

MANIPULACIJA IN DETEKCIJA MIKRO IN NANODELCEV Z MIKRO-ELEKTRO- MEHANSKIMI STRUKTURAMI

Dejan Križaj

2010

Predmet je sestavljen iz treh delov. V prvem delu bomo obnovili oziroma pojasnili nekaj osnovnih pojmov iz elektrotehnike, ki vključujejo pojme kot električni naboj (elektrina), električni tok, sila, električna poljska jakost, potencial, napetost, potencialna energija, delo, kapacitivnost, itd. Veliko pojmov, večina katerih je med seboj povezana. Vsaj osnovno razumevanje teh pojmov, veličin, je potrebno za razumevanje pojavov manipulacije in detekcije mikro in nanodelcev z mikro-elektromehanskimi strukturami. V ta namen bomo spoznali kar nekaj orodij npr. programska orodja Matlab za pomoč pri različnih izračunih in izrisih, Comsol Multiphysics za izračune in vizualizacijo električnega polja in simulacijo delovanja sil na mikro nivoju, programe kot so EJS (Easy Java Simulations) in JaCoB (Java Constructive Objects) s katerimi bomo pojasnili osnovne pojme pomembne za razumevanje električnih pojavov. Izvedli bomo tudi nekaj preprostih eksperimentov, ki nakazujejo delovanje električnih sil na delce. Nato se bomo seznanili z osnovnimi postopki mikro-elektromehanske obdelave, ki omogočajo realizacijo struktur za manipulacijo in detekcijo mikro in submikronskih struktur. V tretjem delu pa bomo opisali nekaj možnih aplikacij realiziranih s pomočjo MEMS tehnologije.

Namen predmeta seveda ni, da bi netehniki v detajle razumeli in obvladali električne pojave in znali načrtovati, realizirati in uporabljati mikrostrukture za manipulacijo in detekcijo mikro/nano delcev. Zelo pomembno pa je, da netehniki poznajo osnovne pojme in možnosti, ki jih ponuja uporaba modernih MEMS tehnologij saj je razvoj na tem področju izredno buren in v njem lahko Slovenija najde svoje mesto. Z določeno mero poguma, znanja, ustvarjalnosti, vztrajnosti in predvsem z interdisciplinarnim delom. Da pa bi se lahko pogovarjali in bili sposobni skupaj načrtovati nove raziskave in razvoj, moramo govoriti približno enak jezik. Temu je namenjena ta skripta. Upam, da bo kljub začetnim pomankljivostim dobro sprejeta.

Dejan Križaj, 2010

Naslov:

Prof. dr. Dejan Križaj

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Laboratorij za bioelektromagnetiko

Tržaška 25

1000 Ljubljana

Tel: 01/4768 429

Email: dejan.krizaj@fe.uni-lj.si

KAZALO

1 DEL.....	5
OSNOVNI POJMI ELEKTROTEHNIKE	5
1. ELEKTRIČNI NABOJ (ELEKTRINA)	6
OSNOVNE VELIČINE	6
MERSKE ENOTE IN PISANJE ENAČB.....	6
OZNAČEVANJE	6
ATOMI	7
PREVODNIKI, POLPREVODNIKI, IZOLATORI	8
NABOJ (ELEKTRINA).....	8
EKSPERIMENT JOSEPHA JOHNA THOMSONA (1856 - 1940).....	9
ZAKON O OHRANITVI NABOJA	9
KONTINUITETNA ENAČBA - ELEKTRIČNI TOK	11
2. ELEKTRIČNA SILA MED NABOJI.....	12
SUPERPOZICIJA SIL	14
VIRTUALNI EKSPERIMENT S PROGRAMOM JACOB.....	16
3. ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST	17
SUPERPOZICIJA ELEKTRIČNEGA POLJA	18
PRIKAZOVANJE ELEKTRIČNE POLJSKE JAKOSTI V PROSTORU	19
PROGRAMI ZA IZRAČUNE IN OBDELAVO	21
4. ELEKTRIČNI DIPOL.....	22
ELEKTRIČNI DIPOL	22
ELEKTRIČNI DIPOLNI MOMENT.....	23
POLARNE IN NEPOLARNE MOLEKULE	23
5. SILA IN GIBANJE NABOJEV V ELEKTRIČNEM POLJU	24
DINAMIČNO IZRAČUNAVANJA ELEKTRIČNE SILE	24
GIBANJE NABOJEV V SNOVEH	25
ELEKTROFOREZA	26
ELEKTROOZMOZA	28
NAVOR IN GIBANJE DIPOLOV V ELEKTRIČNEM POLJU	30
6. ENERGIJA, DELO, POTENCIALNA ENERGIJA, POTENCIAL IN NAPETOST	32
DELO ELEKTRIČNE SILE	33
POTENCIALNA ENERGIJA	34
OHRANITEV ENERGIJE	35
VIRTUALNI EKSPERIMENTI S PROGRAMOM EJS IN MODELOM 3NABOJI.XML	36

ELEKTRIČNI POTENCIAL	37
ELEKTRIČNA NAPETOST	37
2 DEL.....	40
TEHNOLOGIJA IZDELAVE MIKROSTRUKTUR.....	40
1. OSNOVNI MATERIALI MEMS TEHNOLOGIJE.....	42
DRUGI OSNOVNI MATERIALI	44
KRATKA ZGODOVINA MEMS-A.....	45
2. OSNOVNI TEHNOLOŠKI POSTOPKI MEMS TEHNOLOGIJE.....	46
2.1 JEDKANJE	46
MOKRO JEDKANJE.....	46
SUHO JEDKANJE.....	47
2.2 SPAJANJE - BONDIRANJE	49
3. MIKROFLUIDNE STRUKTURE.....	51
MIKROČRPALKE.....	51
ELEKTROSTATIČNI IN PIEZOELEKTRIČNI PRINCIP MIKROČRPALKE	53
ELEKTROMAGNETNI PRINCIPI	54
ELEKTROHIDRODINAMSKI PRINCIP (EHD)	54
MAGNETOHIDRODINAMSKI PRINCIP (MHD)	55
ELEKTROOZMOTSKI PRINCIP.....	55
4. NIZKOCENOVNA MEMS TEHNOLOGIJA.....	57
NIZKOCENOVNE PRIPRAVA MASK (FOTOLITOGRAFIJA)	57
DRUGAČNI NAČINI FOTOLITOGRAFIJE	57
TEHNIKE HITREGA NAČRTOVANJA IN IZDELAVE PROTOTIPOV (ANG. RAPID PROTOTYPING TECHNIQUES)	58
LITERATURA	59
3 DEL.....	60
PRIMERI MIKROSTRUKTUR ZA DETEKCIJO IN MANIPULACIJO Z ELEKTRIČNIM IN MAGNETNIM POLJEM	60
1. POZICIONIRANJE NANOSTRUKTUR S POMOČJO DIELEKTROFOREZE	63
1. DEFORMACIJE NANOCEVK V ELEKTRIČNEM POLJU	64
2. MIKROELEKTROMAGNETNO TIPALO Z MEMS TEHNOLOGIJO	66
3. MAGNETNO AKTUIRAN MIKROPREKLOPNIK ZA SORTIRNE APLIKACIJE.....	69
4. CITOMETRIJA NA MIKROČIPU	70
5. MANIPULACIJA IN UJETJE SUBMIKRONSKIH DELCEV (GREEN, 1997).....	71
6. PATCH CLAMP TEHNIKA Z UPORABO MIKROFLUIDIKE	73
7. HIDRODINAMSKO UJETJE CELIC	74
UPORABLJENE KRATICE.....	76

1 DEL

OSNOVNI POJMI ELEKTROTEHNIKE

1. ELEKTRIČNI NABOJ (ELEKTRINA)

Vsebina poglavja: naboj, osnovne veličine, merske enote, atomi, snov, naboj, zakon o ohranitvi naboja, tok.

OSNOVNE VELIČINE

Veličine (fiziki uporabljajo namesto izraza veličina izraz količina), ki jih bomo obravnavali, večinoma že poznate. Npr. električni naboj (v elektrotehniki pogosto imenujemo tudi elektrina), tok, napetost, moč, energija, itd. Iz srednje šole poznate tudi določene relacije med njimi, na primer povezavo med tokom in nabojem $Q = It$, med napetostjo in tokom $U = IR$ ipd. Ugotovili bomo, da so te zveze le pogojno ustrezne, npr. $Q = It$ le v primeru, ko je tok konstanten in $U = IR$ le za določene tipe elementov (linearnih uporov). Poleg tega tudi definicije določenih veličin niso najbolj preproste. Na primer definicija električne napetosti, ki je definirana kot delo, ki ga opravi električna sila pri premiku enote naboja (1 C) od enega do drugega mesta. Tok pa je definiran s silo med dvema vzporednima tankima vodnikoma razmaknjenima za 1 m.

MERSKE ENOTE IN PISANJE ENAČB

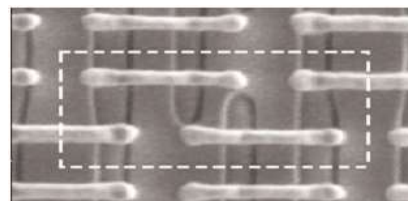
Za vsako veličino uporabljamo določen simbol, običajno eno črko abecede, pogosto grške. Simbol za napetost je U , za tok I , temperaturo T itd. Opazili ste že, da pišemo simbole za veličine poševno. To pa zato, da jih ločimo od merskih enot, kratko kar enot, ki jih pišemo pokončno. Kot primer zapišimo $U = 5 \text{ V}$. Med številsko vrednostjo in enoto je presledek. Mersko enoto predstavimo z imenom in simbolom. Ime enote za napetost je volt, simbol pa V.

V svetu se je uveljavil sistem merskih enot, ki ga s kratico imenujemo SI (Sisteme International). Obsega sedem osnovnih enot in vrsto izpeljanih. Osnovne enote so kilogram (kg), meter (m), sekunda (s), amper (A), kelvin (K), kandela (cd), mol (mol), radian (rad) in steradian (sr). Izpeljane enote pa so na primer m/s za hitrost itd. Zanimivo je, da je električni tok edina električna veličina, ki spada med osnovne enote (kilogram, meter, sekunda, Amper). Bolj natančne definicije osnovnih enot si preberite v Uradnem listu RS št.26/2001 (<http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200126&stevilka=1594>), ali pa v množici drugih spletnih strani, npr. <http://www-f1.ijs.si/~ziherl/standardi.pdf>.

Druge merske enote. Pogosto v literaturi zasledimo uporabo drugih merskih enot, kot smo jih navajeni. Te so lahko posledica uporabe drugega merskega sistema (npr. CGS: centimeter-gram-sekunda), kjer se na primer namesto enote tesla za gostoto magnetnega polja uporablja enota gauss. V konkretnem primeru je pretvorba direktna $1 \text{ T} = 10^4 \text{ gaussa}$.

OZNAČEVANJE

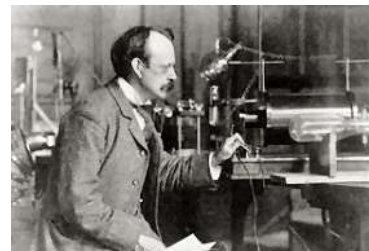
V elektrotehniki pogosto uporabljamo predpone k merskim enotam. To je potrebno zato, ker je red velikosti veličin zelo različen. Kapacitivnosti so pogosto reda mikro, nano ali piko faradov (μF , nF , pF), uporabljajo se napetosti se od mikro voltov do mega voltov itd. Zveze nam prikazuje preglednica:



Intelova 65 nm tehnologija SRAM spominskih celic. Na mm^2 je nekaj 10 milijonov takih tranzistorjev.

vrednost ime, predpona

10^{-12}	piko p
10^{-9}	nano n
10^{-6}	mikro μ
10^{-3}	mili m
10^3	kilo k
10^6	mega M
10^9	giga G
10^{12}	tera T



Joseph John Thomson, profesor fizike na univerzi Cambridge, je leta 1897 v eksperimentih s katodno cevjo opazil delce (elektrone), ki so

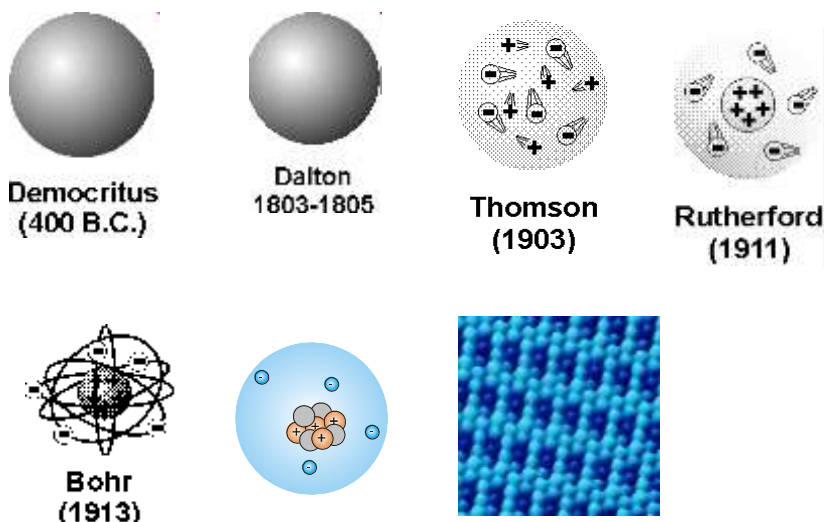
ATOMI

Zavedati se moramo, da so električni pojavi posledica lastnost naše narave, ki je sestavljena iz atomov, ti pa iz jedra iz protonov, nevtronov in oblaka elektronov. Elektroni in protoni imajo lastnost, ki ji rečemo naboj. Elektroni imajo negativni naboj, protoni pa pozitivnega. To je seveda naš (človeški) koncept, ki ga je prvi vpeljal Benjamin Franklin, ki je ene naboje poimenoval pozitivne, druge pa negativne. Čisto lahko bi se lahko Franklin odločil tudi za obratno pojmovanje.

Dandanes je poleg že klasične slike o zgradbi atoma iz nevtronov, protonov in elektronov potrebno za razumevanje pojavov na atomskem (molekularnem) nivoju upoštevati teorijo kvantne mehanike.



Benjamin Franklin (1706-1790) je bil izjemen politik (pisec ameriške ustave) pa tudi izjemen znanstvenik. Prvi je ločil naboje na pozitivne in negativne, izumil izraze baterija, naboj, prevodnik, pozitivni in negativni naboj itd. Najbolj znan (in tudi nevaren) je njegov dokaz, da je strela električen pojav. To je pokazal z eksperimentom z zmajem, ki se ob dežju namoči in postane prevoden. Ob strelah se del toka razelektitve prenese preko zmaja na zemljo. Iz teh raziskav sledi tudi njegov izum strelovoda.



SLIKA: Razvoj spoznanj o zgradbi atoma.

PREVODNIKI, POLPREVODNIKI, IZOLATORI

. Dokler ima atom enako število pozitivnih in negativnih nabojev je nevtralen. Atomi so običajno vezani med seboj in tvorijo zelo različne tvorbe. V kovinah so atomi, ki običajno tvorijo vezi, pri katerih je del elektronov zelo šibko vezan na jedro in se z lahkoto od jedra odcepi in se »prosto« giblje po materialu. Zato za kovine smatramo, da so dobri prevodniki. Nasprotni primer so izolatorji. Pri izolatorjih ni prostih ali pa je zelo malo prostih elektronov, ki lahko delujejo kot nosilci toka. Zato so izolatorji slabi prevodniki električnega toka. Poseben primer predstavljajo polprevodniki. Že ime samo pove, da so njihove lastnosti nekaj vmes med prevodniki in izolatorji. Čisti polprevodniki so običajno izolatorji (npr. silicij ali germanij). Če pa jim vstavimo primesi (npr. z mikrotehnološkim procesom dopiranja), postanejo te snovi bolj prevodne. Prevodnost teh snovi torej lahko spreminjamo, še posebno pa je zanimivo, da je I-U karakteristika ustrezno dopiranih polprevodniških elementov pogosto nelinearna. Na tak način realiziramo polprevodniške elemente, ki jih poznamo kot diode, tranzistorje. Te lahko integriramo v mikroelektronske komponente (integrirana vezja)*. Poseben primer so še superprevodniki, snovi, ki pri določeni temperaturi izgubijo uporovne lastnosti.

NABOJ (ELEKTRINA)

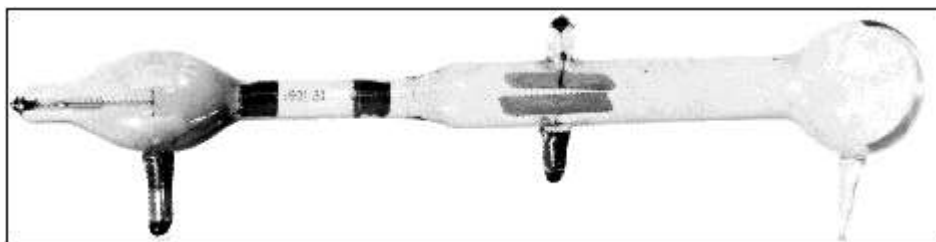
Vsi naboji prispevajo k električnim pojavom. V tem smislu bi morali v principu upoštevati pri analizi vse naboje v atomu, molekuli, snovi, tako elektrone kot protone. V praksi pa je pogosto dovolj, da se osredotočimo le na vplive presežkov nabojev, saj je njihov vpliv na električne pojave največji. Omenili

* Gordon E. Moore, soustanovitelj podjetja Intel, je že leta 1965 zapisal znamenito ugotovitev, da se gostota tranzistorjev na integriranem vezju večja eksponentno s časom – vsaki dve leti se približno podvoji. V podjetju Intel so leta 2007 prikazali zmožnost proizvodnje tranzistorjev velikosti 45 nm na 300 mm veliki silicijevi rezini. (http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law).

smo že enoto naboja 1 C (Coulomb ali slovensko kulon). Najmanjša vrednost naboja je naboj elektrona, ki je približno $1,602 \cdot 10^{-19}$ C in ker je ta naboj negativen, moramo upoštevati še negativen predznak. 1 C je torej mnogo elektronov. Koliko? $1/1,602 \cdot 10^{-19} \cong 6,25 \cdot 10^{18}$. To pa je veliko delcev in da bi obravnavali vsakega posebej je praktično neizvedljivo. Bolj pogosto obravnavamo naboje v smislu njihove koncentracije oziroma gostote porazdelitve.

EKSPERIMENT JOSEPHA JOHNA THOMSONA (1856 - 1940).

JJ Thomson je Nobelov nagrajenec za fiziko za leto 1906. Nagrado je dobil za odkritje elektrona, kar mu uspelo z ekperimenti s katodno cevjo. V enem od teh eksperimentov je uspel odkriti, da so elektroni negativno naelektrjeni, saj se odklanjajo v električnem polju vzpostavljenim med dvema elektrodama, ki sta postavljeni prečno na smer leta elektrona. Za razliko od drugih raziskovalcev, ki so opravljali podobne eksperimente, je njemu leta 1897 to uspelo pokazati zato, ker je uspel zrak v katodni cevi v zadostni meri razredčiti (doseči dovolj nizek tlak), da se niso elektroni, ki jih je »izstreljeval« iz katode (katodni žarki), pred prehodom do fluorescenčnega zaslona zadeli v molekule zraka. V nadaljnjih eksperimentih je s kombinacijo delovanja električnega in magnetnega polja ugotovil razmerje med maso elektrona in njegovim nabojem. Pokazal je tudi, da ima vodik le en elektron. JJ Thomsonu pripisujemo izum masnega spektrometra, naprave, s pomočjo katere je mogoče razpoznavati kompozicijo snovi iz razmerja med maso in nabojem (masni spekter).



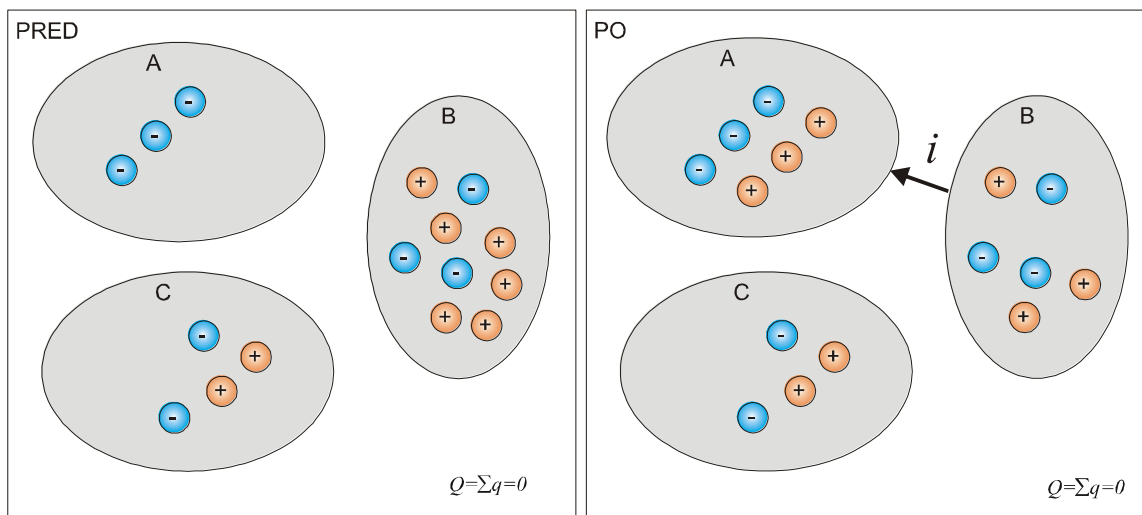
SLIKA: Katodna cev, s pomočjo katere je JJ Thomson dokazal obstoj in naravo katodnih žarkov (elektronov).

ZAKON O OHRANITVI NABOJA

Če je neko telo električno nevtrarno (ima enako število pozitivnih in negativnih nabojev), se lahko naelektri le tako, da se s telesa prenese (steče) določena količina naboja ali pa na to telo prenese dodaten naboj iz okolice. Pri tem pa se je potrebno zavedati, da se bo hkrati ta sprememba odražala tudi v okolici, saj mora veljati, da je **v električno zaključenem sistemu vsota vseh nabojev konstanta**

$$\sum_{\text{v zaključenem sistemu}} Q = \text{konst.}$$

kar imenujemo tudi zakon o ohranitvi naboja. Z drugimi besedami: nabojev ne moremo iz »nič« narediti, niti jih ne moremo izničiti.



SLIKA: V električno zaključenem sistemu na levi so tri telesa. Telo A ima presežek treh negativnih nabojev ($-3q$), telo B ima presežek treh pozitivnih nabojev ($+3q$), telo C pa je nevtravno. Vsota vseh nabojev v sistemu na levi je nič ($Q = 0$). Nato v določenem trenutku pride do prenosa nabojev med telesi. Telesi A in B, ki sta bili pred tem naelektreni, postaneta nevtralni. Ker velja zakon o ohranitvi naboja, je v celotnem električno zaključenem sistemu vsota vseh nabojev enaka pred razelektritvijo in po njej.

Če je konstanta (vsota nabojev) pozitivna, govorimo o presežku pozitivnih nabojev, če je negativna o presežku negativnih nabojev, če pa je enaka nič je sistem nevtralen (ima enako število pozitivnih in negativnih nabojev). Pri vseh prej omenjenih primerih razelektritve in naelektritve gre torej za prerazporejanje naboja, ne more pa naboj nastati »iz nič« niti ne more »izginiti«. V tem smislu lahko rečemo, da je neuničljiv. Fizikalno – matematično rečemo, da je relativistična invarianta, je količina, ki se ne spremeni tudi če se sistem giblje s hitrostjo blizu svetlobne. (To pa ne drži za maso, ki se ob velikih hitrostih spreminja v skladu z znano povezavo med maso in energijo delcev (Einstein). Torej za maso ne moremo trditi, da velja zakon o ohranitvi mase. Ta velja le, če so hitrosti sistema majhne v primerjavi s svetlobno hitrostjo. Kar pa zelo pogosto drži.)

Primer: Vzemimo izoliran sistem v katerem imamo tri telesa. Dve nevtralni, na enem pa je presežek pozitivnega naboja 10 mC. Ob stiku teh treh teles se prenese 5 mC na eno, 2 mC pa na drugo telo. Koliko naboja je ostalo na prvotno naelektrenem telesu?

V skladu z zakonom o ohranitvi naboja mora veljati

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 10 \text{ mC},$$

tako pred stikom teles kot po stiku. Po stiku teles je $Q_2 = 5 \text{ mC}$, $Q_3 = 2 \text{ mC}$ iz česar sledi $Q_1 = 10 \text{ mC} - (Q_2 + Q_3) = 3 \text{ mC}$.

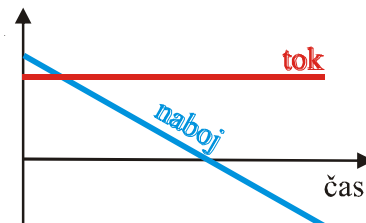
V neposredni povezavi z zakonom o ohranitvi naboja je tudi kontinuitetna enačba, ki opisuje povezavo med električnim tokom in nabojem.

KONTINUITETNA ENAČBA - ELEKTRIČNI TOK

Če želimo neko telo naelektriti oziroma razelektriti, mora pri tem priti do prenosa naboja. Hitrost prenosa množine naboja opišemo z veličino i - električni tok.

Hitreje, kot se kopiči (ali zmanjšuje) količina naboja na telesu, večji je električni tok. Če je tok časovno konstanten, je količina naboja, ki priteče na telo v času t enaka $Q = It$, od koder je $I = Q/t$. Ker je enota za tok ampere (A) in za čas sekunda (s), pogosto enoto za naboj (C) pišemo tudi kot A's. Po definiciji je tok definiran kot hitrost odtekanja pozitivnega naboja, to v splošnem opišemo z odvodom naboja po času:

$$i = -\frac{dQ}{dt}$$



2. ELEKTRIČNA SILA MED NABOJI

Vsebina poglavja: sila med točkastima nabojema, dielektrična konstanta vakuumu, vektorski zapis sile, superpozicija sil.

Že stari Grki so ugotovili, da med naelektrenimi telesi deluje sila, ki jo je William Gilbert leta 1600 v znameniti knjigi *De Magnete* poimenoval električna sila. Kljub znanstvenim raziskavam je preteklo kar nekaj časa, da je bila dognana zveza med velikostjo sile in naboji, ki to silo povzročajo.

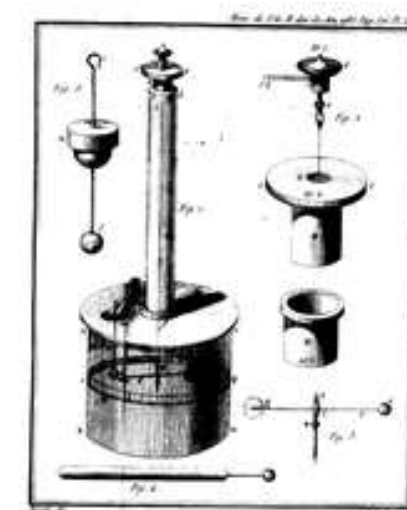
Osnovno zakonitost je s pomočjo eksperimenta s torzijsko tehtnico dognal Charles Augustin de Coulomb. Ugotovil je, da je sila med dvema naelektrenima kroglicama sorazmerna produktu nabojev in inverzno sorazmerna kvadratu razdalje med kroglicama. Matematično to zapišemo kot

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2},$$

kjer je k konstanta. Odvisna je od izbire merskega sistema. V sistemu merskih enot, ki je v veljavi dandanes (SI), velja

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \text{ in je približno enaka } k \cong 9 \cdot 10^9 \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{s}}.$$

ϵ_0 imenujemo dielektrična konstanta vakuumu* in je enaka $\epsilon_0 \cong 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$.



Coulombova torzijska tehtnica, s katero je izvajal poskuse in ugotovil

Da bi bila enačba točna, morata biti kroglici čim manjši. Eksaktno enačba velja le za tako imenovane **točkaste elektrine**. To je čista matematična formulacija, saj točkastih nabojev v naravi ni. Še tako majhen naboj ima določen polmer, četudi majhen[†]. Je pa koncept točkaste elektrine (točkastega naboja) zelo pomemben v elektrotehniki in z njegovo pomočjo izpeljemo izraze za silo med naelektrenimi telesi.

Primer: Določimo električno silo med dvema točkastima nabojema $Q_1 = 2 \mu\text{C}$ in $Q_2 = 5 \mu\text{C}$, ki sta oddaljena za 1 cm.

Izračun:

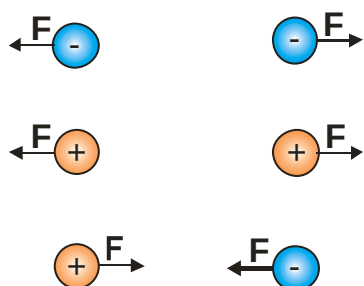
$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{s}} \frac{2 \mu\text{C} \cdot 5 \mu\text{C}}{(0,01 \text{ m})^2} = \underline{\underline{900 \text{ N}}}.$$

* Pogosto tudi zrak smatramo za prostor brez nabojev, v katerem določamo silo med naboji na enak način kot v vakuumu. Kasneje bomo ugotovili, da je za izračun sil in električnega polja v različnih medijih potrebno upoštevati vpliv samega medija. Ta vpliv opišemo z relativno dielektrično konstanto. Za vakuumu je ta 1, za zrak pa 1,00059.

[†] Polmer elektrona je $2,8179 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Iz rezultata lahko ugotovimo, da smo enoto N(ewton) kar pripisali, saj bi po izvajanju morala biti enota za silo VAs/m. To tudi je ekvivalentna enota za silo, le da je bolj običajno, da silo izrazimo z enoto iz mehanike, newtnom (njutnom).

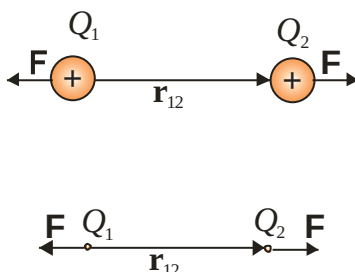
Izračun sile med točkastimi naboji je torej preprost. Potrebno pa je poudariti, da je sila vektorska veličina, saj ima poleg velikosti tudi smer. Kot smo že omenili, je smer sile taka, da se enako naznačena (predznačena) naboja odbijata, nasprotno naznačena pa privlačita. To pravilo moramo le še zapisati v matematični obliki in ga upoštevati pri izračunu sile. Pri tem si pomagamo z vektorskim zapisom. Silo zapišemo kot vektor, hkrati pa z vektorji zapišemo tudi pozicije mest, kjer se naboji nahajajo.



SLIKA: Odbojna in privlačna sila med paroma nabojev.

Zapis sile v vektorski obliki. Imejmo točkasta naboja Q_1 in Q_2 , ki se nahajata v točkah T_1 in T_2 , kjer je točka T_1 določena s koordinatami (x_1, y_1, z_1) in T_2 z (x_2, y_2, z_2) . Vektor iz koordinatnega izhodišča do točke T_1 označimo z $\vec{r}_1$ in ima komponente (x_1, y_1, z_1) ter $\vec{r}_2$ s komponentami (x_2, y_2, z_2) . Določimo še vektor, ki kaže iz točke T_1 v točko T_2 . Ta je $\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ oziroma $\vec{r}_{12} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$.

Da bi izračunali vektor sile, moramo velikosti sile, določeni z enačbo $F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$, dodati še smer. Smer sile, ki jo naboj Q_1 povzroča na naboj Q_2 bo v smeri vektorja $\vec{r}_{12}$. Potrebujemo torej vektor, ki kaže v smeri vektorja $\vec{r}_{12}$, njegova velikost pa je 1. Ta vektor imenujemo **enotski vektor** in ga dobimo tako, da vektor $\vec{r}_{12}$ delimo z njegovo absolutno vrednostjo (velikostjo): $\vec{e}_{r_{12}} = \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|}$.

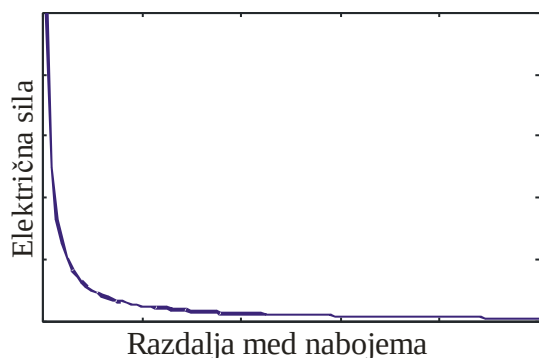


Sila na Q_2 , ki jo povzroča naboj Q_1 , zapisana v vektorski obliki, je

$$\vec{F}_{Q_2} = \vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{r_{12}}. \text{ To enačbo imenujemo } \mathbf{Coulombov\ zakon}.$$

Zapisana sila je sila na naboj Q_2 , če pa želimo izraziti silo na naboj Q_1 , moramo obrniti vektor $\vec{r}_{12}$, oziroma upoštevati $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Kako se spreminja sila z oddaljenostjo med točkastima nabojema? Sila je inverzno proporcionalna kvadratu razdalje med nabojema.

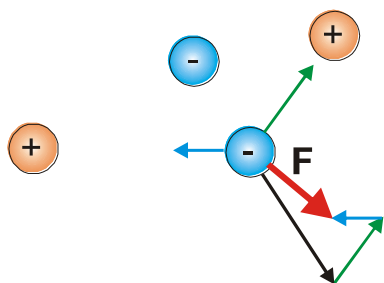


SLIKA: Sila med nabojema Q_1 in Q_2 v odvisnosti od razdalje med nabojema.

SUPERPOZICIJA SIL

Kaj pa če imamo tri ali več nabojev? Kako določimo silo na določen naboj? Določimo jo preprosto s seštevanjem posameznih prispevkov sil. Matematično temu rečemo superpozicija in princip seštevanja sil kot superpozicija sil. Sila na Q_1 bi bila torej enaka vsoti sil med nabojema Q_1 in Q_2 , Q_1 in Q_3 , Q_1 in Q_4 , itd.

$$\vec{F}_{Q_1} = \vec{F}_{Q_2 \rightarrow Q_1} + \vec{F}_{Q_3 \rightarrow Q_1} + \vec{F}_{Q_4 \rightarrow Q_1} + \dots$$



SLIKA: Primer superpozicije sil. Na desni spodnji naboj delujejo tri sile kot posledica treh okoliških nabojev. Skupna sila je vektorski seštevek posameznih sil.

Za doma:

1. Preberite poglavje.
2. Uporabite ključne besede iz svojega področja delovanja in poiščite nekaj naslovov na članke, ki vsebujejo ključne besede: Couloumb force, electrostatic force, electric charge, electric current. Zanimivejše stiskajte in jih prinesite pokazati.
3. Izračunajte silo med dvema nanodelcema polmera 5 nm, oddaljenima za 500 nm. Prvi ima presežek 10 elektronov, drugi pa primanjkljaj 5 elektronov. Dodatna vprašanja: je sila med delcema privlačna ali odbojna. Sila na kateri naboj je večja? V katero smer bi se premaknila delca? Za koliko se poveča sila, če je razdalja med delcema pol manjša?

VIRTUALNI EKSPERIMENT S PROGRAMOM JACOB.

Program se nahaja na spletni strani <http://jacob.fe.uni-lj.si>

Program računa silo med naboji in v vsakem naslednjem koraku prestavi vsak delec v smeri rezultantne sile na delec.



3. ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST

Vsebina poglavja: definicija električne poljske jakosti, superpozicija električnega polja.

Pojem električne poljske jakosti je en najpomembnejših konceptov v elektrotehniki. V osnovi abstrakten pojem se bo kasneje izkazal kot ključen za določanje napetosti, energije in drugih pomembnih veličin.

Električna poljska jakost je definirana kot sila na enoto pozitivnega naboja $Q_t = 1\text{ C}$:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_t}.$$

Električno poljsko jakost v poljubni točki v prostoru določimo tako, da v to točko postavimo poskusni (testni) naboj Q_t in določimo silo na ta naboj. Nato silo delimo silo s poskusnim nabojem Q_t in dobimo električno poljsko jakost.

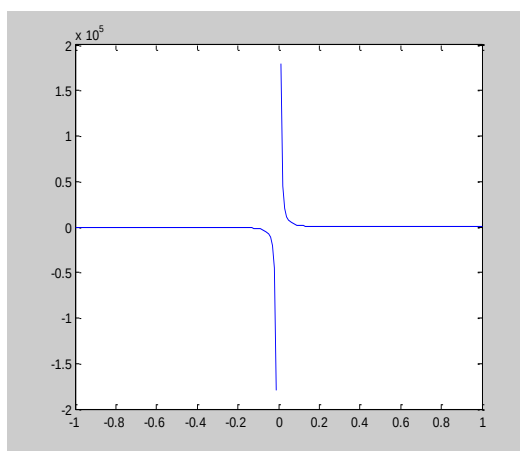
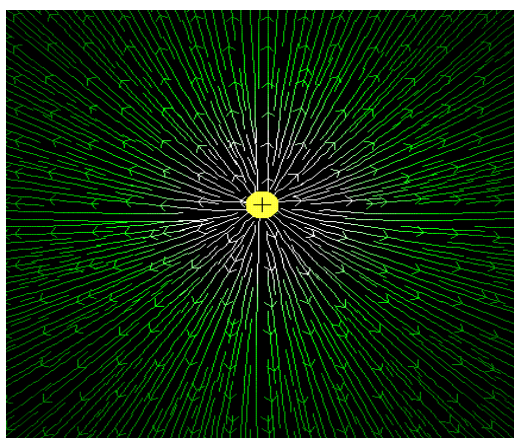
Med točkastima nabojem Q in Q_t je sila $\frac{Q_t Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, kjer je r razdalja med nabojema. Električna poljska

jakost na mestu naboja Q_t je torej $E = \frac{1}{Q_t} \frac{Q_t Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$.

Ker pa je tako sila kot električna poljska jakost vektorska veličina, moramo upoštevati še smer. Ta je v smeri vektorja $\vec{r}$, ki je vektor od mesta naboja Q do testnega naboja Q_t .

Električna poljska jakost na oddaljenosti r od točkastega naboja Q je torej enaka

$$\vec{E} = \vec{e}_r \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$



SLIKA: Levo: prikaz velikosti polja s puščicami. Desno Električna poljska jakost na oddaljenosti r od točkastega naboja Q .

Primer: Določimo velikost električne poljske jakosti v oddaljenosti 1 mm, 1 cm in 1dm od naboja $Q = 2 \mu\text{C}$.

Izračun:

Enota za električno poljsko jakost je V/m.

Iz primera vidimo, da lahko smer električne poljske jakosti določimo kot smer sile na namišljen pozitivni naboj. V principu je vseeno, kako velik je ta testni naboj, saj vidimo, da v enačbi sploh ne nastopa – v enačbi nastopa naboj, ki povzroča silo na testni naboj. Naboj 1 C je zelo velika količina naboja, ki ga je (1) realno nemogoče zbrati v točki (v malem radiju) in (2) tak naboj bi vsekakor predstavljal izrazito veliko silo na okoliške naboje in povzročil njihovo premaknitev. Zato je bolj natančna **definicija za električno poljsko jakost, da je to sila na majhen poskusni pozitivni naboj**, matematično

$$\vec{E} = \lim_{Q_t \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{Q_t}.$$

V čem je potem razlika med silo in električno poljsko jakostjo? Pomembna konceptualna razlika je v tem, da je mogoče sile določati le med naboji, medtem ko je **električna poljska jakost definirana v vsaki točki v prostoru**.

SUPERPOZICIJA ELEKTRIČNEGA POLJA

Kako določimo električno poljsko jakost v točki, če je v okolici več nabojev? Enako kot smo določali silo na naboj v okolici več nabojev. V točko postavimo poskusni naboj, izračunamo silo na poskusni (pozitivni) naboj kot superpozicijo posameznih prispevkov sile ter nato delimo s poskusnim nabojem. Oziroma, določimo električno poljsko jakost za vsak naboj posebej in prispevke seštejemo.

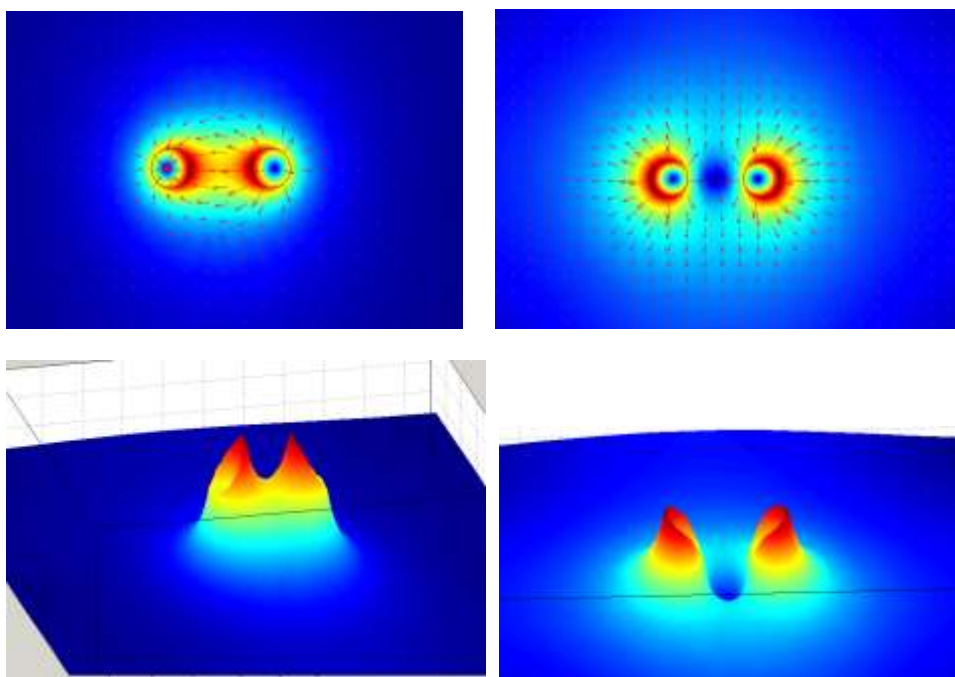
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots = \sum_i \vec{E}_i$$

SLIKA: Več nabojev in električna poljska jakost v točki kot superpozicija električnih poljskih jakosti posameznih nabojev.

PRIKAZOVANJE ELEKTRIČNE POLJSKE JAKOSTI V PROSTORU

Ker je polje definirano v vsaki točki prostora, pomeni, da lahko v vsaki točki prostora ponazorimo polje z vektorjem, ki kaže smer in velikost polja v točki. Običajno se spoprijaznimo s tem, da rišemo vektorje električne poljske jakosti v določenih točkah v prostoru in tako prikažemo vektorsko polje. Druga možnost je, da prikazujemo velikost polja (vendar ne smeri) z 2D ali 3D prikazom z obarvanjem, pri čemer lahko na enem grafu prikažemo le eno komponento E-ja, npr. E_x ali le E_y . Pogosto pa z obarvanjem prikažemo absolutno vrednost polja.

SLIKA: Prikazovanje električne poljske jakosti v okolici točkastega naboja: a) z vektorji, b) 1D prikaz, c) 2D prikaz, d) 3D prikaz.



SLIKA: 2D in 3D prikaz električne poljske jakosti za polje v okolici dveh prevodnih naelektrenih valjev. Na dveh slikah na levi je prikazano električno polje v okolici dveh valjev naelektrenih z naboji nasprotnega predznaka (levi valj z negativnim, desni pa s pozitivnim nabojem), na desni pa dva valja z enako predznačenim nabojem (pozitivnim). Smer polja prikazujejo puščice (vektorji), velikost pa tako velikost puščic, kot tudi obarvanost – toplejša barva predstavlja večjo poljsko jakost.

Za doma:

1. Izračunajte električno poljsko jakost v točki, ki je za oddaljenosti $100\ \mu\text{m}$ oddaljena od točkastega naboja $Q=2\ \text{pC}$.
2. Uporabite ključne besede iz svojega področja delovanja in poiščite nekaj naslovov na članke, ki vsebujejo ključne besede: electric field, electric field density . Zanimivejše stiskajte in jih prinesite pokazati.

PROGRAMI ZA IZRAČUNE IN OBDELAVO

Obstaja množica računalniških programov (software) za izračune in obdelavo podatkov. V tehniki največ uporabljamo program Matlab, ki poleg osnovnega računanja, izrisovanja itd. vsebuje tudi dodatne module, prilagojene za različna področja: finance, biologija, obdelava slik, statistika, itd. Obstajajo pa tudi programi, ki imajo osnovni koncept enak paketu Matlabu in delajo

kot kloni, so pa zastoj oziroma t.i. freeware z GPL licenco. En bolj zmogljivih programov je Octave, za naložiti na računalnik pa je mogoče najbolj enostaven program Freemat, ki ga naložite s strani <http://freemat.sourceforge.net/index.html>.



Ko naložite program npr. s preprostimi ukazi

```
e0=8.854e-12;
```

```
Q=1e-12;
```

```
r=100e-6;
```

```
E=Q/(4*pi*e0*r^2)
```

Izračunate vrednosti polja iz prejšnje naloge.

Če želite izračunati polje za različne vrednosti r , preprosto r definirate kot vektor z več vrednostmi, npr. $r=[10,20,50,100]*1e-6$ in določite polje za vse r -e s pomočjo izraza

```
E=Q/(4*pi*e0*r.^2)
```

Razlika med prejšnjim in novim izrazom je, da ko množimo in delimo vektorje, pred operacijo množenja, deljenja, potenciranja, uporabimo znak pika. Torej, namesto $*$ uporabimo $.*$, namesto $/$ uporabimo $./$ in namesto $^$ uporabimo $.^$

Izris grafa je zelo enostaven. Preprosto uporabite ukaz `plot(x os, y os)` in dobite izris, kot ga kaže slika. Za take izrise je smiselno uporabiti več vrednosti r -ov, da bo krivulja bolj gladka. Npr. r lahko zapišemo kot

```
r=(10:1:100)*1e-6
```

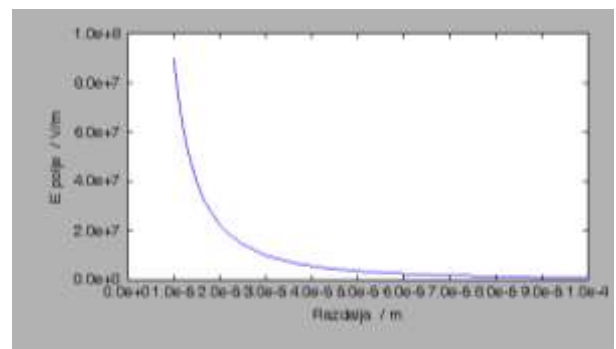
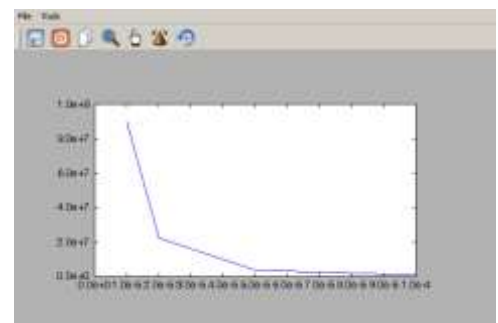
kar naredi vektor z vrednostmi r od 10 po 1 do 100 μm . Sledita ukaza

```
E=Q/(4*pi*e0*r.^2)
```

```
plot(r,E)
```

in še dodatna za izris x in y osi:

```
xlabel('Razdalja / m'), ylabel('E polje / V/m')
```



Za doma:

Naložite si program Freemat in opravite nekaj izračunov ter izrišite polje od -10 do 10 μm s korakom 0,5 μm .

4. ELEKTRIČNI DIPOL

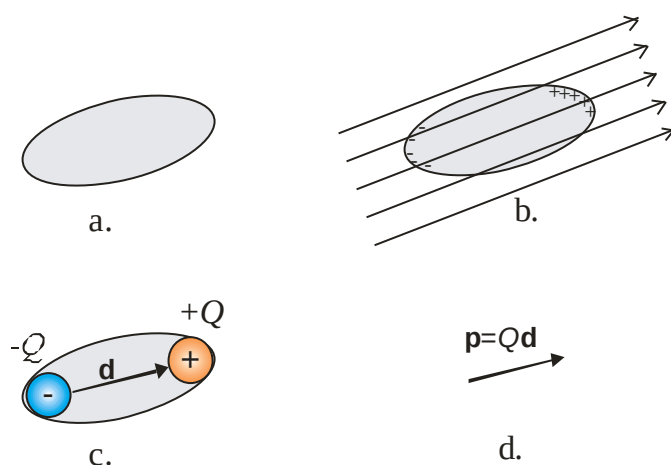
Vsebina poglavja: polarizacija prevodnika (snovi) v električnem polju, električni dipolni moment, polarne in nepolarne snovi, dipol v homogenem in nehomogenem polju, potencial in polje v okolici dipola, navor na dipol.

Električni dipol je en pomembnejših elementov v teoriji električnega polja. S tem konceptom (elementom) med drugim lahko razložimo vpliv in delovanje električnega polja v snovi, kar je seveda zelo pomembno. Poleg tega nam pomagajo razložiti in določati električne sile na električno nevtralne delce. Če take delce postavimo v električno polje, na atome (elektrone in protone) iz katerih je delec sestavljen deluje električna sila. V kolikor so v snovi prisotni prosti elektroni se bodo ti usmerili v smer nasprotno smeri električnega polja in se nakopičili na površini delca. Na drugi strani bodo ostali pozitivni naboji (protoni).

ELEKTRIČNI DIPOL

Spomnimo se poglavja o prevodnikih v električnem polju. Če nevtralni prevoden delec postavimo v električno polje, pride v prevodniku do prerazporeditve naboja, pri čemer se elektroni premaknejo (zamaknejo) v nasprotni smeri polja. Ti zamiki potekajo toliko časa (pa vendar zelo hitro), da se v notranjosti prevodnika vzpostavi polje, ki je enako nič. Prevodni delec tako dobi enovit potencial. Presežek pozitivnega naboja na enem koncu prevodnika lahko konceptualno združimo v pozitiven točkast naboj, presežek negativnega pa v negativen točkast naboj. Ta naboja sta razmaknjena za neko fiksno razdaljo, ki jo lahko opišemo z vektorjem, ki kaže od negativnega v smeri pozitivnega naboja.

Električni dipol definiramo kot dva nasprotno-predznačena točkasta naboja razmaknjena za razdaljo d .



SLIKA: Prevodnik v električnem polju. a) Nevtralen prevoden delec. b) Nevtralen prevoden delec v električnem polju. Pride do prerazporeditve naboja. c. Prerazporeditev naboja lahko ponazorimo z dvema točkastima nabojema povezanimi s fiksno razdaljo, kar ponazorimo s konceptom električnega dipola. d) električni dipol.

ELEKTRIČNI DIPOLNI MOMENT

imenujemo produkt naboja Q in vektorja $\vec{d}$, ki je distančni vektor od naboja $-Q$ do naboja Q in ga zapišemo s simbolom $\vec{p}$:

$$\vec{p} = Q\vec{d} \quad (* \text{ enota je Cm})$$

Pozor: Velja opozoriti, da je smer vektorja $\vec{d}$ ravno nasprotna smeri polja, ki ga povzročata naboja in je torej definirana od minus naboja v smeri plus naboja.

Primer: vzdolž daljše osi ovalnega prevodnika dolžine 5 mm se prerazporedi 10^{10} elektronov. Ponazorimo prevodnik v obliki električnega dipola in ocenimo njegov električni dipolni moment.

Izračun:

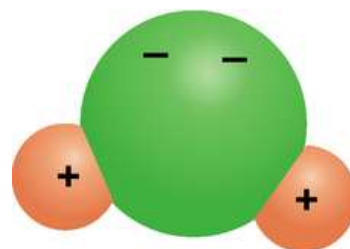
$$p = Qd = 10^{10} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ m} = \underline{\underline{8 \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{m}}}.$$

Primer: V molekuli NaCl (sol) je razdalja med Na in Cl ionom 0,6 nm. Izračunajmo električni dipolni moment molekule NaCl.

Izračun: $p = Qd = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,6 \cdot 10^{-9} \text{ m} \approx \underline{\underline{10^{-28} \text{ C} \cdot \text{m}}}$

POLARNE IN NEPOLARNE MOLEKULE

Ni pa nujno potrebno, da dobimo električni dipol le pri vstavitvi prevodnika v električno polje. Določene snovi (molekule) so lahko že same po sebi take, da imajo neenakomerno porazdeljen naboj. Tipičen primer je molekula vode (H_2O), ki ima vodikova atoma razmaknjena od središčnega kisikovega za kot 105° . Zakaj ravno tak kot? Izkaže se, da ta kot omogoča minimalno energijsko stanje molekule. Zaradi nehomogene porazdelitve naboja je električni dipolski moment molekule vode $6,7 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$. Molekula vode ima torej vgrajen dipolni moment, rečemo tudi, da je **polarna** molekula (ima pozitivni in negativni pol) v nasprotju z nepolarnimi, kjer je naboj molekule porazdeljen tako, da je navzven nevtralna. Lahko pa nepolarna molekula postane bolj ali manj polarna, če jo postavimo v električno polje. Temu efektu rečemo **polarizacija**.



Neenakomerna porazdelitev pozitivnega in negativnega naboja v molekuli vode ustvari permanentni dipolni moment vode.

http://lightandmatter.com/html_b

SLIKA: Polarna in nepolarna molekula: a) brez zunanjega električnega polja, b) v zunanjem električnem polju.

* Pogosto, posebno v elektrokemiji, se uporablja za enoto električnega dipolnega momenta D (Debye). Velja $1 D = 3,33 \cdot 10^{-33} \text{ C} \cdot \text{m}$. To omogoča tudi »lepše« zapise dipolnih momentov. Npr. dipolni moment vode je $p(\text{H}_2\text{O}) = 1,85 D$, $p(\text{HCl}) = 1,08 D$, itd.

5. SILA IN GIBANJE NABOJEV V ELEKTRIČNEM POLJU

Na naboj v električnem polju deluje električna sila

$$\vec{F} = Q\vec{E}$$

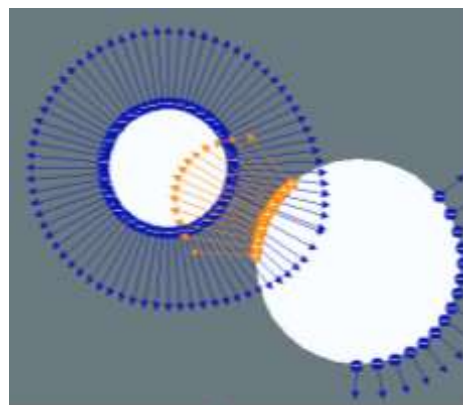
, kar sledi direktno iz definicije električnega polja. Če torej poznamo velikost polja na mestu naboja, določimo silo kot produkt naboja in polja.

Primer: Določimo električno silo, ki deluje na ion natrija, če ga postavimo v električno polje velikosti 20 kV/m.

Izračun: Ion natrija je pozitiven in enovalenten in ima torej presežek naboja protona (+). Sila je $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 20 \text{ kV/m} = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ N}$.

VIRTUALNI EKSPERIMENT:

Uporabimo program Jacob za opazovanje delovanja sil na naboje in njihovo pozicioniranje. Uporabimo orodje za prikaz električnega polja in opazujemo velikost in smer polja.



DINAMIČNO IZRAČUNAVANJA ELEKTRIČNE SILE

V kolikor nas zanima trajektorija gibanja naelektrenega delca v električnem polju moramo rešiti enačbo gibanja, kjer je pospešek na delec z maso m določen s pomočjo enačbe

$$m\vec{a} = \sum_i \vec{F}_i$$

Desna stran predstavlja vsoto vseh sil, ki delujejo na delec. V našem primeru je to lahko le električna sila ali pa na primer električna sila in sila gravitacije. V praksi je običajno potrebno računati na več sil, ki delujejo hkrati na delec.

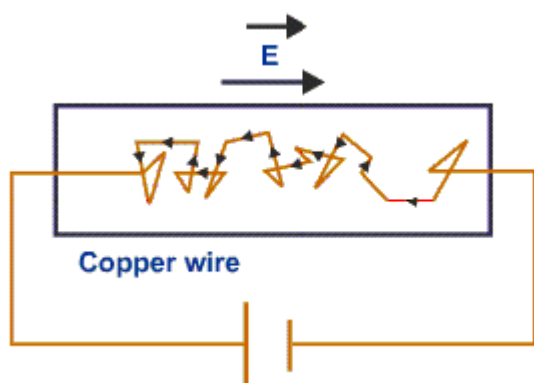
Primer: Določite večkratnik naboja, če na delec z maso $m=1,6418 \times 10^{-15} \text{ g}$ deluje enako velika gravitacijska in električna sila. Delec se nahaja v homogenem polju 10 kV/m .

Izračun: $mg = QE = nQ_e E \Rightarrow n = \frac{mg}{Q_e E} \cong 5$.

MILLIKANOV EKSPERIMENT^{*} je potrdil, da je naboj kvantiziran. Da nastopa določena najmanjša količina naboja, ki je naboj elektrona (protona). To je uspel Millikan dognati z eksperimentom, v katerem je brizgal majhne kapljice v prostor s homogenim poljem. Polje je delovalo v nasprotni smeri kot sila težnosti in iz hitrosti padanja oz lebdenja je uspel dognati, da naboj na kapljicah nastopa kot produkt osnovnega naboja.

GIBANJE NABOJEV V SNOVEH

Če se naelektren delec nahaja v električnem polju, nanj deluje sila QE in se v vakuumu pod vplivom polja giblje pospešeno s pospeškom enakim $\vec{a} = \frac{QE}{m}$. Hitrost delca narašča v skladu z $\vec{v} = \int \vec{a} dt$. Če je pospešek konstanten (konstantno polje), se njegova hitrost s časom linearno povečuje $v = at$. To velja le za vakuum ali za prostor zelo redek s snovjo (npr. v katodni cevi). V nasprotnem primeru delec trka z delci iz okolice in izgublja hitrost.



SLIKA: Premikanje (tok) nabojev v prevodniku pod vplivom električnega toka ni premočrtno zaradi trkov z atomi v snovi. Naboji v prevodniku se gibljejo s povprečno hitrostjo (hitrostjo »drifta«). Vir: <http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iv/current-electricity/resistivity-origin.php>

Izkaže se, da se namesto pospešeno v povprečju giblje s povprečno hitrostjo (včasih rečemo hitrostjo drifta). Tipičen primer je gibanje elektronov v prevodnikih ali pa gibanje ionov v elektrolitih oziroma »gostih« snoveh. V teh primerih je hitrost gibanja nabojev sorazmerna električnemu polju, kar lahko zapišemo v obliki [†]

^{*} Glej tudi B. Crowell: Electricity and Magnetism.

[†] Preprosta izpeljava izraza za mobilnost je sledeča. Vzemimo, da delec pospešuje določen čas τ , potem pa trči v atom na poti, ki ga zaustavi (in spremeni smer). Hitrost bo pri tem $v = a\tau = \frac{QE}{m}\tau$. To hitrost lahko vzamemo tudi

$$\vec{v}_d = \mu \vec{E}$$

kjer je μ mobilnost. Mobilnost »pove«, kako hitro se uspejo naboji gibati v snovi. Enota mobilnosti je m^2/Vs .

V kolikor gre za premikanje elektronov v prevodnikih, je μ odvisna od tipa prevodnika. Bolj pogosto kot mobilnost v teh primerih govorimo o prevodnosti snovi oziroma o specifični prevodnosti.

Material	Mobilnost cm^2/Vs
Silicij	1900
GaAs	8800
InAs	33000

SLIKA: Tabela mobilnosti nabojev v nekaterih polprevodnikih.

Primer: Določimo elektroforetično mobilnost albumina (beljakovina topna v vodi, zelo pogosta v organizmih), ki pri vzpostavljeni homogenem električnem polju 2500 V/m doseže razdaljo 25 mm v času ene ure.

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{25 \text{ mm}/1 \text{ h}}{2500 \text{ V/m}} = 0,0028 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}. \text{ (primer iz Pure and Appl. Chem. Vol. 66, No. 4. pp. 891-896. Vir}$$

opisuje tudi pravilno uporabo veličin pri elektroforezi)

ELEKTROFOREZA

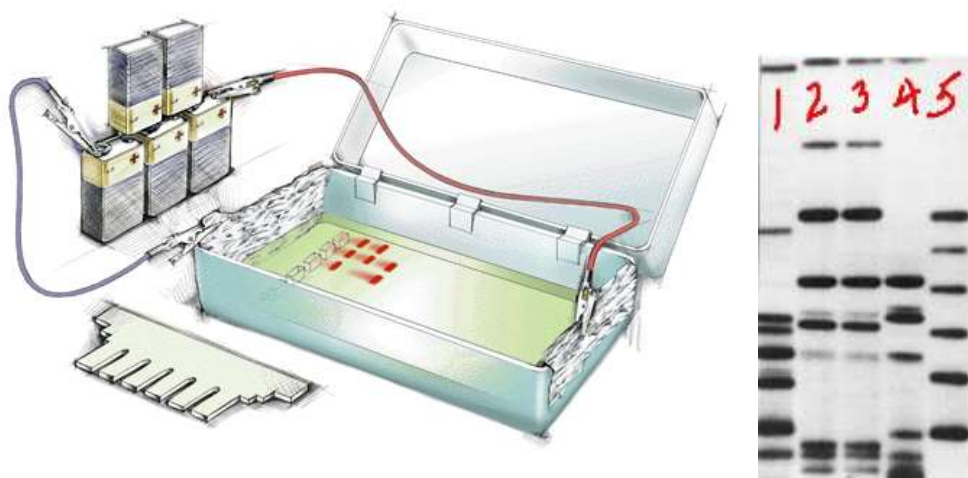
Elektroforeza imenujemo gibanje naelektrenih delcev v snovi, električna sila, ki to omogoča pa je elektroforezna sila. Na delce, ki so bolj naelektreni, deluje večja sila (v skladu z $F_{el} = QE$) in torej potujejo v mediju v smeri vzpostavljenega električnega polja. Ko naelektren delec potuje v smeri električnega polja odriva snov v svoji okolici. Zato nanj v nasprotni smeri deluje sila, ki je v skladu s Stokesovim zakonom sorazmerna hitrosti gibanja delca, viskoznosti medija ter polmera delca $\vec{F}_{drag} = 6\pi\eta a \vec{v}$. Če bi vzeli primer padanja telesa pod vplivom gravitacijske sile, zaradi upora zraka delec ne bi stalno pospeševal pač pa bi se njegova hitrost ustalila tedaj, ko bi bila sila upora enako velika gravitacijski sili, torej pri $m\vec{g} = 6\pi\eta a \vec{v}$, od koder bi z lahkoto dognali končno hitrost delca ($\frac{m}{6\pi\eta a} \vec{g} = \vec{v}$).

Podobno gibanje naelektrenega delca v mediju zaradi električne sile upočasnjuje upor medija in delec doseže končno hitrost pri

kot končno oz povprečno hitrost. Namesto mase naboja bi lahko pisali neko efektivno maso vendar bistvo je v tem,

da se hitrost ne povečuje, pač pa je odvisna od velikosti električnega polja: $v = \frac{Q\tau}{m} E = \mu E$.

$$\vec{F}_{el} = \vec{F}_{drag} \Rightarrow Q\vec{E} = 6\pi\eta a\vec{v} \Rightarrow \vec{v} = \frac{Q}{6\pi\eta a} \vec{E}.$$



SLIKA: Preprost sistem za elektroforezo. Med dve elektrodi priključimo napetost, ki vzpostavi električno polje in s tem silo na naboje. Ti se pod vplivom polja gibljejo v smeri nasprotno naelektrene elektrode glede na množino naboja in druge lastnosti (glej tekst). Na desni tipičen primer analize DNA z elektroforezo. (http://www.ndpteachers.org/perit/biology_image_gallery1.htm)

Ta rezultat ni najbolj natančen iz naslednjega vzroka: naelektren delec v mediju, ki običajno vsebuje določeno količino vode in ionov ne more potovati neovirano zaradi tega, ker okoliški naboji (pa tudi molekule vode, ki so močno polarne) čutijo določen elektrostatični privlak. Zato se okoli naelektrenih delcev nabere oblak ionov, tako tistih z enakim kot tistih z nasprotnim predznakom. Naboj, na katerega deluje zunanje električno polje je torej zmanjšan zaradi okoliških ionov.

Da bi to upoštevali pri izrazu za elektroforezno hitrost, je naprej potrebno rešiti Poissonovo enačbo, ki vključuje porazdelitev ionov v okolici naelektrenega (sferičnega) delca. To porazdelitev imenujemo Boltzmanova porazdelitev, ki sledi iz uporabe Nernst-Planckove enačbe za elektrodifuzijo (upoštevata tako difuzijo delcev kot premikanje v električnem polju). Ta »pravi«, da v ravnovesju (tok kationov in anionov = 0) koncentracija nabojev ob naelektreni površini upada eksponentno. Ko tak potek koncentracije nabojev vstavimo v Poissonovo enačbo (ki jo sedaj poimenujemo Poisson-Boltzmanova enačba) dobimo potek potenciala v okolici naelektrenega telesa. Ob določenih poenostavitvah zopet dobimo eksponentni potek potenciala, hitrost upadanja pa nam podaja t.i. Debyejeva dolžina λ_D , kjer potencial od naelektrene površine upade za $1/e$. $1/\lambda_D^2$ je sorazmeren koncentraciji

ionov, od koder jo lahko določimo. V poenostavljenem primeru (le en enovalenten elektrolit) je $\lambda_D = \sqrt{\frac{RT\epsilon}{2c_0F^2}}$,

kjer je R molarna plinska konstanta, T temperatura, c_0 koncentracija elektrolita in F Faradayeva konstanta. Sedaj uporabimo rezultate na primeru polja v okolici naelektrene sfere in upoštevamo še dinamiko tekočin, pri čemer zaradi minimalnih pospeškov tekočine v okolici kroglice predpostavimo, da mora biti povsod vsota vseh sil enaka nič.

Iz tega sledi, da bo mobilnost kroglice enaka $\mu = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\eta} \Phi(s)$, kjer je $\Phi(s)$ potencial v oddaljenosti s od kroglice, do

katere se okoliški naboj drži kroglice tudi med gibanjem. Temu potencialu rečemo elektrokinetični potencial ali tudi zeta potencial in ga označimo s simbolom $\Phi(s) = \zeta$. Dobimo izraz za elektroforezno mobilnost

$$\mu = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\eta} \zeta,$$

ki je znana tudi kot enačba Smoluchovskega. Ta enačba tudi služi za merjenje zeta potenciala, ki ga določimo iz znane električne poljske jakosti in hitrosti gibanja delcev. Običajno je velikosti do 200 mV. Meritve zeta potenciala so pomembne pri študiju elektrokinetike, še posebno v primeru nanodelcev in Lab-on-a-chip naprav. Zeta potencial je odvisen od mnogih parametrov, tako koncentracije ionov, valence, pHja kot tudi temperature.

Ta potencial je nekoliko manjši od potenciala na površini krogle, ki je enak $\Phi(r=a) = \frac{Q}{4\pi\epsilon a} \left(\frac{1}{1+a/\lambda_D} \right)$. Če zanemarimo ta detajl in upoštevamo, da je običajno $a \gg \lambda_D$, dobimo za elektroforetično mobilnost izraz $\mu = \frac{Q}{4\pi\eta a} \left(\frac{\lambda_D}{a} \right)$. Več v Ref. **G.B. Benedek in F.M.H. Villars: Physics with illustrative examples from medicine and biology, Springer, 2000.**

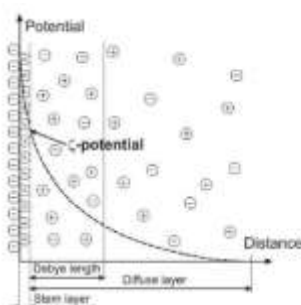


Figure 7-2. Charge and potential distribution at a charged wall in an electrolyte [14]. The Stern layer, the diffuse layer including Debye length, is illustrated in the figure. Note that the wall potential (ψ) is different from the zeta potential (ζ -potential).

Table 7-2. Illustration of the Debye length in biologically relevant media

Solution	Debye length (nm)
0.15 M physiological solution	0.8
10 mM KCl	~ 3
1 mM KCl	10

SLIKA: Prikaz koncentriranja nabojev ob naelektreni površini. Ločimo več plasti ter t.i. zeta potencial. (Vir: G.A. Urban: Biomems, Springer, 2006)

ELEKTROOZMOZA

V prejšnjem poglavju smo že spoznali, da se ob naelektrenem telesu v elektrolitu nakopičijo naboji, ki jih lahko razvrstimo v več različnih plasti. Pogosto te plasti imenujemo tudi dvojna plast ali s kratico EDL (electric double layer*). To se lahko zgodi tudi na določenih površinah, ki niso prevodne, pač pa imajo določen naboj. Določene snovi so tudi nagnjene k naelektrenju (temu rečemo torno elektrenje (ang. triboelectricity)). V skladu z zgornjo sliko se ob negativno naelektreni steni nabere plasti kationov, ki se stene držijo. V smeri vzporedni s steno je hitrost določena z elektroforezno hitrostjo $v = \mu E$, kjer je μ elektroforezna mobilnost, ki smo jo spoznali v prejšnjem poglavju in je odvisna od t.i. zeta potenciala.

* Za več glej npr. [http://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_\(electrode\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_(electrode))

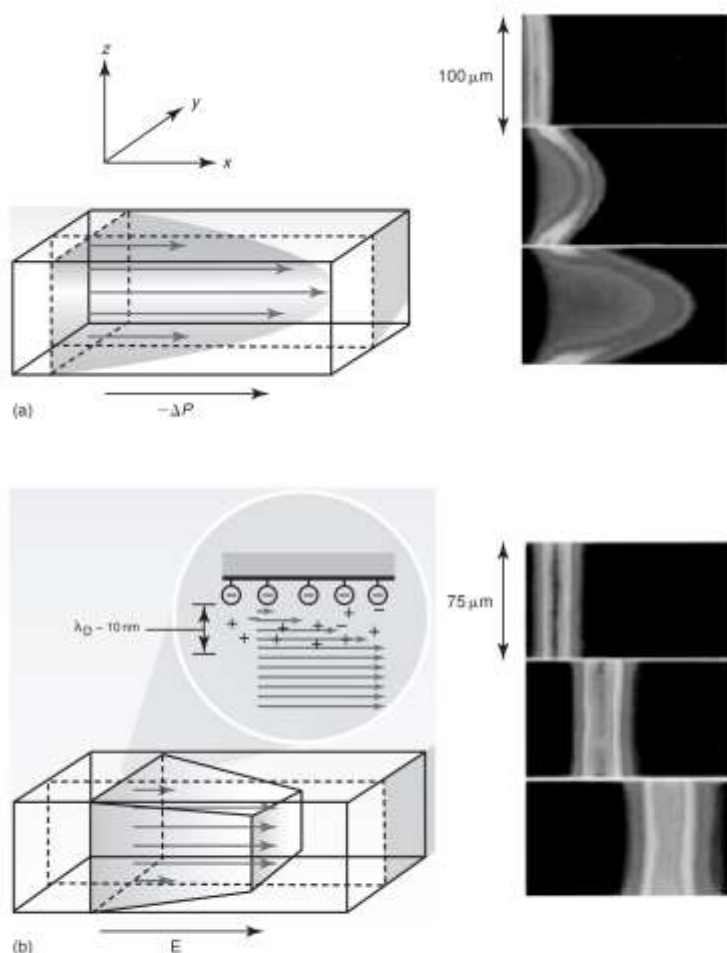
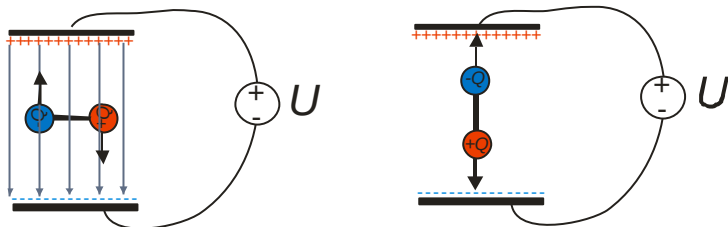


FIGURE 11.32 Flow profiles in microchannels. (a) A pressure gradient, $-\Delta P$, along a channel generates a parabolic or Poiseuille flow profile in the channel. The velocity of the flow varies across the entire cross-sectional area of the channel. On the right is an experimental measurement of the distortion of a volume of fluid in a Poiseuille flow. The frames show the state of the volume of fluid 0, 66, and 165 ms after the creation of a fluorescent molecule. (b) In electroosmotic flow in a channel, motion is induced by an applied electric field E . The flow speed only varies within the so-called Debye screening layer, of thickness λ_D . On the right is an experimental measurement of the distortion of a volume of fluid in an electroosmotic flow. The frames show the state of the fluorescent volume of fluid 0, 66, and 165 ms after the creation of a fluorescent molecule [165]. Source: <http://www.nihersst.gov.ti/scipop/sci-bits/microfluidics.htm> (see Plate 12 for color version).

SLIKA: Elektroosmotski pretok je precej različen od klasičnega t.i. Poiseuillovega, saj nima tipične parabolične oblike. (Vir: Electrochemical sensors, biosensors and their biomedical applications, Academic Press, 2008)

NAVOR IN GIBANJE DIPOLOV V ELEKTRIČNEM POLJU

Kako se obnaša električni dipol v električnem polju? Nanj deluje električna sila, ki je enaka $\vec{F} = \vec{F}_Q + \vec{F}_{-Q} = Q \cdot \vec{E}_Q + (-Q) \cdot \vec{E}_{-Q} = Q \cdot (\vec{E}_Q - \vec{E}_{-Q})$.



SLIKA: Dipol v homogenem električnem polju.

Če je polje homogeno, je $\vec{E}_Q = \vec{E}_{-Q}$ in skupna sila na dipol je enaka nič. Deluje pa sila na oba naboja dipola v nasprotni smeri, tako, da bo delovala z navorom na dipol v taki smeri, da bi dipol usmerila v smer polja. Če pa je polje nehomogeno, na dipol deluje poleg navora tudi premikalna sila, ki je različna od nič in deluje v smeri večjega polja. Te sile so običajno zelo majhne, kljub temu pa jih je mogoče koristno izrabiti.

Navor določimo na enak način kot iz fizike, kot produkt ročice in sile $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$. Pri tem je potrebno upoštevati vektorski produkt ročice in sile, rezultat je torej tudi vektor. Navor kaže v smeri vrtenja. V našem primeru nas zanima navor na dipol kot posledica električne sile, ki jo izrazimo z električnim poljem $\vec{F} = Q\vec{E}$.

Navor na pozitivni in negativni naboj je

$$\vec{M} = \frac{\vec{d}}{2} \times \vec{F}_Q + \frac{-\vec{d}}{2} \times \vec{F}_{-Q} = \frac{\vec{d}}{2} \times Q\vec{E}_Q + \frac{-\vec{d}}{2} \times (-Q\vec{E}_{-Q}) = \frac{Q\vec{d}}{2} \times (\vec{E}_Q + \vec{E}_{-Q}).$$

Če upoštevamo kratko razdaljo med nabojema, lahko smatramo, da je polje na pozitivni naboj enako polju na negativni naboj (lokalno homogeno polje) in navor na dipol bo enak $\vec{M} = Q\vec{d} \times \vec{E} = \vec{p} \times \vec{E}$.

Ponovimo rezultat: navor na dipol je enak vektorskemu produktu električnega dipolskega momenta in jakosti polja. Rezultat je vektor, ki opisuje smer vrtenja.

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$$

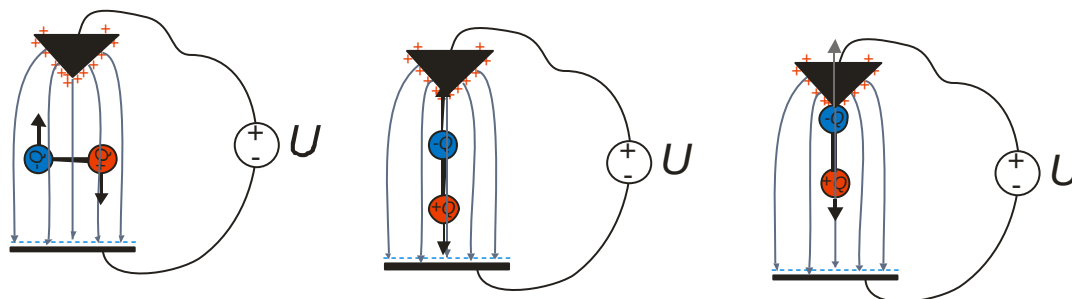
Absolutna vrednost navora je $|\vec{M}| = |\vec{p}||\vec{E}|\sin\alpha$ ali $M = pE\sin\alpha$, kjer je α kot med vektorjema $\vec{p}$ in $\vec{E}$.

Primer 1: Določimo navor na dipol velikosti 10 nC/m, če nanj delujemo s poljem 5 kV/m. Med smerjo polja in dipola je kot 60° .

Izračun: Navor določimo s pomočjo enačbe $M = pE\sin\alpha$ in je enak $M = 10 \text{ nC/m} \cdot 5 \text{ kV/m} \cdot \sin(60^\circ) = 25 \mu\text{Nm}$.

Primer 2: Pri $x = 1 \text{ cm}$ se nahaja električni dipol z momentom $\vec{p} = 10^{-6}(1, 2, 0) \text{ Cm}$. Določimo navor na dipol v polju $\vec{E} = (2, 5, 1) \text{ kV/m}$.

Izračun: Navor določimo direktno iz enačbe $\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} \dots$



SLIKA: Dipol v nehomogenem električnem polju.

6. ENERGIJA, DELO, POTENCIALNA ENERGIJA, POTENCIAL IN NAPETOST

Da napnemo lok moramo opraviti določeno delo. Pri tem se poveča napetost niti oziroma energija sistema. Na podoben način lahko pridobimo t.i. potencialno energijo, če opravimo delo in se sprehodimo na Šmarno goro.

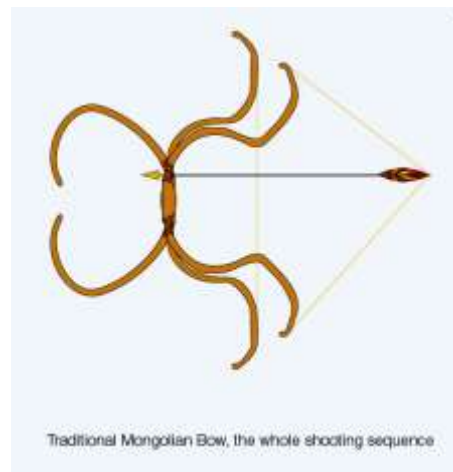
Delo je definirano kot zmnožek sile in poti, ki jo sila (objekt na katerega deluje sila) opravi na poti. Potrebno pa je opozoriti, da je potrebno upoštevati le tisto silo, ki deluje v smeri poti. Če za delo uporabimo simbol A in za pot dolžino poti l (length), velja:

$$A = F \cdot l.$$

Primer:

Če potiskamo voziček v smeri poti dolžine 5 m s silo 100 N opravimo delo 500 N·m ali 500 J. Če pa voziček potiskamo s silo 100 N v smeri, ki je pod kotom 60° na smer pa je delo v smislu definicije odvisno le od sile v smeri poti, torej $A = F \cdot l \cdot \cos(\alpha) = 100 \text{ N} \cdot 5 \text{ m} \cdot \cos(60^\circ) = 250 \text{ J}$.

Ugotovimo, da je za izračun dela primerna uporaba skalarnega produkta $A = \vec{F} \cdot \vec{l}$.



SLIKA: Sila na poti določa delo.

Bolj splošno pa je potrebno upoštevati možnost, da se vzdolž poti spreminja tako smer sile kot njena velikost. Za en majhen (diferenčni) del poti Δl je delo enako skalarnemu produktu $\Delta A = \vec{F} \cdot \Delta \vec{l}$. Z limitiranjem dobimo iz diferenc diferencial dela, to je infinitezimalen del (lahko tudi rečemo tako majhen, da na tem delu deluje konstantna sila v konstantni smeri): $dA = \vec{F} \cdot d\vec{l}$. Celotno delo je enako seštevek vseh prispevkov na poti, kar zapišemo z integracijo sile v smeri poti od začetne točke do končne točke:

$$A = \int dA = \int_L \vec{F} \cdot d\vec{l}.$$

DELO ELEKTRIČNE SILE

Upoštevamo, da je sila na naboj v električnem polju enaka $\vec{F} = Q\vec{E}$, torej bo delo za premik naboja Q v električnem polju iz točke T_1 v točko T_2 enako

$$A_e = A_{12} = \int_{T_1}^{T_2} Q\vec{E} \cdot d\vec{l} = Q \int_{T_1}^{T_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}.$$

SLIKA: Delo pri premiku naboja v električnem polju.

* DELO ELEKTRIČNIH SIL PO ZAKLJUČENI POTI

Izkaže se, da je delo električne sile v elektrostatičnem polju po zaključeni poti enako nič. (Z upoštevanjem časovno spremenljivega električnega in magnetnega polja pa je enako inducirani napetosti) To zapišemo v obliki $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$

Podobno je delo enako nič, če gremo na Šmarno goro in se vrnemo v začetno točko. To morda iz vsakdanje prakse ni ravno razumljivo, izhaja pa iz definicije veličine.



Primer: Vzemimo dva pozitivna naboja oddaljena za $d = 1$ cm z množino naboja $Q = 10$ nC. Koliko dela opravi naboj (zunanji vir) za premik na polovično razdaljo?

Izračun: naboja postavimo vzdolž X osi, levega v izhodišče k.s., desnega pa za razdaljo d v smeri X osi. Izračunali bomo delo, potrebno za premik desnega naboja v levo. Da bi lahko izračunali delo, moramo desni naboj postaviti na neko poljubno mesto vzdolž X osi, oddaljeno za razdaljo x od levega naboja. Polje na mestu desnega naboja je $\vec{E} = \vec{e}_x \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 x^2}$, $d\vec{l}$ pa je usmerjen v smeri $-X$ osi*.



SLIKA: Premik desnega naboja v smeri levega naboja.

$$\begin{aligned}
 A_{12} &= \int_{T_1}^{T_2} Q \vec{E} \cdot d\vec{l} = Q \int_{x_1=d}^{x_2=d/2} \vec{e}_x \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 x^2} \cdot (\vec{e}_x dx) = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0} \left(-\frac{1}{x} \right)_d^{d/2} = \\
 &= -\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{d/2} - \frac{1}{d} \right) = -\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 d} \cong -9 \cdot 10^9 \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} (10 \cdot 10^{-9} \text{C})^2 10^2 \text{m}^{-1} = \underline{\underline{-9 \cdot 10^{-5} \text{J}}}
 \end{aligned}$$

POTENCIALNA ENERGIJA

Ko sopihamo na Šmarno goro opravljamo delo, ki se manifestira v spremembi (gravitacijske) potencialne energije. Lahko rečemo, da se nam ta z višino večja, saj velja $\vec{F} = m\vec{g}$ in torej na predelani višini h pridobimo potencialne energije $W_{pot} = mgh$, prav toliko, kolikor smo dela opravili na poti.

Podobno velja pri premikanju nabojev v električnem polju. Tu deluje električna sila $\vec{F} = Q\vec{E}$ in opravi na poti v konstantnem (rečemo tudi homogenem) polju delo $A_{el} = QE l$, kjer je l dolžina opravljene poti. V skladu z definicijo to velja le, če je sila (električno polje) konstantno in deluje v smeri poti. Če naboj potuje v smeri polja opravi delo, ki je po predznaku pozitivno in pri tem porabi določeno (električno) potencialno energijo, ki je bila shranjena v polju. Sprememba te energije je ravno enaka delu, ki je bilo opravljeno.

Primer: Vzemimo primer elektrona, ki se giblje v smeri homogenega polja velikosti 100 kV/m na dolžini 2 cm. Kot na primer v katodni cevi. Določimo delo, ki ga pri tem opravi polje in spremembo električne energije v polju.

Velja $A_{el} = QE l$, kar da

OHRANITEV ENERGIJE

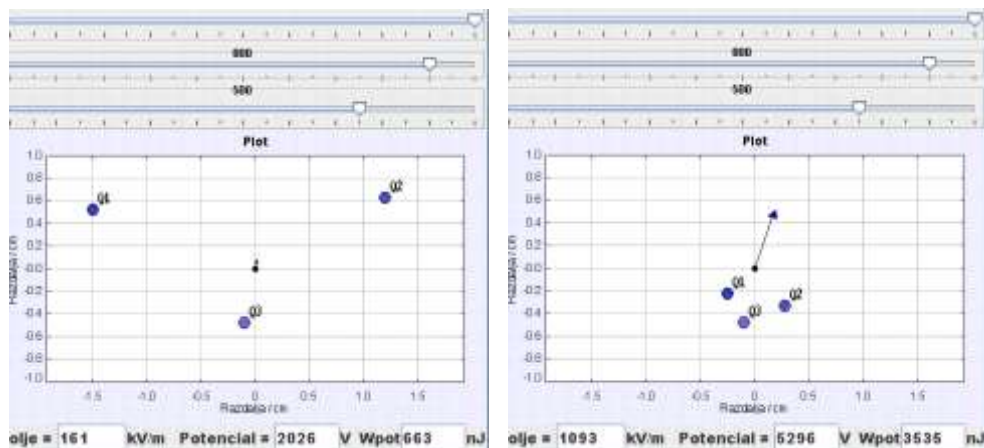
Ali se je potem celotna energija zmanjšala? Električna potencialna energija se je zmanjšala, ne pa tudi celotna. Celotna energija se vedno ohranja, kar je tudi en od osnovnih zakonov fizike. V konkretnem primeru se je potencialna energija spremenila v kinetično. To pomeni, da je naboj na račun zmanjševanja potencialne energije pridobil določeno hitrost, saj je kinetična energija enaka $mv^2 / 2$.

Primer:

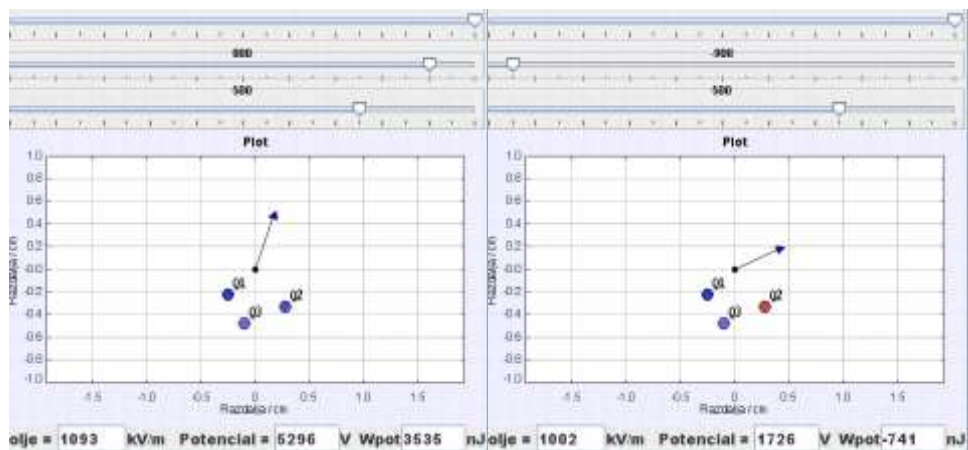
Določimo hitrost elektrona iz prejšnjega primera po preletu razdalje 2 cm.

Očitno se bo potencialna energija sistema nabojev zmanjševala, če se bodo naboji v električnem polju gibal tako, da bodo prepuščeni električni sili, ki na njih deluje. Če pa bomo pri spremembi konfiguracije nabojev sodelovali mi tako, da bomo premikali naboje v nasprotni smeri električne sile, se bo potencialna energija povečevala.

VIRTUALNI EKSPERIMENTI S PROGRAMOM EJS IN MODELOM 3NABOJI.XML



SLIKA: Primerjaj potencialno energijo sistema nabojev na levi in na desni sliki. Izračun je v okencu na vsaki sliki desno spodaj. (EJS: 3naboji.xml)



SLIKA: Zopet primerjaj potencialno energijo. Sedaj je pozicija nabojev enaka v obeh primerih, le da je na desni sliki naboj Q2 negativen. Razloži spremembo.

Sam preizkusi določene postavitve nabojev in spremljaj spremembe potencialne energije.

ELEKTRIČNI POTENCIAL

Električni potencial ni nič drugega kot normirana potencialna energija. Da bi nek naboj pripeljali v bližini drugih nabojev (npr. na mesto, ki ga označuje točka T) moramo opraviti določeno delo, ki ga zapišemo v

obliki $A_e = Q \int_T^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{l}$. To delo je enako potencialni energiji, ki jo naboj pri tem pridobi (izgubi).

Normirana potencialna energija pomeni, da je to energija na naboj Q oziroma energija, normirana na enoto naboja (na 1 C). Potencial označimo s simbolom V in velja

$$V(T) = \frac{A}{Q} = \int_T^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{l}.$$

Prav tako kot za električno polje velja tudi za potencial (potencialno polje) superpozicija potenciala. To pomeni, da lahko posamezne prispevke seštevamo.

Električni potencial je skalar, kar pomeni, da ima le vrednost, nima pa tudi smeri kot npr. električna poljska jakost.

Enota je volt in jo pišemo pokončno (V), kot tudi vse druge enote.

SLIKA: Električni potencial je skalar, definiran v vsaki točki prostora.

Za potencial v oddaljenosti r od osamljenega točkastega naboja dobimo izraz $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$.

ELEKTRIČNA NAPETOST

Delo električnih sil na enoto naboja pri premiku med dvema točkama pa je električna napetost. Električna napetost je torej določena med dvema točkama, medtem ko je potencial določen v točki. Hitro ugotovimo, da velja, da je napetost enaka razliki potencialov.

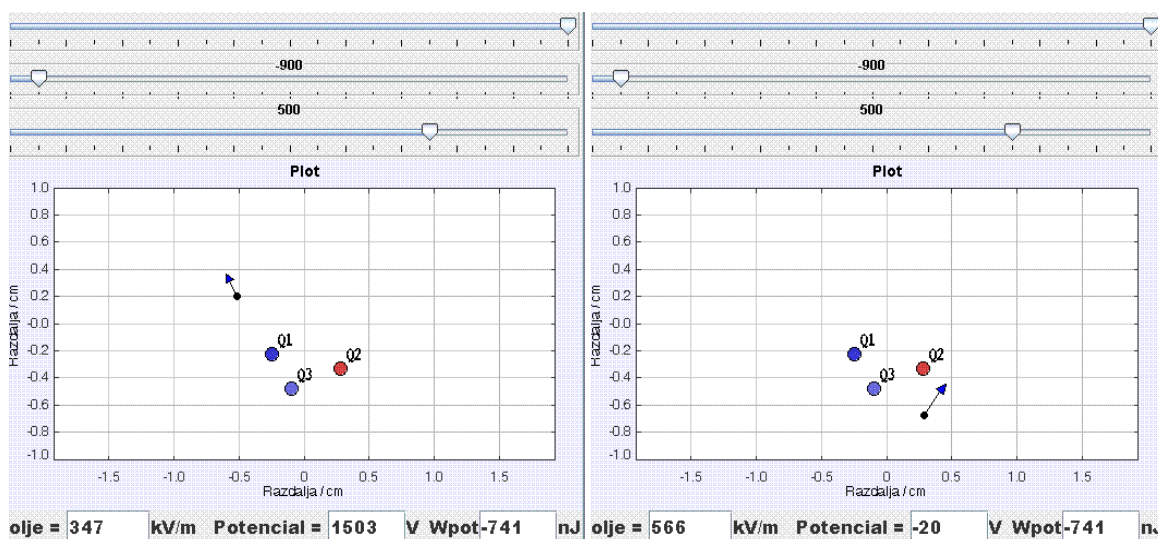
$$U_{12} = \frac{A(T_1 \rightarrow T_2)}{Q} = \int_{T_1}^{T_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$U_{12} = V_1 - V_2$$

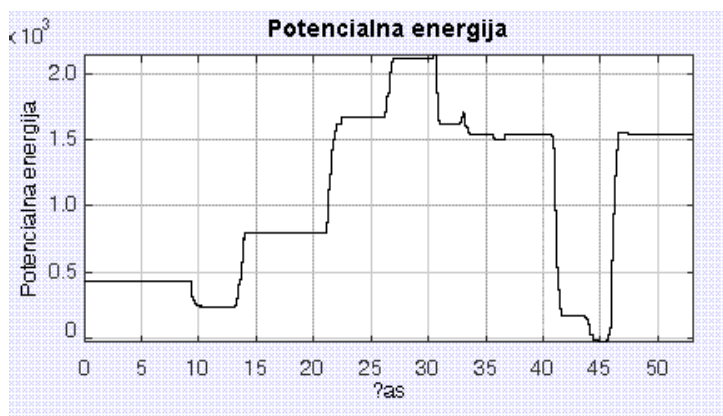
Primer: določimo napetost iz prejšnjega primera leta elektrona v polju.

Končno smo torej prispeli do nekega znanega pojma, veličine. Pogosto imamo električno napetost podano, npr. napetost akumulatorja je 12 V, napetost baterije je 1,5 V ali pa 9 V itd. Napetost hišne napeljave je 400 V vendar je le ta izmenična, spreminja se sinusno (harmonično). Napetost med žicami daljnovoda je nekaj 10 ali 100 kV itd.

Torej, običajno imamo napetost podano, lahko uporabimo vir napetosti, zanima pa nas porazdelitev polja, potenciala in s tem sile, ki delujejo na naboje v polju.



SLIKA: Programček 3naboji ima poleg izračuna potencialne energije sistema možnost spremljanja velikosti potenciala in hkrati električnega polja v poljubni točki. Točko označuje črna pika, ki jo lahko z računalniško miško premikamo v poljubni smeri. Primerjajte vrednosti potenciala in polja za dve različni točki in poskusite pojasniti rezultat.

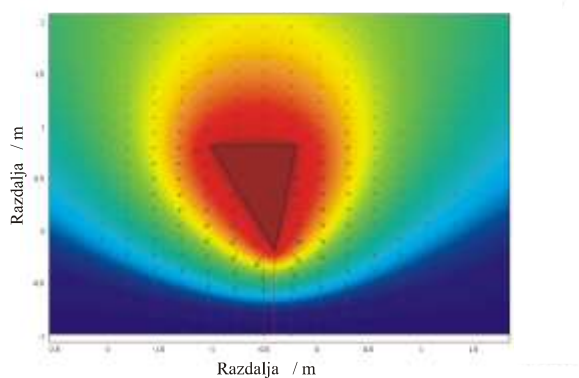


SLIKA: Spremljajte spreminjanje potencialne energije sistema s spreminjanjem pozicije nabojev ter velikost naboja. Razložite spremembe na sliki.

Za doma:

Naložite si Java simulacijo **Trije_naboji** in spreminjajte vrednosti velikosti nabojev ter spremljate spreminjanje električne poljske jakosti, potenciala in potencialne energije. Odgovorite na vprašanja iz priloženega vprašalnika Vaje z EJS1.

Za zagon programa morate imeti naloženo Javo iz <http://java.com/>

Določitev in analiza porazdelitve polja in potenciala za različne prevodne strukture

Se nadaljuje ...

2 DEL

TEHNOLOGIJA IZDELAVE MIKROSTRUKTUR

TEHNOLOGIJA IZDELAVE MIKROSTRUKTUR

(Doktorski študij Bioznanosti)

Dejan Križaj

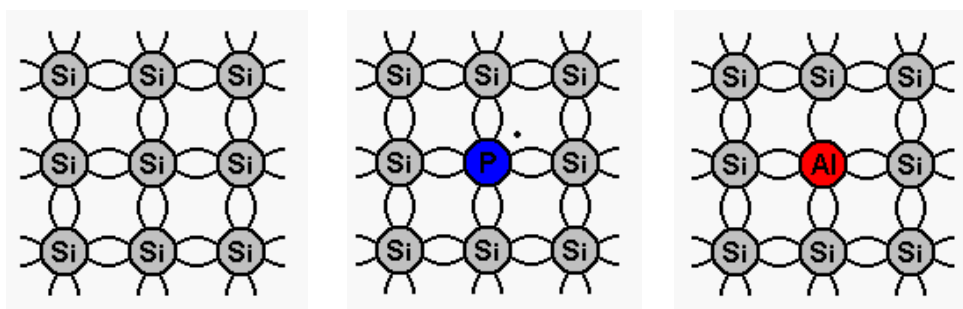
2010

Če želimo podrobneje razumeti princip delovanja aplikacij realiziranih z mikrostrukturami ter jih po možnosti tudi načrtovati, je koristno poznati tehnologijo izdelave tovrstnih struktur. Tehnologij je več in so zelo raznolike. Njihova uporaba je odvisna od želenega cilja. Pogosto je ta povezan s čim bolj natančno realizacijo kanalov mikronskih razsežnosti, kar narekuje uporabo bolj zahtevnih tehnologij, ki večinoma izhajajo iz polprevodniške tehnologije in jih običajno imenujemo MEMS tehnologije (ang. Micro-Electro-Mechanical Systems). Pogosto pred besedo MEMS dodamo še oznako Bio (BioMEMS), kar pomeni, da je uporaba namenjena v biotehnoloških (in medicinskih) aplikacijah. V določenih primerih zadostuje tudi uporaba bolj »preprostih« tehnologij, na primer s pomočjo laserskega izrezovanja ali pa tiskanja prevodnih (in neprevodnih) struktur z igličnimi tiskalniki, ki so v osnovi podobni igličnim tiskalnikom za vsakdanjo uporabo. Nadalje se uporabljajo tudi metode sitotiska ali brizganja plastike. Vse te metode imajo določene omejitve, večinoma pa je njihova prednost v cenenosti realizacije, saj omogočajo izdelavo cenenih struktur za množično in enkratno uporabo. Dobro je vedeti, da večino omenjenih tehnologij do določene mere uporabljajo tudi različne raziskovalne skupine in industrija v Sloveniji, kar omogoča načrtovanje eksperimentov s pomočjo mikrostruktur v domačem okolju.

Literatura MEMS tehnologije je zelo obširna, zato navajam le nekaj ključnih, bolj preglednih člankov iz tega zanimivega področja ([1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]). Poleg tega je na koncu poglavja zapisanih še nekaj spletnih virov ter knjižnih virov (večino katerih je mogoče pridobiti preko spletnih aplikacij).

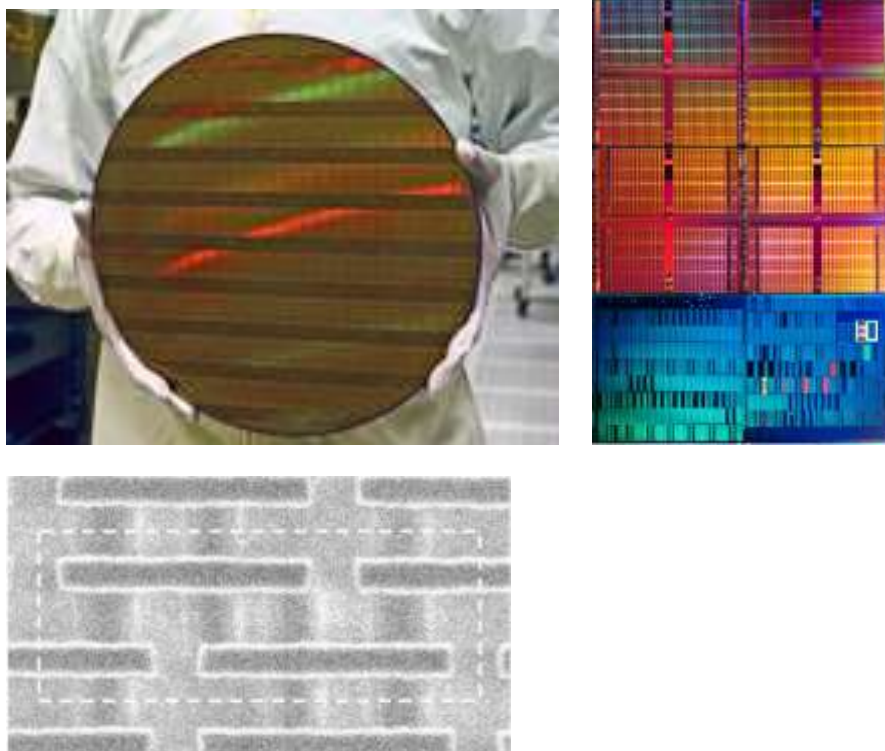
1. OSNOVNI MATERIALI MEMS TEHNOLOGIJE

Material, ki ga najpogosteje uporablja MEMS tehnologija je silicij. Silicijeve rezine (ang. wafer), običajno premera 4 in več palcev (1 palec (ang. inch) = 2,54 cm)), je mogoče dobiti v različnih debelinah (običajno nekaj sto mikronov), orientacijah kristala (npr. 100 ali 111) in različnih dopiranjih. Čisti silicij je praktično električno neprevoden, silicij z vgrajenimi primesmi pa je bolj ali manj prevoden odvisno od količine (koncentracije) vnesenih primesi.. Z dodanimi primesmi lahko povzročimo, da ima silicijeva rezina (ali le en del) v povprečju presežke šibko vezanih elektronov, kar dosežemo npr. z dodajanjem atomov fosforja (ker je fosfor petvalenten, silicij pa štirivalenten). Zaradi presežka šibko vezanih elektronov (ki imajo negativen naboj) jo imenujemo tipa N (negative). Z vnosom atomov bora ali aluminija (ki sta trivalentna) pa v stiku z atomi silicija ostanejo nezaključene vezi, kar se odraža kot pomanjkanje elektronov. Tak tip polprevodnikov imenujemo tipa P (positive).



Slika 1: Levo: kristal silicija brez primesi s kovalentnimi vezmi med atomi (Si je 4 valenčen). Sredina: kristal silicija z vnesenim atomom fosforja (P), ki je petvalenčen ima za posledico šibko vezane elektrone. Tako dopiran material ima presežke elektronov in ga imenujemo N-tipa. Desno: kristal silicija z vnesenim atomom aluminija (Al), ki je trivalenčen, ima za posledico nezaključene vezi z atomi silicija in »primankljuje« elektrone. Tako dopiran material imenujemo P-tipa.

Silicijeve rezine so torej lahko že v osnovi dopirane in s tem bolj ali manj prevodne, lahko pa se jih naknadno dopira s primesmi. Načini dopiranja so različni, običajno se jih realizira z nanašanjem dopirnega materiala na osnovno silicijevo rezino, ki se jo nato izpostavi zelo visoki temperaturi. Ob tem dopirni atomi difundirajo v notranjost silicija in s tem spremenijo prevodnost silicijevega kristala na mestu dopiranja. Selektivna mesta dopiranja se določi z maskirnimi plastmi iz silicijevega oksida (SiO_2) ali silicijevega nitrída (Si_3N_4). Na ta način (nekoliko poenostavljeno) se uporablja klasična polprevodniška tehnologija, s pomočjo katere je mogoče realizirati elemente polprevodniških vezij. Glede na izredno majhne dimenzije (mnogo manj kot mikron na en element) posameznega elementa, je mogoče doseči zelo veliko gostoto elementov na enem delu rezine, s čimer realiziramo t.i. polprevodniške čipe, kot so na primer mikroprocesorji.



Slika 2: Primer vrhunske polprevodniške tehnologije. Levo zgoraj: Intelova rezina premera 30 cm. Desno zgoraj: Intelova 45 nm tehnologija omogoča izdelavo milijardo osnovnih elementov (tranzistorjev) za realizacijo 153 Mb SRAM čipa. Levo spodaj: s črtkano črto je označenih šest tranzistorjev realiziranih s 45 nm tehnologijo*. Desno spodaj: Primer dokaj zahtevnega polprevodniškega elementa (n kanalni MOSFET), ki ima več različnih področij dopiranja in izolacijskih plasti.

VIR: [HTTP://WWW.INTEL.COM/PRESSROOM/ARCHIVE/RELEASES/2006/20060125COMP.HTM](http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2006/20060125COMP.HTM), DESNO SPODAJ BREWS 1990.

* 45 nm tehnologija po dogovorih polprevodniške industrije pomeni, da ta razdalja predstavlja polovico enega elementa (spominske celice). Več na strani http://en.wikipedia.org/wiki/45_nanometer.

DRUGI OSNOVNI MATERIALI

Vedno pogostejše se za realizacijo mikrostruktur uporabljajo tudi drugi materiali, na primer polimeri. Lastnosti polimerov so odvisne od tipa vezi med verigami iz katerih so sestavljeni. Termoplasti (kot na primer polymethyl methacrylate ali krajše PMMA) ali polikarbonati (PC)) imajo vezi, ki niso le šibko vezane, se pa jih da z lahkoto oslabiti s segrevanjem in ojačati z ohlajanjem. Poleg tega se topijo v organskih topilih. Tipično se jih razvršča glede na tranzicijsko temperaturo stekla (T_g) in temperaturo taljenja (T_m). Poleg tega je pomemben še koeficient temperaturne raztezka*. Uporaba polimerov je v porastu, tudi zaradi nižje cene. Cena PMMA-ja je na primer 10 do 100 krat manjša od cene stekla.

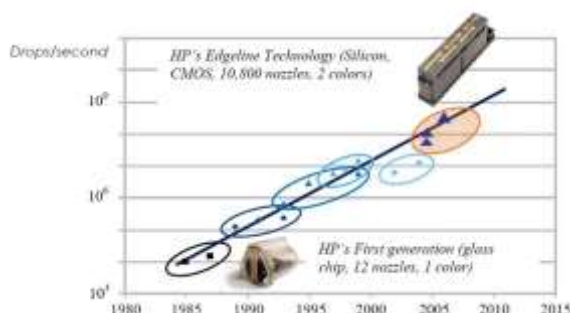
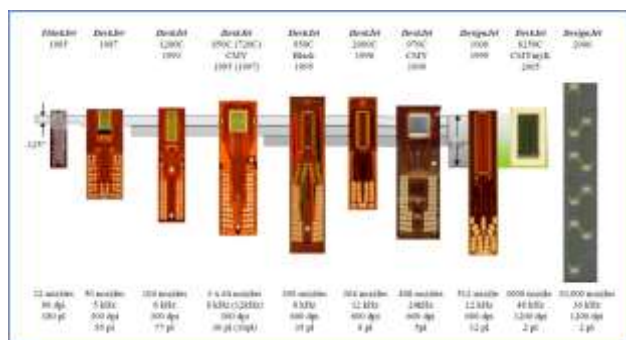
Name		T_g (°C)	T_m (°C)	Thermal expansion coefficient (ppm K ⁻¹)	Structure
COC TOPAS 5013	Cycloolefin copolymer	140	/	nd	Amorphous
PMMA	Polymethylmethacrylate	105	/	70–77	Amorphous
PC	Polycarbonate	150	/	66–70	Amorphous
PS	Polystyrene	100	/	30–210	Amorphous
POM	Polyoxymethylene	–15	160	80–120	Semi-crystalline
PFA	Perfluoralkoxy copolymer	nd	310	nd	Semi-crystalline
PVC	Polyvinylchloride	90	/	50–180	Amorphous
PP	Polypropylene	–20	170	100–180	Semi-crystalline
PET	Polyethylene terephthalate	80	265	20–80	Semi-crystalline
PEEK	Polyetheretherketone	150	340	50–110	Semi-crystalline
PA	Polyamide	50	260	80–95	Semi-crystalline
PVDF	Polyvinylidene fluoride	40	210	80–140	Semi-crystalline
PI	Polyimide	350	/	30–60	Amorphous
LCP Vectra A950	Liquid crystal polymer	/	280	0–30	Semi-crystalline
Crosslinked SU-8		200	/	50	Amorphous
Crosslinked PDMS Sylgard 184	Polydimethylsiloxane	–128	/	310	Amorphous
Borofloat glass		525	/	3.25	Amorphous
Silicon		/	1414	2.5	Crystalline

Tabela 1: Primer različnih osnovnih materialov, ki jih uporabljamo za realizacijo MEMS struktur. Pomembnejši parametri, ki določajo način uporabe in možnosti spajanja so stekla (T_g), temperatura taljenja (T_m) in koeficient temperaturnega raztezka.

* Podobno tehnologijo, kot za silicijeve substrate se lahko uporabi tudi za substrate iz stekla (npr. Pyrex 7740). Prednost Pyrex stekla je v tem, da ima v določenem temperaturnem razponu zelo podobno temperaturno karakteristiko kot silicij.

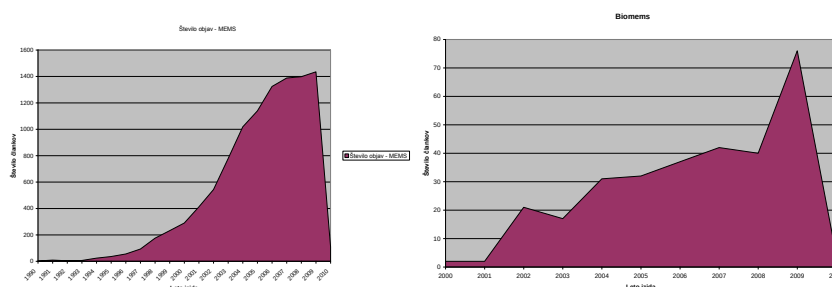
KRATKA ZGODOVINA MEMS-A

Polprevodniška tehnologija se razvija »že« od leta 1950. Znan je t.i. Moorov zakon^{*}, ki predvideva podvajanje gostote osnovnih elementov na silicijevi rezini na vsaki dve leti. Mikro-elektro-mehanska tehnologija se je pridružila klasični polprevodniški industriji leta 1980 na Univerzi Berkeley, kjer so prvi opisali možnost integracije MEMS elementov in elektronike na enem čipu[†] (ravno v primeru pospeškometra). Harrison et al. so leta 1990 uporabili postopek anizotropnega jedkanja silicija ter anodnega bondiranja za realizacijo prvega elektroforeznega lab-on-a-chip sistema[‡]. Leta 1990 je A Manz[§] razširil uporabo MEMS tehnologije na biomedicinsko področje, ki je od tedaj dalje v velikem vzponu. Več o zgodovini mikrofluidike v knjigi Comprehensive Microsystems (poglavje 2.13 Microfluidic Lab-on-a-chip).



SLIKA 3: PODOBEN TREND KOT PRI MOOROVEM ZAKONU SE DOGAJA TUDI PRI MEMS TEHNOLOGIJI. NA DESNI VIDIMO HPJEVE IZBOLJŠAVE INKJET TEHNOLOGIJE, Z ZAČETKI IZ LETA 1985 S THINKJET MODELOM, KI JE OMOGOČAL RESOLUCIJO 96 DPI (DOTS PER INCH) S KAPLJICAMI ČRNILA 180 PL. MODEL DESIGNJET IZ LETA 2006 OMOGOČA 1200 DPI IN KAPLJICE 2 PL. VIR: [HTTP://WWW.L-MICRONEWS.COM/INTERVIEWS/INK-JET-TECHNOLOGY-PAST-PRESENT-FUTURE,58.HTML](http://www.l-micronews.com/interviews/ink-jet-technology-past-present-future,58.html)

Da je področje MEMS in BioMEMS tehnologij relativno novo, priča tudi naraščanje števila publikacij, ki jih beleži ISI WOS in jih prikazuje spodnja slika za dve ključni besedi: MEMS in BioMEMS.



Slika 4: Število objav na leto s

ključno besedo MEMS in bioMEMS (ISI WOS, feb. 2010).

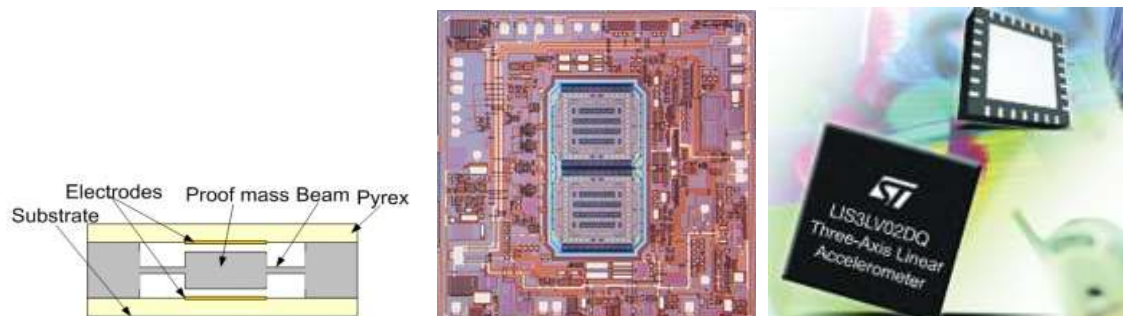
^{*} Za več glej npr. http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law.

[†] Chen PL, Muller RS and Andrews AP, 1984, Integrated silicon PI-FET accelerometer with proof mass, Sensors Actuators 5 119.

[‡] Harrison D J, Glavina P G and Manz A 1993 Towards miniaturized electrophoresis and chemical analysis systems on silicon: an alternative to chemical sensors Sensors Actuators B 10 107.

[§] Manz A, Graber N and Widmer HM, 1990, Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing, Sensors Actuators B 1 244.

2. OSNOVNI TEHNOLOŠKI POSTOPKI MEMS TEHNOLOGIJE



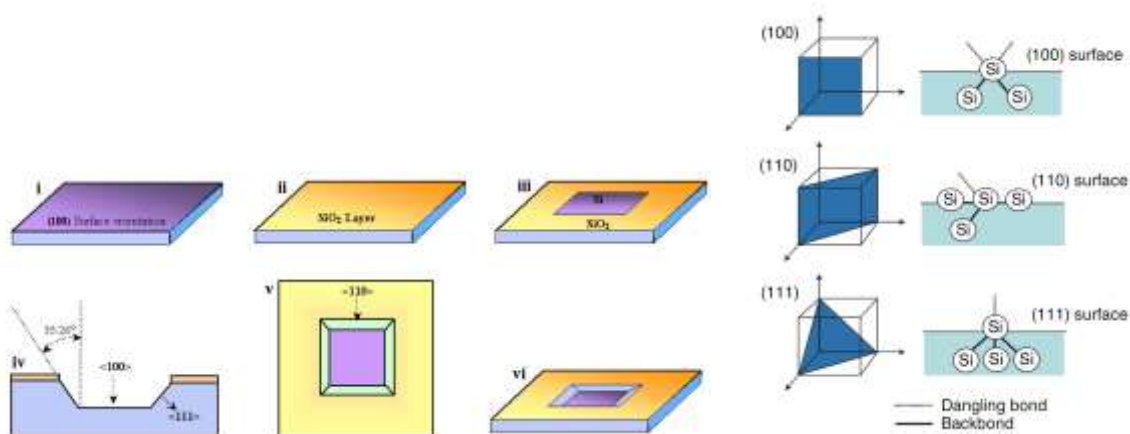
Slika 5: Levo: princip določanja pospeška iz spremembe kapacitivnosti ob premiku mase. Sredina: realiziran čip pospeškometra podjetja Analog Devices. Skupaj z MEMS pospeškometrom je realizirana tudi elektronika, ki zaznava pospeške in pripravi izhodni signal. Desno: Končen izgled čipa pospeškometra podjetja ST. Vir: <http://www.memsuniverse.com/>

2.1 JEDKANJE

Jedkanje silicija je en najpomembnejših korakov za realizacijo MEMS struktur. Z jedkanjem globinsko odstranimo (selektivno, glede na načrtano masko oz. maskirni material) določen del materiala in s tem ustvarimo različne tridimenzionalne strukture. V običajni MEMS tehnologiji je morda najbolj tipična izdelava miniaturnih pospeškometrov, ki na primer v avtomobilu omogočajo sprožitev zračne vreče ob trku (Slika 5Slika 1). MEMS pospeškometri delujejo na principu premične mase, ki se ob hitri spremembi položaja premakne drugače, kot drug del čipa, ki na primer ni pojedkan. Te spremembe je mogoče zaznati na različne načine, zelo pogosto iz spremembe kapacitivnosti. Z različnimi načini jedkanja je na različnih tipih silicijevih rezin mogoče doseči različne efekte. V osnovi lahko razlikujemo suho in mokro jedkanje.

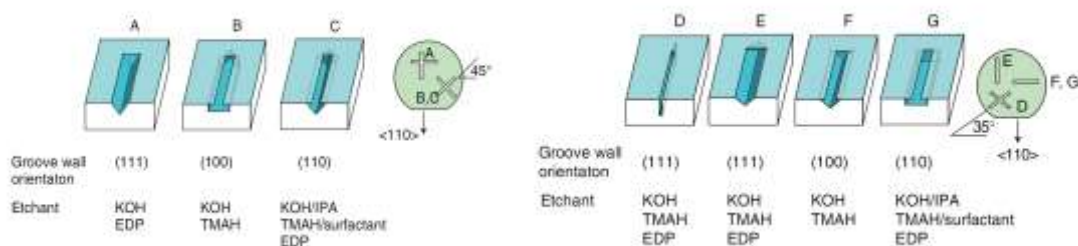
MOKRO JEDKANJE

Pri mokrem jedkanju običajno izpostavimo silicijevo rezino v kopel z jedkalom. Jedkanje je lahko izotropno ali anizotropno, odvisno od jedkala, ki ga uporabimo. Z mešanico HF-HNO₃ jedkamo izotropno, to pomeni, da se odstranjuje material enako hitro v vseh smereh, tako lateralno kot tudi globinsko. Z anizotropnim jedkalom, npr. z KOH (kalijev hidroksid) pa se jedka silicijev substrat z različno hitrostjo glede na orientacijo, torej odvisno od tega, katera kristalna ravnina je izpostavljena jedkanju (Slika 6).



Slika 6: Princip mokrega jedkanja. Levo: Postopek mokrega jedkanja v Si rezino. Najprej se na Si rezino (I) nanese plast SiO_2 (izolator), ki bo služila kot maskirna plast (II). S fotolitografskim postopkom se določi mesta, kjer bo plast SiO_2 odstranjena in izpostavljena jedkalu (III). S pomočjo jedkala KOH se skozi masko odjedka določen del Si materiala (IV-VI). Hitrost (anizotropnega mokrega) jedkanja je odvisna od izpostavljenosti kristalne ravnine jedkalu. Desno: Silicijeva rezina ima lahko različno orientacijo, odvisno od tega v kateri smeri glede na kristalno strukturo je »izrezana«. V ta namen se uporablja t.i. Millerjev indeks, ki razvršča orientacijo na (100), (110) in (111). Od tega je odvisna tudi hitrost jedkanja. Vir: <http://www.parallel-synthesis.com/SiliconMicrofabrication.htm> in Comprehensive Microsystems.

Z različnimi jedkali ter uporabo različnih kristalnih orientacij (smeri) substrata silicija je mogoče realizirati različne oblike mikrokanalov, kot prikazuje spodnja slika (Slika 7).

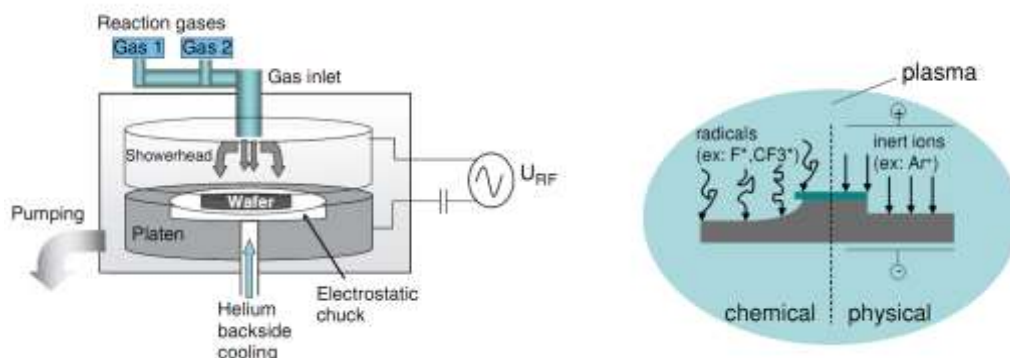


Slika 7: Z različnimi jedkali, maskami in orientacijami silicijevega substrata (končen nabor) je mogoče doseči različne efekte. Vir: Comprehensive Microsystems.

SUHO JEDKANJE

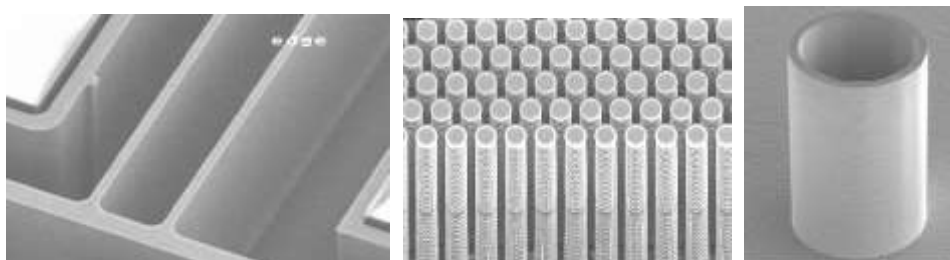
Za suho jedkanje potrebujemo običajno bolj zahtevno opremo. Pri suhem jedkanju izpostavimo silicijev substrat ioniziranim delcem (običajno plazmi iz reaktivnih plinov kot fluoroogljik, kisik ipd), ki so izpostavljeni močnemu električnemu polju. To pospešuje ione in »bombardira« material ter odnaša izpostavljen material. V primeru, ko je material izpostavljen električnemu polju je suho jedkanje anizotropno, torej omogoča jedkanje le v eni (direktni) smeri. V kolikor pa je material izpostavljen le ionizirani plazmi brez dodatnega električnega polja, pa je jedkanje izotropno. Slika 8 desno prikazuje razliko med izotropnim in anizotropnim suhim jedkanjem, kjer vidimo, da pride v primeru izotropnega jedkanja do odnašanja materiala tudi v prečni smeri torej tudi pod zaščitno masko. Bistvena razlika med

suhim in mokrim jedkanjem je ta, da je pri suhem jedkanju le to neodvisno od orientacije Si kristala, medtem ko je pri mokrem jedkanju od le to od orientacije kristala odvisno.



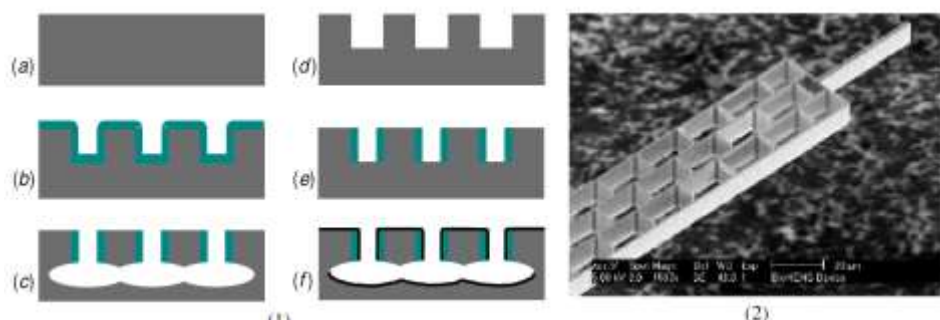
Slika 8: Princip suhega jedkanja z reaktivnim jedkanjem (RIE –reactive ion etching). Levo: Iz reaktorja se izčrpa zrak (ustvariti vakuum) ter dovede pline, ki se jih izpostavi izmeničnemu električnemu polju radijskih frekvenc. V polju pride do ionizacije plinov (plazme), ioni pa so reagirajo z atomi substrata, v katerega naletavajo in odnašajo material. Desno: V kolikor je med substratom in okolico priključena električna napetost, je jedkanje anizotropno, če pa dodatnega vira, ki bi usmerjal nalet ionov na substrat ni, je jedkanje izotropno. Vir: Comprehensive Microsystems.

Možne končne realizacije struktur s pomočjo RIE kaže spodnja slika (Slika 9).



Slika 9: Primeri anizotropnega jedkanja (DRIE). Od leve proti desni: mikroaktuator (širina 3,5 μm , globina 100 μm), Si stolpci (za aplikacije kjer je potrebna velika površina, npr. superkondenzatorji), mikrocevka (npr. za vnos zdravil), Vir: <http://www.advancedmicrosensors.com/capabilities-etch.html>

Možno je tudi kombinirati suho in mokro jedkanje, kot na primer v procesu SCREAM (single crystal reactive ion etching and metallization), ki so jo prvi predstavili na univerzi Cornell leta 1993.



Slika 10: SCREAM tehnologija omogoča kombinirano suho in mokro jedkanje, s čemer je mogoče realizirati strukture, ki so »obešene« in imajo kontakt z glavnim substratom le na določenih mestih. *

Primernost različnih tehnologij jedkanja glede na material prikazuje spodnja tabla

Method	Material		
	Silicon (+/-)	Glass (+)	Plastic (+)
Wet chemical etching	+	+	NA
Radiation-induced etching		+	+
Deep reactive ion etching (DRIE)	+	+	-
Laser cutting	+	+	+
Powder blast	+/-	+/-	NA
Injection molding	NA	NA	+
Hot embossing	NA	NA	+
NA	not applicable		
+	suited for CE chips		
-	not suited for CE chips		
+/-	limited applicability for CE chips		

Tabela 2: Tabela primernosti različnih tehnologij jedkanja glede na izbran material. Vir: G. A. Urban: BioMEMS, Springer, 2006.

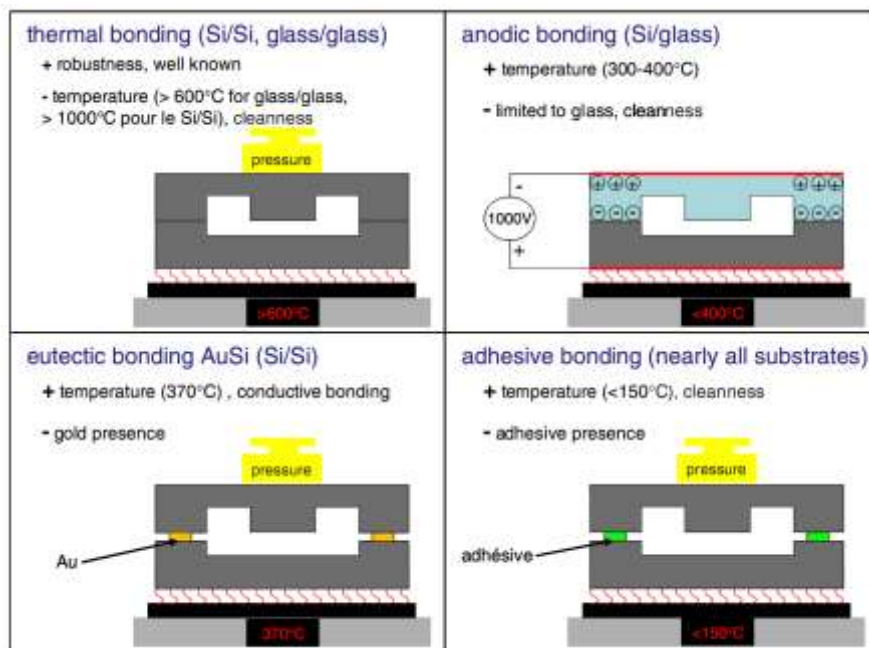
2.2 SPAJANJE - BONDIRANJE

Običajno so MEMS mikrostrukture izdelane iz dveh ali več delov, ki jih je potrebno v končni fazi sestaviti skupaj – združiti. Temu procesu rečemo tudi končno sestavljanje - asembliranje (ang. assembling). Pogost način sestavljanja zgornje in spodnje strani imenujemo spajanje materialov (ang. bonding, poslovenjeno bondiranje). Obstaja več različnih načinov spajanja, ki je lahko samo mehansko ali pa hermetično. V kolikor ne spajamo med seboj enakih materialov predstavljajo največjo nevarnost oziroma težave različne temperaturne karakteristike materialov, predvsem koeficient temperaturnega raztezka. Če imata materiala različne koeficiente temperaturnega raztezka pride ob spajanju do velikih mehanskih napetosti in kot posledica do neuspešnega spajanja. Temu se lahko izognimo z adhezivnim bondiranjem (lepljenjem), ki pa doda dodaten material med zgornjo in spodnjo stranjo, kar lahko povzroča neželene efekte.

Anodno bondiranje imenujemo tudi elektrostatično, saj temelji na priključitvi visoke napetosti med dva substrata, ki tvori med njima visoko električno polje in posledično tvorjenje kovalentnih vezi med materialoma. Običajno se hkrati ob priključeni napetosti (velikosti 500 do 1500 V) za lažje spajanje material predhodno segreje, kar poveča mobilnost ionov in izboljša proces spajanja. Dodatno se ga lahko izboljša še z fizično obtežitvijo.

Pri eutektičnem bondiranju vnesemo med materialoma, ki jih združujemo, dodaten material (tipično tanko plast zlata), ki se pri določeni temperaturi stopi in tvori vezi z osnovnim materialom. Na primer zlato in silicij se eutektično združita pri temperaturi 365 °C.

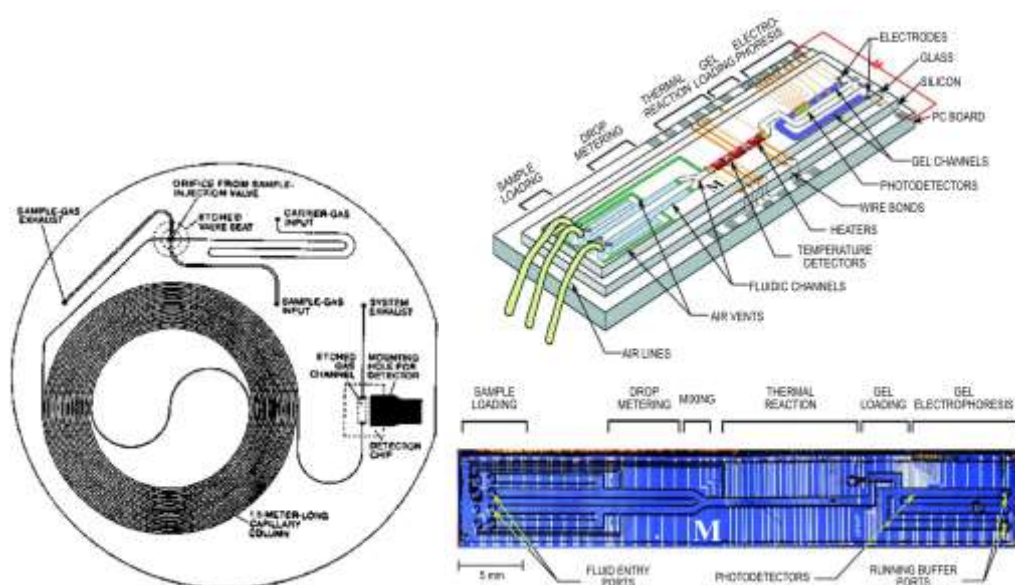
* Zhang Z L and MacDonald N C, 1992, A RIE process for submicron, silicon electromechanical structures , J. Micromech. Microeng. 2 31.



Slika 11: Različni tipi bondiranja: levo zgoraj termično, desno zgoraj anodno, levo spodaj eutektično, desno spodaj adhezivno bondiranje.

3. MIKROFLUIDNE STRUKTURE

Ena najpogostejših uporab MEMS tehnologije je za izdelavo mikro kanalov v različne materiale. Ena prvih realizacij je izvedba miniaturiziranega plinskega kromatografa na Univerzi Stanford leta 1970, kjer so izdelali 1,5 m dolg mikrokanal, mikroventil ter detektor na silicijevi 4 palični rezini^{*}. Dandanašnje naprave integrirajo na enem mestu več različnih elementov, ki opravljajo zelo različne dejavnosti. Na primer, za analizo DNA na enem mestu je potrebno imeti integrirane elemente kot npr. mikrofluidne kanale, mikrogrelce, temperaturne senzorje, fluorescenčne detektorje itd. Naprava na sliki (Slika 12, desno) omogoča mešanje DNA molekul v vodni raztopini, ojačanje in razgradnjo DNA na diskretne dele, ki jih nato zaznava s pomočjo kapilarne elektroforeze[†]. Detekcijo omogočajo vgrajeni senzorji (fotodiode).



Slika 12: Levo: Prva mikrofluidna naprava: plinski kromatograf. * Desno: Napredna nano-literska naprava za DNA analizo z več moduli integriranimi v enem čipu. †

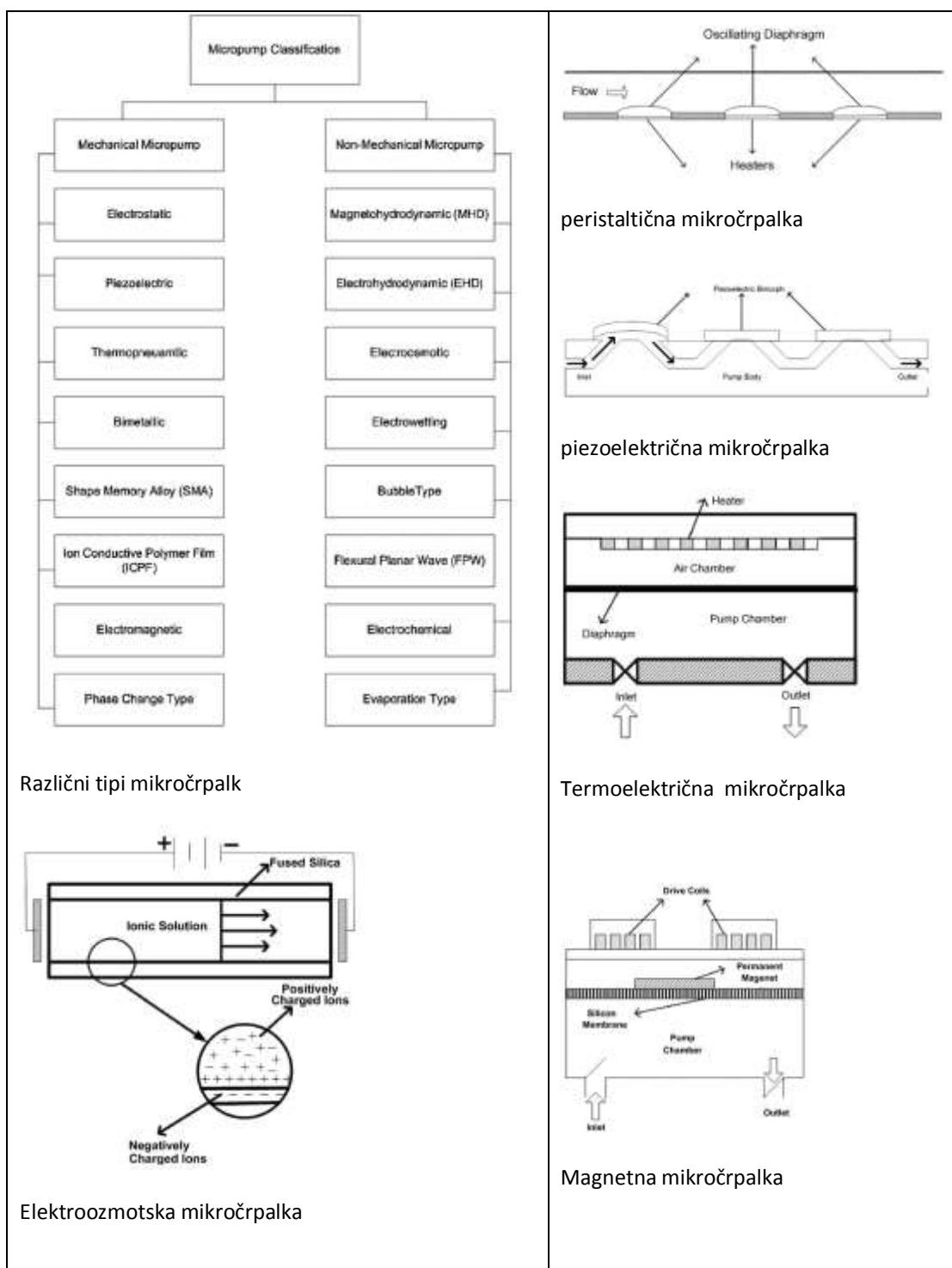
MIKROČRPALKE

En od pomembnejših elementov mikrofluidnih sistemov so mikročrpalke (ang. micropumps). Te skrbijo za kontroliran pretok tekočin v mikrokanalih. V grobem jih lahko ločimo na mehanske in nemehanske. Mehanske so take, ki vsebujejo mehanske premične dele kot npr. opno (ang. diaphragm), ventile ipd. Nemehanske pa so take, ki pretvorijo neko nemehansko energijo v mehansko. Vključujejo na primer magnetohidrodinamski princip (MHD), elektrohidrodinamski princip (EHD), elektroosmotski princip, elektroovlaževanje (ang. electrowetting) in podobno. Kot vidimo je na razpolago mnogo različnih

* Terry S C, Hermann J H and Angel J B, 1979, A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer, IEEE Trans. Electron Devices 26 1980.

[†] M.A. Burns, B.N. Johnson, S.N. Brahmasandra, K. Handique, J.R. Webster, M. Krishnan, T.S. Sammarco, P. Man, D. Jones, D. Heldsinger, C.H. Mastrangelo, D.T. Burke, Integrated nanoliter DNA analysis device, *Science* 282 (5388) (1998 October 16) 484–487.

tehnologij. Izbira je odvisna od aplikacije, ki diktirajo zahtevan tlak in pretok ter tudi od vrste medija. Pogosto je pomembna tudi potreba po biokompatibilnosti, saj so določene mikrofluidne naprave vgrajene v žive organizme. MEMS tehnologija iz silicija je bila že uspešno preizkušena v biomedicinskem področju na primer za implantabilni sistemi za vnos drog (zdravil). Vedno bolj pa je tudi pogosta uporaba polimerov, na primer polimetilmetakrilata (PMMA - polymethylmethacrylate), polidimetilsiloksan (PDMS – polydimethylsiloxane), foto rezist SU-8, ki so vsi biokompatibilni in imajo poleg tega tudi druge primerne lastnosti.

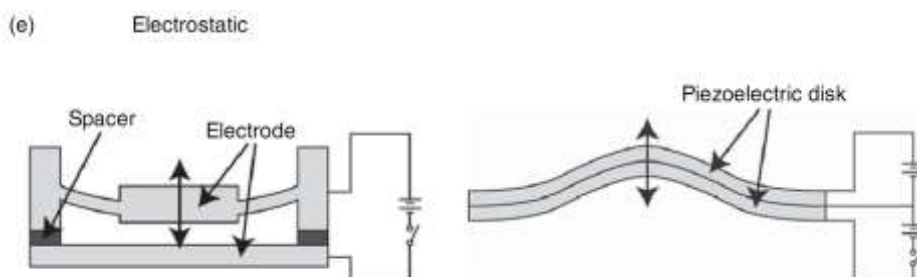


Slika 13: Prikaz razdelitve različnih principov (tipov) mikročrpalk.[8]

ELEKTROSTATIČNI IN PIEZOELEKTRIČNI PRINCIP MIKROČRPALKE

V osnovi gre za izkoriščanje sile med dvema nasprotno naelektrenima telesoma, kar dosežemo s priključitvijo (običajno visoke napetosti) med dvema prevodnima telesoma, kot prikazuje Slika 14. Podobne elektrostatičnim so piezoelektrične mikročrpalke, kjer se uporabi za transversalen premik membrane piezoelektrični efekt, ki ga posedujejo določeni materiali (PZT). Pritisk med naelektrenima

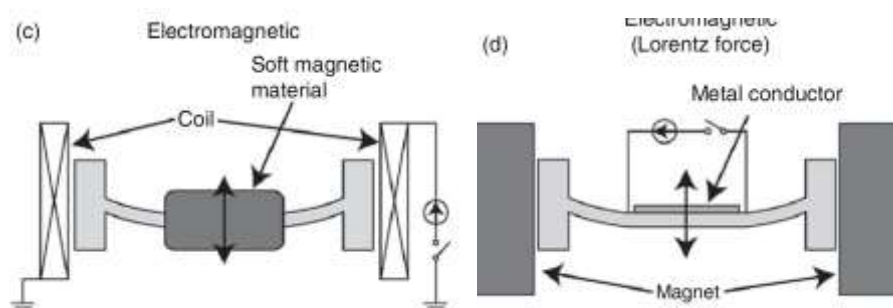
ravnima ploščama je določen kot $p = F / A = (Q / A)E = \sigma E = \sigma \frac{\sigma}{2\epsilon}$.



Slika 14: Levo: Princip elektrostatične mikročrpalke temelji na sili med nasprotno naelektrenima elektrodama. Desno: princip delovanja piezoelektrične črpalke. Vir: Comprehensive microsystems.

ELEKTROMAGNETNI PRINCIPI

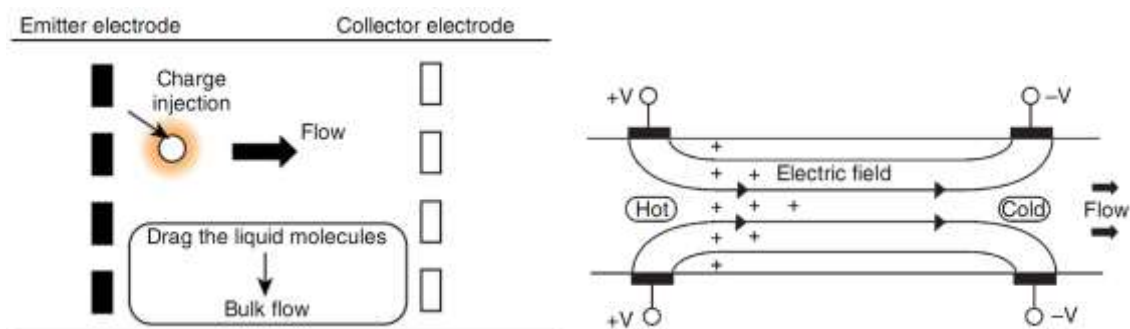
temelji na izkoriščanju magnetne sile. To lahko ustvarimo tako, da je na premičnem delu trajni magnet, ki ga krmilimo s strani postavljenimi elektromagneti. Tako deluje sila med dvema magnetoma, trajnega in elektromagnetnega. Drug način pa je, da je na premičnem delu prevodna struktura skozi katero pošljemo električni tok. V skladu z enačbo $\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$ (ki sicer v poenostavljeni obliki velja za ravne vodnike) deluje sila na prevodnik s tokom (na premikajoče naboje), ki omogoča premike in s tem črpanje.



Slika 15: Dva principa elektromagnetne črpalke. Na levi je premični del iz mehkomagnetnega materiala, na katerega deluje magnetna sila, ki jo vzpostavimo z zunanjima elektromagnetoma. Na desni je premični del iz prevodnika, v katerem je električni tok. Nanj deluje magnetna sila, ki jo vzpostavita zunanja trajna magnetna. Vir: Comprehensive Microsystems.

ELEKTROHIDRODINAMSKI PRINCIP (EHD)

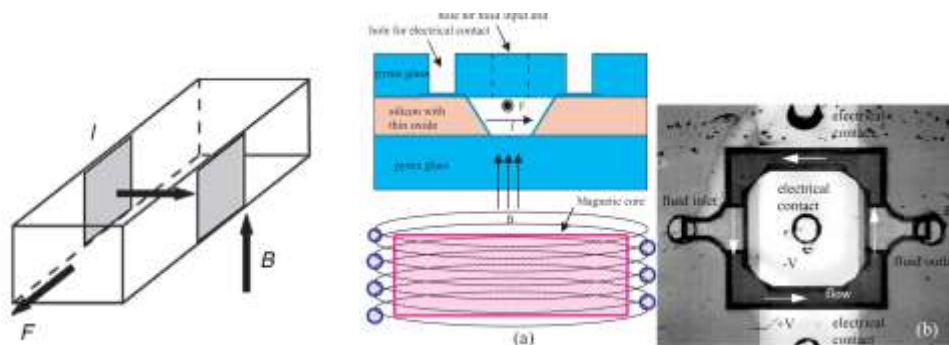
EHD je primer nemehanske črpalke, saj nima premičnih delov. Temelji na električni sili na naelektrene delce. Z električnim poljem ustvarimo ione, na katere hkrati deluje električno polje in jih usmeri v smeri polja. Hkrati s premikanjem ionov se v enako smer premika tudi okoliška tekočina.



Slika 16: Princip delovanja elektrohidrodinamske črpalke. Vir: Comprehensive Microsystems.

MAGNETOHIDRODINAMSKI PRINCIP (MHD)

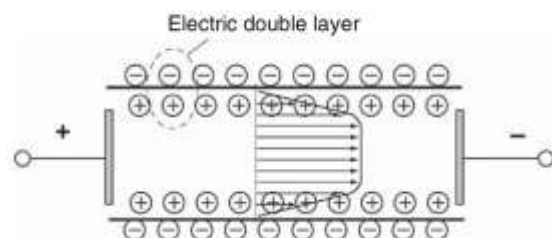
Temelji na sili na gibajoče naboje v magnetnem polju. V teoriji elektromagnetike tej sili pogosto rečemo Lorentzova sila in je usmerjena pravokotno na smer gibanja naboja in smer gostote magnetnega polja: $\vec{F} = Q\vec{v} \times \vec{B}$. Konceptualno to prikazuje spodnja slika. Med dvema elektrodama vzpostavimo električni tok (gibanje nabojev), prečno nanj pa magnetno polje.



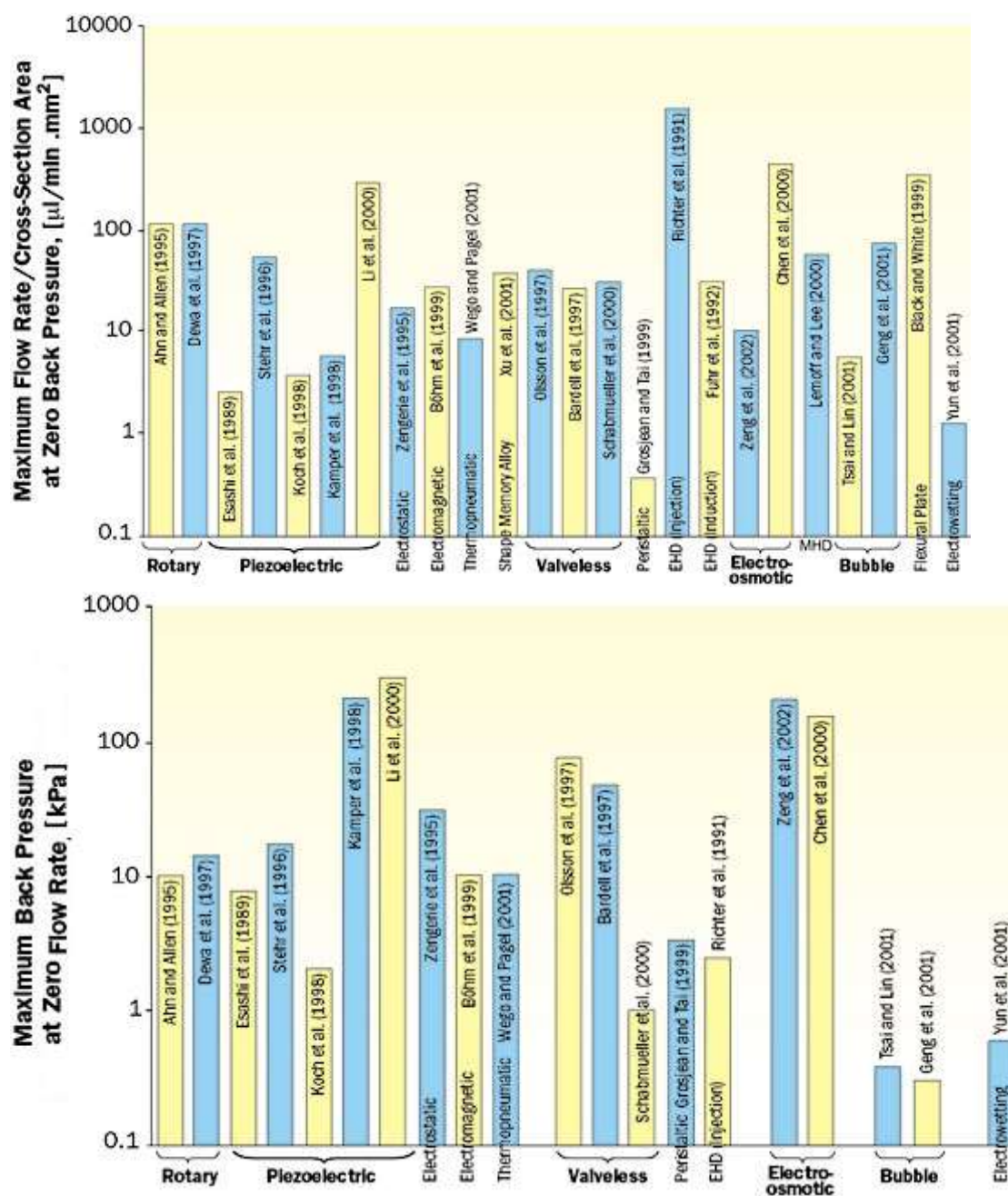
Slika 17: Levo: magnetnohidrodinamski princip. Desno: realizacije MHD mikročrpalke

ELEKTROOZMOTSKI PRINCIP

temelji na uporabi enosmernega vira ter dvojne plasti, ki povzroči kopičenje naboja na stenah mikročrpalke. Ob priključitvi napetosti med koncema črpalke deluje električna sila na naboje na dvojni plasti, ki se začnejo premikati v smeri električnega polja. Zaradi viskoznosti se poleg nabojev na dvojni plasti gibljejo tudi naboji v notranjosti oziroma kar celotna tekočina. Več v [8].



Pri delovanju mikropump je pomembnih kar nekaj parametrov, kot na primer hitrost pretoka na enoto površine, največji povratni pritisk, napetost, moč, frekvenca, itd. Uspešnost določenih omenjenih metod glede na doseganje maksimalne hitrosti pretoka in povratnega pritiska kažeta grafa na spodnji sliki.



Slika 18: Levo: maksimalne hitrosti pretoka na presek za različne principe delovanja mikročrpalk pri ničelnem povratnem pritisku. Desno: Maksimalni povratni pritisk pri ničelnem pretoku. *

* Singhal, V., Garimella, S.V., and Raman, A., 2004, "Microscale pumping technologies for microchannel cooling systems," Applied Mechanics Reviews, Vol. 57, pp. 191-221.

4. NIZKOCENOVNA MEMS TEHNOLOGIJA

Klasična MEMS tehnologija, ki temelji na obdelavi silicijevega substrata s polprevodniško tehnologijo z dodanimi MEMS postopki je draga. Potrebuje uporabo čistih prostorov, večjih električnih in plinskih postrojenj, itd. Ocenjuje se, da je cena proizvodnih naprav za polprevodniško MEMS tehnologijo okoli milijon dolarjev, za vzpostavitev celotnega podjetja pa kar milijardo dolarjev. Lahko pa seveda mnogo več, odvisno od uporabljene tehnologije. Zato se v določenih primerih, ko je mogoče doseči enake ali ustrezne rezultate tudi z enostavnejšimi in običajno cenejšimi postopki uporabi le-te.

Načinov pocenitve stroškov izdelave mikrostruktur je več. En od načinov je zamenjava relativno dragih silicijevih rezin s cenejšimi iz stekla, plastike ali keramike. Večinoma je pocenitev možna, če so dimenzije osnovnih struktur večje od 10 μm . V nasprotnem primeru je običajno klasična polprevodniška MEMS tehnologija še vedno najprimernejša. Nadalje je mogoče doseči pocenitve z uporabo nizkocenovnih postopkov izdelave mask, drugačnimi načini fotolitografije, tehnikami hitrega načrtovanja in tehnikami nizkocenovne množične produkcije (vliivanje, tiskanje).

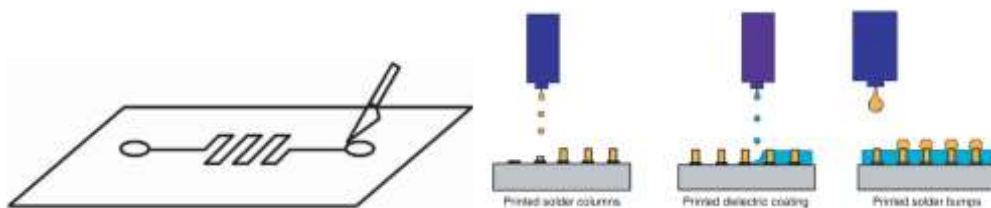
NIZKOCENOVNE PRIPRAVA MASK (FOTOLITOGRAFIJA)

Klasična maska iz kroma lahko stane okoli tisoče dolarjev na masko. Za izdelavo kromove maske se uporablja posebne naprave imenovane pattern generator (generator vzorcev), ki imajo na kovinski osnovi nanosen fotorezist, ki ga osvetljujemo z UV svetlobo. Ker se z napravo osvetljujejo zelo majhni delčki površine zaporedoma, lahko proces izdelave ene maske traja več ur ali celo dni. Ker običajno potrebujemo več mask in moramo v fazi načrtovanja večkrat spremeniti oz. popraviti načrt za maske, je lahko visoka cena izdelave mask ključni zaviralni faktor za hitrejši razmah novih aplikacij. Izdelavo mask lahko nadomestijo cenejše tehnike kot na primer lasersko tiskanje maske ali tisk maske z igličnim tiskalnikom. Laserski tiskalniki imajo resolucije od 600 pa tja do 20000 dpi (dots per inch – pik na palec), s čemer je mogoče doseči resolucije do 2 μm in realizirati širine linij do 10 μm . Namesto posebnih programov za načrtovanje mask lahko v primeru uporabe laserskega tiskanja uporabimo klasične programe za risanje kot so AutoCad ali CorelDraw. Tako izdelane načrte mask lahko damo tiskati tudi podjetjem, ki imajo opremo za grafični tisk.

DRUGAČNI NAČINI FOTOLITOGRAFIJE

Z določenimi postopki se lahko v celoti izognemo maskam, UV osvetlitvam, optičnim poravnalnim sistemom (ang. optical aligners) in dragim kemikalijam. To lahko dosežemo npr. s tehnikami kot so xurografija, sitotisk (ang. screen printing) ali laserskim rezanjem. Xurografija temelji na uporabi ploterja, ki namesto brizgalne igle uporablja rezilo (Slika 19). Z rezilom je mogoče realizirati izreze dimenzij do 5 μm .

Slika 19 prikazuje način uporabe igličnega tiskanja z različnimi premeri šob in različnimi materiali, kar omogoča hitro realizacijo mikrofluidnih naprav.



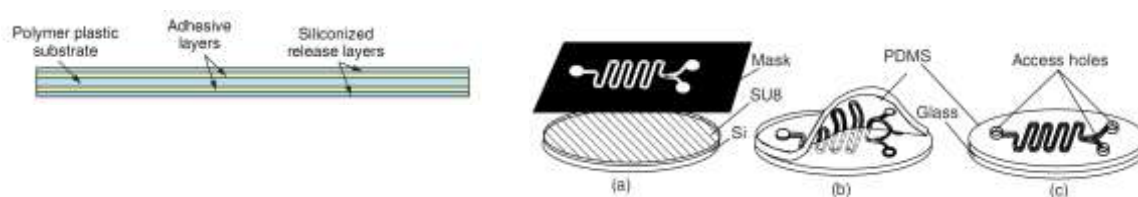
SLIKA 19: NIZKOCENOVNA TEHNIKA IZREZOVANJA (XUROGRAFIJA) IN TEHNIKA TISKANJA.

TEHNIKE HITREGA NAČRTOVANJA IN IZDELAVE PROTOTIPOV (ANG. RAPID PROTOTYPING TECHNIQUES)

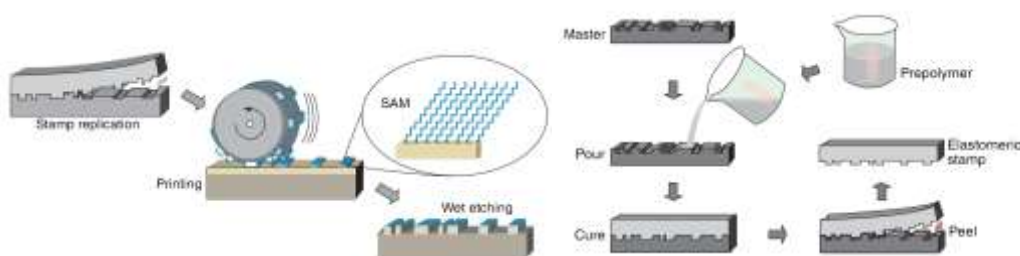
Polprevodniška tehnologija je optimirana za množično proizvodnjo. Ko je enkrat način izdelave vzpostavljen, se kromove maske lahko uporabijo mnogokrat in s tem doseže cenenost proizvodnje. Če pa nam zadostuje manjša količina izdelanih struktur, se lahko nizkocenovne prototipe realizira s postopki laminacije, igličnega tiskanja, xurografije, laserskega rezanja, mehke litografije ali sitotiska.

Laminacija je tehnika, ki uporablja tanke plasti polimerov, SU-8 filma, PDMS in drugih materialov. Komercialno je mogoče nabaviti plasti različnih materialov in različnih debelin, ki so med seboj zlepljeni. Najpogosteje se za realizacijo mikrostruktur iz laminiranih materialov uporabi lasersko izrezovanje s CO₂ laserjem. Tipična proizvodna resolucija laserskega izrezovanja je okoli 100 µm.

Z mehko litografijo lahko izdelamo osnovno masko - npr. s fotorezistom SU-8 (Slika 20a desno). Nato se vlije tekoči polimer (npr. PDMS) v masko (b) in počaka nekaj minut, da se uleži. S postavitvijo v pečico in kondicioniranjem na temperaturi med 60 in 80 °C za nekaj ur se struktura strdi. Nato se PDMS odstrani z maske in postavi na nosilec npr. iz stekla in dokonča mikrofluidno napravo (c).



Slika 20: Tehnike nizkocenovne množične produkcije. Levo: laminiran osnovni material, desno: postopek mehke litografije.



Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti. prikazuje še tehnike hitre in množične izdelave s postopki mikrokontaktnega printanja (ang. micro contact printing - µCP) ali vlivanja (ang. stamping).

LITERATURA

Članki:

- [1] P. Abgrall and a. Gué, "Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem—a review," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, 2007, pp. R15-R49.
- [2] R. Bashir, "BioMEMS: state-of-the-art in detection, opportunities and prospects.," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 56, 2004, pp. 1565-86.
- [3] R. Bogue, "MEMS sensors: past, present and future," *Sensor Review*, vol. 27, 2007, pp. 7-13.
- [4] A.P. Lee, J. Collins, and A.V. Lemoff, "A Multi-Functional Micro Total Analysis System (," *Transport*.
- [5] M.E. Lidstrom and D.R. Meldrum, "Mary E. Lidstrom and Deirdre R. Meldrum," *Group*, vol. 1, 2003, pp. 158-164.
- [6] S.P. Mohanty, "Biosensors : A Survey Report," *Source*, 2001.
- [7] V. Mukundan and B.L. Pruitt, "MEMS Electrostatic Actuation in Conducting Biological Media," vol. 18, 2009, pp. 405-413.
- [8] A. Nisar, N. Afzulpurkar, B. Mahaisavariya, and A. Tuantranont, "MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 130, 2008, pp. 917-942.
- [9] A. Subramanian, B. Vikramaditya, L. Dong, D. Bell, and B.J. Nelson, "Micro and Nanorobotic Assembly Using Dielectrophoresis," *interactions*.
- [10] S.H. Yeo and H.Y. Zhang, "Techniques in Sonophoresis Biomedical Devices and Their Applications," *Aerospace Engineering*, 1970, pp. 1-56.
- [11] B. Ziaie, "Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 56, 2004, pp. 145-172.

Knjige:

Comprehensive Microsystems, eds. **Yogesh Gianchandani, Osamu Tabata, and Hans Zappe, Elsevier, 2008.**

<http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780444521903>

BioMEMS and Biomedical Nanotechnology IV, Eds: Ferrari, Mauro Bashir, Rashid; Wereley, Steven T., 2007, XXII, 410 p. DOI: 10.1007/b136241

Web:

<http://www.memsuniverse.com/>

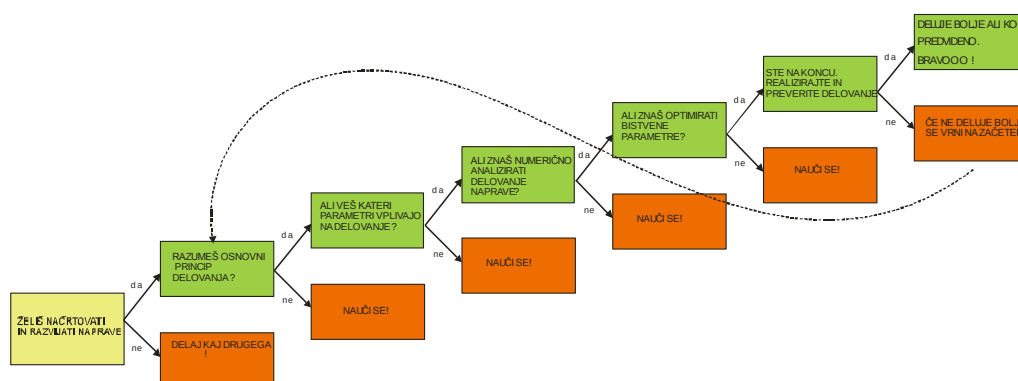
3 DEL

PRIMERI MIKROSTRUKTUR ZA DETEKCIJO IN MANIPULACIJO Z ELEKTRIČNIM IN MAGNETNIM POLJEM

UVOD

Mikroelektronska tehnologija omogoča poleg izdelave elektronskih čipov tudi izdelavo mikro-elektro-mehanskih sistemov (MEMS). V predmetu se bomo seznanili z osnovnimi koncepti mikrotehnoloških postopkov in mikroobdelave, ki poleg standardnih postopkov difuzije, implantacije, oksidacije ter metalizacije uporablja še postopke jedkanja in nanašanja dodatnih plasti. Rezultat so MEMS strukture, ki zajemajo integracijo mehanskih elementov, senzorjev, aktuatorjev in elektronike na enem samem elementu (običajno iz silicija). Eno najbolj propulzivnih področij uporabe teh struktur je področje biotehnologije in biomedicine, saj MEMS strukture omogočajo manipulacijo in detekcijo mikronskih in submikronskih delcev. Prednosti teh struktur ni le v izredno majhnem vzorcu, ki ga obdelujemo, pač pa pogosto tudi v večji hitrosti obdelave, večji natančnosti in cenenosti postopkov. Seznanili se bomo s fizikalnimi procesi, ki jih je potrebno upoštevati oziroma, jih lahko koristno uporabimo pri analizi delovanja MEMS struktur ali pa pri načrtovanju novih struktur. Podrobneje bomo obravnavali nekaj tipičnih aplikacij, ki omogočajo manipulacijo delcev z elektromagnetnim poljem in detekcijo delcev z impedančne metodo, amperometrično metodo ali optičnim zaznavanjem.

V nadaljevanju je prikazanih nekaj tipičnih aplikacij MEMS tehnologije. Kako uspešno bomo uporabili te tehnologije je odvisno od nas samih. Morda nas zanima le njihovo delovanje, sicer pa bomo kupili napravo, ki je izdelana z MEMS tehnologijo in jo uporabljamo pri svojih raziskavah. V tem primeru bomo želeli vedeti, kaj so prednosti te tehnologije, pa tudi njene omejitve. Če bomo bolj ambiciozni bomo morda želeli uporabiti to tehnologijo bolj kreativno. Lahko naročimo ali nabavimo neke osnovne strukture in poskušamo zgraditi lastne eksperimente. V tem primeru bomo morali tudi nekoliko bolj podrobno poznati fizikalne pojave, ki vplivajo na delovanje naprave/strukture. V še bolj ambiciozni obliki bomo želeli sami načrtovati tako eksperimente kot tudi dizajnirati strukture in jih morda s pomočjo ustrezne tehnologije celo želeli realizirati. V tem primeru moramo poleg zamišljenega eksperimenta poznati tudi tehnologijo izdelave MEMS struktur, njihovo kompleksnost, načine načrtovanja, ... Slednji način je gotovo najbolj zahteven, lahko pa je tudi najbolj kreativen in v končni fazi tudi nagrajujoč. Postopek spoznavanja kompleksnosti načrtovanja in delovanja MEMS struktur oziroma postopek razvoja novih naprav temelječih na MEMS tehnologiji prikazuje Slika 1.



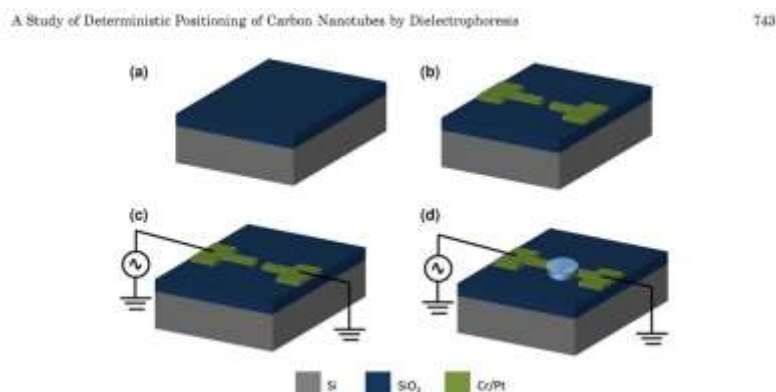
SLIKA 1: POSTOPEK PRIDOBIVANJA ZNANJ POTREBEN PRI NAČRTOVANJU IN RAZVOJU NOVIH NAPRAV. LAHKO SE ZADOVOLJIMO Z OSNOVNIH RAZUMEVANJEM DELOVANJA ALI PA ŽELIMO NAČRTOVATI NAPRAVE Z MEMS TEHNOLOGIJO.

KAZALO:

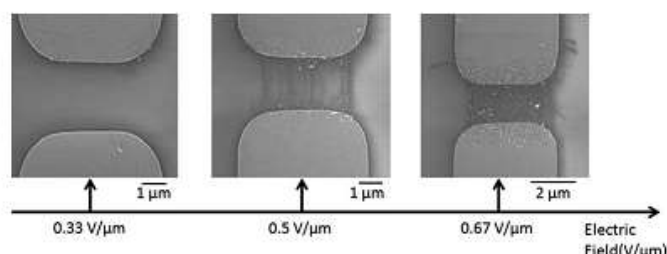
1. POZICIONIRANJE NANOSTRUKTUR S POMOČJO DIELEKTROFOREZE	63
1. DEFORMACIJE NANOCEVK V ELEKTRIČNEM POLJU.....	64
2. MIKROELEKTROMAGNETNO TIPALO Z MEMS TEHNOLOGIJO.....	66
3. MAGNETNO AKTUIRAN MIKROPREKLOPNIK ZA SORTIRNE APLIKACIJE	69
4. CITOMETRIJA NA MIKROČIPU	70
5. MANIPULACIJA IN UJETJE SUBMIKRONSKIH DELCEV (GREEN, 1997).....	71
6. PATCH CLAMP TEHNIKA Z UPORABO MIKROFLUIDIKE	73
7. HIDRODINAMSKO UJETJE CELIC.....	74
UPORABLJENE KRATICE	76

1. POZICIONIRANJE NANOSTRUKTUR S POMOČJO DIELEKTROFOREZE

En večjih problemov raziskave nanostruktur je njihova karakterizacija. Predivideva se, da imajo ogljikove nanocевke (CNT – carbon nano tubes) odlične električne in mehanske lastnosti^{*}. Problem karakterizacije (predvsem električne) je mogoče rešiti z vpetjem nanocevk med dve elektrodi, oddaljeni za majhno razdaljo. Elektrode je mogoče izdelati s klasično mikroelektronsko tehnologijo. Na sliki je shematski prikaz izdelave in merjenja električnih lastnosti CNT, ki jih med elektrodi spravimo s pomočjo dielektroforeze[†]. Da so se CNT nabrali med elektrode, so priključili izmenični vir napetosti frekvence 5 MHz. Slika 2 kaže uspešnost dielektroforeze odvisna od priključene napetosti oz. od električnega polja, ki ga le ta ustvari med elektrodama.



Slika 2: Proces izdelave elektrodnih struktur ter priključitev vira napetosti za doseg dielektroforeznega učinka. Na silicijev substrat (siv) izoliran s plastjo silicijevega dioksida (modra) je nanešena plast prevodnika (Cr/Pt) in zjedkana tako, da ostaneta dve ločeni elektrodi. Med elektrodi je priključena izmenična napetost nakar je med elektrodi nanešene 20 μL raztopine z nanocevkami. Po 120 s je izklopljen vir in določen del nanocevk se je postavil tako, da povezujejo oba dela elektrod. Vir[[†]].



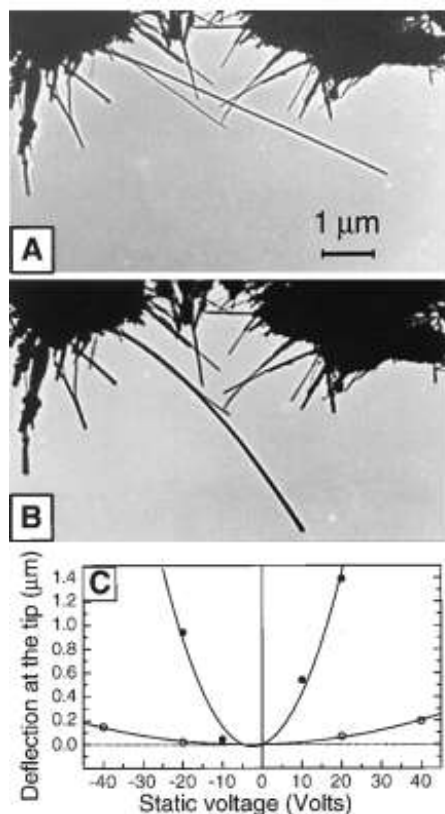
Slika 3: Vpliv velikosti električnega polja na velikost dielektroforezne sile in usmerjanje CNT med elektrodama. Nanocevke se orientirajo le pri dovolj velikem polju. Slike so narejene s SEM (Scanning electron microscope). Vir[[†]].

^{*} R. Saito, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus, Physical Properties of Carbon Nanotubes (London: Imperial College Press, 1998).

[†] A. Arun, P. Salet, A. M. Ionescu, A Study of Deterministic Positioning of Carbon Nanotubes by Dielectrophoresis, Journal of Electronic Materials, 38 (6), 2009, p.742, doi:[10.1007/s11664-009-0797-0](https://doi.org/10.1007/s11664-009-0797-0)

1. DEFORMACIJE NANOCEVK V ELEKTRIČNEM POLJU

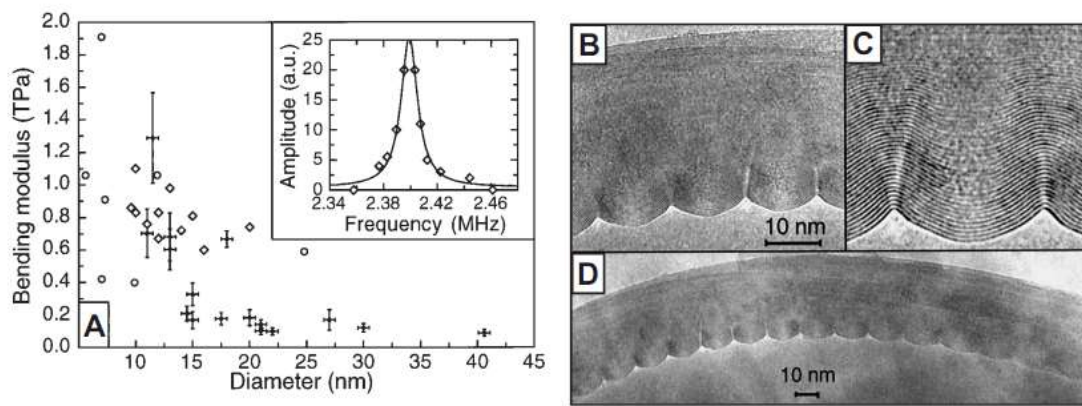
Že dolgo časa je znano, da je mogoče nanocевke deformirati z električnem poljem. Youngov modul CNT naj bi bil izredno velik* (1 TPa). Nanocevko pritrdimo na elektrodo in nanjo in sosednjo priključimo vir napetosti (Slika 4). Nanocevka se naelektri. Naelektrena nanocevka se upogne v električnem polju. Najbolj se upogne konica nanocevke, iz česar se da sklepati, da je naboj lociran predvsem na konici nanocevke



Slika 4: S pomočjo TEM je mogoče opazovati upogibanje SWCT pod vplivom električnega polja. Nanocevka je na enem koncu pritrjena na eno elektrodo. Med to elektrodo in sosednjo se priključi napetost. Ta naelektri nanocevko, na naboj pa deluje elektrostatična sila, ki upogne nanocevko.

Zanimivo je tudi, da pri določeni frekvenci izmeničnega signala nanocevka preide v režim resonance, kar prikazuje Slika 5. Oblika resonančne krivulje kaže na obliko dušenega nihanja. Izmerjena kvaliteta je 170. raziskave naj bi kazale, da imajo nanocevke z manjšim modulom elastičnosti manj izrazite resonančne lastnosti (večje dušenje).

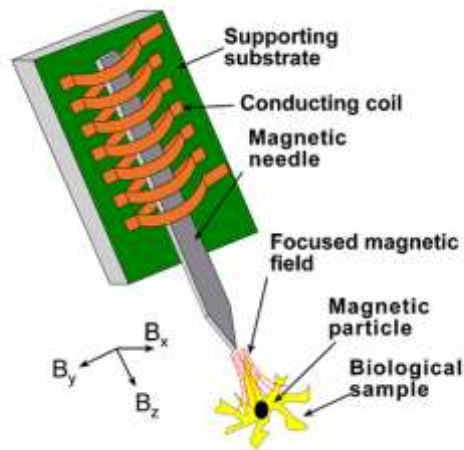
* P. Poncharal, Z. Wang, D. Ugarte, and W. De Heer, Science 283, 1513 (1999). DOI: 10.1126/science.283.5407.1513



Slika 5: Elastične lastnosti nanocevk: slika prikazuje spreminjanje modula elastičnosti s premerom nanocevk. Na desni je TEM slika ukrivjene nanocevke in nakazuje valovne vzorce. Vir [*].

2. MIKROELEKTROMAGNETNO TIPALO Z MEMS TEHNOLOGIJO

Manipulacija bioloških struktur je mogoča tudi z delovanjem magnetnega polja. Na sliki vidimo primer sonde, izdelane z MEMS tehnologijo in je narejena iz tankega tipala iz prevodnega materiala, okoli nje pa je realizirana miniaturna tuljava *.



Slika 6: MEMS realizacija tankega prevodnega tipala znotraj miniaturnih ovojev za vzpostavljanje in manipulacijo z magnetnim poljem. Vir [*].

Ko skozi tuljavico spustimo električni tok, ta ustvari magnetno polje (Amperov zakon), ki se ovija okoli toka. Ker je magnetna upornost prevodnega tipala manjša od okolice, se usmeri magnetno polje v smeri tipala in se koncentrira na robu tipala. Tam dobimo velik gradient magnetnega polja, ki deluje s silo (in seveda navorom) na magnetni dipolni moment:

$$\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{m} \cdot \vec{B})$$

B je gostota magnetnega pretoka, m pa magnetni dipolni moment. Magnetni dipolni moment je v osnovi določen kot mala zanka površine A s tokom I okoli zankice. Matematično je to produkt toka in površine zankice, smer pa je pravokotna na površino zanke (v smeri normale na površino $\vec{e}_n$):

$$\vec{m} = \vec{e}_n I A$$

Če si npr. celico predstavimo v obliki male kroglice, lahko poenostavljeno njen magnetni dipolni moment določimo iz njenih magnetnih lastnosti (podanih z magnetno susceptibilnostjo χ_m), volumna V in gostote magnetnega pretoka B :

$$m = \chi_m V \frac{B}{\mu_0}.$$

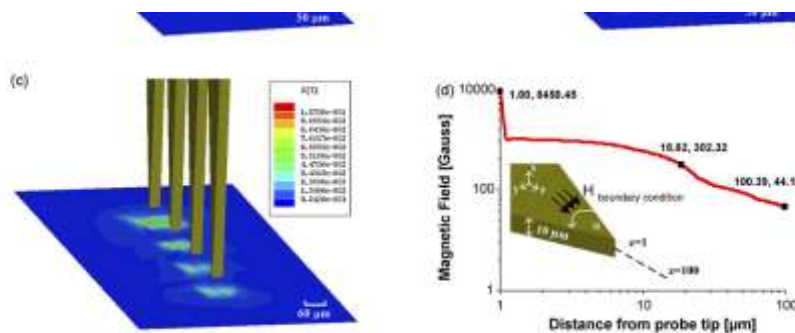
* Yapici, M.K. / Ozmetin, A.E. / Zou, J. / Naugle, D.G, Development and experimental characterization of micromachined electromagnetic probes for biological manipulation and, Sensors & Actuators: A. Physical, 144 (1), p.213-221, May 2008. [doi:10.1016/j.sna.2007.12.029](https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.12.029)

Magnetno polje tako hkrati ustvari v celici magnetni dipolni moment, obenem pa s svojim poljem deluje na ta moment v skladu z zapisano enačbo.

Največja sila je predvsem v bližini konice, saj je tam največji gradient. Zopet nekoliko poenostavljeno, lahko enačbo za silo v eni smeri zapišemo v obliki

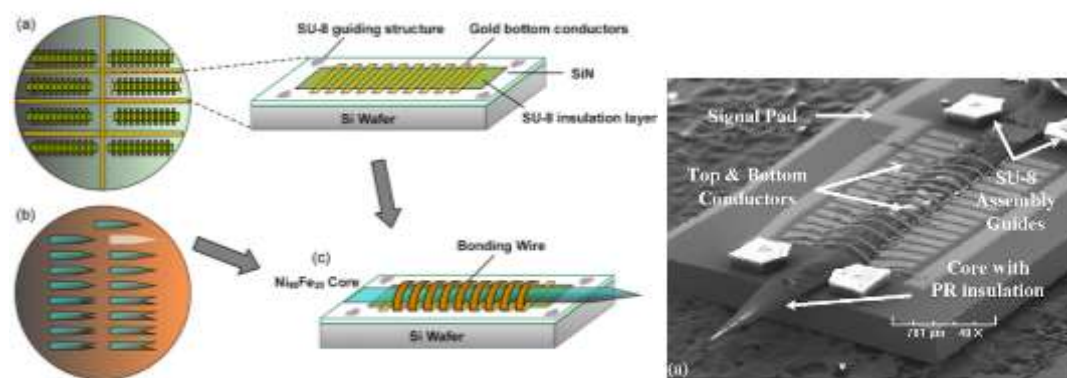
$$F_z = m_z \frac{\partial \bar{B}}{\partial z}.$$

Iz enačbe je razvidno, da na silo vpliva predvsem sprememba magnetnega polja (pa tudi velikost, ki se »skriva« v členu magnetnega dipola), to pa je največje v bližini konice. To prikazuje tudi Slika 7.



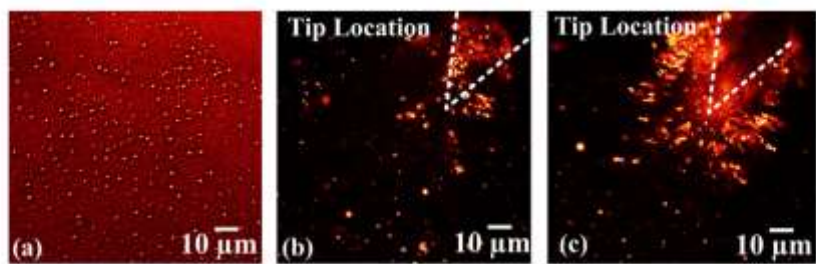
Slika 7: Numerična simulacija velikosti magnetne poljske jakosti v okolici tipal. Vidimo, da velikost polja strmo pada predvsem v bližini tipal. Tam bo tudi največji gradient in s tem tudi sila. Vir [8].

Slika 8 prikazuje način izdelave mikroelektromagnetnega tipala. Na silicijev substrat je nanesen izolator iz silicijevega nitrida, nanj pa plast zlata, ki bo v končni obliki služila za izdelavo mikroovojev. Tipalo je iz feromagnetnega materiala (permaloy)



Slika 8: Izdelava in realizacija mikroelektromagnetnega tipala.

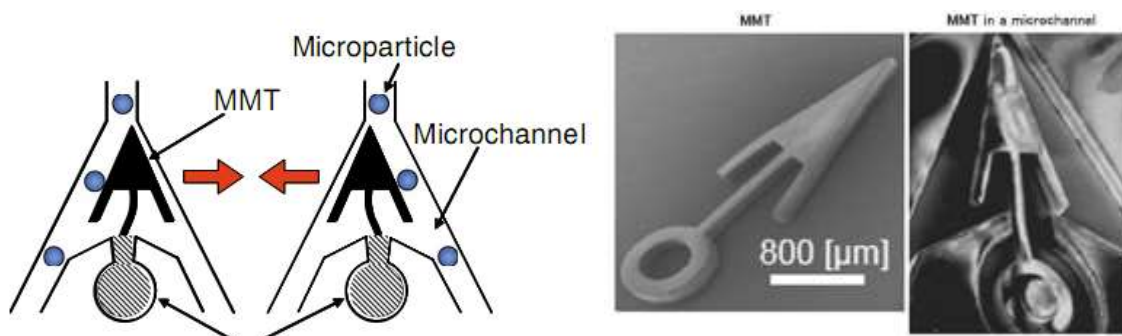
Eksperiment kaže možnost manipulacije superparamagnetnih delcev (Slika 9) povprečnega radija 0,9 μm. Ocenjena dosežena sila z izdelanimi tipali je nekaj deset pikonjtnov.



Slika 9: Na levi so neurejeni delci, ko na tipalu ni vzbujanja, na sredini ob začetku vbujanja in na desni v stacionarnem stanju.

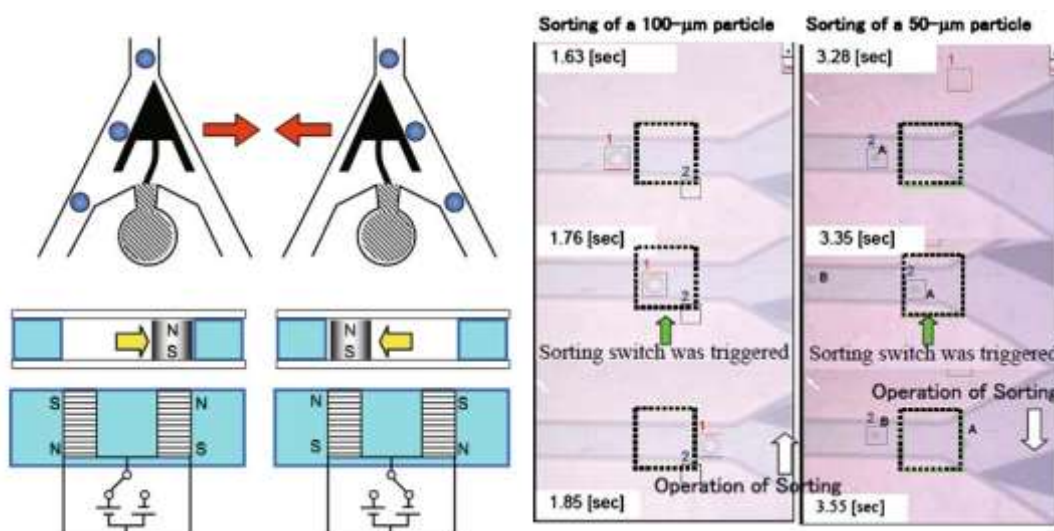
3. MAGNETNO AKTUIRAN MIKROPREKLOPNIK ZA SORTIRNE APLIKACIJE *

S pomočjo MEMS tehnologije je mogoče izdelati premične dele, ki lahko delujejo kot stikala, ki so odzivna na električno ali magnetno polje. Slika 10 kaže princip delovanja mikropreklopnika izdelanega iz polimera z vsebnostjo feromagnetika (PDMS + magnetit). Premik omogoča vzpostavitev magnetnega polja, ki ga vzpostavimo z eksterno tuljavico (na površini mikročipa z mikrokanali). Odvisno od smeri magnetnega polja (smeri toka v vzbujačni tuljavici), se v mikropreklopnik v mikrokanalu premakne tako, da odpre en ali drug kanal kot kaže slika.



Slika 10: Skica delovanja magnetnega mikropreklopnika realiziranega z MEMS tehnologijo in uporabo polimera z vsebnostjo feromagnetika. Slika na desni kaže (SEM) realiziran mikropreklopnik in mikropreklopnik vgrajen v mikrokanalu. [*]

Da bi povečali magnetno polje, ki mora delovati na mikropreklopnik za uspešno akucijo, so zunanjemu magnetu dodali trajni magnet, ki se premakne v smer, ki jo določimo s smerjo toka v tuljavici (Slika 11).

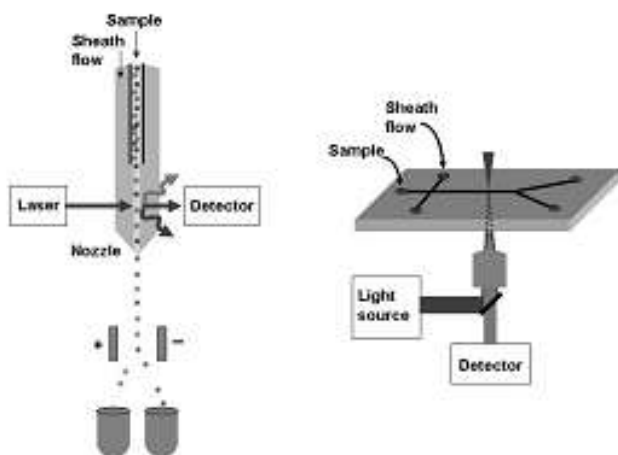


Slika 11: Način premikanja mikropreklopnika s tuljavico in trajnim magnetom. Na desni je prikazano delovanje mikropreklopnika pri detektiranju in sortiranju 50 μm in 100 μm delca. Manjše usmerja v zgornji, večje pa v spodnji kanal. [*]

*Yoko Yamanishi, Shinya Sakuma, Kazuhisa Onda, Fumihito Arai, Biocompatible polymeric magnetically driven microtool for particle sorting, J. Nano Micromechatronics. DOI 10.1007/s12213-008-0009-7.

4. CITOMETRIJA NA MIKROČIPU *

Štetje in sortiranje celic je postala že standardna metoda v celični biologiji. Pomembna je tako v bazični znanosti kot v kliničnih aplikacijah. Prva citometrična naprava je bila zgrajena že leta 1970 [†], od tedaj pa so se naprave le še izpopolnjevale in nadgrajevale. Standardni citometer deluje na principu detekcije označenih (ang. tagged) delcev (npr. s fluorescentnimi delci – markerji). Označeni delci potujejo v tekočini (suspenzija) in skenirani z laserskim žarkom en po enega, kar omogoča poseben ustnik (ang. nozzle), katerega se rahlo stresa. Glede na sipanje laserskega snopa je mogoče suspendirane delce zaznati in jih sortirati z vzpostavljenim električnim poljem.

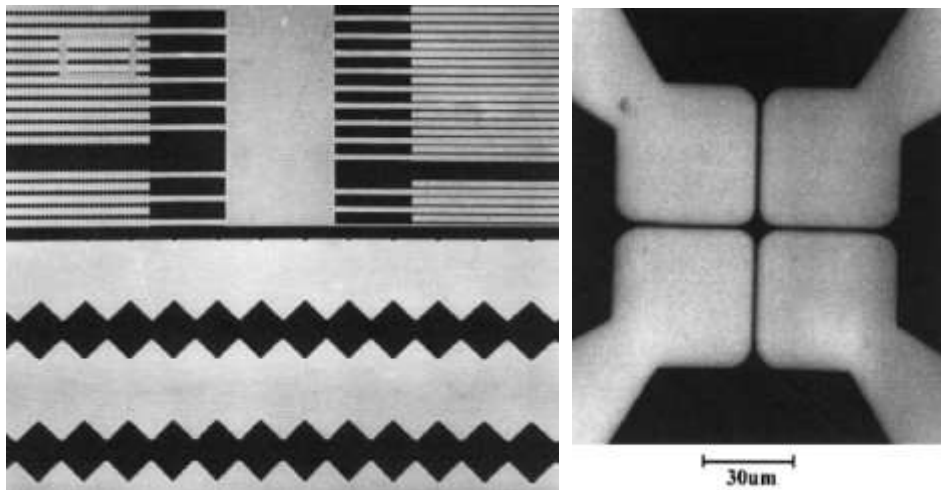


* P.S. Dittrich,, F. Malik, P Schuille, Chapter 14, Cytometry on Microfluidic Chips.

[†] Herzenberg LA, Sweet RG, Herzenberg LA (1976) Fluorescence-activated cell sorting. Sci Am 234: 108–117

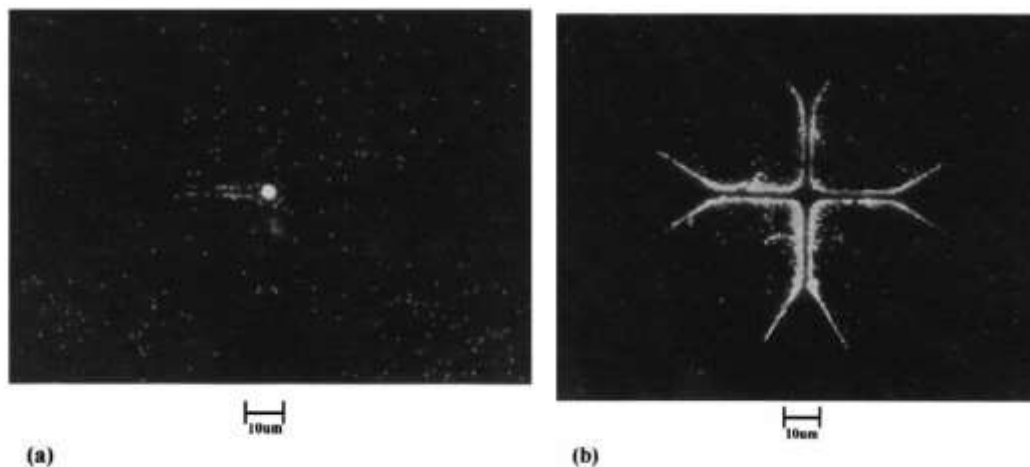
5. MANIPULACIJA IN UJETJE SUBMIKRONSKIH DELCEV (GREEN, 1997)

Dielektroforeza omogoča koncentriranje delcev s pomočjo električnega polja. Green in sodelavci so že leta 1997 pokazali, da je s pomočjo dielektroforezne sile mogoče manipulirati submikronske delce TMV (tobacco mosaic virus). Izdelali so več različnih mikroelektrodni struktur, kot prikazuje slika.

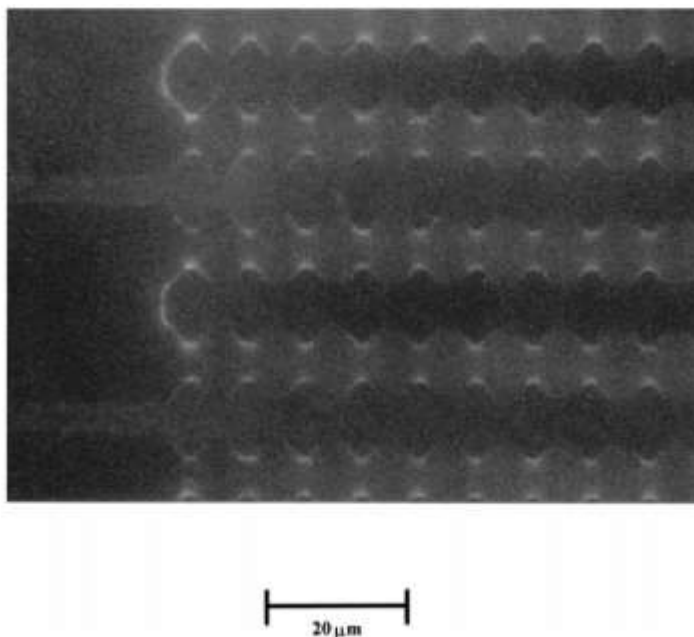


Na levi so prikazane realizirane mikroelektrode žagaste oblike (ang. sawtooth), na desni pa t.i. polinomske elektrode.

Za opazovanje vpliva dielektroforezne sile je bilo potrebno delce virusa najprej označiti z fluorescentnim barvilom (Rodamine B, Sigma) ter pripraviti ustrezno raztopino. Pri ustreznih pogojih (prava frekvenca in velikost AC napetosti med elektrodami) se delci koncentrirajo ali na robovih elektrod ali v sredini med elektrodami.



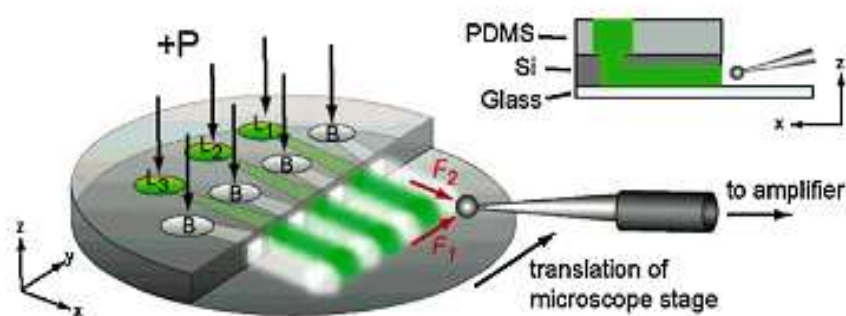
Na levi vidimo koncentriranje označenih delcev iz lateksa (premera 282 nm) v sredini med elektrodami, kar imenujemo negativna dielektroforeza, kar dosežemo pri frekvenci 10 MHz. Na desni pa se delci lateksa pri frekvenci 500 Hz koncentrirajo na robovih elektrod. Priključen je AC vir napetosti 5 V, delci so suspendirani v 1 mM kalijevega klorida (kar ustreza specifični prevodnosti 14 mS/m).



Slika prikazuje koncentriranje TMV na žagastih elektrodah.

6. PATCH CLAMP TEHNIKA Z UPORABO MIKROFLUIDIKE

Patch-clamp tehnika je že standardna tehnika za proučevanje odzivov celic na različne dražljaje. S pomočjo mikrotehnologije so Orwar et. al.^{*} izdelali napravo, ki uporablja tehnologijo MEMS za realizacijo množice mikrokanalov, ki dovajajo različne substance v okolico celice, ki jo opazujemo s pomočjo patch-clamp tehnike. Mikrokanali so izjedkani v silicijev substrat in na vrhu zaprti z drugim substratom (iz stekla) s pomočjo anodnega bondiranja. Rezervoarčki za različne substance katerih vpliv na celico želimo spremljati so realizirani s PDMS. Z izdelanim sistemom je mogoče izmeriti 300 različnih odzivov celice v času 30ih minut.

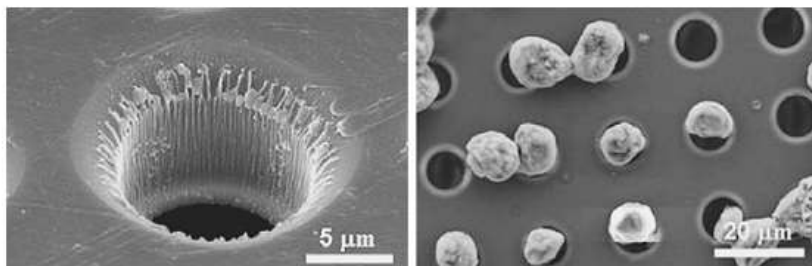


ŠE

^{*} J. Sinclair, J. Pihl, J. Olofsson, M. Karlsson, K. Jardemark, D.T. Chiu, O. Orwar, Anal. Chem. 74 (2002) 6133.

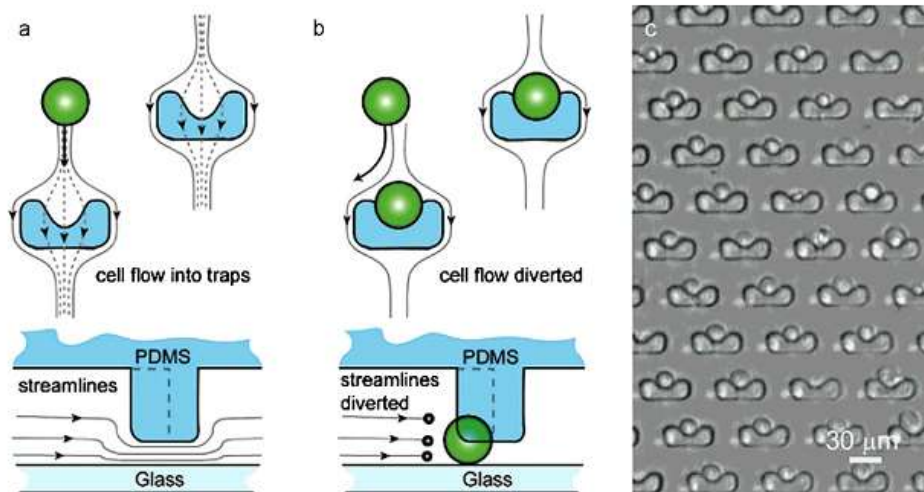
7. HIDRODINAMSKO UJETJE CELIC

Več načinov hidrodinamskega ujetja celic obstaja. En od načinov je, da z ustrezno MEMS tehnologijo lahko izdelamo majhne jamice, v katere se ujamejo delci *. Zeng et al. so tako uporabili RIE jedkanje za izdelavo 10 μm jamic razmaknjenih za 20 μm . Primeren način delovanja so prikazali z uspešnim ujemanjem cirkulirajočih tumorskih celic (89% ujetje), medtem ko se eritrociti niso ujeli v jamice (Slika 12).



SLIKA 12: REALIZACIJA JAMICE PREMERA 10 μm V PARILENSKEM FILMU. NA DESNI JE PRIKAZ UJETJA CELIC TUMORJA V JAMICAH.

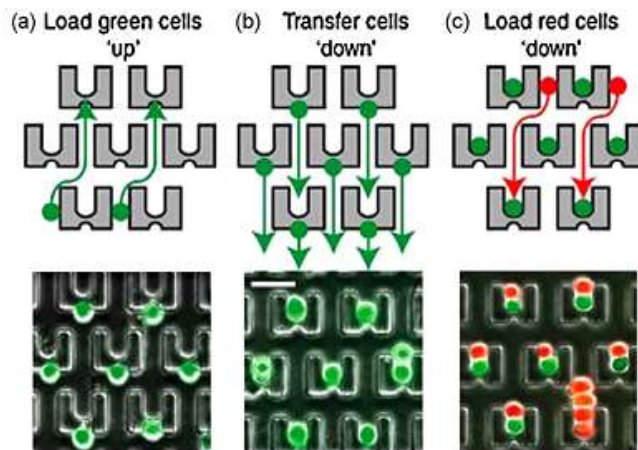
Drugi način hidrodinamskega ujetja prikazuje Slika 13. Tu so izdelani na določenih mestih otočki tako oblikovani, da se pri potovanju v tekočini vanje ujame delec ustrezne velikosti. Lahko se ujame tudi več delcev manjše velikosti. Tipična velikost pasti je med 10 μm in 60 μm , kar omogoča gostoto pasti reda 3300 pasti na mm^2 .



Slika 13: Na levi vidimo način ujetja delcev v pasti in uklanjanje delca iz pasti, če je ta že zasedena. Na desni je eksperiment, ki nakazuje uspešnost delovanja pasti.

* S. Zheng, H. Lin, J.Q. Liu, M. Balic, R. Datar, R.J. Cote, Y.C. Tai, Membrane microfilter device for selective capture, electrolysis and genomic analysis of human circulating tumor cells, in: 21st International Symposium on Microscale Bioseparations, Elsevier Science BV, Vancouver, Canada, 2007, p. 154.

Nadgradnjo tega načina so prikazali Voldman et al^{*}, ki so izdelali pasti tako, da poleg ujetja enih delcev omogočajo tudi združenje dveh različnih tipov delcev. Uspešno so opravili poskuse na fibroblastih in mišjih izvornih celicah. Dosegli so 70% uspešnost združevanja na površini 8 mm x 4 mm, kjer je bilo cca. 6000 pasti.



Način združevanja različnih tipov celic. Najprej se z eno smerjo toka zeleni delci naberejo na spodnji strani pasti. Nato obrnemo smer toka in zeleni delci padejo v past na drugi strani. Poleg tega dodamo še tok rdečih delcev, ki se prav tako ujamejo v pasti.

^{*} A.M. Skelley, O. Kirak, H. Suh, R. Jaenisch, J. Voldman, Nat.Meth. 6 (2009) 147.

UPORABLJENE KRATICE

Razlaga kratic:

MEMS Micro-electro-mechanical system , mikro-elektro-mehanski sistem

TEM Transmission electron microscope, trnasmisijski elektronski mikroskop

SEM Scanning electron microscope, skenirni elektronski mikroskop

PDMS ... polidimetilsiloksan. Je polimer, ki se pogosto uporablja v MEMS tehnologiji. Je prozoren, se z lahkoto mehča in obdeluje. Relativno poceni. Dobro se tudi spaja s silicijevim ali steklenim substratom in je biokompatibilen.

Indeks kratic:

MEMS 57, 58, 62, 65, 73

PDMS 70, 73

SEM 73

TEM 73