

東京大学生産技術研究所
マイクロメカトロニクス国際研究センター 年吉研究室

MEMS ジャンプスタート・プログラム (その1)

SOI 基板と DRIE でつくる 静電マイクロアクチュエータ入門

配布にあたってヒトコト

あまり学生さんを待たせるのも大変なので、できたところから順にリリースすることにしました。個人的お勉強のために本書を紙コピーすることを許可します。しかし、随時更新しますので、あまり気合いの入った製本はやめておいた方がいいでしょう。本書はラボ内外のお友達に配ってもかまいません。ただし、本書の全部、一部にかかわらず、本書の販売は許可しません。著作権は著者にあります。本書の文章や図面を自分の論文などに無断引用することを禁止します。かつてに使ったら、そのヒトの修論、D論は最悪ボツ、少なくとも、審査会場で厳しいツッコみが入ることを覚悟してください。その予防策として、テキストも図面も、電子ファイルは配りません。どうしても必要なひとは、著者宛にメールで連絡をください。断られることはまずないでしょう。また、本書にもいろいろと勘違い、誤植、用語の不統一、読みにくい箇所などがあると思いますので、読者のラボ内外に関わらず、それらを指摘してくれるのは大歓迎します。しかしながら、本書を使ったMEMS デバイスの設計製作に失敗したり、研究実験上の事故、製造物による事故が発生したとしても、著者はいかなる責任も負いません。本書を読んだひとは、著者宛に感想のメールをいただけると嬉しいです。アフターサービスとして、改訂版のアナウンスや、正誤表を送付することがありますので、読者の名前とメールアドレスだけでも送ってもらえると助かります。いただいた情報は、他の用途には使用しません。では、お勉強がんばってください。Hiroshi Toshiyoshi (hiro@iis.u-tokyo.ac.jp), 2004.11.24, のぞみ30号, 名古屋あたり

年吉 洋

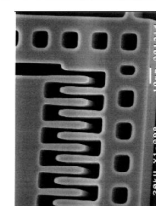
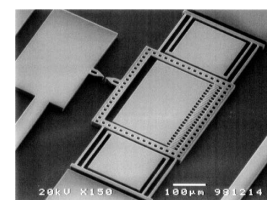
2004 年版

2004.11.20 変分法と連続系について追記
2004.10.09
2004.07.07 角チェック
2004.06.21 平行平板のところまで完成
2004.02.26 書き始め

本コースの目的

研究室のメンバーも増え、装置も増えて、その Technology Transfer の負荷が増えてきました。また、覚えておかなければならない基本的な注意事項、学習事項も大量に蓄積されて、そのすべてをきれいに教えるのも果たして可能かどうか。そこで、MEMS プロセス初心者を対象として、簡単なデバイスの製作を通して、MEMS/NEMS (Micro/Nano Electro Mechanical Systems) に関する基本的な知識・技能が身に付く教習課程を用意しておこうと思ったのが、本プログラムのきっかけです。講習者には、クリーンルーム経験は必要ありませんが、あれば好都合です。約1週間の講習課程で、SOI (Silicon-on-insulator) 基板のオモテ面を DRIE (Deep Reactive Ion Etching) で加工し、フッ酸でリリースして最も基本的な静電アクチュエータを製作します。その製作と評価を通して、以下の項目を学べるように設定しました。

- 第1章 静電アクチュエータ
- 第2章 製作プロセスの概略
- 第3章 サスペンションの材料力学
- 第4章 静電駆動力の計算方法
- 第5章 静電アクチュエータの動特性
- 第6章 マイクロマシン・プロセスの実際
- 第7章 アクチュエータの動作特性の評価
- 付録 A 微分・積分・ベクトル解析
- 付録 B 電磁気の定義と法則



詳細は、目次と索引をご覧ください。こなれてきたら、学生さんの方から新たに項目を追加して貰うことによって、良い実地教本に仕上がっていくことを期待しています。

目次

第1章	静電マイクロアクチュエータ	3
1.1	本コースで製作する構造	3
1.2	静電アクチュエータの駆動原理	5
1.3	静電アクチュエータとMOSトランジスタの違い	5
1.4	櫛歯型アクチュエータの応用例	6
第2章	製作プロセスの概略	11
2.1	製作プロセスの説明	11
	プロセスチャート	11
	基板洗浄工程 (ステップ1)	11
	レジスト塗布工程 (ステップ2)	12
	露光・現像工程 (ステップ2)	13
	シリコンのエッチング工程 (ステップ3)	14
	レジスト剥離工程 (ステップ4)	15
	リリース工程 (ステップ5)	16
2.2	実験ノートについて	17
第3章	サスペンションの材料力学	21
3.1	バネ定数を決定する要因	21
3.2	片持ち梁の変形	22
3.3	材料力学でよく扱う弾性定数	23
	ヤング率	23
	ポアソン比 (Poisson's Ratio)	25
	ポアソン比の最大値	25
	ヤング率と梁の曲げ	26

	剪弾性定数	27
	剪弾性定数の物理的意味	28
3.4	弾性定数の結晶異方性	29
	よく使われる材料の弾性定数	29
	弾性定数の結晶方位依存性	30
	結晶方位, 面方位	31
3.5	梁の曲げ理論	34
	曲がり梁の円弧近似	34
	ミクロに見た梁の曲げ	34
	中立面の位置	36
	梁の断面にはたらく曲げモーメントと, 梁の曲げの曲率半径の関係	37
	梁断面のモーメントと曲率半径の関係 (ミクロな取り扱い)	38
	梁の曲げと曲率半径の関係 (マクロな取り扱い)	40
	梁の曲げに関する微分方程式	42
3.6	梁の曲げ理論のケーススタディー	42
	重力を受けるブリッジ構造	42
	静電引力を受けるブリッジ構造	44
	自由端に集中荷重を受ける片持ち梁の曲げ	44
	静定問題	47
	おなじ問題をもっとすっきりと解く方法	47
	材料力学が分かりにくい理由	48
	自由端片持ち梁のバネ定数	48
	曲げと剪断の大きさ比較	48
	集中荷重を受ける先端の回転が拘束された片持ち梁の曲げ	49
	不静定問題	51
	先端の回転を拘束された片持ち梁のバネ定数	51
	組み合わせバネの合成バネ定数	51
第4章	静電駆動力の計算法	57
4.1	静電駆動アクチュエータの解析理論	57
	静電アクチュエータの解析モデル	57

静電容量の定義	59
充電に要する仕事	60
4.2 平行平板型静電アクチュエータ	61
平行平板間の静電容量	61
平行平板電極に蓄えられるエネルギー	62
仮想仕事による静電引力の定式化 (電圧一定条件)	63
平行平板型静電アクチュエータの発生力計算法 (電圧一定条件)	64
電極がした仕事に着目した仮想仕事の説明	65
平行平板型静電アクチュエータの発生力計算法 (電圧一定条件)	66
静電アクチュエータの変位-電圧特性	68
静電プルイン現象	70
プルイン変位の 1 / 3 ギャップ・ルール	70
初期ギャップ 1 / 3 限界以上の変位を制御する技術	72
静電アクチュエータの仮想変位に関するパラドックス	73
パラドックスに対する解説	73
静電アクチュエータの充電に関する思考実験	74
静電アクチュエータに蓄えられたエネルギー	74
Mathcad を用いた変位-電圧特性の解析プログラム	76
4.3 櫛歯型静電アクチュエータ	78
櫛歯形静電アクチュエータの利点	78
櫛歯形静電容量の解析モデル	79
櫛歯形静電アクチュエータの発生力	81
平行平板型と櫛歯型の比較 1 : 最大ストローク一定の場合	81
平行平板型と櫛歯型の比較 2 : ギャップ一定の場合	82
平行平板型と櫛歯型の比較 3 : 極端なギャップ一定の場合	83
差動電圧駆動による静電アクチュエータの線形化	83
櫛歯型静電アクチュエータのモデル化における仮定	86
櫛歯型アクチュエータ設計上の留意点	86
4.4 マイクロアクチュエータに関する補足説明	87
アクチュエータ駆動原理とエネルギー密度	87

静電アクチュエータが広く用いられる理由	87
第5章 静電アクチュエータの動特性	91
5.1 2次の振動系	91
共振現象	91
集中定数系の固有周波数 — バネ-マス系	92
分布定数系の固有周波数 — カンチレバー	92
振動モデルの適用範囲	94
2次振動系の数学モデル	95
調和振動子を仮定した解析的手法	95
振動波形と周波数の関係	98
振幅と位相の周波数特性 (Bode 線図)	100
2次振動系の共振周波数	101
粘性の上昇にともなう共振周波数の低下	101
2次共振系の規格化表現	102
減衰振動, 臨界減衰, 過減衰	103
規格化パラメタと周波数比による表現	104
振幅増幅率	105
振幅増幅率の最大値としてのQ値	105
Q値の測定誤差とパワースペクトルから求める方法	106
Q値から粘性定数を求める方法	108
5.2 分布定数系の共振周波数を求める方法	109
共振現象の物理的な意味	109
最小作用の法則と運動方程式	111
Rayleigh の方法	115
分布定数系への Rayleigh 法の適用	116
曲がり梁に蓄えられる弾性ポテンシャル・エネルギー	116
曲がり梁に蓄えられる運動エネルギー	117
Rayleigh 法による解析結果の傾向	120
先端自由カンチレバーの運動方程式	120
先端自由カンチレバーの連続体としての取り扱い	123

5.3 静電アクチュエータの振動 —非線形性現象—	127
平行平板型静電アクチュエータの振動解析モデル	127
バイアス電圧が静電アクチュエータの振動に与える影響	128
駆動周波数がアクチュエータの振動に与える影響	129
平行平板型静電アクチュエータの負のバネ定数効果	133
5.4 空気の粘性の流体力学的取り扱い	136