

14. Prevodnik v polju

Že v prejšnjem poglavju smo ugotovili, da polja znotraj žile koaksialnega kabla ni, niti ga ni znotraj prevodnega oklopa koaksialnega kabla. Ali je to le posledica simetrične porazdelitve naboja in uporabe Gaussovega zakona, ali je to splošna lastnost prevodnikov? Odgovor dobimo z razmislekom o lastnostih prevodnikov*: dober prevodnik ima to lastnost, da je tudi v primeru nevtralnosti (brez presežkov naboja) mnogo nabojev (elektronov), ki so zelo šibko vezani na jedro, kar pomeni, da jih že najmanjše polje lahko premakne iz ravnovesne lege.

Prevodnik v zunanjem električnem polju. Če prevodnik postavimo v zunanje električno polje $\vec{E}_{\text{zunanje}}$, na vse naboje v prevodniku deluje električna sila, v skladu z zvezo $\vec{F} = Q\vec{E}$. Prosti oziroma šibko vezani elektroni se pomaknejo v nasprotni smeri polja (ker so negativnega predznaka) do roba prevodnika.[†] Koliko pa se jih pomakne? Toliko, kolikor »zahteva« zunanje polje, oziroma toliko, da se vzpostavi novo ravnotežje, v katerem je znotraj prevodnika polje enako nič. Kaj pa ostane tam, kjer ni več elektronov? Ostane primankljaj elektronov, torej število protonov in elektronov ni več enako. Ostane pozitiven naboj.

Torej, premaknjeni naboji delujejo z lastnim električnim poljem $\vec{E}_{\text{nabojev}}$ tako, da bo električno polje v prevodniku $\vec{E}_{\text{v prevodniku}} = \vec{E}_{\text{zunanje}} + \vec{E}_{\text{nabojev}} = 0$.

$$\vec{E}_{\text{v prevodniku}} = 0$$

SLIKA: a) V zunanje polje vstavimo prevodnik. b) Po (hitrem) prehodnem pojavu pride do prerazporeditve naboja (presežka elektronov na eni strani in pomanjkanja na drugi strani) tako, da je polje znotraj prevodnika enako nič.

* Energijsko so ti elektroni v prevodnem pasu, za razliko od izolatorjev, kjer elektronov v prevodnem pasu praktično ni. Polprevodniki so po lastnostih nekje vmes med prevodniki in izolatorji. Njihove lastnosti spreminjamo z dodajanjem primesi. Čisti silicij je tako izolator, z dodatkom atomov fosforja, ki se (z difuzijo pri visoki temperaturi) vgradijo v kristalno strukturo silicija pa postane tak kos silicija prevoden. Siliciju z dodatki fosforja rečemo n-tip polprevodnika, ker atomi fosforja doprinesejo k dodatku šibko vezanih elektronov, ki so negativni naboji. Poznamo tudi p-tip polprevodnikov, pri katerih siliciju (ali drugemu polprevodniku) dodajamo atome npr. bora, ki s kristalno strukturo silicija tvorijo vezi v katerih nastanejo vrzeli (nezaključene vezi). Te vezi delujejo kot pomanjkanje elektronov. Tudi p-tip polprevodnika je prevoden, vendar je način prevajanja nekoliko drugačen kot v n-tipu. Smatramo lahko, da v takem tipu polprevodnika prevajajo pozitivni nosilci naboja, ki jih imenujemo vrzeli.

[†] V resnici elektron ne prepotuje celotne razdalje od enega roba do drugega roba prevodnika pač pa se elektroni le zamaknejo med samo. Povprečna hitrost elektronov v prevodniku je relativno počasna (reda) in ji rečemo tudi hitrost drifta, saj med prenosom trkajo z atomi v prevodniku tako, da njihova pot ni premočrtna pač pa se le v povprečju gibljejo v nasprotni smeri polja. Prerazporeditev, ki smo ji priča ko vstavimo prevodnik v polje pa je skoraj hipna.

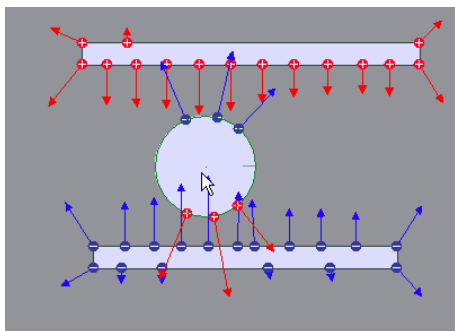
Polje znotraj, pa tudi v okolici, polprevodnika se spremeni ob prerazporeditvi naboja, saj na polje vplivajo tudi prerazporejeni naboji.

Površina polprevodnika je ekvipotencialna ploskev.

Če je polje znotraj prevodnika enako nič, potem bo tudi napetost med poljubnima dvema točkama znotraj prevodnika enaka nič, saj velja $U_{12} = \int_{T_1}^{T_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}$. To pa tudi pomeni, da imajo vse točke na prevodniku enak potencial in da je površina prevodnika ekvipotencialna ploskev.

Polje na nevtraln prevodno telo.

Če deluje polje na nevtraln prevodno telo, pride znotraj tega telesa do prerazporeditve elektronov, ki se premaknejo v smeri polja in pustijo za sabo pomanjkanje elektronov oz. pozitivni naboj. Presežkov pozitivnega naboja je enako veliko kot prerazporejenih elektronov, tako, da je vsota vseh nabojev znotraj telesa še vedno enaka nič. Prerazporeditvi naboja rečemo **elektrostatična indukcija**.



Simulacija elektrostatične indukcije s programom Jacob.
<http://jacob.fe.uni-lj.si>

SLIKA: Prerazporeditev nabojev imenujemo elektrostatična indukcija.

Ali je polje znotraj votline prevodnika v kateri ni nabojev različno od nič?

Če bi to polje obstajalo, potem bi imeli znotraj votline prevodnika ekvipotencialne ploskve in po Gaussovem zakonu bi morali z integracijo polja okoli ekvipotencialne ploskve dobiti količino zaobjetega naboja. Ker pa tega ni, je tudi polje enako nič.

SLIKA: Ekvipotencialne ravnine znotraj votline prevodnika. Polje kaže v smeri manjšanja potenciala.

Kaj pa, če je poleg zunanjega polja še v votlini prevodnika naboj? Ali je tudi v tem primeru polje v notranjosti prevodnika enako nič?

Odgovor je da, saj če bi se v notranjosti prevodnika nahajal naboj in polje, bi ga potegnilo v smeri, ki jo diktira zunanje polje ali pa v smeri notranjega naboja v votlini. Če zapišemo Gaussov stavek po prevodniku v okolici votline, hitro ugotovimo, da mora biti na notranji površini prevodnika (ob luknji) enaka količina naboja kot ga je v notranjosti.

SLIKA: Porazdelitev naboja po površini prevodnika z luknjo v primeru, ko se v luknji nahaja naboj.

Kaj pa če ni zunanjega polja? Če je torej je naboj v luknji, ki jo obkroža prevodnik.

Odgovor: V tem primeru bo prišlo do elektrostatične indukcije. Na notranji površini se bo induciral naboj nasprotnega predznaka kot je v luknji, na zunanji površini se pa v smislu indukcije nakopiči naboj enakega predznaka kot je v luknji. Kaj pa polje v zunanosti prevodnika? Vpliv polja naboja v luknji in naboja na notranji površini prevodnika se izničita, ostane le polje na zunanji površini prevodnika, ki je enakega predznaka in velikosti kot naboj v luknji. Ta bo povzročil polje v okolici. Če je prevodnika sferične oblike, bo polje v zunanosti enako polju, ki bi ga povzročal točasti naboj v središču sfere.

SLIKA: Porazdelitev naboja v prevodniku z luknjo v kateri se nahaja naboj.

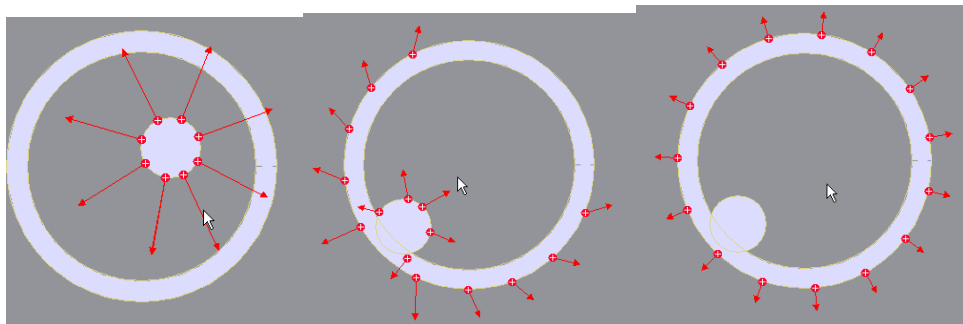
Faradayeva kletka. Ugotovili smo že, da se v iz votljenem prevodniku postavljenem v zunanje električno polje vzpostavijo take razmere, da na površini prevodnika pride do prerazporeditve naboja, znotraj prevodnika in tudi v votlini pa je polje enako nič. Če hočemo del prostora električno izolirati od okolice, ga moramo torej prevleči s prevodnikom, ki ga običajno ozemljimo. Omeniti velja, da je taka zaščita popolna za elektrostatično (enosmerno) polje, za časovno spremenljivo pa ne popolnoma, odvisno od frekvence motenj in debeline zaščitne plasti*.



Faradayeva kletka učinkovito varuje ne le pred elektrostatičnim poljem, pač pa tudi dinamičnim. Neučinkovita je le pri magnetostatičnem polju.

<http://teslardownunder.com/>

* Znano je, da avto smatramo kot precej varnega pred udarom strele, ker je njegova karoserija iz prevodnika. Podobno velja za letala, kjer pa je kljub temu potrebna pazljiva dodatna zaščita elektronike pred udari strel. Poleg tega so moderna letala lahko zgrajena iz neprevodnih kompozitnih materialov (zaradi večje trdote in manjše teže), ki jim je ravno zaradi nevarnosti strel potrebno vgraditi dodatno prevodno plast.



SLIKA: Proces prenosa naboja iz notranjega prevodnika na zunanjega ob dotiku.

Okovinjje ekvipotencialnih ploskev. Vzemimo primer poljubnih ekvipotencialnih ploskev med dvema prevodnima telesoma. Poljubno ekvipotencialno ploskev lahko okovinimo, kar pomeni, da prevodno telo razširimo do te ekvipotencialne ravnine, pa se polje med novima prevodnima telesoma ne bo spremenilo, če pridobi novo prevodno telo potencial okovinjene ekvipotencialne ravnine. Bo pa seveda spremenjena potencialna razlika med telesoma – napetost.

SLIKA: Okovinjje ekvipotencialnih ravnin ne spremeni razmer (polja) med neokovinjenimi ekvipotencialkami.

Električno polje na površini prevodnika.

Ugotovili smo že, da je rob prevodnika ekvipotencialna ploskev. To tudi pomeni, da na robu ne more obstajati komponenta polja, ki je usmerjena vzdolž roba prevodnika. Taki komponenti rečemo tangencialna komponenta, pravokotno na površino pa je normalna komponenta. Če bi tangencialna komponenta polja obstajala, bi to polje delovalo na šibko vezane elektrone v kovini in jih premaknila v novo ravnovesno lego. Velja torej:

$$E_{t, \text{na robu prevodnika}} = 0.$$

Poleg tega smo na treh primerih (ploščati, valjni in krogelni kondenzator) ugotovili, da je polje na površini prevodnika enako σ/ϵ_0 . Ali to velja splošno? DA. Polje na površini polprevodnika je usmerjeno v smeri normale na površino in je enako*

$$\vec{E}_{\text{na površini prevodnika}} = \vec{e}_n \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

* Za bolj natančno razlago glej A.R.Sinigoj: Osnove elektromagnetike.

SLIKA: Polje na površini polprevodnika.

Razlika med poljem naelektrene ravnine in poljem na površini prevodnika.

Za polje naelektrene ravnine smo ugotovili, da je enako $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ in to v smeri v stran od ravnine v primeru pozitivnega in v ravnino v primeru negativnega naboja na površini prevodnika. Tik nad površino prevodnika lahko vpliv nabojev na polje razdelimo na dva dela. En del polja prispevajo naboji na površini, ti prispevajo polja $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$, vsi ostali naboji pa tudi toliko, zato je polje na površini naelektrenega prevodnika enako $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$.

***Sila na površini prevodnika.** Če je na površini prevodnika električno polje, torej mora na naboje na površini delovati sila, pač v skladu z $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$. Upoštevati je potrebno električno polje na naboje σ , ki je posledica ostalih nabojev na prevodniku. To polje je enako polovici celotnega polja na površini prevodnika* oz. $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$. Sila na naboje σ je ploskovna sila (ali

pritisk) in je enaka $\vec{f}_e = \vec{e}_n \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0}$. Celotno silo na objekt pa bi dobili z integracijo ploskovne sile

po celotni površini $\vec{F}_e = \frac{1}{2\epsilon_0} \int_A \sigma^2 \cdot d\vec{A}$.

* Drugače povedano, električna poljska jakost na površini prevodnika velja pravzaprav tik nad površino, medtem, ko je električna poljska jakost na naboje σ na površini prevodnika enaka povprečni jakosti v notranjosti in zunanosti: Ker je v notranjosti polje enako nič, je polje na mestu nabojev enako $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$.