

Continuous-Membrane Single-Crystal-Silicon Mirrors for Adaptive Optics Fabricated by Wafer Bonding Process

著者	呉 同
号	58
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第004852号
URL	http://hdl.handle.net/10097/58910

氏名	ごとう 呉 同
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成25年9月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) ナノメカニクス専攻
学位論文題目	Continuous-Membrane Single-Crystal-Silicon Mirrors for Adaptive Optics Fabricated by Wafer Bonding Process
指導教員	東北大学教授 羽根 一博
論文審査委員	主査 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 桑野 博喜 東北大学教授 小野 崇人 東北大学准教授 金森 義明 東北大学准教授 秋山 正幸

論文内容要旨

Adaptive Optics (AO) plays a significant role in high-performance imaging as it enables the measurement and subsequent correction of optical aberrations in real time. The AO system is comprised of two main components: wavefront sensor and wavefront corrector, which are connected by a real-time controller. The wavefront corrector which is usually called deformable mirror (DM) is a core component for aberration compensation. Presently, the stroke of the current available DM cannot meet the requirement for the AO system of the next-generation large telescopes.

Wafer bonding has been an important technique in micro fabrication as a technique for device packaging and sealing since the mass manufacturing of MEMS (micro-electro-mechanical system) devices. In particular, bonding techniques play an important role in making micro cavities in some MEMS devices such as microphone, pressure sensors and some other vacuum packaged devices. Moreover, for the development of next-generation microsystems, wafer bonding is of great importance to combine different high-performance materials or subsystems such as single-crystal-silicon, III-V materials, piezoelectric materials, carbon nanotubes, graphene, etc. Also, for constructing the electric interface for transducers, integrated circuits are desired to be combined with the transducers. The technology for combining the different high-performance materials or subsystems into a microsystem is called heterogeneous integration.

As discussed in chapter 1, wafer bonding technology holds unparalleled superiority to the traditional fabrication method, such as bulk micromachining, surface micromachining in the fabrication of MOEMS (micro-opto-electro-mechanical system) device. Especially in continuous membrane mirror fabricating, wafer bonding technology provides a much easier process than that using surface micromachining for generating a large scale freestanding continuous membrane mirror.

This work mainly focus on the development of a continuous membrane mirror for adaptive optics using wafer bonding technology. To solve the problem that the stroke of the current DM is not enough, an alternative method is proposed in chapter 2. By introducing a reflective phase plate into the AO system, the static aberration can be compensated and the DM is only

responsible for the dynamic aberration. The reflective phase plate expressed by Zernike modes are fabricated by bending silicon thin-plate. A 10 μm thick silicon plate was bonded to a glass plate using anodic bonding to form a smooth spherical surface. A series of convex spherical surface with different diameter was generated. The surface profiles were fitted by a parabolic curve and the rms error derives from the parabola was less than around 25 nanometers. The concave spherical surface with a diameter of 800 μm was also fabricated. Furthermore, a 6-order polynomial surface expressed by high-order spherical aberration mode was also generated.

In chapter 3, a novel approach was theoretically proposed and experimentally demonstrated for fabricating high aspect ratio, precise, spherical micromirror. Smooth spherical surface was realized by bending single crystal silicon (SCS) membrane. The surface profiles of the fabricated spherical mirrors were well fitted with parabolic curve. The focal lengths range from 0.4mm to 1.6mm with the corresponding diameter ranging from 100 μm to 400 μm . Moreover, extremely low-roughness ($\sim 2\text{nm}$) mirror surface was guaranteed because no etching process was implemented on it. Polymeric lens was also manufactured using the fabricated mirror as a mold with a high accuracy. The simple bending mechanism for spherical surface generation makes this method a stable and effective approach for the fabrication of high-aspect ratio surface micromirror and microlens.

To enlarge the stroke of the DM is also considered as an urgent issue. In chapter 4, a DM using bimorph spring is proposed and fabricated to solve this problem. Different from the previous design which always used a micro-post to support the membrane, the mirror membrane is designed to be supported by a bimorph cantilever spring. As shown in Fig. 1(a), this bimorph spring contains two layers: silicon layer and HfO₂ layer. The HfO₂ film stress will bend the bimorph spring out of the plane. The bimorph spring elevates the mirror membrane which is driven by a voltage applied on the electrode under it. The out-of-plane deflection of the bimorph spring was first evaluated by FEM (Finite Element Method) simulation. Then the fabrication of the bimorph spring was conducted and the deflection was measured before and after HfO₂ crystallization. The intrinsic stress and crystallization-induced stress of HfO₂ was calculated to be 590MPa and 1.56GPa, respectively. Using this value of stress, the length of the bimorph spring was designed to be 200 μm to get an enough electrode gap. A SCS membrane transfer process for large-stroke continuous membrane DM is proposed and demonstrated. A 2 μm -thick membrane is transferred to a flexible bimorph array by combining bulk micromachining, Au-Si eutectic bonding technology and the subsequent all-dry release process. The HfO₂ stress layer of the bimorph spring introduced an electrode gap of $\sim 20\mu\text{m}$. Au-Si eutectic bonding guarantees the desired bonding strength and electric interconnect. Two types of DM (with and without the side suspension) are fabricated. A 0.86mm \times 0.86mm mirror membrane with a underlying 2 \times 2 electrode array is supported by a 3 \times 3 bimorph spring array. The stroke of the two types of DMs are 3.7 μm at 120V (with suspension) and 7.6 μm at 110V (with suspension), respectively. The fill factor of the fabricated mirror is $\sim 99.9\%$. This process allows transferring an edge-free SCS membrane to a flexible suspension spring array with a large air gap. The applications of this transfer process extend to the

fabrication of many other MEMS devices such as large stroke actuators, wavelength selective switches and biosensors in additions to deformable mirrors.

Furthermore, $8 \times 8/4 \times 4$ pixel continuous membrane deformable mirror is designed and fabricated in chapter 5. The design of the $8 \times 8/4 \times 4$ pixel DM is shown in Fig. 1(b) and Fig. 1(c). The fabricated 4×4 pixel DM and 8×8 pixel DM are shown in Fig. 2(a) and Fig. 2(b), respectively. The SCS membrane of the 4×4 pixel DM is well supported by the bimorph springs with a uniform gap. The initial air gap is from $15 \mu\text{m}$ to $18 \mu\text{m}$. The stroke of the fabricated 4×4 pixel DM is measured to be $3.5 \mu\text{m}$ at 115V and the pull-in voltage is 130V , as shown in Fig. 2(c). The device influence function was measured by actuating a single pixel and measuring the displacement of neighboring actuator and comparing this to the displacement of the actuated pixel. The measured influence was 51% , with a variation of $<3\%$.

In chapter 6, the whole thesis is summarized.

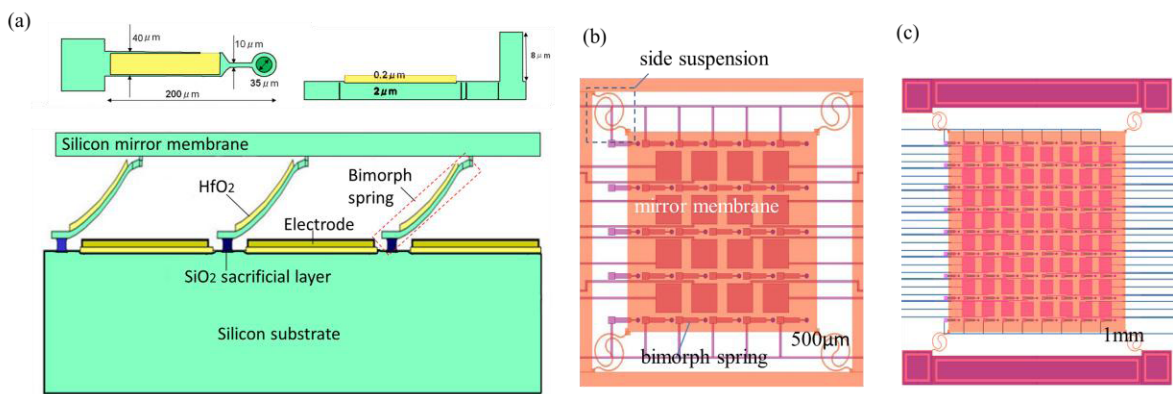


Fig. 1 (a) schematic diagram of the structure of the proposed DM; (b) design of the 4×4 pixel DM; (c) design of the 8×8 pixel DM

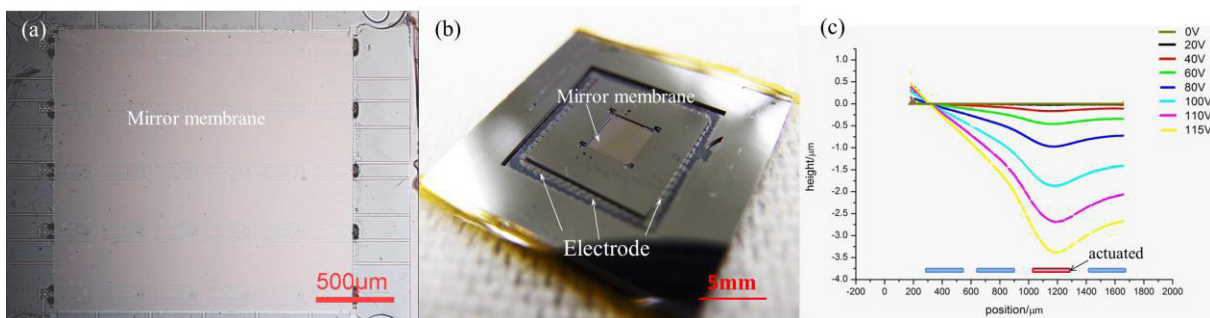


Fig. 2 (a) fabricated 4×4 pixel DM; (b) fabricated 8×8 pixel DM; (c) deflection profile with zero-voltage profile subtracted of the 4×4 pixel DM.

論文審査結果の要旨

補償光学ミラーは、大型天体望遠鏡において、大気揺らぎにより生じる結像の劣化を補償するために不可欠な装置である。また、眼科の網膜観察において、個々の眼の光学ひずみの違いを補正するためにも有効である。しかし、現状では補償できる波面ひずみは小さく、大きいひずみを補正することが望まれている。たとえば、次世代大型天体望遠鏡では $20\mu\text{m}$ のミラー変位が要求されているが、連続膜ミラー方式では $3.5\mu\text{m}$ に留まっている。分割ミラー方式では $10\mu\text{m}$ 程度の変位が得られているが、不連続なミラー面となるため、回折光雑音が発生する。大変位の補償光学ミラーを連続膜により形成することは、設計および製作において困難が多く、実用化を阻んでいる。本研究では、マイクロマシニングによりシリコンの連続膜を形成し、アクチュエータアレイを形成した別基板にウエハ接合することで、連続膜の補償光学ミラーを実現する方法を提案し、設計、製作を行っている。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編 6 章からなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、固定の波面位相を発生できるシリコン単結晶連続膜を用いた位相板を、陽極接合により形成する方法を提案し、設計、製作した結果について述べている。シリコン単結晶膜の弾性変形により、ゼルニケモードのいくつかを実現できることを見出している。これは有益な成果である。

第 3 章では、シリコン単結晶連続膜の陽極接合により、高いアスペクト比の球面ミラーを製作した結果について述べている。表面粗さが 36nm である滑らかな球面のミラーを実現している。これは有用な知見である。

第 4 章では、連続膜の補償光学ミラーを形成するために、シリコン単結晶連続膜の大面积移動プロセスを提案し、設計、製作した結果について述べている。Au-Si の共晶を利用したシリコン単結晶連続膜の接合により、十分な接合強度を達成し、99.9% のミラー利用率を実現している。さらに、 HfO_2 膜の結晶化により発生する引張応力を利用して、ばね構造を立ち上げて、 $20\mu\text{m}$ の初期間隙および $4\mu\text{m}$ 変位を達成している。これらは重要な成果である。

第 5 章では、 4×4 および 8×8 ピクセルのアクチュエータアレイを備えた連続膜の補償光学ミラーを設計、製作した結果について述べている。 $4\text{mm}\times 4\text{mm}$ の面積で厚さ $2\mu\text{m}$ の自立したシリコン単結晶連続膜を実現できている。隣接ピクセルの結合係数は 0.51 であり、膜の変位の時間応答は 1.3ms であることを示している。2 種類のピクセル数の試作から、提案された製作方法は、さらに大きな変位の発生とミラー面積を拡大するように展開できることを示している。これらの結果は有用な知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、マイクロマシニングによりシリコンの単結晶連続膜を形成し、アクチュエータアレイを形成した別基板に、Au-Si の共晶を利用してウエハ接合することで、連続膜の補償光学ミラーを形成する方法を提案し、実現したもので、ナノメカニクスおよび精密工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。