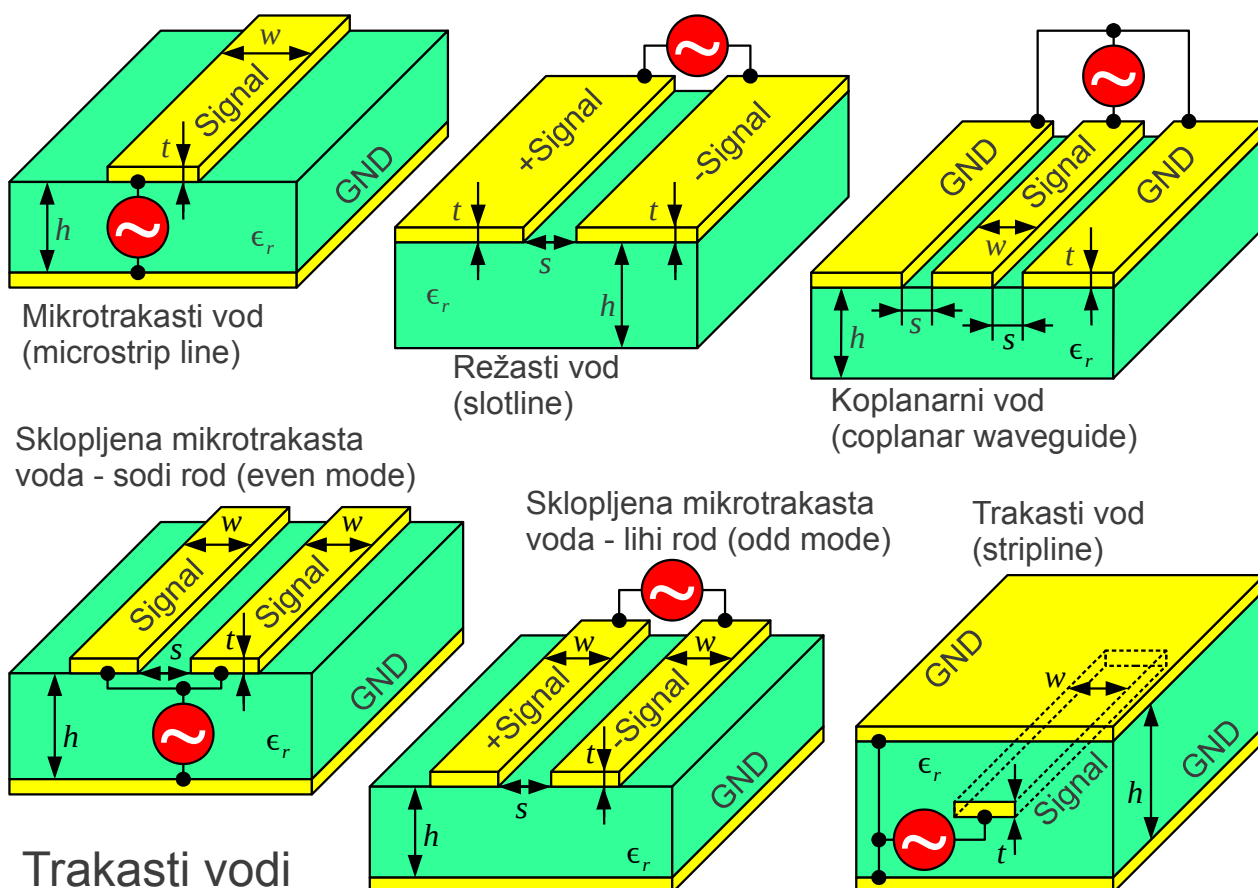


17. Trakasti vodi

Čeprav kovinski trak ni najprimernejša oblika vodnika s stališča elektromagnetnega polja in pripadajočih pojavov, so trakasti vodniki zelo priljubljeni zaradi preproste izdelave. Ploščato žico je lažje navijati od žice okroglega prereza. Ploščate vodnike lahko preprosto izdelamo iz pločevine. Postopki fotolitografije narekujejo električne povezave v monolitnih integriranih vezjih prav tako v obliki trakov.

Daleč najpogostejša oblika trakastih vodnikov v elektroniki in telekomunikacijah so tiskana vezja najrazličnejših izvedb: preprosta enostranska, zahtevnejša dvostranska in najzahtevnejša večslojna tiskana vezja. Na istem tiskanem vezju lahko uporabljamo več različnih oblik trakastih vodov oziroma valovodov. Nabor niti zdaleč ni omejen na nekaj najpogostejših zvrsti, ki so prikazane na spodnji sliki:



Kjer je na istem tiskanem vezju prisotnih več različnih signalov na pripadajočih vodih in so medsebojni sklopi (presluhi) nezaželeni, se najpogosteje uporabljajo mikrotrakasti vodi. Mikrotrakasti vod (angleško: microstrip line) zahteva dvostransko ali večslojno tiskano vezje. Ena stran

dvostranskega vezja oziroma en sloj večslojnega vezja ni jedkan in deluje kot skupna referenčna ravnina (masa, ground ali GND) za vsa prisotna vezja. Signalni vodniki na drugi strani dvostranskega vezja zaključujejo večino svojega elektromagnetnega polja na opisano referenčno ravnino.

Mikrotrakasti vod je popolnoma opisan s štirimi podatki: debelino podlage h , njeno relativno dielektričnostjo $\epsilon_r \geq 1$, širino vodnika w in debelino vodnika t . Debelina podlage se giblje med $h = 1.6 \text{ mm}$ pri preprostih dvostranskih tiskanih vezjih vse do manj kot $h < 0.1 \text{ mm}$ v večslojnih vezjih. Relativna dielektričnost vitroplasta se giblje okoli $\epsilon_r \approx 4.4$ in je frekvenčno odvisna, dielektričnost teflonskih laminatov pa okoli $\epsilon_r \approx 2.3$. Elektromagnetno polje mikrotrakastega voda sicer sega tudi v prazen polprostor (zrak) nad tiskanim vezjem, kjer velja $\epsilon = \epsilon_0$ in $\mu = \mu_0$.

Debelina vodnika t ustreza debelini bakrene folije, ki je prilepljena na laminat. Debelina $t = 35 \mu\text{m}$ ustreza eni unči ($1 \text{ oz} = 28.35 \text{ g}$) bakra na kvadraten čevljev ($1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$), debelina $t = 17.5 \mu\text{m}$ pa pol unče bakra na kvadraten čevljev. Ker običajno velja $t \ll h, w$, v približkih marsikdaj smemo privzeti $t \rightarrow 0$ neskončno tanek trak. Načrtovalec ima največjo svobodo pri širini vodnika w , s pomočjo katere izbira željeno kapacitivnost, induktivnost in karakteristično impedanco.

Referenčno ravnino mase mikrotrakastega voda privzamemo neskončno veliko. Prav tako privzamemo neskončno velik prazen polprostor nad tiskanim vezjem. V resnici si neskončnosti ne moremo privoščiti. V večini primerov zadošča, da se ravnina mase in prazen polprostor nad vezjem raztezata na vsaj $s > 3h$ trikratno debelino podlage.

Ko je razdalja med sosednjima mikrotrakastima vodoma manjša od trikratne debeline podlage ($s < 3h$), presluh med vodoma ni več zanemarljiv. Elektromagnetno polje dveh sklopljenih vodov opisujeta sodi in lihi rod valovanja. Sodi rod (sofazni rod, angleško: even mode) valovanja vzbudimo tako, da izvor priključimo sofazno (vzporedno) na oba mikrotrakasta voda.

Lihi rod (protifazni rod, angleško: odd mode) valovanja vzbudimo tako, da izvor priključimo protifazno (zaporedno) na oba mikrotrakasta voda. Ravnina mase GND na drugi strani tiskanega vezja ni nujno potrebna za lihi rod. Brez ravnine mase lihi rod predstavlja preprost simetričen dvovod na tiskanem vezju. Slednjega pogosto uporabljajo hitra logična vezja pri frekveni uri (takta) nad $f > 1 \text{ GHz}$.

Komplementarni zgled mikrotrakastega voda je režasti vod (angleško:

slotline), kjer uporabimo natančno tiste ploskve bakra, ki smo jih pri jedkanju mikrotrakastega voda odstranili. Režasti vod sestavljata dve neskončni polravnini, ki ju ločuje reža širine s . Vir priključimo med obe polravnini. V praksi morata biti obe polravnini veliki v primerjavi z valovno dolžino, zato se režasti vod najpogosteje uporablja v antenah.

Dva sklopljena režasta voda na razdalji w dajeta koplanarni vod (angleško: coplanar waveguide ali CPW). V koplanarnem vodu običajno vzbujamo le sodi rod tako, da po srednjem vodniku peljemo signal, obe neskončni polravnini pa delujeta kot masa GND. Koplanarni vod lahko izdelamo na enostranskem tiskanem vezju. Koplanarni vod uporabljajo monolitna integrirana vezja za zelo visoke frekvence tudi nad $f > 100 \text{ GHz}$, kjer bi imele drugačne vrste trakastih vodov neprimerno karakteristično impedanco Z_K oziroma prevelike izgube.

Koplanarni vod ima lahko tudi dodatno ravnino mase GND na drugi strani tiskanega vezja (angleško: coplanar waveguide with ground ali grounded coplanar waveguide). Koplanarni vod z dodatno ravnino mase je pravzaprav križanec med navadnim koplanarnim vodom in mikrotrakastim vodom. Če dobro povežemo obe polravnini in spodnjo ravnino mase s številnimi metaliziranimi "via" luknjami na tiskanem vezju, ima koplanarni vod z dodatno ravnino mase zelo majhen presluh do sosednjih vodov.

Čeprav vsi opisani vodi uporabljajo trakaste vodnike, izraz trakasti vod (angleško: stripline) v ožjem pomenu besede opisuje vode v večslojnih tiskanih vezjih, kjer je elektromagnetno polje omejeno med dve ravnini mase. Dielektrik ϵ_r med obema ravninama mase je homogen in vsebuje enega ali več trakastih signalnih vodnikov v enem ali več slojih med obema ravninama mase. Prednosti trakastega "sendviča" so elektromagnetno zaključena naloga brez zunanjega polja, homogen dielektrik ϵ_r omogoča prave TEM rodove valovanja, vodniki v več slojih eden nad drugim pa poljubno velik elektromagnetni sklop.

Katerikoli trakasti vod je zelo zahtevna elektromagnetna računska naloga. Trakasta geometrija zahteva konformno preslikavo v drugačen koordinatni sistem, kjer lahko sploh iščemo analitsko rešitev naloge. Prisotnost dveh različnih dielektrikov, podlaga $\epsilon_r > 1$ in prazen prostor (zrak) $\epsilon \approx \epsilon_0$, zahteva vzdolžni komponenti električnega in magnetnega polja, kar onemogoča prave TEM rodove, onemogoča strogo definicijo električne napetosti U in karakteristične impedance Z_K . V nadaljevanju si bomo natančneje ogledali vse opisane pojave v mikrotrakastem vodu, ki se od vseh trakastih vodov danes najpogosteje uporablja.

Statični kapacitivnost in induktivnost mikrotrakastega voda je analitsko

izračunal šele Harold Alden Wheeler najprej za mikrotrakasti vod v zraku oziroma homogenem dielektriku (1964) in leto kasneje še za mikrotrakasti vod na poljubni podlagi $\epsilon_r \geq 1$, nad katero je prazen polprostor (zrak)

$\epsilon \approx \epsilon_0$ oziroma drugačen dielektrik. Iz statičnih kapacitivnosti in induktivnosti se da preprosto izračunati TEM približek karakteristične impedance Z_K , ki je povsem uporaben pri nizkih frekvencah, ko so prečne izmere voda $h, w, t \ll \lambda$ majhne v primerjavi z valovno dolžino.

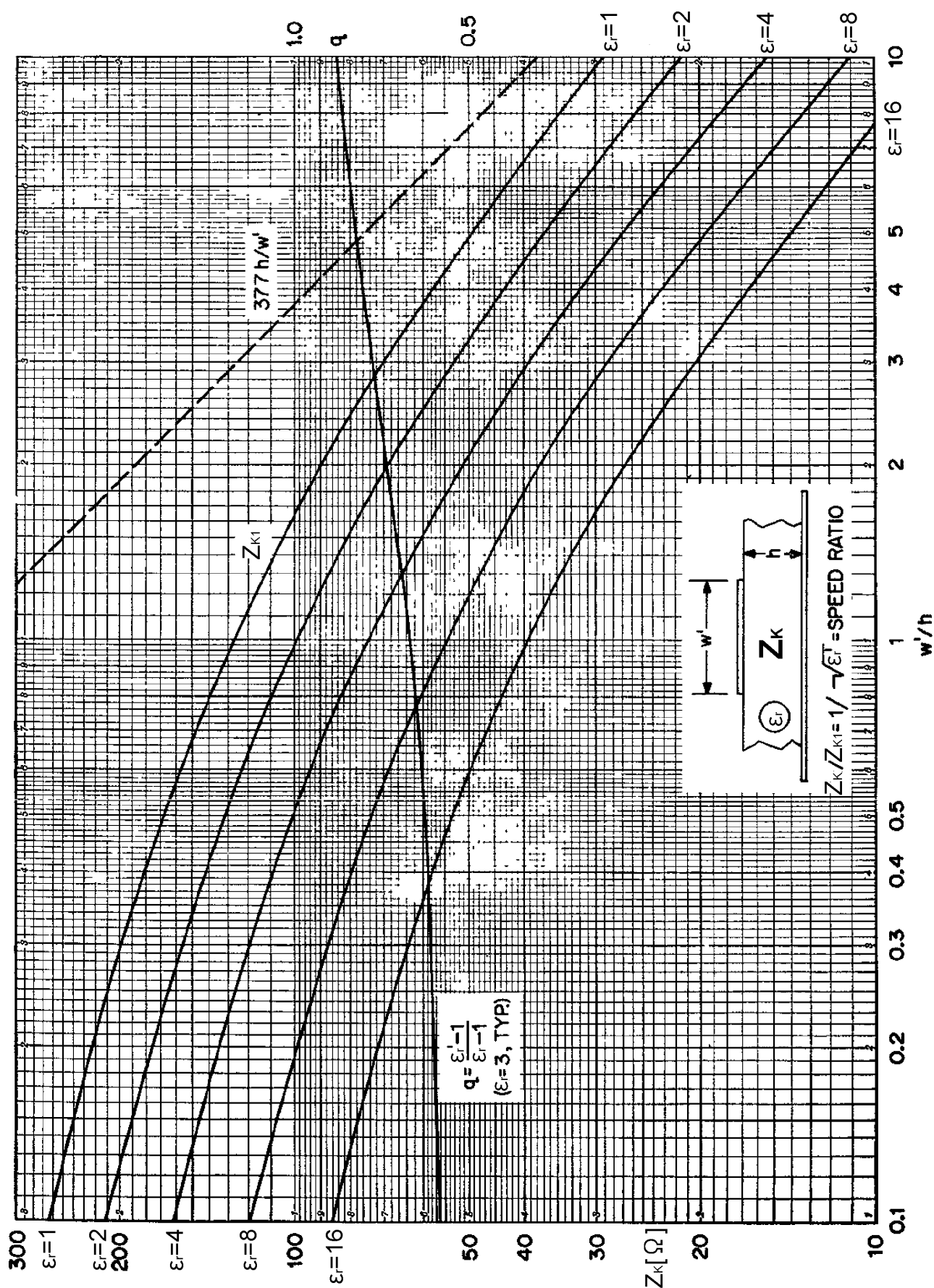
Wheeler je za komplicirane analitske rešitve mikrotrakastega voda poiskal tudi preproste približne izraze zadovoljive natančnosti za vse inženirske naloge. Približne izraze je najprej zapisal posebej za ozke trakove (majhno razmerje w/h) in posebej za široke trakove (veliko razmerje w/h), kar se večinoma uporablja še danes. V svojem zadnjem članku iz leta 1977 je Wheeler predstavil en sam res dober približek, ki deluje v celotnem uporabnem razponu $0.1 \leq w/h \leq 10$.

V svojem približku Wheeler najprej zamenja resnični mikrotrakasti signalni vodnik širine w in nezanemarljive debeline $t > 0$ z neskončno tankim trakom $t' \rightarrow 0$ nekoliko večje širine w' :

$$w' \approx w + t \cdot \left(\frac{1 + \frac{1}{\epsilon_r}}{2\pi} \right) \cdot \ln \left(\frac{4e}{\sqrt{\left(\frac{t}{h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{w}{t} + \frac{11}{10}} \right)^2}} \right) \quad e = 2.718...$$

Z novim razmerjem w'/h in valovno impedanco praznega prostora $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 120\pi \Omega$ se Wheelerjev približek Z_K glasi:

$$Z_K \approx \frac{Z_0/2\pi}{\sqrt{2(1+\epsilon_r)}} \cdot \ln \left(1 + \frac{4h}{w'} \left(\frac{14 + \frac{8}{\epsilon_r}}{11} \cdot \frac{4h}{w'} + \sqrt{\left(\frac{14 + \frac{8}{\epsilon_r}}{11} \cdot \frac{4h}{w'} \right)^2 + \pi^2 \cdot \frac{1 + \frac{1}{\epsilon_r}}{2}} \right) \right)$$



Karakteristična impedanca mikrotrakastega voda (TEM približek Wheeler 1977)

Kompliciran računski izraz prikazuje graf za karakteristično impedanco

Z_K kot funkcijo razmerja w'/h in dielektričnosti podlage ϵ_r . V graf je Wheeler namenoma dodal tudi krivuljo $Z_K \approx 377 \Omega \cdot h/w'$, ki opisuje karakteristično impedanco mikrotrakastega voda v zraku, če stresanje elektromagnetnega polja zanemarimo in upoštevamo le preprosto polje tik pod signalnim vodnikom. V resnici stresano električno polje povečuje kapacitivnost mikrotrakastega voda, stresano magnetno polje pa znižuje induktivnost mikrotrakastega voda. Primerjava s krivuljo $Z_{K1} = Z_K(\epsilon_r = 1)$ pokaže, da moramo v vseh praktičnih primerih upoštevati celotno elektromagnetno polje vključno s stresanjem!

Elektromagnetno polje mikrotrakastega voda se nahaja večinoma v dielektriku podlage $\epsilon_r \geq 1$, znaten del stresanega polja pa sega tudi v prazen polprostor (zrak) $\epsilon \approx \epsilon_0$ nad podlago. Fazna hitrost valovanja v mikrotrakastem vodu $v_f \geq c_0/\sqrt{\epsilon_r}$ je zato nekoliko višja od faze hitrosti v homogenem dielektriku podlage. Pojav opisuje navidezna dielektrična konstanta $\epsilon_r' = (c_0/v_f)^2$ mikrotrakastega voda.

Navidezno dielektrično konstanto $1 \leq \epsilon_r' \leq \epsilon_r$ določa faktor q , ki pove, kolikšen del polja je v podlagi. Za faktor q obstaja preprost, a dokaj natančen približek:

$$q = \frac{\epsilon_r' - 1}{\epsilon_r - 1} \approx \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 10 h/w}} \right)$$

Karakteristično impedanco Z_K in navidezno relativno dielektrično konstanto ϵ_r' smemo računati preko navedenih izrazov v primeru, ko so vse prečne izmere trakastega voda $h, w, t \ll \lambda$ dosti manjše od valovne dolžine. V tem primeru je elektromagnetno polje zelo podobno statičnemu polju, ki nima niti vzdolžne komponente električnega polja $E_z = 0$ niti vzdolžne komponente magnetnega polja $H_z = 0$.

V elektrostatiki in magnetostatiki segajo silnice elektromagnetnega polja tudi v neskončnost polprostora nad mikrotrakastim vodom. V elektrodinamiki valovanje potuje počasneje v podlagi $\epsilon_r \geq 1$ kot pa v praznem polprostoru $\epsilon \approx \epsilon_0$ nad njo. Namesto v neskončnost se silnice električnega in magnetnega v praznem polprostoru zasukajo nazaj proti trakastemu vodniku, kjer je upočasnjeno valovanje hitreje menja in obrne fazo:

polja zelo majhne.

V strokovni literaturi je pogosto navedena karakteristična impedanca Z_K mikrotrakastega voda tudi pri višjih frekvencah, ko prečne izmere presežejo $h, w, t \geq \lambda/10$. Po nekaterih izračunih karakteristična impedanca Z_K mikrotrakastega voda s frekvenco narašča, po drugih izračunih pa ista veličina s frekvenco upada? Pameten človek bo verjetno zaključil, da nima smisla računati veličin, ki fizikalno ne obstajajo niti jih ne znamo izmeriti...

Pri elektromagnetnem polju mikrotrakastega voda obstaja svetla izjema. Ko je podlaga zrak oziroma je gornji polprostor zapolnjen z enako snovjo kot podlaga, je dielektrik povsem homogen. V takšnem mikrotrakastem vodu je osnovni rod vedno TEM ne glede na frekvenco.

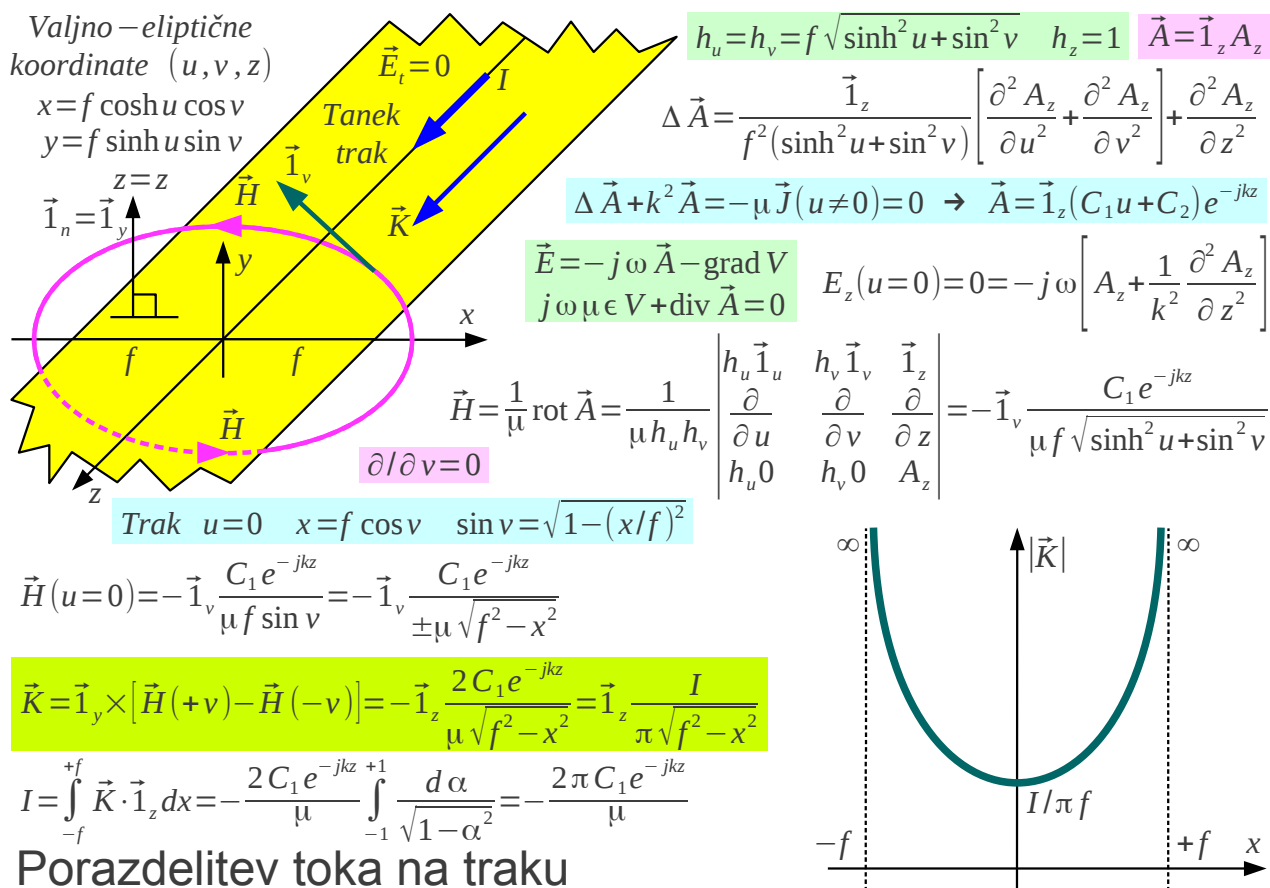
Z višanjem frekvence lahko prav v vsakem prenosnem vodu vzbudimo višje rodove, ki običajno niso TEM. V mikrotrakastem vodu se višji rodovi pojavijo takrat, ko najmanj ena od prečnih izmer $h, w, t > \lambda/2$ preseže polovico valovne dolžine v podlagi $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$. Z večanjem prečnih izmer postane nezanemarljivo tudi sevanje mikrotrakastega voda, ki se lahko obnaša kot antena.

Trakasti vodi na tiskanem vezju imajo večje izgube od drugih električnih vodov primerljivega prereza. Poleg izgub zaradi upornosti vodnikov lahko izgube dodaja tudi izolirna podlaga, ki ni izdelana iz najprimernejšega dielektrika. Povrhu dielektrik znižuje karakteristično impedanco voda Z_K in posredno povečuje delež izgubljene moči v vodnikih. Trakasti vodniki niso najprimernejša oblika za elektromagnetno polje. Končno, način pritrditve trakastih vodnikov na podlago še dodatno povečuje izgube.

Običajen vitroplast (G10 ali FR4) je izdelan iz steklenih vlaken, ki so zlepljena v laminat s pomočjo epoksidne smole. Glede na razmerje količin vlakna/smola se relativna dielektričnost vitroplasta giblje v območju $\epsilon_r = 4...5$. Tangens izgubnega kota takšnega dielektrika je okoli $\tan \delta = 0.02$ v širokem razponu frekvenc. Visoke dielektrične izgube pomenijo tudi znatno upadanje relativne dielektričnosti $\epsilon_r = \epsilon_r(f)$ s frekvenco.

Namenski mikrovalovni teflonski laminati so prav tako ojačani z vlakni. Glede na razmerje vlakna/teflon se relativna dielektričnost podlage giblje v območju $\epsilon_r = 2.2...2.5$. Tangens izgubnega kota teflonskega dielektrika je okoli $\tan \delta = 0.001$ v področju mikrovalov. Najsodobnejši laminati skušajo združiti oboje, majhne dielektrične izgube teflona in mehansko trdnost vitroplasta v istem izdelku.

Trakast vodnik naj bi bil na prvi pogled ugodnejši od vodnika krožnega prereza, ker je pri istem preseku obseg traku večji, kar pomeni širši sloj kože, po kateri teče visokofrekvenčni tok. Žal se pri visokih frekvencah tok ne izrine samo na površino vodnika (kožni pojav) pač pa tudi proti robovom traku. Pojav si je najlažje ogledati na dolgem, osamljenem kovinskem traku iz dobrega prevodnika širine $2f$ v smeri osi x in zanemarljive debeline v smeri osi y z izmeničnim tokom I v smeri osi z :



Kovinski trak najlažje opišemo v valjno-eliptičnih koordinatah (u, v, z) , kjer goriščnico elipse priredimo širini traku. Glede na vzbujanje mora biti vektorski potencial \vec{A} usmerjen v smer z . Najpreprostejša rešitev v valjno-eliptičnih koordinatah je potujoči val v smeri osi z , kar daje odvisnost e^{-jkz} . Vektorski potencial \vec{A} ne sme biti funkcija koordinate v , sicer ne moremo zadostiti pogoju $\vec{1}_n \times \vec{E} = 0$ oziroma $\vec{E}_t = 0$ kjerkoli na površini traku. Predlagana rešitev valovne enačbe v okolici traku $u \neq 0$ dopušča preprosto (linearno) odvisnost od koordinate u .

Električno polje $\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \text{grad } V$ izračunamo iz vektorskega potenciala tako, da skalarni potencial $V = j/(\omega\mu\epsilon) \text{div } \vec{A}$ nadomestimo skladno z Lorentzovo izbiro. Predlagana rešitev za vektorski potencial daje

$E_v = 0$ (ker ni odvisnosti od v) in hkrati $E_z = 0$, torej ni tangencialne komponente električnega polja nikjer na površini traku.

Magnetno polje $\vec{H} = 1/\mu \operatorname{rot} \vec{A}$ izračunamo iz vrtinčena vektorskega potenciala. Razlika magnetne poljske jakosti tik nad $\vec{H}(u \rightarrow 0, +v)$ in tik pod $\vec{H}(u \rightarrow 0, -v)$ vodnikom preko prestopnih pogojev določa gostoto ploskovnega toka $\vec{K}(x)$ v vodniku. Tok I v vodniku dobimo tako, da seštejemo (integriramo) ploskovni tok \vec{K} po celotni širini vodnika.

Rešitev naloge pokaže, da tok ni enakomerno razporejen po širini traku. Gostota ploskovnega toka $\vec{K}(x=0)$ je najnižja sredi traku in narašča vse do neskončnosti $\vec{K}(x=\pm f) \rightarrow \infty$ proti robovom. Visoka gostota ploskovnega toka \vec{K} tik ob robovih trakastega vodnika pomeni zelo velike izgube. Enakovreden pojav kot za osamljen trakast vodnik upravičeno pričakujemo tudi za vse ostale primere z dvema ali več trakastimi vodniki.

V neskončno tankem traku $t \rightarrow 0$ iz kovine s končno prevodnostjo $\gamma < \infty$ so izgube neskončno velike. Čeprav je debelina traku na tiskanem vezju $t \gg \sqrt{2/\omega\mu\gamma}$ običajno precej večja od vdorne globine, ima t še vedno velik vpliv na izgube zaradi izriva toka na robove traku. Pri določanju karakteristične impedance Z_K smemo debelino traku $t \rightarrow 0$ marsikdaj zanemariti, pri določanju izgub pa moramo debelino traku t dosledno upoštevati!

V laminatu za tiskana vezja mora biti kovinska folija dobro pritrjena na izolirno podlago, da prenese toploto spajkanja in nato nosi vgrajene elektronske gradnike. Na strani podlage je kovinska folija zato namenoma hrapava, da pri stiskanju laminata smola prodre v luknjice in zagradi za izbokline iz kovine. Ker je hrapavost večja od vdorne globine mikrovalov v kovino, hrapavost podaljšuje pot toka po koži in znatno povečuje izgube v kovinskih vodnikih na mikrovalovnih frekvencah.

Zunanja obdelava, srebrenje ali zlatenje kovinske folije na obeh straneh tiskanega vezja prav nič ne pripomorejo k zmanjšanju izgub mikrotrakastega voda. Magnetno polje \vec{H} je najmočnejše v podlagi tik pod vodniki. Torej je gostota ploskovnega toka \vec{K} največja prav na hrapavih površinah, ki končnemu uporabniku laminata niso dostopne.

Hrapavost bakrene folije je na običajnem vitroplatu tako visoka, da se izgube zaradi daljše poti toka v vodnikih povečajo tudi za faktor petkrat. Izgube v bakrenih vodnikih so tedaj v istem velikostnem razredu kot

dielektrične izgube vitroplasta. Skupaj ima mikrotrakasti vod na vitroplastu za en velikostni razred (desetkrat) višje slabljenje od koaksialnega kabla primerljivega prereza. Namenski mikrovalovni laminati uporabljajo manj hrapav baker za nižje izgube, a žal tudi slabšo mehansko trdnost.

Glavni namen tega zadnjega poglavja v knjigi je združiti vse pridobljeno znanje elektrodinamike za reševanje resničnih nalog, ki daleč presegajo dopustno zahtevnost šolskega zgleda. Dober inženir se mora hitro odločiti, kaj bo rešil z analitsko izpeljavo, kaj s približki, kaj z računalniško simulacijo, kaj z utemeljeno oceno in kaj bo izmeril v poskusih. Ni vse zlato, kar se sveti niti kar je objavljeno v priznanih revijah in knjigah. Nazoren primer so različne in nezdružljive definicije karakteristične impedance vodov, ki niso **TEM** !

Trakasti vodniki najrazličnejših izvedb so danes prisotni v vseh tiskanih vezjih kot tudi znotraj monolitnih integriranih vezij. Prav nič ne kaže, da bi se v bodočnosti lahko izognili trakastim vodnikom v telekomunikacijski in drugi elektroniki. Učinkovita uporaba trakastih vodov zahteva najprej dobro poznavanje osnovnih pojmov, kot so karakteristična impedanca Z_K , fazna hitrost v_f oziroma skupinska hitrost v_g valovanja, slabljenje itd.

Nato moramo poznati še posebnosti samih trakastih vodov z zahtevno geometrijo, nehomogenim dielektrikom, vzdolžnimi komponentami polja, višjimi rodovi in sevanjem ne glede na to, če je slednje zaželeno ali ne. Vse skupaj izgleda strahotna težava za črnogledega računalniškega inženirja, ki bi rad zvišal frekvenco ure (takta) svojih logičnih vezij. Mogoče je napaka v šolanju, saj so računalniškega inženirja učili samo o parazitnih kapacitivnostih, parazitnih induktivnostih in številnih drugih nadlogah resničnih vezij tega sveta, ki samo kazijo sanje prečudovitih digitalij.

Dober inženir vidi nalogo drugače. Resničnost je analogna in ni nujno sovražna. Svojemu črnogledemu sodelavcu bo takoj razložil, da je energija v kondenzatorjih ali drugačnih reaktivnih gradnikih nujno potrebna za hranjenje informacije v kateremkoli računalniku. Kapacitivnost torej nikakor ni parazitna, pač pa je nujno potrebna za delovanje naprave!

Ni nujno, da trakaste vode katerekoli izvedbe uporabljano samo kot prenosne vode. Iz trakastih vodov različnih izvedb se da na istem tiskanem vezju izdelati tudi tuljave, kondenzatorje, transformatorje impedance, zakasnilne vode, delilnike moči, smerne sklopnike, frekvenčna sita vseh možnih izvedb in povrh še antene! Edina omejitev je domiselnost načrtovalca, snovi pa je za skromen učbenik elektrodinamike daleč preveč...