

Osnove mikrovalovne tehnike

Tadej Strah

19. januar 2023

Izvedeno 3. november

1 Izvor mikrovalov

Mikrovalovi so EM valovanje z valovno dolžino nekaj cm in frekvenco nekaj GHz. Kot izvor mikrovalov služijo klistroni; to so elektronke, ki imajo za pospeševalno mrežico še dve mrežici, povezani s poloma resonančne votline. Lastno nihanje elektromagnetnega polja v resonančni votlini ustvarja med mrežicama izmenično napetost, ki vpadni curek elektronov hitrostno modulira. V curku tako nastanejo razredčine in zgoščine. Za mrežicama resonančne votline je odbojna elektroda, ki curek elektronov odbije. Če je odbojna napetost pravilno izbrana, se hitrostno moduliran curek elektronov vrne med mrežici s tako fazo, da električno polje gruč elektronov ojači lastno nihanje elektromagnetnega polja v resonančni votlini in klistron deluje kot oscilator. Resonančni pogoj je izpolnjen pri več diskretnih vrednostih odbojne napetosti - govorimo o več rodovih klistrona.

2 Širjenje mikrovalov

Za strogo usmerjanje širjenja EM valovanja po prostoru uporabljamo valovode - take in drugačne oblike kovinskih cevi, kablov..., ki omejuje širjenje valovanja.

V frekvenčnem spektru mikrovalov so v takih vodnikih upornost, prevodnost, kapacitivnost (C) in induktivnost (L) zvezno porazdeljene po dolžini.

V idealiziranem vodniku (brez prevodnosti in upornosti) dobimo valovni enačbi za napetost (in analogno za tok):

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2}{\partial t^2}.$$

Če vodnik napajamo z izmenično sinusno napetostjo in tokom $u = U \exp(i\omega t)$, po nekaj računanja pridemo do sledečih zvez.

Amplituda nihanja napetosti je oblike

$$u(x, t) = A \exp(\gamma x + i\omega t) + B \exp(-\gamma x + i\omega t) = (U_i + U_r) \exp(i\omega t),$$

kjer je $\gamma = \alpha + i\beta = nR/2\omega L + G/2\omega C + i\omega\sqrt{LC}$, U_i in U_r pa sta amplitudi vpadnega oz. odbitega valovanja. Za tok pa velja $I(x) = \frac{1}{Z} \frac{\partial U}{\partial x}$

V splošnem imamo v vodniku torej stoječe valovanje. Z Z_0 označimo karakteristično impedanco voda, z Z_R pa impedanco bremena. Iz robnih pogojev določimo konstanti A in B ; sedaj lahko izračunamo impedanco Z na mesti x kot:

$$Z = \frac{U}{I} = Z_0 \left(\frac{Z_R + Z_0 \tanh \gamma x}{Z_0 + Z_R \tanh \gamma x} \right).$$

To enačbo lahko uporabimo tudi za določanje impedance bremena Z_R iz poznane vrednosti Z .

Pogosto to določimo preko meritve vrednosti minimalne impedance vodnika $Z_{min} = |U_{min}/I_{min}|$, ki nastopi v oddaljenosti x_{min} od porabnika.

Uvedimo refleksijski koeficient r_R , ki je definiran kot razmerje amplitud odbitega in vpadnega vala pri x_0 , torej na bremenu

$$r_R = \frac{U}{I} \Big|_{x_0} = \frac{B}{A} = \frac{Z_R - Z_0}{Z_0 + Z_R}.$$

V splošnem je refleksijski koeficient kompleksno število. Če je vod zaključen s karakteristično impedanco $Z_R = Z_0$, odboja ni in je $r_R = 0$, če pa je vod kratko sklenjen se vse valovanje odbije in je $r_R = 1$.

Odslej bomo računali v približku $R = G = \alpha = 0$, kar pomeni, da ima konstanta širjenja γ od 0 različno samo imaginarno komponento $\gamma = i\beta = i\omega\sqrt{LC}$.

Značilna in lahko merljiva količina za stoječe valovanje v vodniku je razmerje med minimalno in maksimalno amplitudo napetost, ki ga imenujemo ubranost:

$$s = \frac{|U_{min}|}{|U_{max}|} = \frac{1 - |r_B|}{1 + |r_B|}.$$

Če je vod zaključen z naravnim bremenom ni odboja in je $s = 1$, če pa je vod kratko sklenjen se odbije vse valovanje in je ubranost $s = 0$.

x_{min} določimo z dvojno meritvijo: najprej izmerimo krivuljo ubranosti za vodnik, ki je zaključen z bremenom, nato pa še vodnik, ki je kratko sklenjen. Ker je v slednjem primeru $U_{min} = 0$ pri $x = 0$, pri vodniku, ki je zaključen z bremenom pa je $x_{min} \neq 0$, se opazovani minimum ubranosti premakne proti bremenu ravno za vrednost x_{min} . Če je premik večji od $\lambda/4$ izgleda, kot da se je minimum premaknil proti generatorju.

Če Z_R zapišemo po komponentah, sledi $Z_R = \xi_R + i\eta_R$. Velja

$$\frac{\eta_R}{Z_0} = \frac{(s^2 - 1) \tan \beta x_{min}}{1 + s^2 \tan^2 \beta x_{min}}$$

in

$$\frac{\xi_R}{Z_0} = \left(1 - \frac{\eta_R}{Z_0} \tan \beta x_{min} \right) s.$$

3 Frekvenca mikrovalov

Pri vstopu v valovod se valovna dolžina spremeni in je enaka

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}},$$

kjer je a daljša stranica preseka valovoda. Valovno dolžino lahko izmerimo s prostorsko meritvijo stoječega valovanja; iskano frekvenco pa dobimo iz izraza

$$\nu = \frac{c\sqrt{\lambda^2 + 4a^2}}{2a\lambda'}$$

Lahko pa frekvenco mikrovalov merimo tudi z resonatorjem, ki ga vgradimo v valovod. Resonator uglašimo na merjeno frekvenco npr. s premikanjem dna. Ko je resonator uglasen, se tudi v njem pojavi valovanje, toda za to se porabi del moči valovanja v valovodu.

4 Merjenje moči mikrovalov

Z bolometrom izmerimo moč P_m ; torej absorbiran del dejanske vpadne moči P . Del valovanja se odbije, zato velja zveza

$$P_m = P(1 - |r_R|^2),$$

kjer je r_R refleksijski koeficient, ki je povezan z ubranostjo

$$|r_R|^2 = \left(\frac{1 - s}{1 + s} \right)^2.$$

Bolometri so povečini dveh vrst:

- Bareterji: sestavljeni so iz tanke platinaste žičke. Zveza med sprejeto močjo in spremembo upornosti je linearna. So zelo občutljivi na preobremenitve. Občutljivost: 3-12Ω/mW
- Termistorji: izdelani so iz polprevodnikov (nikljevi ali magnezijevi oksidi), ki so zaradi boljše prevodnosti pomešani z bakrenim prahom. Zveza med absorbirano močjo in spremembo upornosti ni popolnoma linearna. Niso občutljivi na preobremenitve. Občutljivost 50 - 100Ω/mW.

5 Določanje impedance bremena iz meritve ubranosti

Sliko valovanja posnamemo z merilno sondo, ki jo lahko premikamo vzdolž valovoda. Meritev je popačena, saj gre signal iz sonde preko diode. Da določimo ubranost, moramo razmerje minimalnega in maksimalnega odčitka h_{min} in h_{max} , koreniti:

$$s = \frac{|U_{min}|}{|U_{max}|} = \sqrt{\frac{h_{min}}{h_{max}}}.$$

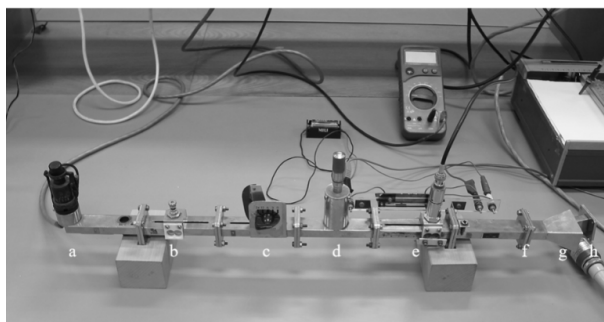
Za določitev x_{min} in s , ki ju rabimo za izračun impedance bremena Z_R , z merilnim vodom najprej posnamemo sliko valovanja pri bremenu z neznano impedanco. nato breme odstranimo, valovod zaključimo kratkostično ter ponovno posnamemo sliko valovanja. Iz obeh krivulj določimo ubranost s . Da je meritev čim natančnejša, odčitamo razdaljo med dvema minimumoma na krivulji, ki opisuje kratko sklenjen valovod. Ta razdalja je enaka polovici valovne dolžine valovanja v valovodu. Razlika med lego izbranega minima krivulje, ki opisuje valovod z bremenom, in ustreznega minima krivulje, ki opisuje kratko sklenjen valovod, je iskani x_{min} . Ker sta λ' in x'_{min} merjena v istih enotah, velja

$$\frac{x'_{min}}{\lambda'} = \frac{x_{min}}{\lambda} = \frac{\beta x_{min}}{2\pi},$$

od koder sledi, da je $\beta x_{min} = 2\pi \frac{x_{min}}{\lambda'}$.

6 Potrebščine

- Klistron
- Valovod - pravokotna cev ((10.0±0.05)mm x (22.7±0.05)mm) z ubiralko in resonatorjem
- Bolometer, wattmeter
- Antena, linearni enkoder, osciloskop



Slika 1: Elementi mikrovalovnega sistema. a) izvor, b) ubiralka, c) dušilka, d) resonator, e) merilni vod, f) kratkostična stena, g) antena, h) bolometer.

7 Naloga

1. Prilagodite valovod na generator mikrovalov
2. Izmerite frekvenco valovanja s pomočjo v valovod vgrajenega resonatorja.
3. Posnemite rodove klistronovega delovanja v odvisnosti od odbojne napetosti.
4. Izmerite moči, ki jih porablja termistor v vrhovih najmočnejših rodov.
5. Z osciloskopom posnemite krivulji ubranosti za valovod, ki je zaključen z bremenom, in za kratko sklenjeni valovod.

8 Meritve, obdelava in rezultati

Eksperimentalno postavitev vidimo na grafu 1.

Prižgemo napajanje klistrona in počakamo, da se segreje. Signal iz merilne sonde opazujemo na osciloskopu in s spreminjanjem odbojne napetosti U_o poiščemo enega od maksimumov izmerjenega odziva (izberemo $U_o \approx 223.9V$).

Merilna sonda ni nič drugega kot preprosta antena, katere signal usmerimo z diodo in ga časovno povprečimo. S tem dobimo ovojnico oz. kar amplitudo signala.

S pomočjo ubiralke lahko valovodu spreminjamo kapacitivnost in s tem parametre širjenja valovanja. Na valovod namestimo naravno breme (odprto anteno) in s premikanjem ubiralke in popravki odbojne napetosti poiščemo maksimum signala. S tem smo valovod prilagodili na valovanje, ki ga v maksimumu oddaja klistron.

Na valovodu je nameščen resonator s spremenljivim volumnom (torej s spremenljivo kapacitivnostjo). Ko pride do resonance se v resonatorju absorbira največ valovanja; amplituda signala se občutno zmanjša. Resonanco izmerimo pri legi mikrometrskega vijaka (415 ± 5), kar s pomočjo umeritvene tabele linearno interpoliramo v vrednost $\nu = (8.425 \pm 0.025)GHz$.

Z umerjenim valovodom poiščemo vse rodove klistrona, ki so nam dosegljivi z izbranim napajalnikom.

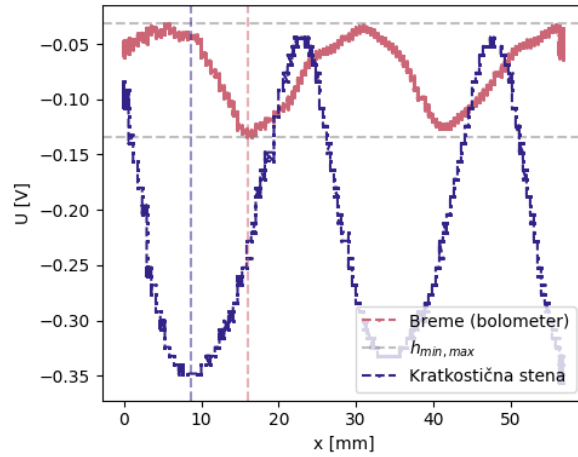
Zapišemo si izmerjene napetosti, potem pa na valovod namestimo bolometer in pri istih odbojnih napetostih pomerimo še prenešeno moč. Rezultate vidimo v tabeli 1

Za nadaljevanje nastavimo odbojno napetost na najmočnejši rod (torej $U_o = -358.7 V$). Prvi kanal osciloskopa priklopimo na drsnik merilne linije (napetost na drsniku je sorazmerna legi), z drugim kanalom pa merimo amplitudo signala merilne sonde.

Hod drsnika je $l_s = (56.8 \pm 0.1)mm$.

N	$U_o (\pm 0.2)$ [V]	$P_m (\pm 0.02)$ [mW]	$P (\pm 0.03)$ [mW]
1	-28.3	0.15	0.17
2	-52.6	0.30	0.34
3	-89.5	0.60	0.68
4	-144.5	1.05	1.20
5	-224.7	1.65	1.88
6	-358.7	1.75	2.00

Tabela 1: Meritve odbojnih napetosti in moči posameznih rodov klistrona. Napake so ocenjene na podlagi ločljivosti izpisa merilnih instrumentov.



Slika 2: Meritev amplitude stoječega valovanja z različnimi zaključki valovoda. Vodoravni črtkani črti označujeta odčitka h_{min} in h_{max} , vodoravni pa odčitka za določitev x'_{min} .

Meritev izvedemo tako, da nastavimo trigger mode na *Normal* z nivojem proženja malo nad signalom pri skrajno levi legi vozička. Ob ustrezni časovni skali na osciloskopu in ustrezni hitrosti premikanja sonde po vodilu posnamemo odvisnost amplitude valovanja v valovodu od lege. Meritev ponovimo s kratkostično steno na koncu valovoda.

Iz meritve z nameščenim bremenom (bolometrom) določimo ubranost.

$$s = \sqrt{\frac{h_{min}}{h_{max}}} = (0.48 \pm 0.03).$$

Iz ubranosti izračunamo refleksijski koeficient

$$|r_R|^2 = \left| \frac{1-s}{1+s} \right|^2 = (0.12 \pm 0.02).$$

Po enačbi $P = P_m / (1 - |r_R|^2)$ izračunamo iz izmerjene absorbirane moči dejansko moč mikrovalov in dodamo stolpec v tabli 1.

Iz slike valovanja 2 preberemo valovno dolžino v valovodu $\lambda' = (25.1 \pm 0.1)$ mm. Z upoštevanjem dolžine daljše stranice valovoda $a = 22.7$ mm izračunamo pravo valovno dolžino

$$\lambda = \lambda' / (\sqrt{1 + (\lambda'/2a)^2}) = (2.01 \pm 0.07) \text{ mm}$$

Zamik minimumov ob različnih zaključitvah x'_{min} določimo iz slike 2, in sicer $x'_{min} = (7.3 \pm 0.2)$ mm.

Naprej izračunamo

$$\beta x_{min} = 2\pi \frac{x'_{min}}{\lambda'} = 1.83 \pm 0.05.$$

Sedaj lahko izračunamo še na karakteristično upornost normirani komponenti impedance;

$$\frac{\eta_R}{Z_0} = \frac{(s^2 - 1) \tan \beta x_{min}}{1 + s^2 \tan^2 \beta x_{min}} = 0.62 \pm 0.08$$

in

$$\frac{\xi_R}{Z_0} = \left(1 - \frac{\eta_R}{Z_0} \tan \beta x_{min} \right) s = 1.71 \pm 0.07$$

Za končno impedanco pa potem dobimo

$$\left| \frac{Z_R}{Z_0} \right| = \sqrt{(\xi_R/Z_0)^2 + (\eta_R/Z_0)^2} = 1.8 \pm 0.1.$$