

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Opis produkcijske poti MEMS naprave

Avtorji:
Lambe Čočorovski
Klemen Pravdič
Zoran Špec

Mentor: prof. dr. Miha Mraz

Ljubljana, 12. 1. 2011

1 Vsebina

1 Vsebina.....	2
2 Uvod.....	3
2.1 Cilj seminarske naloge.....	3
3 Predstavitev orodja MEMS+.....	3
3.1 Komponente orodja MEMS+.....	3
3.1.1 Material Database.....	3
3.1.2 Process Editor.....	4
3.1.3 Innovator.....	5
3.1.4 Scene 3D.....	6
4 Opis poteka dela z orodjem MEMS+ pri izgradnji modela.....	7
4.1 Naprava MEMS.....	7
4.1.1 O RF stikalu.....	7
4.2 Dodajanje materialov v podatkovno bazo.....	7
4.3 Ustvarjanje procesa.....	8
4.3.1 Definicija spremenljivk.....	8
4.3.2 Definiranje korakov v procesu.....	8
4.4 Ustvarjanje 3D modela.....	9
4.4.1 Definiranje spremenljivk.....	9
4.4.2 Nastavitve lastnosti komponent.....	10
4.4.3 Dodajanje osnovnih komponent.....	10
4.5 Povezovanje komponent.....	13
4.5.1 Mehanični konektorji.....	13
4.5.2 Električni konektorji.....	13
4.6 Simulacija s pomočjo MATLAB Simulink-a.....	14
4.6.1 Uvoz modela v MATLAB Simulink.....	14
4.6.2 Ustvarjanje modela v Simulinku.....	14
4.6.3 DC analiza z operacijskimi točkami.....	14
4.6.4 DC sweep za iskanje pull-in napetosti.....	15
4.6.5 Prikaz simulacije v Scene3D.....	15
5 Zaključek.....	17
5.1 Težave, opombe.....	17
5.2 Povzetek.....	17
6 Viri.....	18

2 Uvod

Pri predmetu Optične in nanotehnologije smo spoznali področje MEMS naprav. Kratica izhaja iz krajšave za *Mikro Elektro Mehanske Sisteme*. Za oblikovanje in izdelavo teh naprav je na voljo nekaj komercialnih programskih orodij, dostopnih proti plačilu. Po pregledu ponudbe nam je uspelo pridobiti začasno licenco za preiskus enega izmed teh orodij, MEMS+ podjetja Coventor.

2.1 Cilj seminarske naloge

Cilj seminarske naloge je opis postopka pri izgradnji MEMS naprave. Uporabljali bomo programsko opremo MEMS+ podjetja Coventor. Pri postopku izdelave naprave bomo poskušali natančno opisati funkcionalnosti orodja MEMS+ ter tudi opisati morebitne težave, na katere smo naleteli.

Odločili smo se, da bomo opisali postopek gradnje RF stikala (RF switch). Ker nas zanima predvsem funkcionalnost orodja, podrobnega znanja iz načrtovanja MEMS naprav ter elektrotehnike pa nimamo prav dosti, si bomo pomagali z dokumentacijo orodja ter z opisom primerov (examples), ki so narejeni s tem orodjem. Prav tako bomo navodila in nastavitve za gradnjo naprave pridobili iz primera ter jih nato uporabili pri načrtovanju. Najprej bomo v seminarju predstavili orodje, nato pa bomo napisali našo pot načrtovanja in gradnje RF stikala.

3 Predstavitev orodja MEMS+

Za razvoj naše naprave smo uporabljali orodje MEMS+, zato bomo orodje pred dejanskim opisom postopka izdelave naprave tudi opisali.

MEMS+ je razvojno okolje za design, simulacijo in razvoj MEMS naprav. Oblikovalcem MEMS naprav omogoča sestaviti 3D model MEMS naprave ter simulirati njeno obnašanje v povezavi z MATLAB Simulink ali Cadence Virtuoso programsko opremo. Rezultati simulacij, narejenih s pomočjo prej omenjenih orodij pa se lahko v MEMS+ pregledajo s tridimenzionalno animacijo.

3.1 Komponente orodja MEMS+

Orodje MEMS+ je sestavljeno iz štirih komponent oz. modulov, do katerih dostopamo preko enotnega grafičnega vmesnika. Te komponente so Material Database, Process Editor, Innovator in Scene 3D. Sledila bo predstavitev značilnosti komponent orodja, delo z njimi pa bo podrobneje predstavljeno med opisom poteka izgradnje MEMS naprave.

3.1.1 Material Database

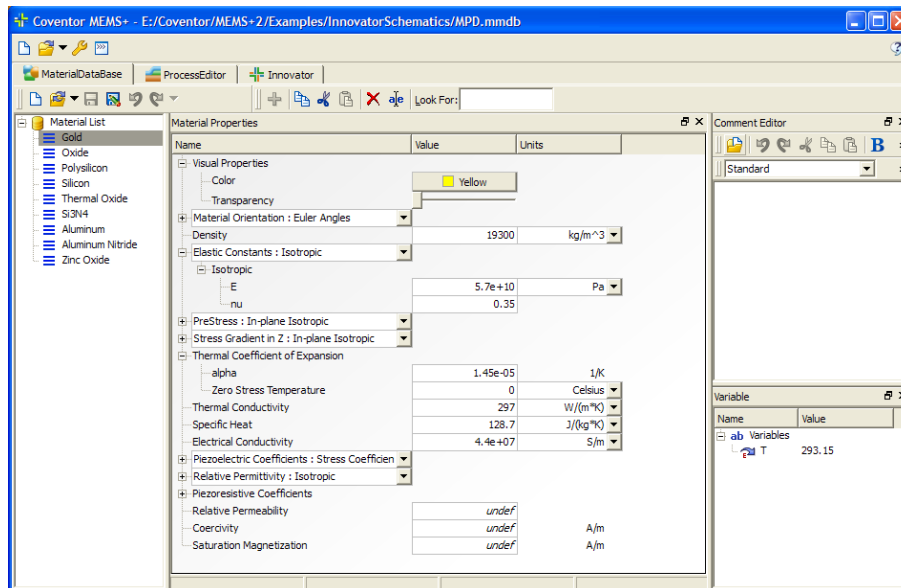
Komponenta služi vnašanju materialov in definiranju lastnosti materialov, ki so pomembne pri procesu izdelave. To je prvi korak pri izdelavi design-a MEMS naprave. Vsi materiali in njihove lastnosti se shranijo v datoteko s končnico .mmdb. Bazo z materiali lahko uvozimo iz datoteke ali pa definiramo in dodajamo svoje poljubne materiale. Ti se v grobem delijo na

trdne in fluide. Lastnosti, ki jih lahko materialom nastavimo so jakost, gostota, prevodnost in termične karakteristike.

Pomembno je povedati da program ne preverja smiselnosti dodeljenih vrednosti za lastnosti materiala. Materialov tudi ni vnaprej dodanih v bazo, razen nekaterih, ki jih lahko dodamo iz testnih primerov («examples«).

V nadaljnjem postopku so nam vsi materiali dostopni, ko povežemo procese s to bazo materialov. Za vsak korak v procesu se izbere material. Njihove fizične in kemične lastnosti pa vplivajo na simulacijo.

Pri izdelavi mems naprav je izbira materialov predvsem odvisna od proizvodnje.



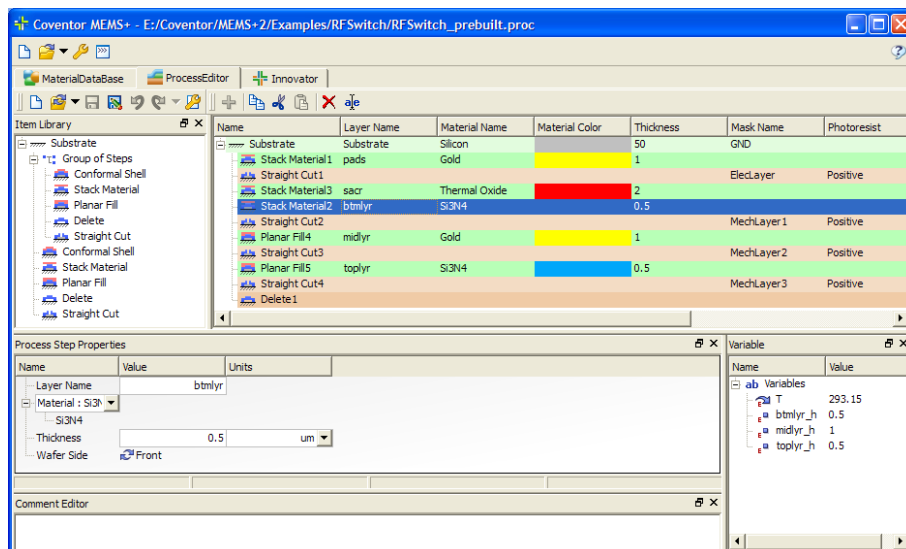
Slika 1: Osnovni pogled na komponento Material Database

3.1.2 Process Editor

S komponento Process Editor ustvarimo plasti materialov za proces izdelave. Uporabnik ustvari zaporedje korakov procesa, ki jih izbira iz knjižnice Item Library.

Materiali so organizirani v plasti in zaporedje plasti emulira industrijski proces (etching) pri izdelavi. Vsakemu koraku oz. plasti je potrebno določiti parametre: debelino materialov, način nalaganja materialov (skladovni, konformni ali ravninski), bočni kot reza materiala ov, masko za odmik (za popravljanje neskladnih dimenzij v skladu z napravo za izdelavo naprave), fotorezistivno polarnost (za določanje površin, ki se bodo jedkale).

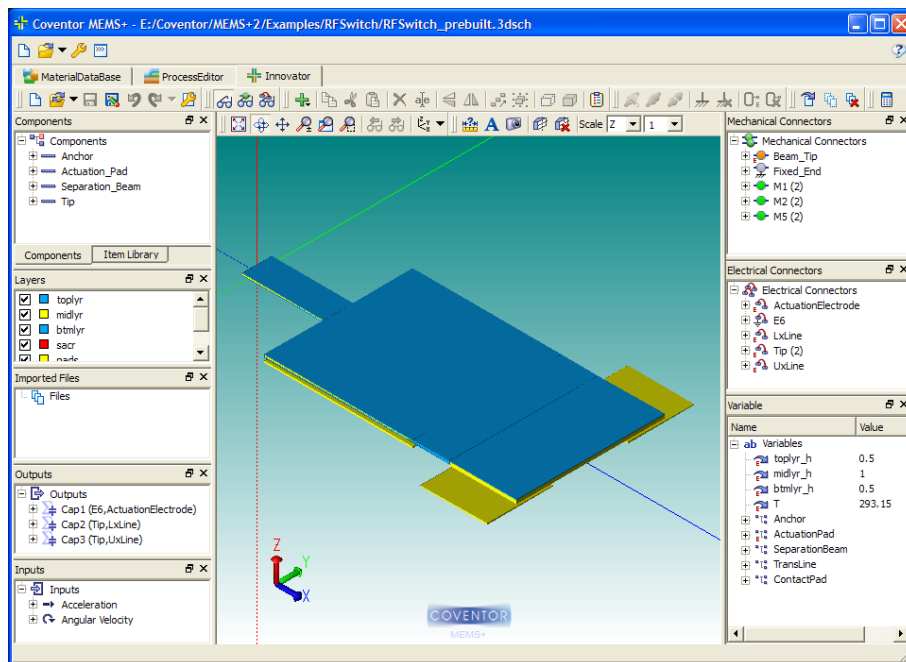
Lastnosti, npr. debelina plasti materialov, se lahko določajo s pomočjo v naprej definiranih spremenljivk, ki se shranijo skozi celoten proces.



Slika 2: : Osnovni pogled na komponento Process Editor

3.1.3 Innovator

Z Innovatorjem, urejevalnikom 3-D shem, uporabnik sestavi 3-D model za MEMS napravo z uporabo komponent iz 3-D knjižnice (3-D library). S spremenljivkami definiramo dimenzije komponent, ki sestavljajo model. Komponente se lahko nato poveže med seboj s pomočjo mehaničnih konektorjev, ki se dodajo komponentam. Te konektorje lahko med seboj povežemo in dobimo togo povezavo, pritrdimo, da se več ne moreje premikati, ali pa pustimo lebdeti brez omejevanja. Z električnimi konektorji pa povezujemo električne komponente. Model naprave se lahko potem uvozi v MATLAB Simulink ali Cadence Virtuoso v obliki datoteke s končnico .3dsch.



Slika 3 : Osnovni pogled na komponento Innovator

3.1.4 Scene 3D

Scene 3d je komponenta oz modul MEMS+, ki omogoča uvoz in vizualizacijo rezultatov MATLAB Simulinka ali Cadence Virtuosa v obliki animacije. Dostopna je, ko izberemo pravilno datoteko z rezultati simulacije.

4 Opis poteka dela z orodjem MEMS+ pri izgradnji modela

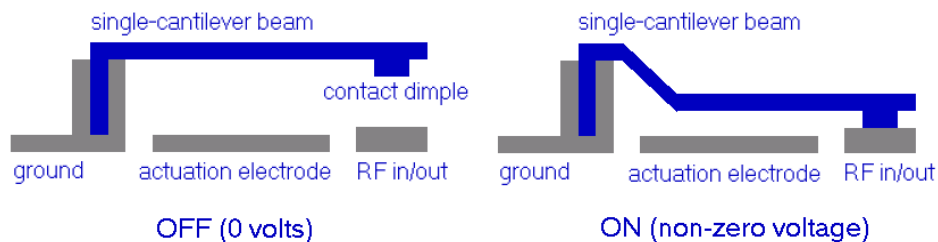
4.1 Naprava MEMS

Odločili smo se, da bomo za prikaz dela z MEMS+ prikazali postopek načrtovanja RF stikala (angl. RF switch). Razvoj RF switch-ev so pospešile brezžične tehnologije, kjer je nastala potreba po ceninih, ultra-nizko izgubnih switch-ih, ki naj bi zamenjale tradicionalne FET (Field Effect Transistor) switch-e.

4.1.1 O RF stikalu

V elektroniki poznamo stikalo kot električno komponento, ki lahko sklene ali razklene električni cikel. V zadnjem času pa so stikala v MEMS tehnologiji.

Kratica RF pomeni Radio Frequency- Radijsko frekvenco, katere delovanje upravlja stikalo. RF stikalo deluje tako, da aktuacijska elektroda glede na napetost ustvarja elektrostatično silo, ki vpliva na to da se skleneta oz. razkleneta komponenti s kontakti ter s tem prekineta oz. omogočita pretok RF signala.



Slika 4: Prikaz delovanja RF stikala. Na desni sliki aktuacijska elektroda zaradi elektrostatične sile pritegne nosilno komponento zgornjega kontakta in le-ta dva se skleneta.

RF stikala v MEMS tehnologiji imajo določene prednosti: nižja poraba in izguba energije, večja izolacija ter izboljšana linearnost, kar pomeni, da ne ustvarjajo izmerljivih motenj in harmoničnih signalov. So tudi cenejši.

4.2 Dodajanje materialov v podatkovno bazo

Prvi korak načrtovanja MEMS modelov je izbira in dodajanje materialov v bazo. Bazo predstavlja .mmdb datoteka, ki vsebuje vse karakteristike materialov, ki so potrebne za proizvodnjo želenih struktur oz. modelov. Kot že omenjeno, za vsak material lahko določimo njegovo trdnost, gostoto, prevodnost in ostale termične lastnosti.

Lastnosti materialov narekujejo livarne, ki napravo izdelajo, tako da lahko pri simulacijah vedno pride do odstopanj zaradi neskladnosti karakteristik materialov, ki jih proizvajajo različne livarne.

Tabela spodaj vsebuje potrebne materiale in lastnosti, ki so potrebni za izdelavo RF switch-a.

Property	Gold	Si3N4	Silicon	Thermal Oxide
Color	Yellow	Custom blue	Light gray	Red
Density	1.93e04 kg/m ³	2.7e03 kg/m ³	2.5e03 kg/m ³	2.7e03 kg/m ³
Elastic Constants	Isotropic: E: 5.7e10 Pa nu: 0.35	Isotropic: E: 2.22e11 Pa nu: 0.27	Isotropic: E: 1.69e11 Pa nu: 0.3	Isotropic: E: 2.22e11 Pa nu: 0.27
Thermal Coefficient of Expansion	Alpha: 1.45e-05 Zero Stress Temp: 0°C	Alpha: 1.6e-06 Zero Stress Temp: 0°C	Alpha: 2.5e-06 Zero Stress Temp: 0°C	Alpha: 1.6e-06 Zero Stress Temp: 0°C
Thermal Conductivity	297 W/(m*K)	24 W/(m*K)	148 W/(m*K)	24 W/(m*K)
Specific Heat	128.7 J/(kg*K)	170 J/(kg*K)	712 J/(kg*K)	170 J/(kg*K)
Electrical Conductivity	4.4e07 S/m	0	0	0.001 S/m
Relative Permittivity	0	Isotropic er: 8	Isotropic er: 11.9	Isotropic er: 8

4.3 Ustvarjanje procesa

Process Editor ustvari vse informacije za izdelavo modela v 3D. Ta komponenta emulira postopek dejanske izdelave, saj ustvari plasti iz prej definiranih materialov in definira postopek nalaganja teh plasti v tako imenovanem postopku »etching«. To je metoda v tehnologiji mikrovlakn, ki s kemičnimi postopki loči posamezne plasti med seboj.

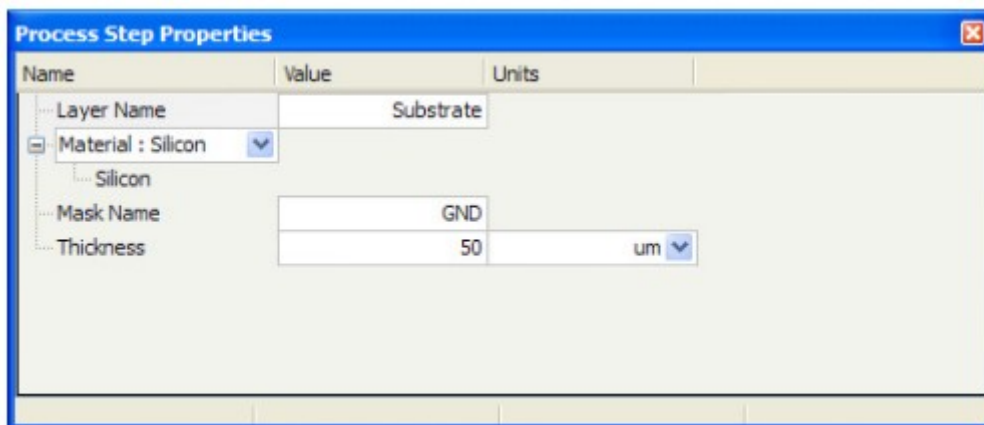
4.3.1 Definicija spremenljivk

Kot v vsakem programskem jeziku je tu prav tako potrebno definirati spremenljivke, ki jih potrebujemo, da bomo z njimi lahko določili lastnosti procesa nalaganja materialov plasti.

V našem primeru RF-switcha smo definirali tri spremenljivke (`topLayer_h = 0.5`, `midLayer_h = 1`, `botLayer_h = 0.5`) za določevanje debeline plasti

4.3.2 Definiranje korakov v procesu

S pomočjo korakov dodajamo materiale v napravo v plasti ter jim določimo lastnosti (debelino). Vsak proces vsebuje t.i. »substrat« plast, ki določa meje aktivne površine modela. Pri našem modelu je ta iz silicija.



Slika 5: Lastnosti prve plasti oz. t.i. "substrata" iz silikona.

Dodati je treba še naslednje plasti materialov, t.i. skladovne material: zlato, termični oksid in Si₃N₄ (silicijev nitrid) ter korak za rezanje robov.

Treba je dodati korak, ki vsebuje lastnosti rezanja robov materialov, t.i. StraightCut korak.

Vseh korakov oz. plasti je 10, prikazuje pa jih spodnja slika.

Name	Layer Name	Material Name	Material Color	Thickness	Mask Name	Photoresist	Mask Offset	Sidewall Angle	Wafer Side
Substrate	Substrate	Silicon		50	GND				
Stack Material 1	pads	Gold		1					Front
Straight Cut 1					ElectLayer	Positive	0	0	Front
Stack Material 2	sacr	Thermal Oxide		2					Front
Stack Material 3	btmlyr	Si ₃ N ₄		0.5					Front
Straight Cut 2					MechLayer 1	Positive	0	0	Front
Planar Fill 1	midlyr	Gold		1					Front
Straight Cut 3					MechLayer 2	Positive	0	0	Front
Planar Fill 3	toplyr	Si ₃ N ₄		0.5					Front
Straight Cut 4					MechLayer 3	Positive	0	0	Front
Delete 1									

Slika 6: Vse plasti materialov in lastnosti.

4.4 Ustvarjanje 3D modela

Z modulom Innovator je sledila izdelava 3-D modela naše naprave RF stikala. Model se ustvari z izdelavo komponent iz plasti materialov v t.i. drevo komponent, ki grafično ponazori hierarhijo in medsebojno odvisnost komponent v modelu.

4.4.1 Definiranje spremenljivk

S pomočjo tukaj definiranih spremenljivk bomo lahko kasneje komponentam določali lastnosti. Uporabljali jih bomo za nastavitve dimenzij (dolžina, višina). V skupine pa združimo spremenljivke, ki opisujejo dimenzije v velikostnem razredu mikrometrov posameznega dela oz. komponente modela naprave.

Skupina (del modela)	Spremenljivka in vrednost
Anchor	Length 55 Width 20

ActuationPad	Length 100 Width 100
SeparationBeam	Length 25 Width 100
TransLine	Length 45 Width 25 Protrude 20
ContactPad	Height 0.5

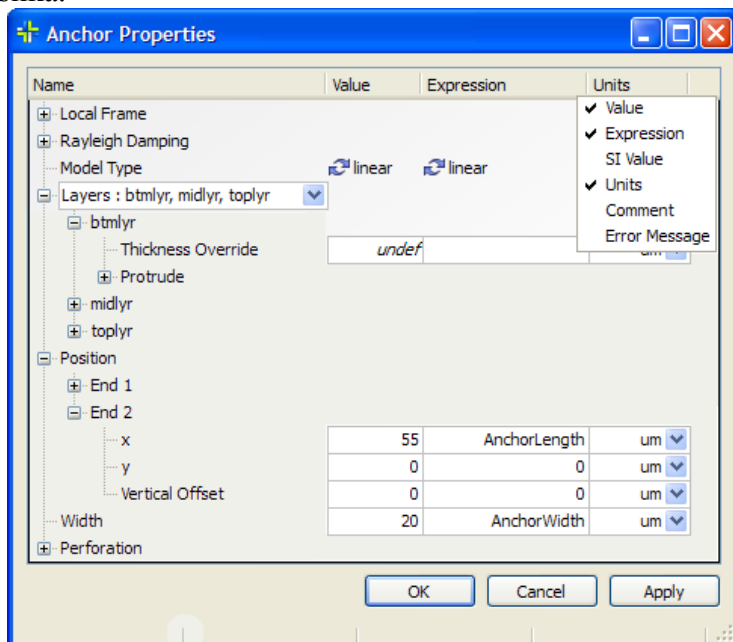
Spremenljivke, ki smo jih dodali se pojavijo v komponenti Innovator na seznamu spremenljivk poleg prej ustvarjenih spremenljivke.

4.4.2 Nastavitve lastnosti komponent

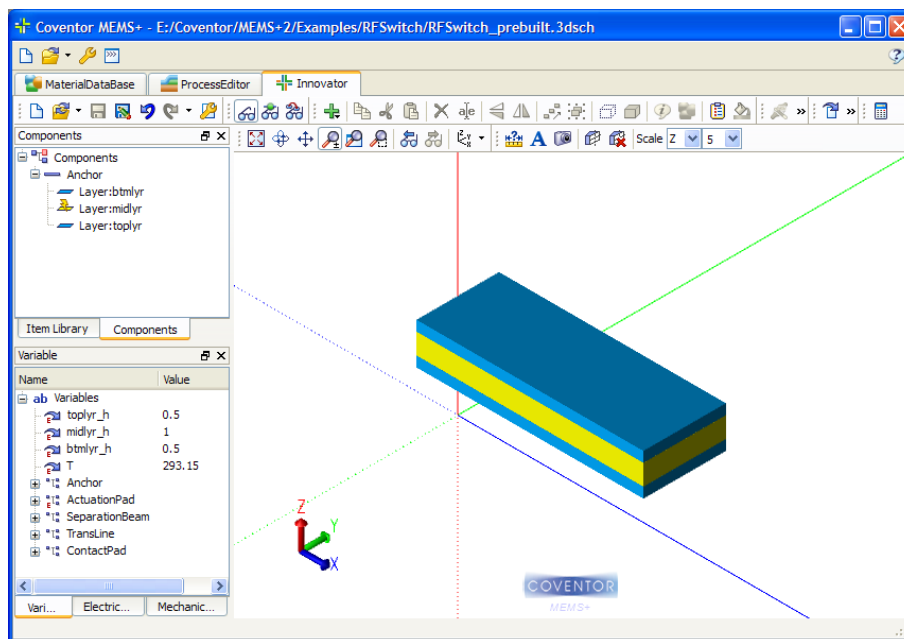
Za vse komponente, ki jih bomo dodali moramo nastaviti vrednost Rayleigh Damping (Rayleigh blaženje) na vrednost $1e-06$. Na ta način simuliramo efekt, ki ga ustvari zrak, ko pritiska na naše stikalo RF switch. Ta lastnost je pomembna, če simuliramo naš model pri t.i. prehodni (transient) simulaciji

4.4.3 Dodajanje osnovnih komponent

Naslednja stvar, ki jo moramo narediti pri izdelavi 3-D modela RF stikala je dodajanje osnovnih komponent, ki jih bomo imenovali kar »beami« (dobesedni prevod iz angleščine tram se nam je zdel precej neposrečen). Z definiranjem vsebujočih plasti materialov, dimenzij in lastnosti preko prej definiranih spremenljivk pa dobimo zelene komponente, ki sestavljajo napravo. Najprej s pomočjo novega beama dodamo osnovno komponento Anchor oz. sidro. V okencu lastnosti definiramo dimenzije s pomočjo prej ustvarjenih spremenljivk, kar prikazuje spodnja slika.

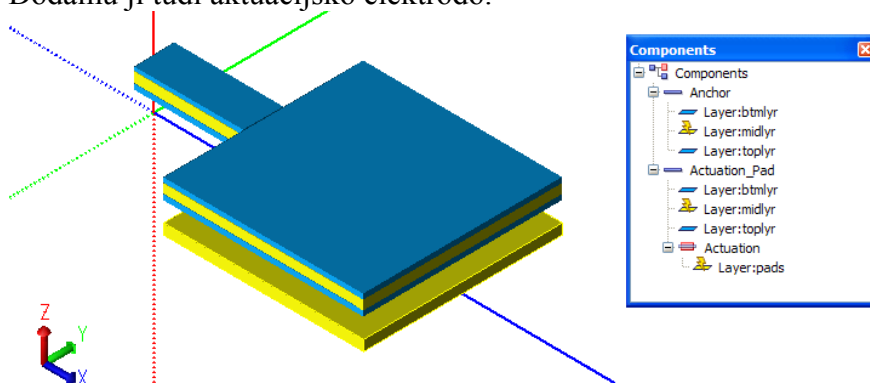


Slika 7: Nastavitve lastnosti komponente Anchor.



Slika 8: Komponenta Anchor

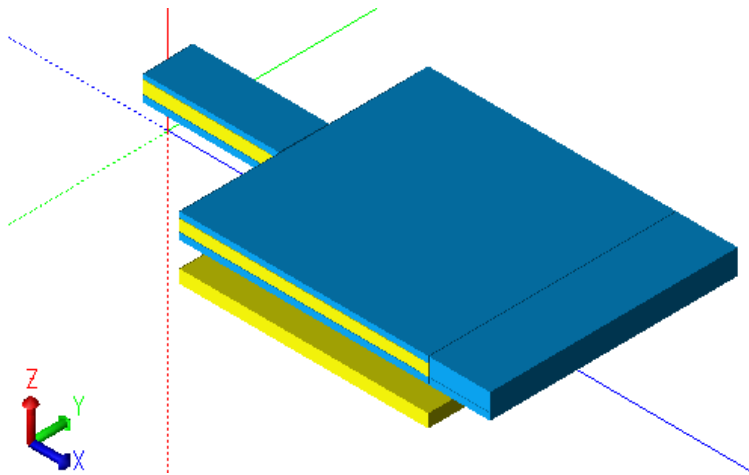
Nato dodamo z novim beamom aktucijsko podlago naprave, ki jo poimenujemo Actuation_Pad, ji na podoben način kot zgoraj v oknu z lastnostmi določimo lastnosti. Izberemo plasti materialov za to komponento in določimo dimenzije s spremenljivkami. Dodamu ji tudi aktucijsko elektrodo.



Slika 9: Anchor in Actuation_Pad komponenti z dodano elektrodo (spodnja rumena plast).

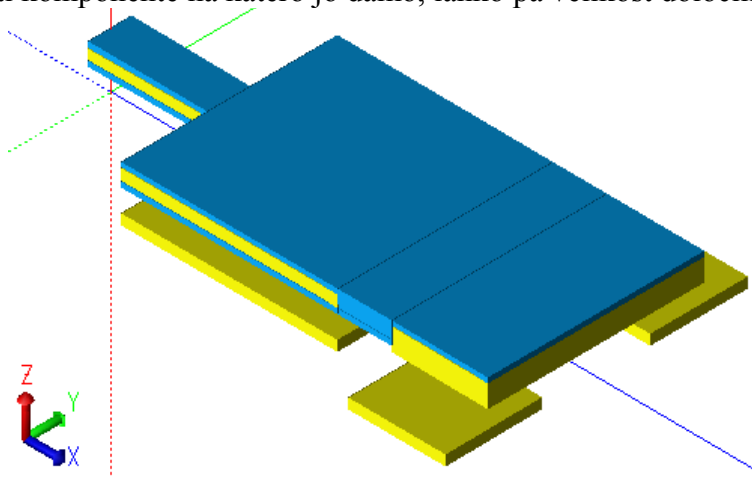
Dodamo še en beam za ločevanje z aktucijsko plastjo (Separation Beam) in določimo njegove lastnosti (debelino prekrivanja, lokacijo). Ta beam določimo z zgornjim in spodnjim layerjem

iz materiala Si₃N₄. Vseeno pa ne pride do “luknje” med njima, ker ga program avtomatično pravilno zamakne tako, da se dotikata.



Slika 10: Dodana komponenta separation beam.

Dodamo še en beam, na konec oz. Tip zgornje komponente po enakem postopku, s tem da tukaj izberemo zgornjo in srednjo plast materialov. Spodnjega v tem primeru ne vključimo, zato da je zlato iz srednje plasti v kontaktu z elektrodama in ga bomo postavili spodaj. Na Tip dodamo še dve elektrodi na levo in desno spodaj. Privzeta velikost elektrode je enaka velikosti komponente na katero jo damo, lahko pa velikost določimo sami.



Slika 11: Dodana komponenta Tip beam z dvema elektrodama levo in desno spodaj.

4.5 Povezovanje komponent

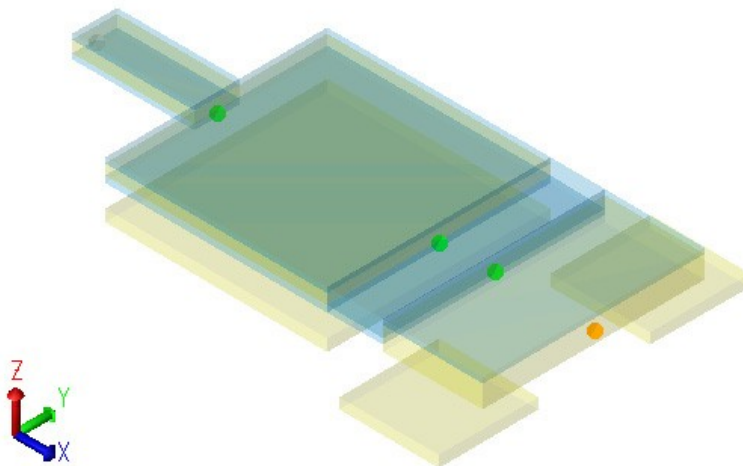
4.5.1 Mehanični konektorji

Ko v dizajn dodamo beam, Innovator avtomatično ustvari mehanski konektor na vsakem koncu beama. Te konektorje je možno povezati z drugimi konektorji, jih fiksirati ali pa jih ne povežemo z ničemer. Ko mehanske konektorje povežemo skupaj tvorijo trdo povezavo in se zato skupaj premikajo.

Fiksen mehanski konektor se sploh ne premika, prosti konektor (floating connector) pa nima nobenih omejitev.

Naslednja stvar je fiksirati konektor na komponento sidro(angl. anchor) in povezati konektorje med beamii tako da bodo beamii trdo povezani.

Preklopimo na “Mechanical Connector Viewing Mode” in vidimo proste mehanske konektorje (z oranžno barvo). Nekateri konektorji na različnih beamih oz. komponentah so na isti poziciji (enake x in y koordinate), zato jih je potrebno povezati preko klica funkcije »Auto Connect«. Orodje jih nato samo poveže. Za mehanske konektorje, ki jih je treba fiksirati, je na voljo funkcija »Fix«. Tako imamo vse gradnike skupaj mehansko povezane.



Slika 12: Razporeditev mehaničnih konektorjev (krogci).

4.5.2 Električni konektorji

Električne komponente povežemo z električnimi konektorji. Za delo z električnimi povezavami preklopimo na “Electrical Connector Viewing Mode” in tudi tukaj orodje samo poveže z električnimi konektorji. Če na beam dodamo elektrodo ustvari dva električna konektorja. Pri postavljanju elektrod moramo premisliti kam jih postaviti, da jih bo orodje znalo povezati z električnimi konektorji.

Ta korak je kar hiter, saj za vse poskrbi orodje samo. Ostane le še simulacija v MATLAB Simulinku ali v Cadence Virtuoso.

4.6 Simulacija s pomočjo MATLAB Simulink-a

V tem podpoglavju je opisan primer simulacije modela v MATLAB Simulink orodju, ki ga moramo predhodno namestiti, če želimo izvesti simulacije. Tako Matlab kot Simulink pa ne prideta skupaj z orodjem MEMS+. Potrebna je tudi nekaj znanja o Simulinku, je pa zato na voljo obširna dokumentacija, ki olajša delo.

Za simulacijo moramo MEMS+ model uvoziti v Simulink in nad njim pognati simulacijo (v našem primeru DC analiza).

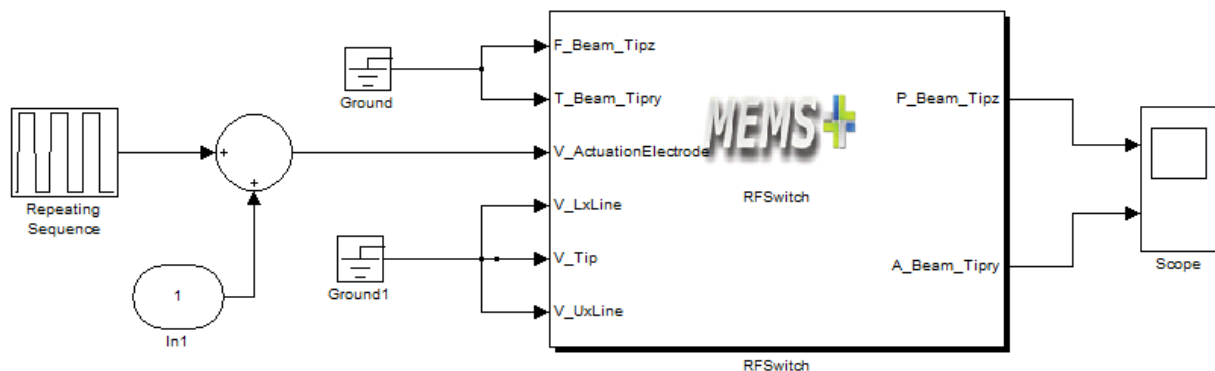
Na koncu pa simulacijo analize poženemo še v Scene3d, ki je del orodja MEMS+.

4.6.1 Uvoz modela v MATLAB Simulink

Prvi korak pri simulaciji je uvoz MEMS+ modela oz. datoteko v MATLAB Simulink. Ko uvozimo model, ga Simulink predstavi kot objekt z vhodi in izhodi, na katere vežemo poljubne komponente iz Simulinkove knjižnice

4.6.2 Ustvarjanje modela v Simulinku

V tem poglavju je prikazano kako opremiti MEMS+ model za simulacijo v Simulinku.



Slika 12: Na vhod pripeljemo periodični signal (repeating sequence), in kupaj vežemo v sum block, na ostale vhode pa pripeljemo ozemljitev (ground). Na izhod pa na prikazovalnik (scope).

4.6.3 DC analiza z operacijskimi točkami

DC analizo uporabimo za računanje operacijskih točk za »transient« analizo (angl. time domain analysis – analiza, ki jo poženemo takrat, ko imamo signale, ki se spreminjajo s časom) ali frekvenčno analizo. Kot privzeto simulacijo Simulink izvede transient simulacijo, na voljo pa sta tudi AC in DC analizi.

Če hočemo pognati DC analizo je na voljo v Simulinku opcija DC Analysis v MEMS+ izbirnem meniju. Simulink nam pokaže začetno stanje raznih parametrov in jih uporabimo kot začetno stanje za ostale simulacije.

4.6.4 DC sweep za iskanje pull-in napetosti

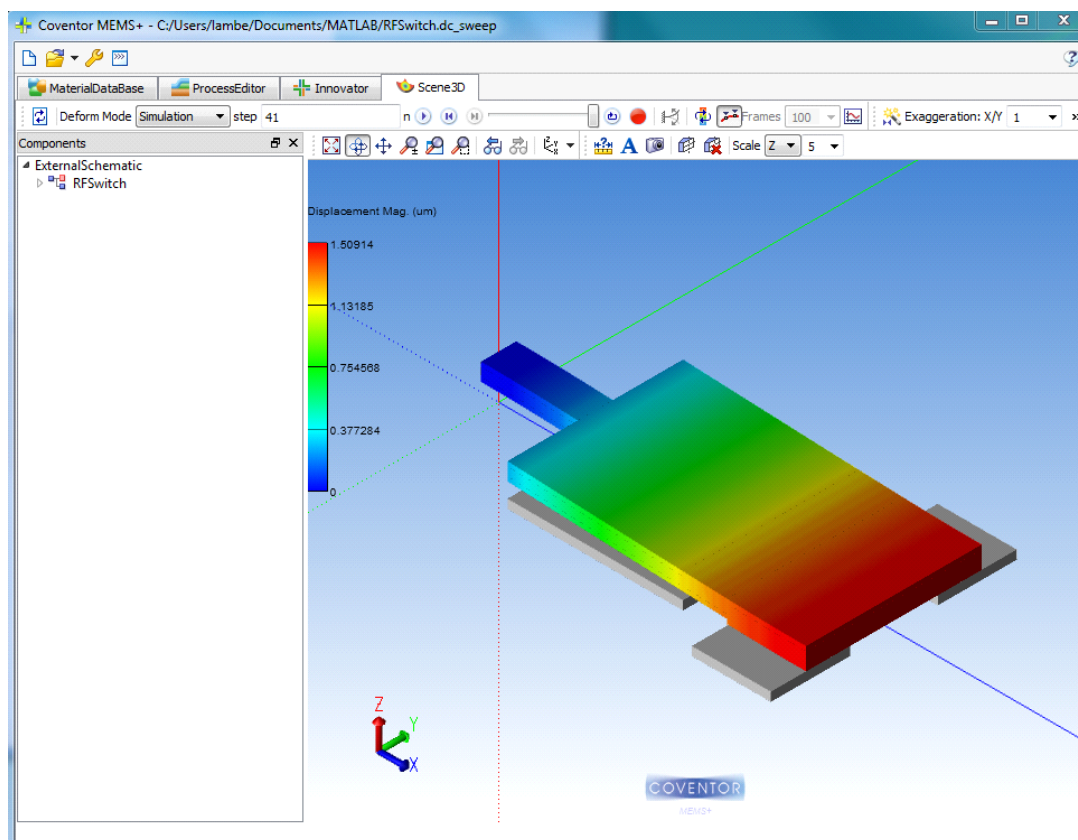
Ob pritisku napetosti na elektrodo se ustvari elektrostatična sila, ki teži k zmanjšanju razdalje med elektrodo in beamom. Večjo napetost kot pritisnemo, manjša bo razdalja med njima. Ko pa sta beam in elektroda skupaj smo dosegli pull-in napetost. V podrobnosti računanja se nismo spuščali, saj je to domena elektrotehnikov.

Pull-in napetost poiščemo z DC sweep metodo, kjer v korakih večamo vhodno napetost. V našem primeru napetost od 0 V do 20 V v korakih po 0.5 V.

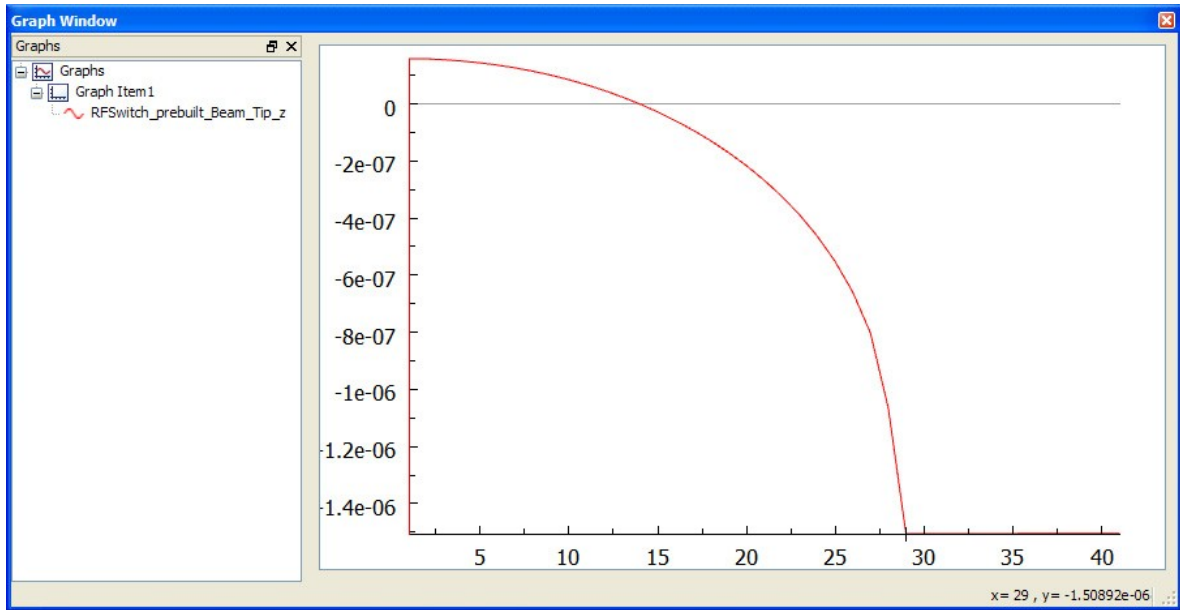
Simulink po analizi ustvari datoteko s simulacijskimi rezultati, ki jo je mogoče odpreti s Scene3D orodjem.

4.6.5 Prikaz simulacije v Scene3D

Zadnji korak pri simulaciji je dejanski prikaz dinamike stikala. Datoteko s simulacijskimi rezultati odpremo v MEMS+, ta pa prepozna da gre za datoteko iz Simulinka in zna interpretirati podatke DC analize in jih z orodjem Scene3D tudi dinamično animira. V Scene3D vidimo na levi strani legendo, ki kaže odmik objektov glede na začetno stanje. Model stikala lahko tudi poljubno obračamo in gledamo animacijo iz vseh možnih zornih kotov.



Slika 13: Animacija simulacije v Scene 3D komponenti MEMS+.



Slika 24: Pull in napetost pri 14 V.

5 Zaključek

5.1 Težave, opombe

Med samim postopkom s programsko opremo nismo imeli posebnih težav. Potrebno je omeniti, da je poleg same programske opreme MEMS+ za izvedbo simulacij potrebna dodatna programska oprema, in sicer MATLAB Simulink ali Cadence Virtuoso.

Pomebno je tudi omeniti, da je za resno samostojno delo s programom potrebno veliko znanja s pomočjo MEMS področja in industrije. Baza namreč ne vsebuje zbirke materialov, vse je potrebno vnesti posamezno ter jim določiti lastnosti. Smiselnost le-teh pa program ne preverja. Na voljo pa je dobra dokumentacija in testni primeri z opisi.

Važna je tudi opomba, da je za delo z MEMS+ potrebno pridobiti vse module licenc, glede na svoje potrebe, saj tako za simulacijo z Simulinkom, kot za simulacijo z Virtuosom potrebujemo dodatno navedbo v licenci.

5.2 Povzetek

V seminarski nalogi smo se spoznali z orodjem MEMS+ ter ga preiskusili, tako da smo načrtovali in simulirali napravo RF stikalo (angl. RF switch). Pri tem smo si pomagali z dokumentacijo in opisi narejenih primerov. S programom MEMS+ je bilo potrebno definirati materiale v bazo, jih dodati v plasti ter iz plasti oblikovati komponente naprave. S pomočjo orodja MATLAB Simulink smo izvedli simulacijo, animacijo pa smo lahko nato videli v komponenti MEMS+.

6 Viri

- http://www.herley.com/index.cfm?act=app_notes¬es=switches
- http://www.memtronics.com/page.aspx?page_id=35
- http://en.wikipedia.org/wiki/RF_MEMS
- <http://www.findpdf.us/view-google-1130749.pdf?mems-tutorial-pull-voltage-electrostatic-microactuators>
- Uradna stran podjetja Coventor: <http://www.coventor.com/>