**Методические указания для студентов**

**при выполнение курсовой работы**

**по дисциплине «Техническая механика микросистем»**

Часть 3. Расчет двухкоординатного микрозеркала на торсионных подвесах

Теоретические сведения и методика расчета.

Двухкоординатные микромеханические системы отклонения лазерного луча нашли применение, как в специальной, так и в бытовой технике. Достоинство таких систем – работа с высокой частотой отклонения луча, малые размеры, простота конструкции, низкая энергоёмкость.

Вся конструкция микрозеркала формируется на поликристаллическом кремнии методом планарной технологии. Формирование отражающего металлического покрытия осуществляется напылением при температуре 400 0С или электрохимическим осаждением.

Характеристики материалов, применяемых в конструкции микрозеркала приведены в таблице 8.1. Диапазон рабочих температур микрозеркала принят от +50 до -30 0С.

Таблица.8.1

Характеристики материалов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Si – пол. | Au | Al | Ni |
| Плотность, q, г/см3 | 2.33 | 19.3 | 2.4 | 8.0 |
| Модуль упругости Е, МПа | 1.7∙105 | 0.8∙105 | 0.7∙105 | 2.1∙105 |
| Модуль сдвига G, МПа | 0.68∙105 | 0.32∙105 | 0.28∙105 | 0.84∙105 |
| Коэффициент термического расширения , °С-1 | 4.7∙10-6 | 14∙10-6 | 26∙10-6 | 13∙10-6 |

Общий схема двухкоординатного микрозеркала приведен на рис. 8.1. , где 1- зеркальный элемент; 2- рама; 3- торсион зеркального элемента; 4- торсион рамы.



Рис. 8.1

Методика расчёта параметров двухкоординатного микрозеркала.

Расчёт зеркального элемента на торсионах

Основание элемента несёт на себе отражающее покрытие, выполненное из Au, Al или Ni. Материал основания – кремний поликристаллический с размером зерна 0,3 – 0,4 мкм. Торсионы одноветьевые.

Зеркальный элемент представлен на рис. 8.2 . Полная масса зеркального элемента включает в себя массу основания (*Si*) и отражающего металлического слоя (*Ме*) толщиной *h* мкм. Все размеры задаются вариантом курсовой работы по табл. 8.3.

,

где:  - масса основания из *Si*;

 - масса отражающего слоя *Ме*;

*a4*, *h0*  - ширина и толщина основания из *Si* (см. табл. 8.3);

*a5*, *hMe* - ширина и толщина отражающего слоя *Ме*.



Рис. 8.2

Расчёт длины торсиона проводится из условия поворота зеркала на угол ***θ0*** вокруг оси торсиона. При закручивании торсионов, выполненных из хрупкого материала (Si - поликристаллический) в условиях нормальных температур разрушение происходит за счёт действия главных растягивающих напряжений, равных главным касательным напряжениям. С учётом этого длину торсиона определим из допускаемых напряжений на растяжение при коэффициенте запаса прочности *n3*=2 т.е. , где предел прочности поликристаллического кремния при растяжении ****= 150Мпа .

*Допускаемое напряжение при кручении* определяется как,

, (8.1)

где – крутящий момент на торсионе, – момент сопротивления торсиона при кручении.

Определим крутящий момент в сечении торсиона из уравнения (8.1)

 (8.2)

При кручении торсиона с прямоугольным сечением вычислим момент сопротивления и момент инерции прямоугольного сечения:

, , (8.3)

Величина ***К***  является отношением высоты поперечного сечения торсиона к его ширине и определяет значения коэффициентов α и *β* ( табл.8.2)

Таблица 8.2

Коэффициенты α и *β* для расчета и .

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
|  | 0,140 | 0,294 | 0,457 | 0,790 | 1,123 |
|  | 0,208 | 0,346 | 0,493 | 0,801 | 1,15 |

Для указанной конструкции зеркального элемента задано прямоугольное сечение торсиона размером .

*Угол закручивания* определяется по формуле

, (8.4)

где  – длина торсиона зеркального элемента.

Из уравнения (8.4) вычислим длину торсиона для угла закручивания 

, (8.5)

*Расчёт коэффициента допустимой динамической перегрузки* проводим из анализа напряженно-деформированного состояния при изгибе от действия статической нагрузки (собственный вес).

При статическом нагружении торсионов зеркального элемента величина растягивающего напряжения при изгибе определится из анализа схемы нагружения, приведённой на рисунке 8.3.а.



Рис. 8.3

Система статически неопределимая, симметричная. При вертикальной нагрузке в силу симметрии системы горизонтальными реакциями из-за их малости пренебрегаем. Моменты в заделках торсиона на раме и зеркального элемента равны. Отсюда момент в заделке (см. эпюры моментов на рисунке 8.3.б) равен



*Максимальное растягивающее напряжение* в торсионе проводим по формуле:

 (8.6)

где  – момент сопротивления сечения торсиона при изгибе.

*Коэффициент допустимой динамической нагрузки* для 

 (8.7)

Расчёт рамы с торсионами

На рисунке 8.4 приведена схема рамы с торсионами. Материал рамы – кремний поликристаллический.



Рис. 8.4

*Масса рамы* определяется произведением:

,

где *lk* - длина контура рамы, *d* - ширина контура рамы, *h0* - толщина рамы, *ρSi* - плотность кремния.

Расчёт длины торсиона рамы проводим из условия поворота рамы на угол  вокруг оси торсиона. *Допускаемое напряжение* в торсионе

,

Для материала торсиона имеем = 150 МПа. Сечение торсиона принимаем равным *C2∙h0* (см. табл. 8.3).

Для соотношения  коэффициенты  и  определяются по таблице 8.3. Отсюда:

.

*Крутящий момент* на торсионе рамы, соответствующий допускаемым напряжениям  равен:

 (8.8)

При заданном угле закручивания *длина торсиона рамы* определится из уравнения:



*Расчёт коэффициента допускаемой динамической перегрузки* рамы проводим из анализа напряжённого состояния при изгибе от действия весовой нагрузки, включающей массу зеркального элемента *m3* и массу рамы *mp*.

Максимальные растягивающие напряжения в торсионе рамы равны

 , (8.9)

где величина момента сопротивления торсиона .

Коэффициент допустимой динамической нагрузки равен

 . (8.10)

Расчёт деформации зеркального элемента в рабочем диапазоне температур.

Надёжность работы двухкоординатного микрозеркала определяется температурной деформацией зеркального элемента, представляющего собой двухслойную пластинку Si – Me. В такой структуре материалы слоёв имеют большую разницу в коэффициентах термического расширения  (в 3 – 5 раз). Величины коэффициентов  для Si металлических отражающих слоёв приведены в таблице. Схема плоской температурной деформации зеркального двухслойного элемента показана на рис. 8.5.



Рис.8.5

Для оценки влияния температуры на деформацию двухслойного элемента считаем напряжённое состояние плоским, двухслойная пластина единичной ширины со свободными краями.

Прогиб и угол поворота сечения двухслойной пластины определим интегрированием уравнения (8.6)

, (8.11)

где  – изменение температуры от нормальной, , – модули упругости металлического слоя и кремния, , – моменты инерции сечений слоёв, , – толщины металлического слоя и слоя кремния, , – коэффициенты термического расширения металла и кремния.

При интегрировании уравнения в качестве граничного условия принимаем прогиб на границе пластины равный *0*, угол поворота в центре в центре пластины равный *0* (см. рис.8.5).

Расчётное уравнение для определения угла поворота на периферии пластины имеет вид:

, (8.12)

Уравнение для расчёта прогиба запишется так:

, (8.13)

Расчёт резонансной частоты зеркального элемента и микрозеркала.

Свободные колебания зеркального и микрозеркала рис.8.6 (демприрование равно нулю) определяется действием инерционного и упругого моментов. Условие равновесия элемента запишется в виде:





Рис.8.6

или  , (8.14)

где ,  – момент инерции твёрдого тела,  - угол закручивания.

Решение уравнения (8.14) имеет вид:

 (8.15)

Собственная круговая частота, как следует из (15) определится зависимостью:



откуда циклическая частота будет равна:

 (8.16)

где  – момент, необходимый для закручивания элемента с двумя торсионами на один радиан; *ω* – период колебания.

Расчётное уравнение для определения циклической частоты записывается в виде:

 (8.17)

где  – длина торсиона,  – момент инерции при кручении, *IM* – момент инерции твёрдого тела относительно оси вращения, – модуль сдвига кремния (*G* ~ 0,4 E).

Величина рассчитывается по приведённым выше формулам для торсиона зеркального элемента и рамы.

Момент инерции твёрдого тела *IM* определяется массой тела и расстоянием от центра масс до оси вращения и определяется зависимостью:

 (8.18)

где *R* – расстояние от центра массы до оси вращения.

Для квадрата с сечением *hh* момент инерции относительно главной оси, проходящей через центр масс равен:

 (8.19)

8.2 Варианты заданий на курсовую работу.

Для заданных размеров элементов микрозеркала рассчитать параметры торсионов, коэффициенты динамической перегрузки, резонансные частоты зеркального элемента и микрозеркала, прогиб микрозеркала в диапазоне рабочих температур, сделать эскизы с расчетными размерами микрозеркала.

Схема микрозеркала для различных вариантов заданий приведена на рис.8.1, необходимые размеры в таблице 8.3. Пояснительная записка, схемы и эскизы курсовой работы оформляются в распечатанном виде на листах формата А4. Размеры на эскизах указывать в мкм.

Слой металлизации Ме для всех вариантов 0.5 мкм. =50 С.













Таблица 8.3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вар.  № | Размеры элементов, мкм. | | | | | | Угол  отклонения, | Материал отражающего  слоя |
|  |  |  |  |  |  |
| 1 | 300 | 290 | 2,5 | 3 | 2,5 | 20 | 5 | Au |
| 2 | 300 | 290 | 2,5 | 3 | 2,5 | 20 | 10 | Al |
| 3 | 300 | 290 | 2,5 | 3 | 2,5 | 20 | 5 | Ni |
| 4 | 300 | 290 | 2,5 | 3 | 2,5 | 20 | 10 | Au |
| 5 | 300 | 290 | 2,5 | 3 | 2,5 | 20 | 5 | Al |
| 6 | 350 | 300 | 3 | 3,5 | 2,5 | 23 | 10 | Ni |
| 7 | 350 | 300 | 3 | 3,5 | 2,5 | 23 | 5 | Au |
| 8 | 350 | 300 | 3 | 3,5 | 2,5 | 23 | 10 | Al |
| 9 | 350 | 300 | 3 | 3,5 | 2,5 | 23 | 5 | Ni |
| 10 | 350 | 300 | 3 | 3,5 | 2,5 | 23 | 10 | Au |
| 11 | 400 | 360 | 3 | 3,5 | 3 | 25 | 5 | Al |
| 12 | 400 | 360 | 3 | 3,5 | 3 | 25 | 10 | Ni |
| 13 | 400 | 360 | 3 | 3,5 | 3 | 25 | 5 | Au |
| 14 | 400 | 360 | 3 | 3,5 | 3 | 25 | 10 | Al |
| 15 | 400 | 360 | 3 | 3,5 | 3 | 25 | 5 | Ni |
| 16 | 450 | 420 | 3,5 | 3,5 | 3 | 30 | 10 | Au |
| 17 | 450 | 420 | 3,5 | 4 | 3 | 30 | 5 | Al |
| 18 | 450 | 420 | 3,5 | 4 | 3 | 30 | 10 | Ni |
| 19 | 450 | 420 | 3,5 | 4 | 3 | 30 | 5 | Au |
| 20 | 450 | 420 | 3,5 | 4 | 3 | 30 | 10 | Al |
| 21 | 500 | 470 | 4 | 4 | 3,5 | 35 | 5 | Ni |
| 22 | 500 | 470 | 4 | 4 | 3,5 | 35 | 10 | Au |
| 23 | 500 | 470 | 4 | 4 | 3,5 | 35 | 5 | Al |
| 24 | 500 | 470 | 4 | 4 | 3,5 | 35 | 10 | Ni |
| 25 | 500 | 470 | 4 | 4 | 3,5 | 35 | 5 | Au |

8.3 Пример выполнения курсовой работы.

Расчёт двухкоординатного зеркала на торсионных подвесах.

Расчёт зеркального элемента на торсионах.

Размеры зеркального элемента по заданию:

*a4* =400мкм, *a5* = 385мкм, *C1* = 1,5мкм, *C2* = 2мкм, *h0* = 3мкм, *hм* = 0,5мкм

Основание зеркального элемента – кремний поликристаллический несет металлический (Au) отражающий слой толщиной 0,5 мкм. Схема зеркального элемента представлена на рис 8.7.

Торсионы одноветьевые.

Масса зеркального элемента:





Рис. 8.7

Расчёт длины торсиона проводим из условия поворота зеркального элемента на 50 вокруг оси торсионов. Поскольку кремний при нормальной температуре относится к хрупким материалам, разрушение торсионов при нормальной нагрузке произойдёт за счёт действия главных растягивающих напряжений, равных главным касательным напряжениям|. С учётом изложенного длину торсиона определим из допускаемых напряжений на растяжение при коэффициенте запаса прочности , т.е. .

Сечение торсиона в соответствии с заданием 1,5 х 3 мкм.(табл.8.2) (*C1h0*)

 

*Момент инерции сечения* торсиона



*Момент сопротивления сечения* торсиона:



*Крутящий момент в сечении* торсиона:



*Длина торсиона* при  равна:





Рис.8.8

*Максимальный изгибающий момент* в торсионе зеркального элемента



*Максимальное растягивающее напряжение* в заделке торсиона (на раме и зеркальном элементе) при изгибе для угла закручивания  равно

,

где момент сопротивления торсиона зеркального элемента при изгибе равен:



*Коэффициент допустимой динамической перегрузки* составит для угла отклонения :



Расчёты рамы на торсионах.

Ширину рамы по варианту задания принимаем *d=*25 мкм. Из рис. 8.1 размеры будут равны: *a1* = 670мкм, *a2* = 470мкм., *a3* = 420мкм.

Общий вид рамы микрозеркала приведен на рис.8.9.



Рис. 8.9

*Масса рамы* равна:



Расчет длины торсиона рамы проводим из условия поворота рамы на 50 вокруг оси торсиона. Допускаемое напряжение в торсионе . Сечение торсиона рамы принимаем равным 2x3 (*С2h0*).





*Момент сопротивления сечения* торсиона *Wk* равен



*Момент инерции сечения* торсиона *Jkp*



*Крутящий момент на торсионе* рамы, соответствующий допускаемым напряжениям равен



*Длина торсиона рамы* при угле закручивания 50



Максимальное растягивающее напряжение при изгибе торсиона рамы от действия веса зеркала и рамы определим из анализа схемы нагружения, показанной на рис. 8.9.

*Максимальный изгибающий момент* в торсионах рамы будет равен



*Максимальное растягивающее напряжение* в торсионе рамы равно



*Коэффициент допустимой динамической нагрузки* равен



Расчёт прогиба зеркального элемента в рабочем диапазоне температур

Из табл.8.1 принимаем для двухслойной структуры Si – Au: , , , , , толщины слоёв *h1* = 0.5*мкм*, *h0* = *h2* = 3*мкм*. Моменты инерции определяются как:





формула для расчёта  имеет вид:



Подставляя выбранные значения в (8.13) при x=0, *получаем максимальный прогиб в центре* зеркального элемента

Расчёт резонансной частоты микрозеркала.

*Момент инерции зеркального элемента* включающего слой Au и Si, определяется суммой



где  и  – массы слоя металлического покрытия и слоя поликремния.



*Суммарный момент инерции* зеркального элемента равен



*Резонансная циклическая частота* зеркального элемента определяется по формуле (8.17)



*Момент инерции микрозеркала* определится суммированием:



где , – момент инерции зеркального элемента и рамы.

*Момент инерции рамы* определим разбиением рамы на более простые фигуры, прямоугольники ( рис. 8.10.*b*).



Рис. 8.10



где







Отсюда:

Общее значение момента инерции микрозеркала определим как его сумму



*Резонансная частота микрозеркала* равна



С учетом заданных размеров и вычисленных значений длины торсионов зеркального элемента и рамы вычертим схему микрозеркала (рис. 8.11) в условном масштабе (например 100мм это 500мкм).



Рис.8.11.