现象也不容忽视; ④减小气隙长度也将增大磁力, 气隙长度的确定与最大驱动行程有关。

进一步考虑到以最大的磁力实现光纤耦合端最大的偏移量, 其方法有二: ①选择薄片专业材质, 使其具有较小的杨式模量, 但是也必须将薄片密度和薄片回复精度考虑在内; ②使磁力等效集中载荷作用点离光纤耦合端尽量远一点, 这里需要综合考虑柔性薄片的总长和实际微加工过程中技术实现问题。此外, 从磁特性角度考虑, 还要注意, 微磁驱动器的设计应使其在最大驱动功率下, 铁芯未被磁饱和; 之后未有电驱动时铁芯所产生的剩磁也极小, 以免影响可调光衰减器的插入损耗。

### 4.3 器件设计的理论分析与优化

在设计过程中, 我们除了利用理论公式对器件结构进行定性分析, 还使用

$$F_1 = \frac{1}{4} (iN)^2 \mu_0 \mu_r^2 \frac{S}{(\mu_r \delta + L)^2} \quad (4-2)$$

式中  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_r$  为铁芯相对磁导率。据(4-1)和(4-2)两个公式, 为达到器件以最小驱动功耗来实现光纤耦合端最大微位移, 首先应实现器件最小驱动功耗, 其方法有二: ①减小驱动电流, 这是较显著和主要方法了; ②减小器件阻抗, 而其阻抗主要来源于线圈阻抗。

其次应考虑如何用最小驱动功耗实现最大磁力, 其方法有四: ①小线圈匝数的平方与磁力成正比, 增大小线圈的匝数可以显著改变磁力, 但这样也会带来其他问题一是器件阻抗增大; 二是线圈尺寸过大, 出于工艺要求和线圈电阻的考虑, 线圈的匝间距和线宽都不可能无限减小, 因此增加匝数必将增大线圈尺寸; 三是降低成品率, 因为任一匝在微加工过程中形成开路则整个线圈不通, 所以匝数增加就会增大线圈不通概率, 降低成品率; ②铁芯横截面积也和磁力成正比, 增大磁力应从增大铁芯横截面直径入手, 但是铁芯横截面增大受微加工工艺影响, 而且势必使磁力等效作用点在某种程度上远离柔性薄片自由端, 减弱驱动力作用效果; ③减小铁芯长度, 将增大磁力, 其原因为减小铁芯总长度将使铁芯磁阻减小, 从而降低磁路总磁阻增大磁通; 另一方面减小了磁能在铁芯中分布的比例, 从而增大了磁能分布在气隙中可做功比例。但是过分减小铁芯长度所带来的漏磁现象也不容忽视; ④减小气隙长度也将增大磁力, 气隙长度的确定与最大驱动行程有关。

进一步考虑到以最大的磁力实现光纤耦合端最大的偏移量, 其方法有二: ①选择薄片专业材质, 使其具有较小的杨式模量, 但是也必须将薄片密度和薄片回复精度考虑在内; ②使磁力等效集中载荷作用点离光纤耦合端尽量远一点, 这里需要综合考虑柔性薄片的总长和实际微加工过程中技术实现问题。此外, 从磁性角度考虑, 还要注意, 微磁驱动器的设计应使其在最大驱动功率下, 铁芯未被磁饱和; 之后未有电驱动时铁芯所产生的剩磁也极小, 以免影响可调光衰减器的插入损耗。

### 4.3 器件设计的理论分析与优化

在设计过程中, 我们除了利用理论公式对器件结构进行定性分析, 还使用

ANSYS 软件进行了定量的结构参数优化和模拟状态分析。在具体分析过程中，与理想公式 (1) 和 (2) 相比，ANSYS 做到以下几点：①铁芯相对磁导率并非常数，加载了该材质相对磁导率的非线性关系，具体参照图 3.3；②实际上磁驱动系统漏磁现象较严重，对此也予以考虑；③详细模拟了衔铁形状和具体三维坐标，衔铁所受磁力大小更加精确可信；④柔性框架和均压孔具体定义更加贴近实际情况，而不是简单看成悬臂梁结构。

毋庸置疑，ANSYS 软件作为大型通用有限元软件融结构、热、流体、电磁、声学于一体的，包含了前置处理、求解处理以及后置处理，将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合，已成为现代工程学问题必不可少的有力工具。

#### 4.3.1 驱动系统磁场状况分析

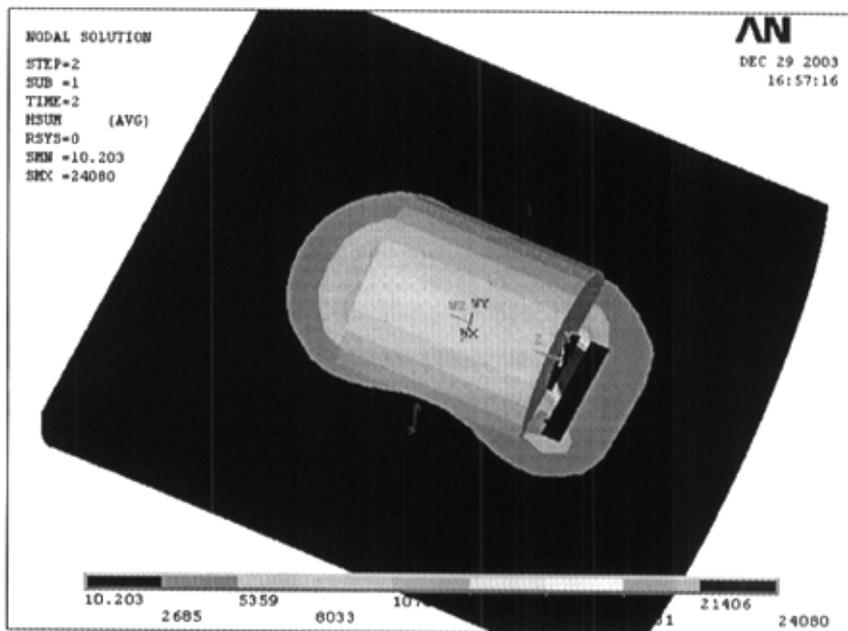


Fig.4.6 3D static magnetic field flux intensity

首先我们研究了低电压下软磁材质衔铁不同位置受电磁力情况。在这一过程中，我们基于微分标量势法 (DSP) 的 3D 静电磁场进行分析，根据铁芯、线圈和衔铁对称关系建立了 3D 实体模型。由于不封闭的驱动系统具有漏磁现象，所以我们对一定范围内的空气也进行了建模并加载了远场边界条件。这里我们给出

了如图 4.6 所示在最大驱动电压 8V 下, 衔铁和铁芯间隙为 200 $\mu\text{m}$  时(即活动柔性框架紧靠器件上表面时) H 磁通量密度分布状况, 可以看出线圈磁场并未形成回路, 而衔铁离铁芯越接近, 其所受磁场作用力也越大。并得出了基于虚功法整个衔铁在衔铁和铁芯垂直距离方向上作用力 1.588mN, 基于 MAXWELL 法作用力为 1.812mN。进一步得到两种求解方法磁场作用力均值大小与驱动电压的拟合关系如图 4.7 所示近似于磁力与电压的平方成正比, 其中磁力  $F_1$  (mN) 与电压  $V$  (V) 拟合函数为:

$$F_1 = 0.02501V^{2.13268} \quad (4-3)$$

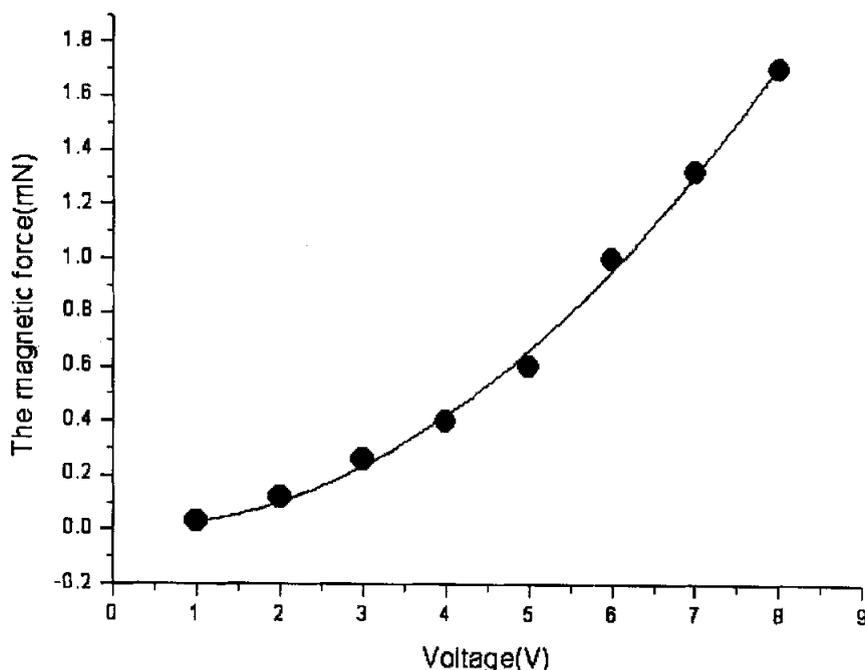


Fig.4.7 The fit of the voltage and the magnetic force

### 4.3.2 柔性框架受力分析

在 VOA 制作过程中, 长臂柔性框架结构参数也必须得到合理优化, 使其在电磁场力和自身回复力作用下达到微位移控制, 从而实现光衰减量控制。这也是本器件设计过程中的关键。因此, 我们运用 ANSYS 建立了长臂柔性框架 3D 实体模型并分析了受力微位移状况, 这里的柔性框架采用了 0.102mm 厚度, 弹性

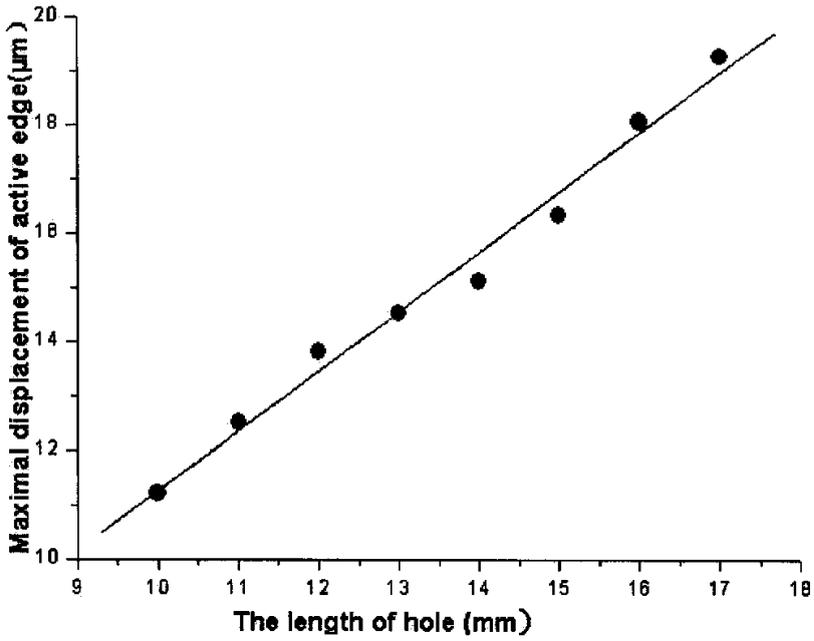


Fig.4.8 The linear fit of the length of hole and the maximal displacement of active edge

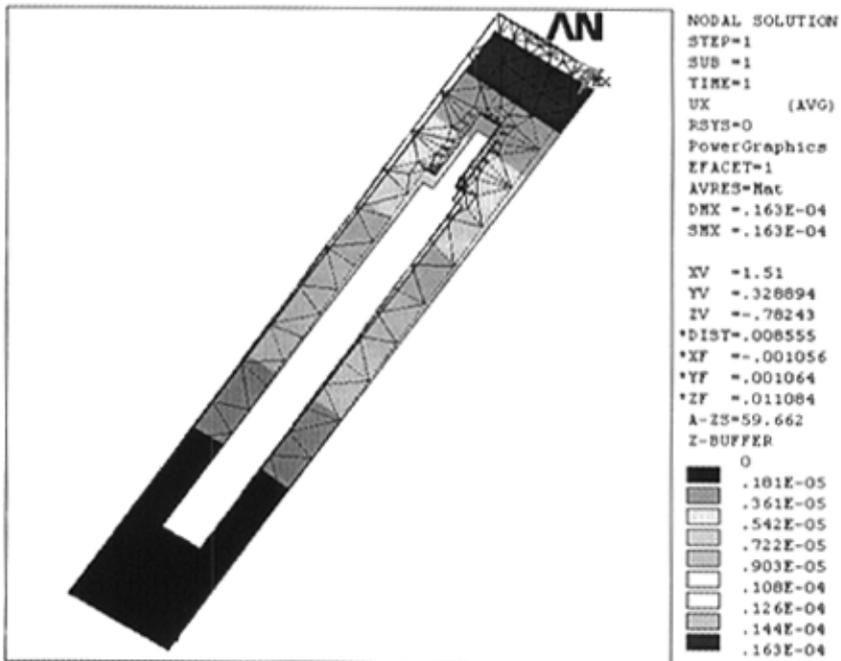


Fig.4.9 Simulation results for displacement

优良的专业不锈钢材质。在 3D 模型分析中我们设定了柔性框架的材料属性，施加了载荷和位移约束条件，结果发现 8V 电压下 21mm 长度的柔性框架整个均压孔长和自由端最大微位移具有如图 4.8 所示拟合线性关系。根据图 4.8，我们将孔长设置为 15mm，并重新得出如图 4.9 所示，在 8V 电压下模型受力微位移状况。可以看出柔性框架变形后的自由端最大微位移为 16.3 $\mu\text{m}$ 。进一步得出柔性薄片回复力与自由端微位移之间的关系如图 4.10 所示，其中柔性框架回复力  $F_2$  与自由端微位移  $f$  拟合函数为：

$$F_2 = 0.16195f^{0.93816} \quad (4-4)$$

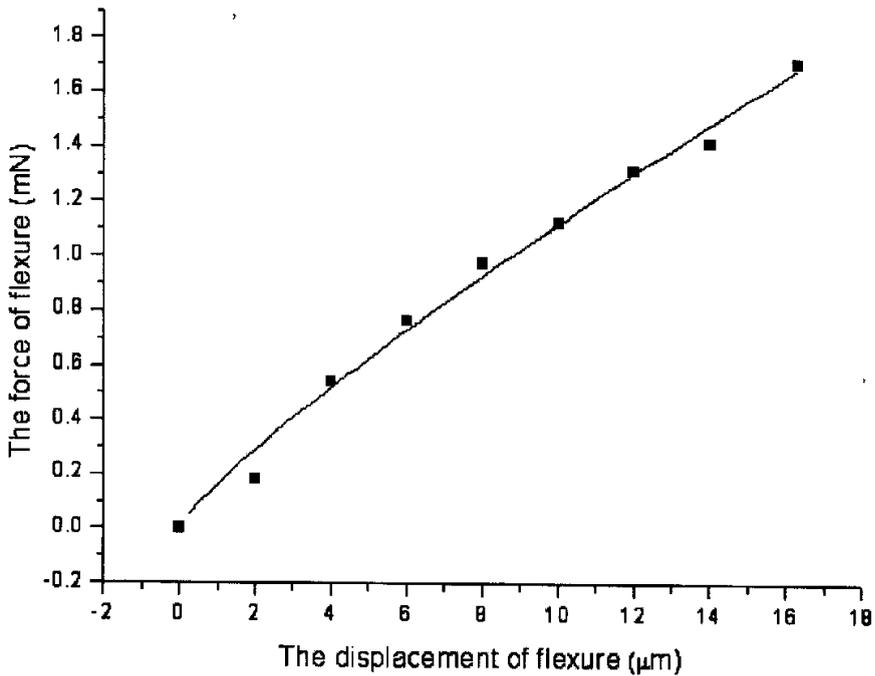


Fig.4.10 The linear fit of the force and the displacement of flexure

综合公式 (4-3)、(4-4)，当柔性薄片受到的作用力和磁力平衡时，即  $F_1 = F_2$ ，因而有

$$f = 0.1544V^{2.27326}$$

根据 (2-4) 将得到驱动电压  $V$ , 单位为 V 与可调光衰减器衰减量  $\text{LOSS}(V)$ , 单位为 dB 之间的关系：

$$LOSS(V) = -10 \log \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{16.3 - 0.1544V^{2.27326}}{\omega} \right)^2 \right] \right\}$$

综上所述经过结构优化的 VOA 理论上足以通过 0~8V 电压来控制耦合光纤的横向错位 0~16 $\mu\text{m}$ ，从而实现 0~50dB 范围内的光衰减量可调。

#### 4.4 器件制作

器件成品照片如图 4.11 所示，封装尺寸为 9×10.2×30.3 mm<sup>3</sup>。其主要制作工艺依次为：

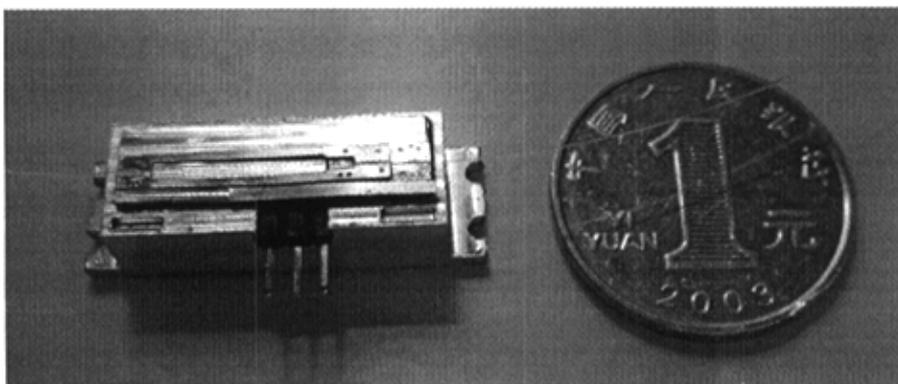


Fig.4.11 A photo of micromachining based direct-coupled VOA prototype

- ① 铝基底形状和封装盒选用了 CNC (Computerized Numerical Control) 雕刻技术。
- ② 基底上表面镀了一层合金膜解决了柔性薄片固定问题，并保证了器件上表面严格的平面。
- ③ 承载活动光纤的柔性薄片制作成具有“凸”字形孔结构的长臂柔性框架。其作用是很好地优化了弹性并增加了稳定性。
- ④ 耦合光纤是被安置在两片柔性薄片的 V 型槽上。为了保证光纤耦合端口的平整，我们采用了超声波切割机对光纤纤芯进行了切割。而 V 型槽的制作则采用了 EDM (electrical discharge machining) 加工技术。
- ⑤ 接下来，解决长臂柔性框架和衔铁的固定问题成为了关键。因此，我们使用了光纤传输激光点焊技术。这种技术以 Nd: YAG 晶体为

激光工作物质，其输出能量为 60J，合金焊接最大深度可达 5mm 以上，最小焦斑直径为 0.2mm~0.3mm。

- ⑥ 为保证长臂柔性框架自由端离器件上表面距离约 16 $\mu$ m，我们在衔铁上表面附加固定了一块压板。

此外，衰减器活动和固定光纤的封装采用了紫外固化树脂将光纤粘合在 V 形槽中。粘合时，在保证光纤对准精度和光纤端面清洁的前提下用盖板压紧光纤，尤其是头部，直至粘合牢固为止。

## 4.5 性能测试

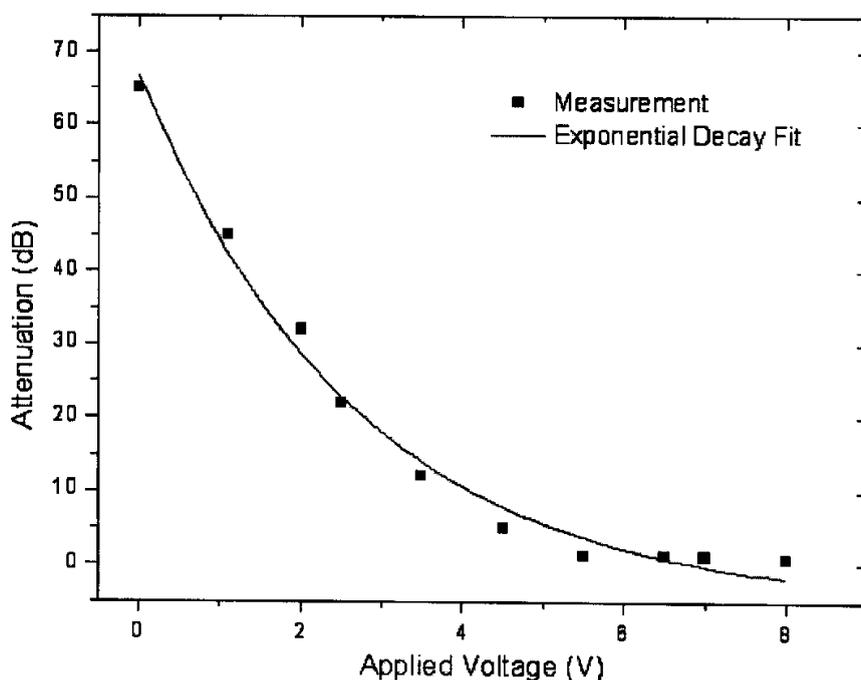


Fig.4.12 The attenuation Loss as a function of voltage

我们对新型光纤直接耦合的 VOA 成品性能进行了测试。实验表明在 0~8V 电压控制下，该器件实现了 0~65dB 范围内的光衰减量可调，其中插入损耗小于 0.8dB。这里我们给出了如图 4.12 所示新型 VOA 光衰减量随小线圈电压变化的实测点和理论曲线。其中衰减与电压的拟合函数为：

激光工作物质，其输出能量为 60J，合金焊接最大深度可达 5mm 以上，最小焦斑直径为 0.2mm~0.3mm。

- ⑥ 为保证长臂柔性框架自由端离器件上表面距离约 16 $\mu$ m，我们在衔铁上表面附加固定了一块压板。

此外，衰减器活动和固定光纤的封装采用了紫外固化树脂将光纤粘合在 V 形槽中。粘合时，在保证光纤对准精度和光纤端面清洁的前提下用盖板压紧光纤，尤其是头部，直至粘合牢固为止。

#### 4.5 性能测试

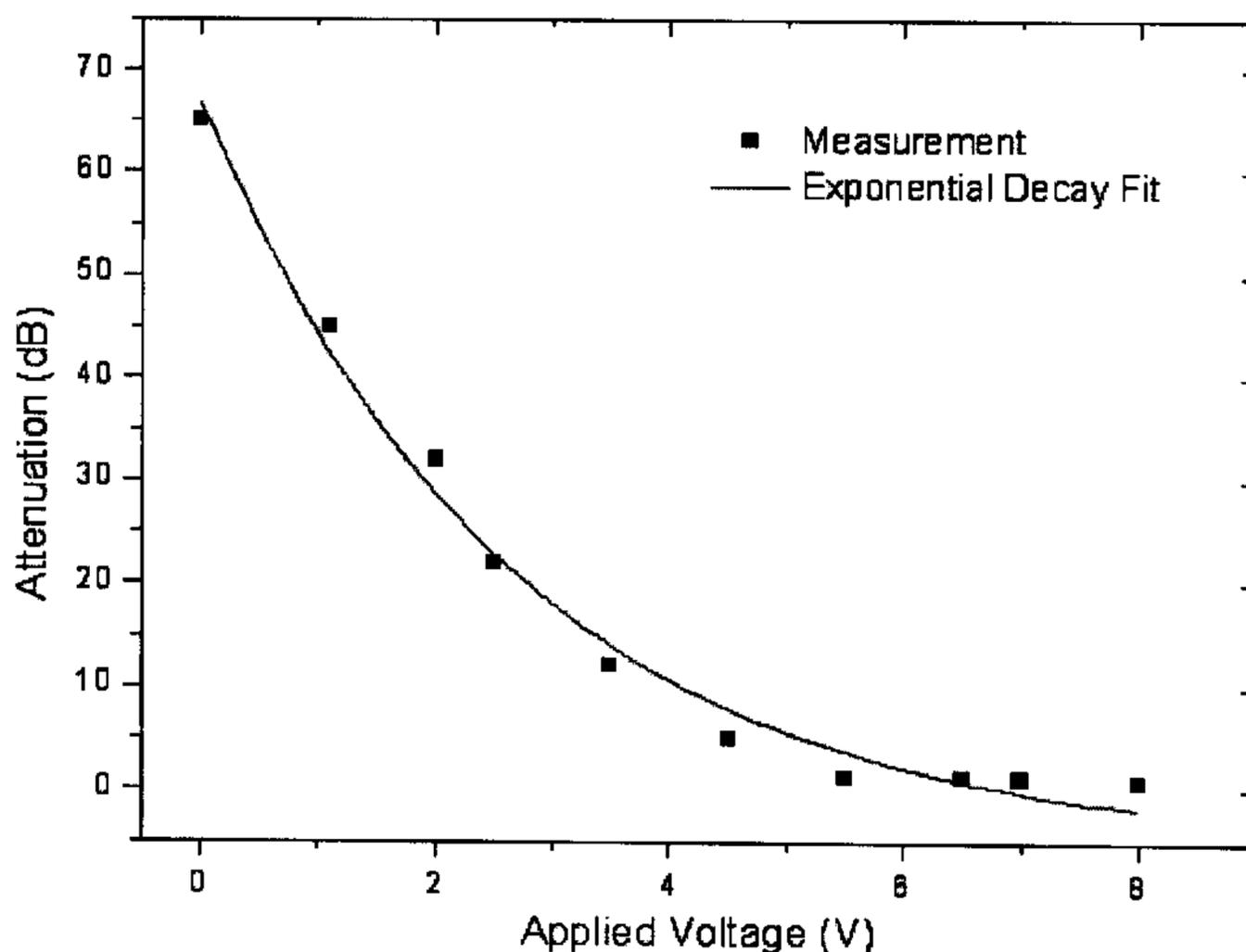


Fig.4.12 The attenuation Loss as a function of voltage

我们对新型光纤直接耦合的 VOA 成品性能进行了测试。实验表明在 0~8V 电压控制下，该器件实现了 0~65dB 范围内的光衰减量可调，其中插入损耗小于 0.8dB。这里我们给出了如图 4.12 所示新型 VOA 光衰减量随小线圈电压变化的实测点和理论曲线。其中衰减与电压的拟合函数为：

$$LOSS(V) = 72.251e^{-V/2.664} - 5.429$$

式中  $V$  为电压，单位为  $V$ ，且  $0 \leq V \leq 8V$ ； $LOSS(V)$  为电压引起的衰减，单位为  $dB$ 。

从图中可以看出，该器件在零电压下，光衰减量达到最大约  $65dB$  左右。当电压逐渐增大，光衰减量的降幅越来越小。电压达到最大时，衰减量的变化趋于平缓，其值在  $0.8dB \sim 0.9dB$  之间。另外该成品在升降压重复性能测试中表现稳定，固定电压下衰减量最大偏差在  $0.4dB$  以内。

#### 4.6 本章小结

基于 CNC 雕刻技术和激光点焊技术研制了一种新的微加工型 VOA，其实现原理利用了光纤直接耦合的横向错位。本文对器件进行了模拟状态分析，并对性能进行了测试。结果表明：该 VOA 工作范围为  $0 \sim 65dB$ ，响应速度小于  $2.3ms$ ，插入损耗  $0.8dB$  左右。本器件工艺简单，设计新颖，成本较低，成品率高，与 MEMS 型 VOA<sup>[14-18]</sup> 相比更易于实现大批量生产。

## 第5章 亚毫秒级微加工型 $1 \times 2$ 光开关阵列

### 5.1 技术背景

在前面两章介绍的光纤直接耦合光开关及可调光衰减器,与同类产品相比最大的特点在于成本低廉,但是性能方面不占优势,适用于光测试系统、光纤系统和光器件调试系统中。如何设计研制一种成本较低且性能优越的微加工型光通信器件成为下一步研究的重点。在第一章引言里已经介绍了一种运用光纤准直器使光纤耦合的新型光开关。与光纤直接耦合光开关相比,使用准直器的光开关尽管增加了准直器带来的附加插入损耗(0.4~0.8dB),但是降低了加工难度,具有可扩展性较好(可以扩展为 $4 \times 4$ 光开关),易装配和性能稳定等优点。

另一方面, OADM/OXC 设备已成功运用在光网络节点设备中,如图 5.1 所示。该结构促使网络在光波长上实现灵活、高速、大容量的交叉连接,而且具有很好的可重构性,满足了网络节点数和业务量的增长要求。但是,由于光分器件缺陷和光开关存在串扰,使得同一个信号的不同分量在 OADM 里面传播,最终在出口处产生零差串扰<sup>[19]</sup>。在光通信网络业务量的急剧膨胀的今天,网络节点的尺寸也越做越大, OADM 中速度瓶颈和零差串扰的凸现已经成为一个制约智能光网络发展的因素之一。

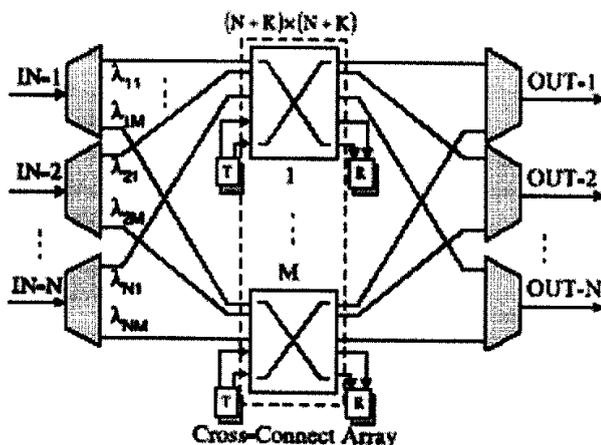


Fig.5.1 Traditional integrated OADM node structure

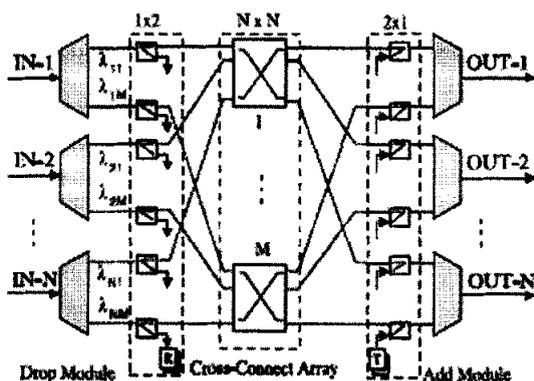


Fig.5.2 Low cross-talk OADM structure with 1×2 optical switch array



Fig.5.3 1×2 MEMS switch

为了改善 OADM 中存在的问题，一种可行的办法是在每路光通道中加入一个 1×2 光开关来构成如图 5.2 所示低串扰结构<sup>[20]</sup>，这样 1×2 开关和 N×N 开关阵列可以采用不同的类型，尤其是具有低串扰的机械开关成为 1×2 开关的理性选择。基于此，我们专门为低串扰 OADM 节点开发了一种微加工型 1×2 光开关阵列。该光开关最大特点就是以往占据主流商用地位的传统机械式光开关和成熟的 MEMS 光开关<sup>[21-23]</sup>重要技术参数——开关响应时间从毫秒量级降低到亚毫秒量级。该微加工型器件 1×2 光开关单元与美国著名公司 DiCon Fiber Optics Inc 发布的 1×2 MEMS 型光开关（如图 5.3 所示产品，采用了电驱动微反射镜转动原理）技术参数相比如下表 5.1：

表 5.1 The comparison between new micromaching based optical switch and MEMS one

	微加工型 1×2 光开关单元	MEMS 型
尺寸 (mm <sup>3</sup> )	15×9×1.5	30.33×12.7×7.21
插入损耗 (dB)	0.6~0.8	<0.8
回波损耗 (dB)	<-70	<-50
开关时间 (ms)	<0.75	<5
光纤准直器	有	无
重复性 (dB)	<0.2	<0.1
通道串扰 (dB)	<-70	<-50

## 5.2 光开关阵列设计与制作

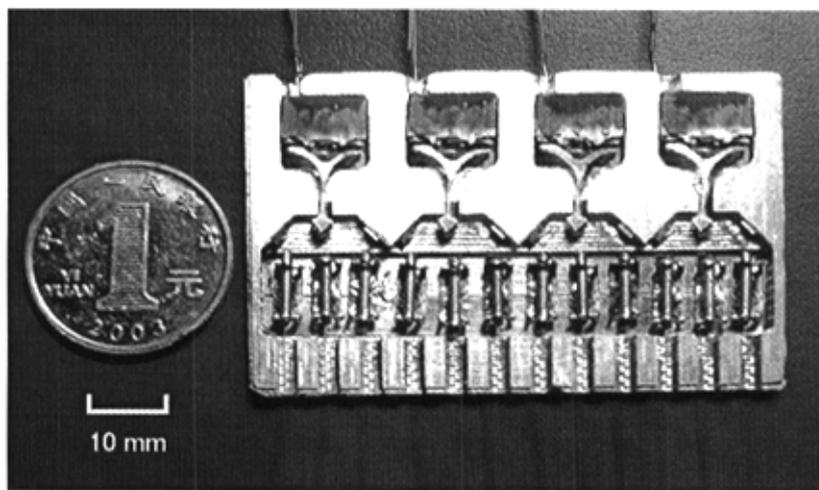


Fig.5.4 Photo of the optical switch array

亚毫秒级  $1 \times 2$  光开关阵列成品如图 5.4 所示尺寸仅为  $60 \times 36 \times 7 \text{ mm}^3$ ，器件的壳体和基底加工选用了精密 CNC 微雕刻技术；在关键部位如摆杆和精密限位装置处理上采用了 EDM 技术；最后的封装装配过程使用了专利校准装置和激光点焊技术。

而其开关单元放大图如 5.5 所示。光信号的输入输出由 3 个焊接固定于基座同侧光纤准直器 (Fujian JDSU CASIX, INC. Part#: CLS-250-0550-20-FC- -/PC-M) 完成。此准直器特点在于工作距离范围大，标定工作距离为 20mm，在平移失配和角度失配极小情况前提下，每一对准直器插入损耗小于 0.5dB，而当工作距离在 10mm 至 40mm 间时，插入损耗小于 0.8dB，宽容的工作距离使得将该准直器用于高端口光开关的制作成为可能。光开关功能的实现包括固定反射单元、可动反射单元两部分，可动反射单元由摆杆 1 和贴于顶端的硅镜 2、3 组成，两微镜面与中轴线夹角稍小于  $45^\circ$ ，在电磁驱动器的带动下，可以左右平行摆动 2 和 3；固定反射单元由放置于摆动单元两侧的硅镜 4 和 5 组成，这两个硅镜固定在基座上，与摆杆中轴线分别成  $45^\circ$  角，用于将反射来的光束偏转方向，耦合到相应的输出准直器中。

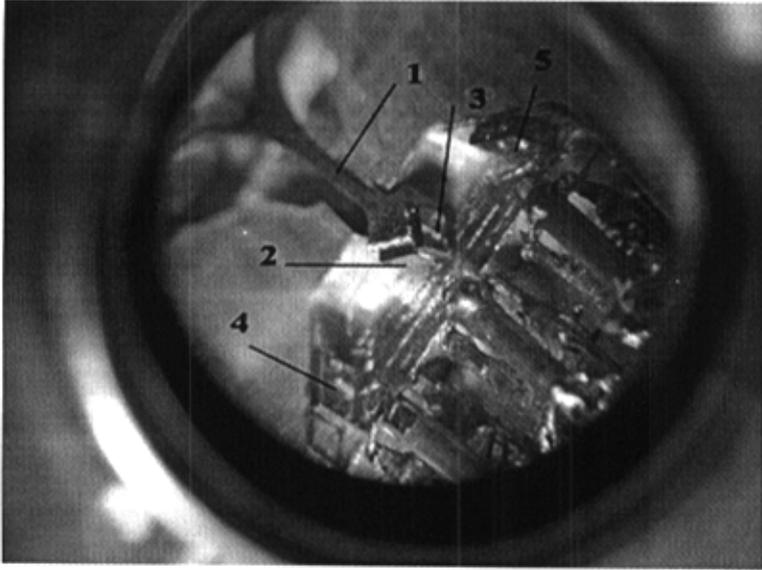


Fig.5.5 The switch unit

这个  $1 \times 2$  光开关阵列具体工作过程如图 5.6 所示，光束由光纤准直器 2 输入，经微镜两次反射后耦合进相应准直器。光路的选择通过摆杆 6 来实现——摆杆末端与电磁驱动器相连，摆杆顶端的对称结构镶有两个微反射镜 5 和 7（两微镜面与中轴线夹角稍小于  $45^\circ$ ），可以进行光路切换。当电磁驱动单元接受到 +5V 信号时，摆杆逆时针摆动，在精确限位装置的固定下，使摆杆左微镜 5 以  $45^\circ$  角切入光路，入射光经两次反射后耦合到输出光纤准直器 1（如图 5.6 状态 I）。相反，当驱动单元为 -5V 信号时，摆杆顺时针复位，光束进入右侧光路，耦合到准直器 3（如图 3 状态 II）。

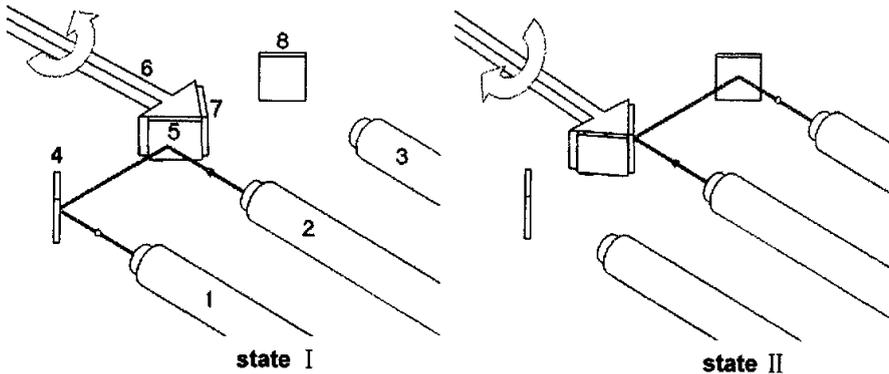


Fig.5.6 Operational principle

### 5.3 开关单元结构的设计和仿真

对于  $1 \times 2$  光开关单元设计来说, 如何实现快速稳定的光路切换是关键。在传统的机械式微镜光开关设计中, 微镜的移动方式大体上可以分为扭转型和移动型<sup>[24-26]</sup>两种。扭转型光开关以日本东京大学研制的一种扭镜型 MEMS 光开关<sup>[27]</sup>为例。微镜受到静电力的吸引, 由水平位置扭转直至与水平成  $90^\circ$  度, 从而改变光路传输方向。而移动型光开关的实现, 使用了驱动器驱使垂直微镜平行移动至输入输出光纤之间, 使光路发生改变。这两种工作方式对于光路的切换非常有效, 串音较小。但这两种设计上的局限在于微镜的工作距离过长或转动角度过大, 不仅加重了驱动器及其附件的要求, 还使开关时间徘徊在数毫秒的水平, 阻碍其进一步提高。在比较现有光开关的工作特点基础上, 我们创新地提出如图 5.6 所示摆杆和微镜的设计思想, 将高切换速度的电磁驱动摆杆和硅基微镜相结合, 从而使光开关的响应时间达到亚毫秒级别, 这是传统机械式和 MEMS 光开关所不能实现的。

当然, 在光开关的结构设计过程中, 快速稳定的实现光路切换也和结构参数的适当选取密不可分的。因此我们在开关的试制作前, 对开关的结构和可实现的技术参数特别是开关速度之间的关系进行了理论分析。

#### 5.3.1 开关机理与速度的相关性

与传统微镜横向切入光路方法相比, 使用摆杆加微镜的方法在设计上对于提高响应速度作用很大。当摆杆偏离工作状态  $\Delta\alpha$  角度后, 入射点纵向后移

$$x = \sin \beta \times L \times \Delta\alpha$$

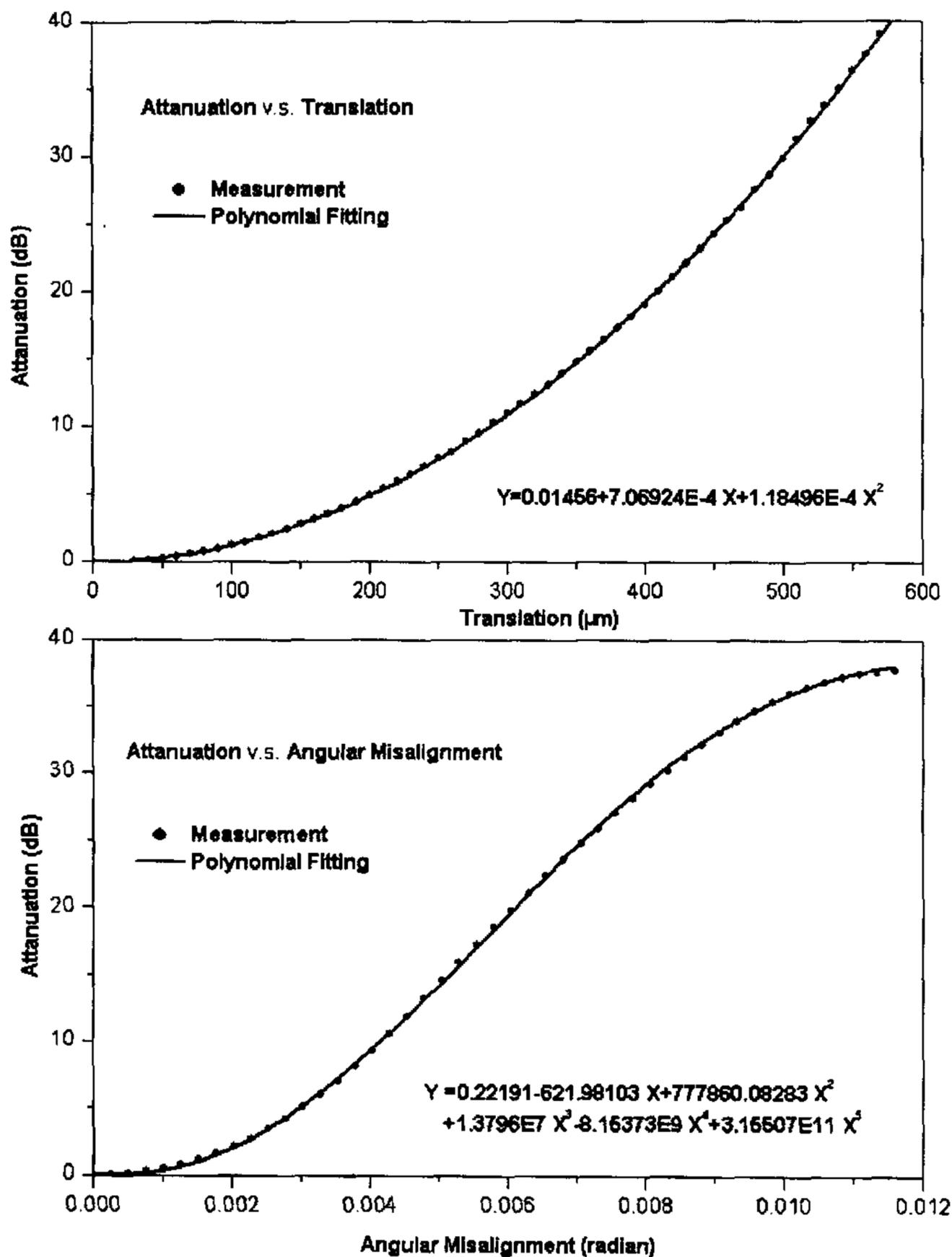
引起出射光束横向偏移

$$\Delta d = (d + h) \times g(2\Delta\alpha) - x$$

其中,  $L$  为摆杆的长度,  $\beta$  为摆杆顶端反射单元的半角,  $d$  为两光纤准直器间横向间距,  $h$  为准直器顶端和微镜之间的纵向距离

根据加工条件, 我们选取开关结构参数  $d=5\text{mm}$ ,  $\beta=41^\circ$ ,  $h=2.5$ ,  $L=10\text{mm}$ , 得到  $\Delta d \approx 5\Delta\alpha$  (单位为毫米)。同时, 光束转动  $2\Delta\alpha$  角度, 由此看出, 相对于传统的横向切入式和摆镜光开关机理, 采用复合工作方式, 可以使开关速度提高数倍以上, 这也是本光开关可以达到亚微秒开关速度的关键之一。

### 5.3.2 光纤准直器与光信号损耗相关性



**Fig.5.7** Misalignment sensitivity of C-lens collimator

本章所述光开关阵列通过光纤准直器来进行光信号的间接耦合，光纤准直器的性能将决定器件的光学特性，因此必须对光纤准直器的性能进行分析。笔者使用了 Fujian JDSU CASIX, INC 生产的 Mini C-lens 型单模光纤准直器来研制

亚毫秒级光开关阵列，此准直器直径 1.4mm，中心工作波长为 1550nm，标定工作距离为 20mm，每一对准直器插入损耗小于 0.5dB。出于商业保护原因，我们无法获得此类准直器透镜的详细参数，如透镜折射率分布函数等。因此如图 5.7 所示在一对光纤准直器标定工作距离 20mm 位置对准直器的横向平移失配和角度失配与损耗量的关系进行测量，然后对实际测量结果进行曲线拟合，分别确定了这种准直器的平移失配和角度失配与衰减量的关系，保留小数点后面 3 位有效数字得到相关多项式函数为：

$$\text{Loss}_1(d)=0.015+7.069\cdot 10^{-4}d+1.185\cdot 10^{-4}d^2 \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \text{Loss}_2(\alpha)=0.222-621.981\alpha+7.786\cdot 10^5\alpha^2+1.380\cdot 10^7\alpha^3 \\ -8.154\cdot 10^9\alpha^4+3.155\cdot 10^{11}\alpha^5 \end{aligned} \quad (5-2)$$

其中  $d$  为平移量，单位  $\mu\text{m}$ ， $\text{Loss}_1(d)$  为平移引起的衰减，单位 dB； $\alpha$  为角度偏移量，单位为弧度， $\text{Loss}_2(\alpha)$  为角度引起衰减量，单位 dB。

公式 (5-1) 与 (5-2) 在器件理论计算与分析中有非常重要的地位，通过这两个公式可以估算出器件的封装误差所带来的额外插损。经过测量和分析得出，光纤直接耦合原理的光无源器件最小插入损耗理论上可达 0 dB 左右，为了使插入损耗小于 1dB，光纤横向错位  $d\leq 2\mu\text{m}$ ，纵向偏移  $s\leq 80\mu\text{m}$ ，角度误差  $\theta\leq 2^\circ$ ；而带有准直器的器件最小插入损耗 0.3dB 左右，为了使插入损耗小于 1dB，准直器横向错位  $d<89\mu\text{m}$ ，纵向偏移  $s<40\text{mm}$ ，角度误差  $\theta<0.1^\circ$ ；由此可见，尽管带有准直器的光无源器件引入了准直器本身具有的损耗且对角度误差较敏感，但是它显著增大了耦合光纤工作距离，对横向错位更加宽容，因而在现有的实验条件下带有准直器的光无源器件比光纤直接耦合原理的器件更易于加工制作，成品率更高，可扩展性好，性能也比较优越。

### 5.3.3 利用有限元(FEA)法对驱动过程进行模拟

在开关的设计中，微镜的摆动速度至关重要，而摆动速度又取决于电磁驱动器的优良性能。对于电磁驱动的结构分析，我们借助于大型有限元(FEA)分析软件 ANSYS 对其驱动过程进行数值模拟，进而修正结构参数，得到最优化设计结果。

驱动机构由线圈、永磁体和衔铁组成。在永磁铁磁场作用下，衔铁被磁化。

亚毫秒级光开关阵列，此准直器直径 1.4mm，中心工作波长为 1550nm，标定工作距离为 20mm，每一对准直器插入损耗小于 0.5dB。出于商业保护原因，我们无法获得此类准直器透镜的详细参数，如透镜折射率分布函数等。因此如图 5.7 所示在一对光纤准直器标定工作距离 20mm 位置对准直器的横向平移失配和角度失配与损耗量的关系进行测量，然后对实际测量结果进行曲线拟合，分别确定了这种准直器的平移失配和角度失配与衰减量的关系，保留小数点后面 3 位有效数字得到相关多项式函数为：

$$\text{Loss}_1(d)=0.015+7.069\cdot 10^{-4}d+1.185\cdot 10^{-4}d^2 \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \text{Loss}_2(\alpha)=0.222-621.981\alpha+7.786\cdot 10^5\alpha^2+1.380\cdot 10^7\alpha^3 \\ -8.154\cdot 10^9\alpha^4+3.155\cdot 10^{11}\alpha^5 \end{aligned} \quad (5-2)$$

其中  $d$  为平移量，单位  $\mu\text{m}$ ， $\text{Loss}_1(d)$  为平移引起的衰减，单位 dB； $\alpha$  为角度偏移量，单位为弧度， $\text{Loss}_2(\alpha)$  为角度引起衰减量，单位 dB。

公式 (5-1) 与 (5-2) 在器件理论计算与分析中有非常重要的地位，通过这两个公式可以估算出器件的封装误差所带来的额外插损。经过测量和分析得出，光纤直接耦合原理的光无源器件最小插入损耗理论上可达 0 dB 左右，为了使插入损耗小于 1dB，光纤横向错位  $d \leq 2\mu\text{m}$ ，纵向偏移  $s \leq 80\mu\text{m}$ ，角度误差  $\theta \leq 2^\circ$ ；而带有准直器的器件最小插入损耗 0.3dB 左右，为了使插入损耗小于 1dB，准直器横向错位  $d < 89\mu\text{m}$ ，纵向偏移  $s < 40\text{mm}$ ，角度误差  $\theta < 0.1^\circ$ ；由此可见，尽管带有准直器的光无源器件引入了准直器本身具有的损耗且对角度误差较敏感，但是它显著增大了耦合光纤工作距离，对横向错位更加宽容，因而在现有的实验条件下带有准直器的光无源器件比光纤直接耦合原理的器件更易于加工制作，成品率更高，可扩展性好，性能也比较优越。

### 5.3.3 利用有限元(FEA)法对驱动过程进行模拟

在开关的设计中，微镜的摆动速度至关重要，而摆动速度又取决于电磁驱动器的优良性能。对于电磁驱动的结构分析，我们借助于大型有限元(FEA)分析软件 ANSYS 对其驱动过程进行数值模拟，进而修正结构参数，得到最优化设计结果。

驱动机构由线圈、永磁体和衔铁组成。在永磁铁磁场作用下，衔铁被磁化。

当线圈加上+5 V 的脉冲信号时，衔铁两端分别收到斥力和引力，从而产生扭矩带动摆杆逆时针摆动；当线圈加上-5 V 的脉冲信号时，衔铁两端受力反向，摆杆逆时针方向摆动；脉冲信号消失后，衔铁由于剩磁作用紧贴于精确限位装置，维持原状态不变，实现断电自锁。磁性衔铁通过激光点焊与 Y 型摆杆紧密连接。

在用 ANSYS 进行工程模拟的时候，按照下列步骤进行求解<sup>[28]</sup>。

(1) 建立永磁体、衔铁、铁心、线圈和空气隙的物理模型，分别对不同的区域赋予相应的材料特性，

(2) 以合理的拓扑结构划分网格，在感兴趣的求解区域适当提高网格密度；

(3) 施加电流载荷，指定磁场边界条件；

(4) 选用合理的求解器对磁场进行求解；

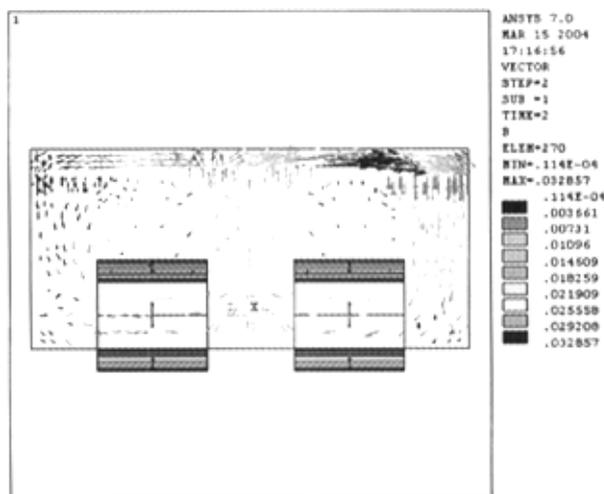


Fig.5.7 Distribution of magnetic field inside actuator

(5) 用虚功法逐点求解每个单元所受的磁场力。通过对位置坐标加权求和，得到衔铁所受的磁力扭矩。图 5.7 显示了驱动器内部磁场分布情况，由此可进一步得出摆杆所受扭矩与摆杆倾角的曲线关系，如图 5.8 所示。

从图中可以看出，摆杆逆时针转动（+5V 信号脉冲）和顺时针转动（-5V 信号脉冲）的力矩曲线是对称的。以顺时针的转动（图中虚线）为例进行分析：在触发信号前，衔铁位于-5 度位置。收到触发信号后，衔铁在斥力和引力的综合作用下开始加速转动（-5~-3 度，斥力占主导优势）；在 0 度位置附近，由于斥力

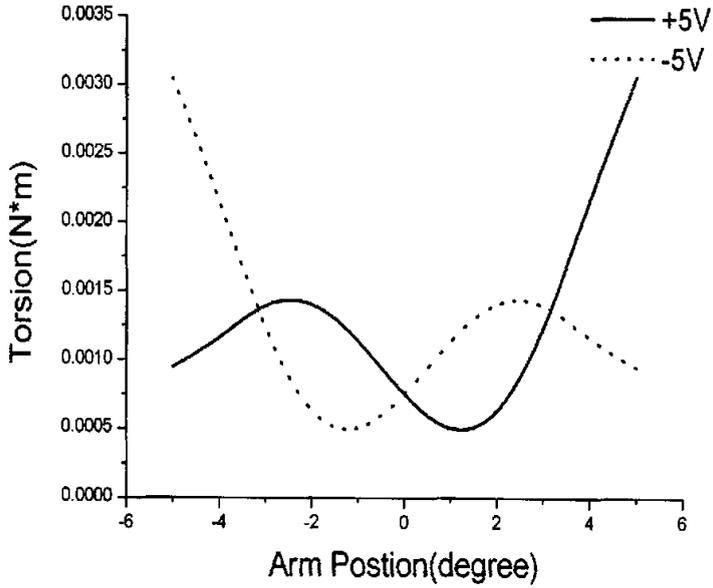


Fig.5.8 The magnetic torsion as a function of arm position

随距离衰减很快，力矩较小；越过 0 度后，引力占主导优势，摆杆继续加速直到 +5 度位置。

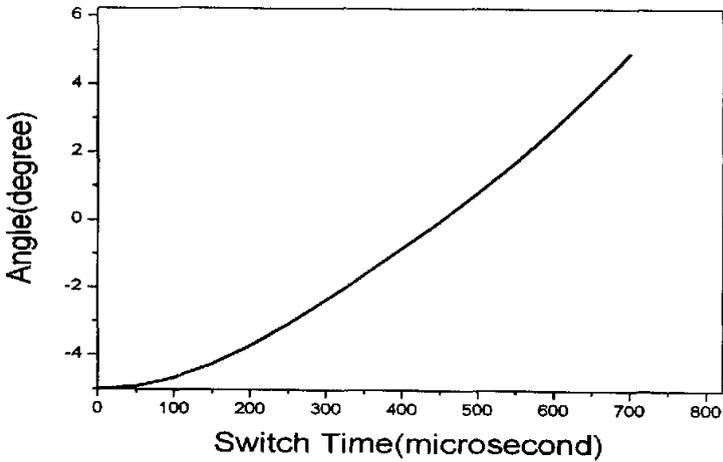


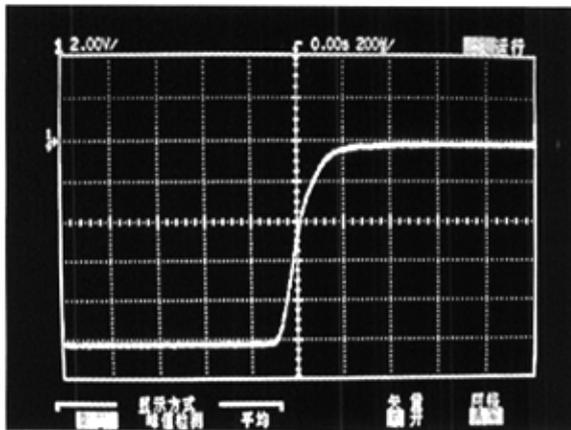
Fig.5.9 The angle of pole as a function of switch time

将力矩—角度曲线进行 5 次多项式拟和，得到力矩—角度函数（角度单位为弧度）：

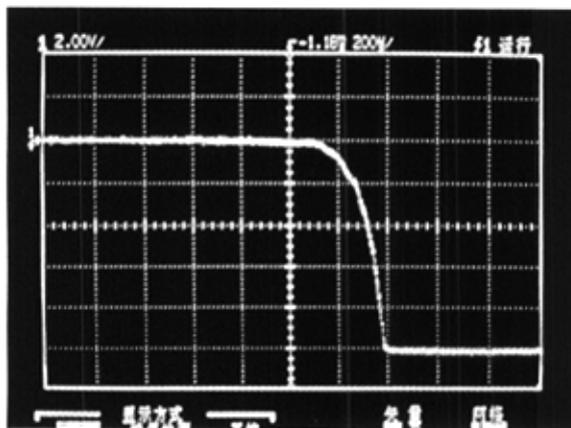
$$F(\theta) = 7.282 \times 10^{-4} + 0.023 \times \theta + 0.236 \times \theta^2 - 9.222 \times \theta^3 - 8.795 \times \theta^4 + 601.379 \times \theta^5$$

根据角加速度方程  $d^2\theta/dt^2 = F(\theta)/I$  和  $t=0$  处的边界条件： $\theta = -0.087, d\theta/dt = 0$ （试验测量摆杆的转动惯量  $I = 2.5776926$  克 \* 平方毫米）数值法求解  $\theta$  关于  $t$  的微分方程得到角度时间曲线从图 5.9 可以看出，开关时间的理论计算结果在  $700 \mu s$  左右。

### 5.4 性能测试



(a) rising time



(b) falling time

Fig.5.10 Switching response to a trig signal

我们分别对每个单元进行测量，插入损耗在  $0.6\text{dB} \sim 0.8\text{dB}$  之间，串扰  $< -70\text{dB}$ 。使用数字示波器得到了如图 5.10 所示的开关响应曲线。曲线 2（下）为触发电脉冲信号，曲线 1（上）为输出光信号。图中显示开关的响应时间约为  $750\ \mu\text{s}$ ，略慢于理论计算时间  $700\ \mu\text{s}$ ，这是由于理论计算未计入运动部件摩擦力等各种损耗因素所致。考虑到微电磁机械结构动态计算的复杂性，此模型给出了相当精确的估算。

同时，光信号曲线的上升段非常平滑，没有出现其他机械式光开关常见的振荡情况。整个驱动结构已经经受了百万次试验，性能稳定。

## 5.5 本章小结

运用于光网络中的微加工型  $1 \times 2$  光开关阵列，经过理论分析和性能测试，结果表明该阵列开关响应时间小于  $750\ \mu\text{s}$ ，插入损耗为  $0.6\text{dB} \sim 0.8\text{dB}$ ，回波损耗和串扰小于  $-70\text{dB}$ ，完全符合智能光网络的性能要求。与现有微加工型和 MEMS 型  $1 \times 2$  光开关相比，其突出特点在于成本较低，结构新颖，响应快速；满足了智能光网络对节点连接设备低串扰快响应的要求，可以进行规模生产，具有很好的市场前景。

## 第6章 结论与展望

本硕士论文研究了非硅基微加工型光开关及可调光衰减器的设计制作与分析。其中运用光纤直接耦合原理制作了一种  $1 \times 2$  光开关和一种可调光衰减器。这种  $1 \times 2$  移动光纤式光开关驱动电压为 5V, 回波损耗为 -47dB, 开关时间小于 2ms, 插入损耗达到 0.9dB~1.1dB。尽管可扩展性方面较差, 但是其低廉的成本和高成品率是最大优势。可以预知, 该产品如果投放市场, 在同类产品中有很强的竞争性, 将广泛运用于低端口光网络系统及光测试系统中。而这种可调光衰减器是弹性回复式可调衰减器工作范围 0~65dB, 驱动电压为 0~8V, 动态时间响应小于 2.3 ms。尽管在升降压重复性能测试中该器件表现较稳定, 但是任何弹性材料随时间变化都会产生老化现象, 使得器件工作曲线发生变化, 因而该器件长期工作性能令人担忧, 建议运用于对器件要求不高的非通信光网络系统中。

用光纤直接耦合原理制作的光开关性能方面只能达到毫秒量级, 为了提高其开关速度以满足光网络节点交换速度的需要, 一种亚毫秒级  $1 \times 2$  微加工型光开关阵列应运而生。该光开关最大特点即开关响应时间小于  $750 \mu\text{s}$ , 其他技术参数也维持在较好的水平如插入损耗为 0.6dB~0.8dB, 回波损耗为小于 -70dB。可见该产品市场前景也是相当广阔的。

在今后的工作过程中, 笔者在参考了国内外相关文献基础上, 结合自身对实际研制微加工器件的经验积累, 可以从以下三点做进一步研究:

①第三章介绍的双簧片回复式的光开关也存在寿命问题, 随时间变化双簧片将渐渐老化, 该器件的插入损耗必将越来越大。为了延长光开关的寿命, 去簧片移动耦合光纤设计势在必行。结合第五章电磁驱动摆杆转换光路的思路, 光纤直接耦合微加工型  $1 \times 2$  光开关可以设计成如图 6.1 所示模型, 运用电磁驱动器驱动铝制摆杆移动实现光路转换。制作器件过程中应注意使摆杆水平悬空以避免摆杆和基板摩擦导致降低开关速度,  $\pm 5\text{V}$  驱动输入光纤对准相应的输出光纤时保证摆杆与挡壁具有一定相互作用力, 即摆杆移动范围在实际最大摆动范围之内。考虑到在摆杆上直接加工 V 型槽来放置输入光纤, 增加了器件制作难度, 无法保证成品质量。于是在在置放光纤位置激光点焊两个经过校准定位的高精度 V 型槽贴片, 再完全固定光纤得到工作较为理想的  $1 \times 2$  光开关。可以预计该光纤直

接耦合微加工型光开关也能达到亚毫秒级速度即开关时间将小于  $750 \mu s$ ，回波损耗为  $-47dB$ ，插入损耗为  $0.8dB \sim 1.1dB$ ，而且器件使用寿命将更长。其缺点就是体积稍大，与原来尺寸  $31 \times 11 \times 5 \text{ mm}^3$  比较，成品尺寸将为  $15.13 \times 23.19 \times 7.14 \text{ mm}^3$ 。

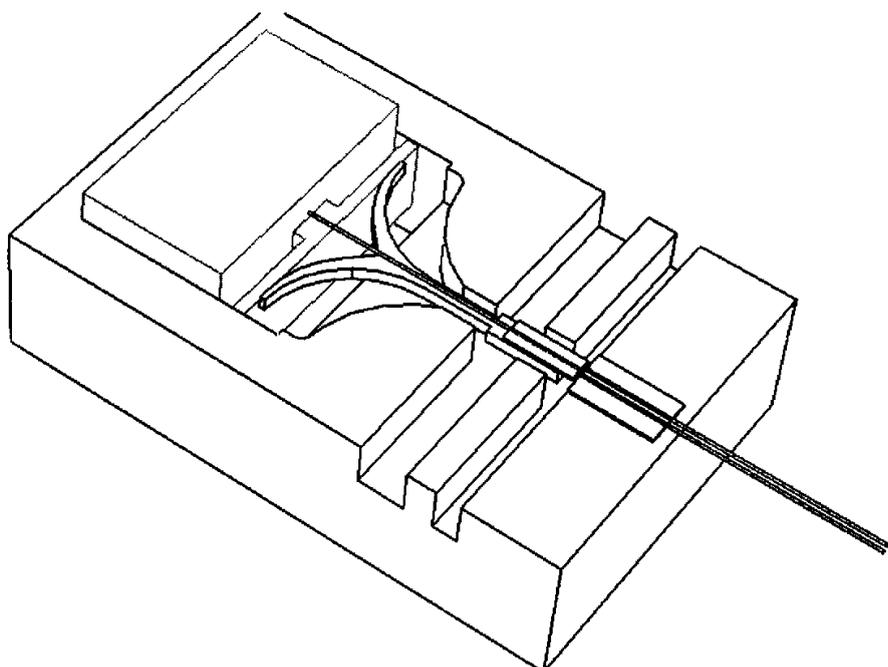


Fig.6.1  $1 \times 2$  micromachining based optical switch

②将光开关和可调光衰减器功能设计集中到一个器件当中，得到一种新概念光无源器件——可调光功率分配器，其原理图可以参照第五章  $1 \times 2$  光开关单元原理设计为如图 6.2 所示，在输出准直器和最近的微镜间增加挡光片微移动来实

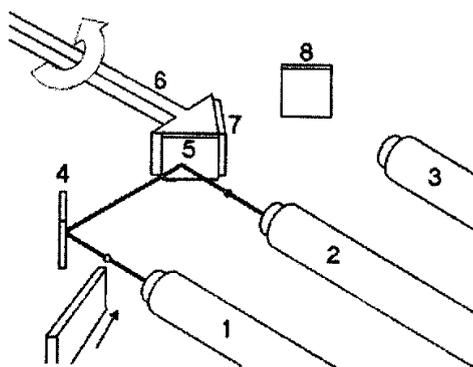


Fig.6.2 The principle of tunable optical power-controller

现光路衰减，从而使该器件既实现光开关功能，又实现了光衰减可调。关于挡光片微位移驱动器可以采用步进电机或第 4 章图 4.1 介绍的凸轮微发动机。也可以采用如图 6.3 所示原理，当向横向位移驱动器输入驱动电压时，横向弹性片带动齿条作横向运动，距离为齿条的一个齿距，同时带动齿轮转动过一个齿距（图 4a）。此时，向纵向位移驱动器输入驱动电压，带动纵向弹性片作纵向运动，使得横向弹性片也纵向运动，齿条脱离与齿轮的啮合（图 4b）。然后撤销横向位移驱动器两端电压，则横向位移驱动器带动齿条回到初始位置，而由于齿条未与齿轮啮合，齿轮保持位置不变（图 4c）。此时撤销纵向位移驱动器两端电压，纵向弹性片回到初始位置，齿条与齿轮啮合，实现自锁（图 4d）。从（a）到（d）四个运动过程的驱动电路控制过程。这个过程不断重复，可以使齿轮不断转动，且每次转动为一个齿距，齿轮的转动将带动偏心轮转动。由于挡光片末端是在弹性片作用下与偏心轮保持点接触的，偏心轮转动，推动挡光片作水平推进或后退。在连续电脉冲的作用下，挡光片在光路中步进移动，实现对输入光功率的数字化衰减。

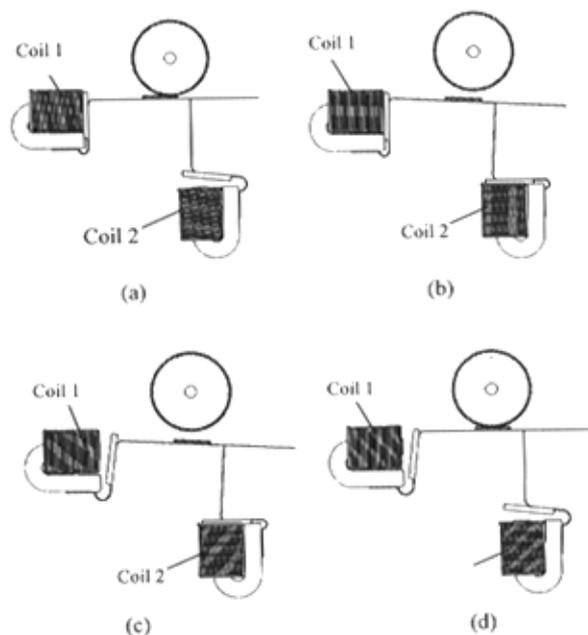


Fig . 6.3 Schematic of each step in VOA operation

③除了使用柔性弹片设计和磁驱动方式外,微加工型光开关和可调光衰减器也可以尝试使用热驱动、压电驱动和静电梳状结构驱动(如表 6.1 所示为三种驱动方式的比较),但是热驱动受材料选择影响太大,响应速度往往需要数十毫秒甚至数秒,所以如何有效提高热驱动光无源器件的响应速度是制作关键。而压电材料由于存在位移滞回环现象,一般  $15 \times 13 \times 15 \text{ mm}^3$  的压电材料在  $\pm 300\text{V}$  电压下能够实现  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  位移量,回零偏差  $0.05 \mu\text{m}$ ,位移最大偏差在  $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$  左右。较好的价格昂贵的压电材料也需要在  $60\text{V}$  电压下实现  $900 \mu\text{m}$  位移,其位移最大偏差大致在  $10 \mu\text{m}$  左右<sup>[29]</sup>。因此选用压电驱动制作光开关及可调光衰减器并非明智之举,而微加工型梳状结构静电力过小经过公式<sup>[6]</sup>估算只有约  $10^{-5}\text{N}$  量级。如何进一步改进驱动结构,提高静电力有待解决。

表 6.1 The comparison of several kinds of actuators

操作器的种类	动作范围(应变)	响应速度	发生力大小	驱动电压	特点
形状记忆合金	大	小	大	加热器加热	需要散热
双金属片	中	小—中	小	加热器加热	需要散热
压电型	小于数十微米	高 100KHz	大	10—100V	有蠕变、迟滞
静电型	大	中—高	小	5—100V	集成度高

目前,微加工型光无源器件与 MEMS 器件一样,尽管抗振性差,使用寿命受到活动部件的影响而且需要防尘,但是仍能在业内占据主流地位。这与它小体积,低廉的成本和稳定且较优的性能是分不开的。此外,随着微加工技术不断提高,微加工精度已能达到  $0.025 \mu\text{m}$  左右的最高水平。一言以蔽之,微加工型光无源器件仍然相当看好。

## 参考文献

- [1] K.C. Kao and G.A. Hockham, Dielectric Fiber Surface Waveguides for Optical Frequencies, Proceedings of the IEE, 1966(Vol:113), July(No:7): 1151~1158.
- [2] Armand Neukermans, Rajiv Ramaswami. MEMS Technology for Optical Networking Applications, IEEE, Communications magazine, 2001, January: 62~69.
- [3] Morito K. Dynamic Analysis of MZISOA All Optical Switches For Balanced Switching [A] .23rd European Conference on Optical Communications [C] ,1997, Feb: 81-84.
- [4] Junfeng Bao, Ye Yuan, Zhonghui Cao and X.Wu . A Low Voltage Micromachining Based Scalable Optical Switch, Proceedings of SPIE. 2002(4928): 222~224.
- [5] David J. Bishop, C. Randy Giles, and Gary P. Austin, Lucent technologies The Lucent lambdaRouter: MEMS Technology of the Future Here Today.IEEE Communications Magazine , 2002, March:75-79.
- [6] J. Patel et al.Liquid Crystal and Grating-Based Multiple-Wavelength Cross-Connect Switch. IEEE Photonics Technology Letters, 1995(7), May (5):514~516.
- [7] Zhonghui Cao, Ye Yuan, Junfeng Bao and X.Wu . A Micromechanical Variable Optical Attenuator Based on EDM Micromachining .Proceedings of SPIE, 2002(4928):225~227.
- [8] Chihchung Chen,Chengkuo Lee et al.Novel VOA Using in-plane Reflective Micromirror and Off-axis Light Attenuator. IEEE,2003, August:516~520.
- [9] S. Nemoto, T. Makimoto. Analysis of Splice Loss in Single-mode Fibers Using A Gaussian Field Approximation. Optical and Quantum Electronics, 1979(11), May(5): 447~457.
- [10] Martin Hoffman, Peter Kopka, Edgar Voges.Bistable Micromechanical Fiber-optic Swithes on Silicon with Thermal Actuators. Sens.Actuators, 1999(A78), Nov(11):28~35
- [11] 王国强 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践, 西安: 西北工业大学出版社, 2001  
WANG Guo-qiang. Practical Numerical Simulation Techniques by ANSYS, Xi'an, published by Xibei Technical Press, 2001.
- [12] Y.Kanamori, Y.Aoki, et al. Driving of optical fiber by surface-micromachined cam-micromotor of new type of MEMS variable optical attenuator.IEEE.2003 ,March:119~120.

- [13] 吴茂松, 杨春生等 新型 MEMS 可变光衰减器的微执行器 压电与声光 2003 年 25 卷 1 月第 1 期: 26~29  
Wu Maosong, Yang Chunsheng et al. Magnetic Micro Actuator of New Type of MEMS Variable Optical Attenuator. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2003 (25), Jan(1): 26~29.
- [14] 赵小林, 李文军, 周光亚, 张明生, 蔡炳初 电磁驱动 MEMS 可调式光衰减器的设计 微细加工技术 2000 年 4 月第 4 期: 60~67  
Zhao Xiaolin, Li Wen-jun, Zhou Guangya, Zhang Ming-sheng, Cai Bing-chu. Design of electromagnet moving-MEMS variable optical attenuator *Microfabrication Technology*, 2000, April (4) :60~67
- [15] 李文军, 赵小林, 蔡炳初 一种新型微机械可变式光衰减器 高技术通讯 2003 年 13 卷 3 月第 3 期: 52~55  
Li Wenjun, Zhao Xiaolin, Cai Bing-chu. A Novel Micro-Mechanical Variable Optical Attenuator. *High Technology Letters*, 2003(13), March(3):52~55.
- [16] X.M.Zhang, A.Q.Liu and D.Y.yang. MEMS Variable Optical Attenuator Using Low Driving Voltage for DWDM systems *Electronics Letters*, 2001(38), April(8):382~383
- [17] Cornel Maxer, Patric Gris and Nicolaas.F de Rooij. A Variable Optical Attenuator Based on Silicon Micromechanics. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999(11), Feb(2):233~235
- [18] Wilfried Noell, Pierre Andre Clerc, Laurent Dellmann et al. Application of SOI-Based Optical MEMS. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002(8), Jan(1): 148~154.
- [19] Fang Laifu, Xu Rong, Liu Xueyuan, Lin Mianfen, Zhang Jie, Gu Wanyi. Homodyne Crosstalk in All Optical Network. *Acta Photonica Sinica*, 2000(29), May(5): 454~458.
- [20] Lei Zong, Yanhe Li, Hanyi Zhang, Xiaoping Zheng, Yili Guo. Low Crosstalk Structure for Integrated OXC/OADM in WDM Optical Transport Networks. *Optics communication* 2001 (195) :179~186.
- [21] Peter De Dobbelaere, Kan Falta and Li Fan et al. Digital MEMS for Optical Switching. *IEEE Communication Magazine*, 2002, March:88~95.
- [22] Bao JunFeng, Cao Zhonghui and Yuan Ye. A Non-silicon Micro-machining Based Scalable Fiber Optic Switch. *Sensors and Actuators*, 2004(116), April(2):209~214.
- [23] 赵波, 李宏生 MEMS 光开关研究进展 微纳电子技术 2004 年 41 卷 2 月第 2 期: 32~

- Zhao Bo and Li Hongsheng. Development and Progress on MEMS Optical Switch. *Micronanoelectronic Technology*, 2004(14), Feb(2): 32~37.
- [24] 鲍俊峰, 曹钟慧, 袁野等 低电压驱动微机械  $1 \times 8$  光开关的动态分析 光电子激光, 2004 年 15 卷 1 月第 1 期: 41~44  
Bao Junfeng, Cao Zhonghui and Yuan Ye et al . Dynamic Analysis of Low Voltage Micro-machining Based  $1 \times 8$  Optical Switch. *Optoelectronics and Laser*, 2004(15), Jan(1) : 41~44.
- [25] 杨艺榕, 刘文平, 王跃林 转动竖直镜面微机械光开关 功能材料与器件学报, 2004 年 10 卷 1 月第 3 期: 54~58  
Yang Yirong, Liu Wenping and Wang Yuelin. Fiber Optical Swiches Based on MEMS Vertical Rotation Mirror. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2004 (10), Jan(3): 54~58
- [26] Lionel Houlet, Philippe Helin and Tarik Bourouina et al. Movable Vertical Mirror Arrays for Optical Microswitch Matrixes and Their Electromagnetic Actuation. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002(8), Jan(1): 58~63.
- [27] H. Toshiyoshi, H. Fujita. Electrostatic Micro Torsion Mirrors for An Optical Switch Matrix. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 1996, May(5): 213~237.
- [28] 晏辉鸣, 万鹏, 吴兴坤. 光纤直接耦合微加工型  $1 \times 2$  光开关 光子学报, 2004 年 33 卷 5 月第 5 期: 536~539  
Yan Huiming, Wan Peng and X. Wu.  $1 \times 2$  Micromachining Based Direct-Coupled Fiber Optical Switch. *Acta Photonica Sinica*. 2004(33), May (5): 536~539.
- [29] 柳光全, 阮玉, 刘猛, 杨宜 一种电控可变光衰减器的研制 光电子技术与信息, 2002 年 15 卷 12 月第 6 期: 12~15  
Liu Guangquan, Ruan Yu, Liu Meng and Yang Yi. Development of A New Type of Electronic-controlled Variable Optical Attenuator. *Optoelectronic Technology and Information*. 2002(15), Dec(6): 12~15.

## 附录

## 硕士期间发表的论文

- [1] 晏辉鸣, 万鹏, 吴兴坤 光纤直接耦合微加工型  $1 \times 2$  光开关 光子学报  
2004 年 33 卷 5 月第 5 期: 536~539;  
Yan Huiming, Wan Peng and X.Wu.  $1 \times 2$  Micromachining Based  
Direct-Coupled Fiber Optical Switch. Acta Photonica Sinica. 2004(33), May  
(5): 536~539.
- [2] 曹钟慧, 晏辉鸣, 吴兴坤 可调光衰减器的光衰减量线性补偿 光子学报  
2004 年, 33 卷第 7 期: 826~829;  
Cao Zhonghui, Yan Huiming and X.Wu. The Linearity Compensation of A  
Digital Micro-machining Based Variable Optical Attenuator. Acta Photonica  
Sinica. 2004(33), July(7): 826~829.
- [3] 晏辉鸣, 曹钟慧, 吴兴坤 光纤直接耦合微加工型可调衰减器 光子学报  
2005 年  
Yan Huiming, Cao Zhonghui and X.Wu. Micromachining Based  
Direct-Coupled Variable Optical Attenuator. Acta Photonica Sinica. 2005.
- [4] 万鹏, 晏辉鸣, 吴兴坤 一种智能光网络中的亚毫秒光开关阵列 光子学  
报 2005 年  
Wan Peng, Yan Huiming and X.Wu. Sub-millisecond Optical Switch Array for  
ION. Acta Photonica Sinica. 2005.
- [5] Yan Huiming, Cao zhonghui, X.Wu. Micromachining Based Fiber-Coupled  
Variable Optical Attenuator. Proceedings of SPIE. 2004.
- [6] Cao Zhonghui, Yan Huiming, X.Wu The Linearity Compensation Of A  
Digital Micro-machining Based Variable Optical Switch. Proceedings of SPIE.  
2004.

## 致 谢

论文完成之际，首先应当感谢我的导师吴兴坤教授。吴老师为人勤勉，学识渊博，工作细致，令人敬佩。非常感谢他在学习上对我的指引，在科研上对我的悉心指导，在工程实践上对我的帮助。在吴老师的教诲下，使我获益非浅，扩展了视野，提高了理论水平，锻炼了实际动手技能。

此外，非常感谢来自实验室师兄兄弟们的帮助。感谢万鹏博士、曹钟慧博士、鲍俊峰博士、邹勇卓博士和我讨论问题，解答疑问；感谢袁野硕士，王斌硕士，王磊硕士，吴君豪硕士以及 2004 级师弟师妹们给予我的支持；也要感谢其他实验室的老师同学和一直以来对我的帮助。

最后，深深感谢永远关心爱护我的父母，爷爷和奶奶。

晏辉鸣

2005 年 1 月 13 日