

ELEKTROKEMIJSKO IMPULZNO NANAŠANJE BAKRA V PROCESU IZDELAVE TISKANIH VEZIJ

Aleš Leban¹, Danijel Vončina¹, Ciril Zevnik², Janez Fister³

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija

²Leonardo d.o.o., Kranj, Slovenija

³Intec Tiv d.o.o., Kranj, Slovenija

Ključne besede: tiskano vezje, skožnja luknja, impulzno nanašanje, transport snovi, gostota toka, tokovni vir

Izvleček: Miniaturizacija električnih naprav narekuje razvoj večplastnih elektronskih tiskanih vezij z visoko integracijo komponent, zaradi česar se zmanjšujeta širina povezav in premer skožnjih lukenj na tiskanini. Nanašanje bakra na ta mesta postaja v procesu izdelave tiskanega vezja vedno bolj zahteven postopek, od katerega je odvisna kakovost in cena izdelka. Zlasti v primeru dimenzijsko zahtevnih oblik, kjer s klasičnim postopkom nanašanja ne moremo izpolniti zahtev kupca, se zato poslužujemo nove tehnologije elektrokemijskega impulznega nanašanja. Njene prednosti se kažejo v enakomernem nanosu in v njegovih izboljšanih mehanskih lastnostih. To dosežemo z izbiro ustreznih parametrov toka, preko katerih lahko vplivamo na kinetiko elektrodskih reakcij na način, ki je v članku principiarno opisan. Nezaželen produkt napajanja elektrokemijskega procesa z impulznim tokom je kapacitivni vpliv dvojnega sloja, ki je odvisen od dinamike tokovnih impulzov. Zgolj z modifikacijo klasičnega enosmernega vira ne moremo zagotoviti ustrezne dinamike toka, zato smo predlagali novo topologijo impulznega tokovnega vira, na podlagi katere smo izdelali eksperimentalni model. Ob koncu so zbrani doseženi rezultati, ki omogočajo primerjavo enosmernega in impulznega postopka nanašanja bakra na zahtevnejša tiskana vezja.

Pulse plating in PCB manufacturing

Key words: PCB, via, pulse plating, mass transport, current distribution, pulse current source

Abstract: The continuing trend of miniaturization is driving PCB design more and more towards HDI and multi-layer boards. This means finer tracks, smaller holes and higher aspect ratios. As a consequence, the conventional acid-copper electroplating becomes very demanding and affects the performance and the price of the finished board. The ability to plate sophisticated boards is given by the use of pulse current instead of a DC. Since the pulse plating process takes place at higher current densities, a fine grain structure of the deposit can be obtained and hence the deposit porosity is reduced. Uniform deposit distribution is another advantage offered by the pulse technology. It should be noted, that current "shaping" represents only one way of influencing the complicated system which contains many other process parameters. To understand the interdependence of these parameters with pulse parameters qualitatively, a basic mass transport and its influence to the current distribution are described. Charging and discharging of the double layer, which is a side effect of the pulse plating, represents the main limitation of arbitrary pulse parameters setting. It can be reduced providing sufficient slopes of current pulses. Considering this, we also proposed a new topology of pulse current source and built an experimental model. At the end, the results of copper deposition obtained under bipolar pulse current conditions are collected and compared to the results obtained using conventional technology.

1. Uvod

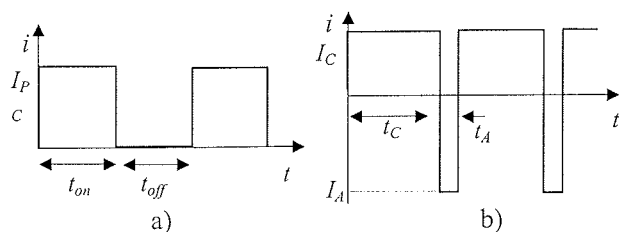
Elektrokemijsko nanašanje kovin je proces, ki zahteva temeljito interdisciplinarno poznavanje metalurgije, kemije in močnostne elektronike. Prav slednja je v preteklem desetletju bistveno pripomogla k novim spoznanjem na področju nanašanja kovin na osnovne materiale s pomočjo moduliranega (impulznega) toka. Prednosti impulzne tehnologije nanašanja pred nanašanjem z enosmernim tokom se kažejo v izboljšanih mehanskih lastnostih in v enakomerni porazdelitvi kovinskega nanosa po površini /1-4/. Tehnologija je v zadnjih letih deležna intenzivnega razvoja, kar je posledica stopnjevanja zahtevnosti industrijskih izdelkov. Posledično s klasičnim enosmernim postopkom nanašanja kovin ni mogoče zadostiti vsem postavljenim zahtevam. S tovrstnimi problemi se soočamo tudi v proizvodnji tiskanih vezij, kjer se zaradi visoke integracije elektronskih komponent na tiskanem vezju zmanjšujeta širina vezi in premer skožnjih lukenj, debelina vezja pa se povečuje. Izziv v procesu izdelave tiskanih vezij je nanašanje bakra v skožnje luknje s premerom, ki je manjši od 200 μm , in z razmer-

jem med debelino plošče in premerom skožnje luknje (AR - Aspect Ratio) vse tja do 20.

Pri nanašanju z enosmernim tokom je namreč porazdelitev gostote toka in s tem debelina nanosa proti sredini luknje izrazito neenakomerna. V primeru zahtevnejših tiskanih vezij so proizvajalci prisiljeni zmanjšati amplitudo toka, s katerim poteka proces bakrenja, in na ta način zagotoviti predpisano debelino (20 μm) kovinskega nanosa znotraj skožnjih lukenj. Ukrep je resda enostaven, vendar vpliva na količino dnevne proizvodnje, saj se skladno z zmanjšanjem amplitude toka podaljša trajanje postopka nanašanja.

Napredek na področju nanašanja kovin zagotavlja tehnologija nanašanja z impulznim tokom. Slika 1 kaže primer preprostega (katodnega) tokovnega impulza (a) in obliko impulza z anodno polarizacijo (b), kakršen se je uveljavil pri sodobnih procesih nanašanja bakra.

Kot bomo videli v nadaljevanju, lahko z amplitudnimi in časovnimi parametri toka vplivamo na porazdelitev gostote toka po površini tiskanega vezja in s tem na enakomernost ko-



Slika 1. Oblika impulznega toka: a) preprosta, b) z anodno polarizacijo

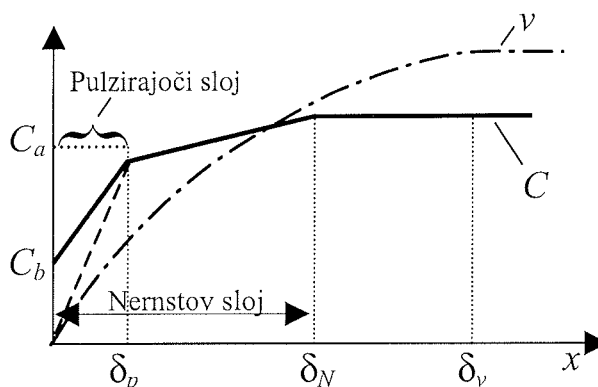
vinskega nanosa. Zaradi številnih vplivnih veličin, ki nastopajo v procesu elektrokemijskega nanašanja (temperatura, vrsta elektrolita, vrsta kovine, intenzivnost mešanja, koncentracija organskih dodatkov...), je optimalne vrednosti parametrov smiselno določiti iz serije poskusov in meritev. Zato mora biti impulzni tokovni vir, s katerim napajamo proces, sposoben generirati tokovne impulze s parametri, nastavljivimi v širokem območju.

2. Fizikalno ozadje impulznega nanašanja kovin

Porazdelitev gostote toka na posameznih mestih tiskanega vezja (le-to v procesu nanašanja tvori katodo elektrolitske celice), je odvisna od geometrije sistema, prevodnosti elektrolita in elektrod ter od kinetike elektrodne reakcije. Na slednje imamo možnost vplivati preko parametrov električnega toka. Pri tem igra ključno vlogo poznavanje masnega transporta snovi, ki v elektrolitu poteka na tri načine: s konvekcijo, difuzijo in z migracijo. Za migracijo predpostavljamo, da bistveno ne prispeva k skupnemu transportu, zato jo bomo v nadaljevanju zanemarili. Transport snovi s konvekcijo poteka pod vplivom zunanega mešanja elektrolita. Zaradi njegove viskoznosti, se ob katodi formira hidrodinamični sloj debeline δ_v , znotraj katerega hitrost gibanja elektrolita v upada (slika 2). Kovinski ioni tik ob površini katode se izločajo v obliki kovine, kar povzroči nastanek koncentracijskega gradienta (koncentracija ionov v smeri proti katodi pada). Transport snovi znotraj hidrodinamičnega sloja zato ne poteka zgolj s konvekcijo, temveč tudi z difuzijo. Za lažje razumevanje je smiselno razmere v okolici katode idealizirati, zato vpeljemo fiktivni parameter, Nernstov difuzijski sloj, debeline δ_N . Na ta način smo predpostavili mirujoč (stacionaren) difuzijski sloj, znotraj katerega poteka transport snovi zgolj z difuzijo, izven tega sloja pa prevladuje transport snovi s konvekcijo. Pravkar opisno dogajanje ustreza razmeram pri nanašanju z enosmernim tokom.

Sedaj predpostavimo napajanje procesa z impulznim tokom, pri čemer naj ima tok obliko pravokotnih impulzov trajanja t_{on} in s pavzo t_{off} (slika 1a). V tem primeru se znotraj Nernst-ovega difuzijskega sloja na strani katode formira dodaten pulzirajoči difuzijski sloj debeline δ_p , ki je precej tanjši od stacionarnega sloja. Koncentracija ionov znotraj novonastalega sloja pulzira s frekvenco tokovnih impulzov, minimalno vrednost na površini katode pa doseže ob kon-

cu tokovnega impulza. Potek koncentracije kovinskih ionov C v odvisnosti od razdalje x od katode pri nanašanju z impulznim tokom kaže slika 2.



Slika 2: Potek koncentracije kovinskih ionov v odvisnosti od razdalje od katode

Nagib premice v pulzirajočem sloju je sorazmeren amplitudi impulznega toka

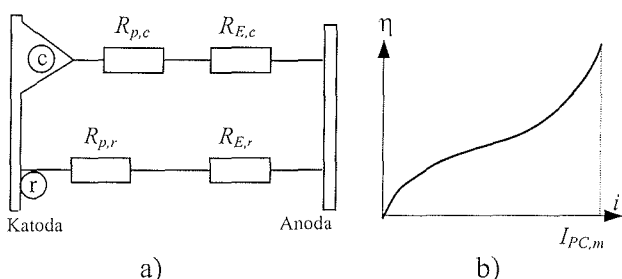
$$I_{PC} = -nFD_a \frac{C_a - C_b}{\delta_p}, \quad (1)$$

pri čemer je n število elektronov na izločeni ion kovine, F je Faradeyeve konstanta, D_a pa je difuzijski koeficient. Na enak način lahko iz nagiba premice v stacionarnem difuzijskem sloju določimo srednjo vrednost impulznega toka, ki je ekvivalentna amplitudi toka pri nanašanju z enosmernim tokom. Amplitudi toka, pri kateri pade koncentracija ionov ob katodi na nič ob koncu tokovnega impulza, pravimo mejna vrednost toka $I_{PC,m}$. Iz slike 2 je razvidno, da je nagib premice v stacionarnem sloju, ki je značilen za nanašanje z enosmernim tokom, mnogo manjši od nagiba premice v pulzirajočem sloju ($\delta_p \ll \delta_N$). Zato je lahko amplituda tokovnih impulzov temu ustrezno večja, kar se odraža v finostrukturi in posledično v izboljšanih mehanskih lastnostih kovinskega nanosa. Pri tem velja omeniti, da se trajanje impulznega postopka v primerjavi s klasičnim načinom nanašanja ne skrajša, saj srednja vrednost impulznega toka, od katere je odvisna hitrost izločanja kovine, ne sme preseči vrednosti, ki je določena z nagibom premice v stacionarnem sloju.

Dodatna prednost impulznega nanašanja, ki jo s pridom izkoriščamo v procesu izdelave tiskanih vezij, je možnost vplivanja na debelino pulzirajočega sloja (δ_p) in s tem, kot bomo videli v nadaljevanju, na porazdelitev gostote toka. Kako globoko se bo pulzirajoči sloj razširil v območje stacionarnega sloja, je namreč odvisno od trajanja tokovnega impulza t_{on}

$$\delta_p = \sqrt{2D_A t_{on}}. \quad (2)$$

Problematiko neenakomerne porazdelitve gostote toka po površini katode si ponazorimo s sliko 3a, ki ilustrira model upornosti v galvanski kopeli. Katoda je namenoma nepravilnih oblik.

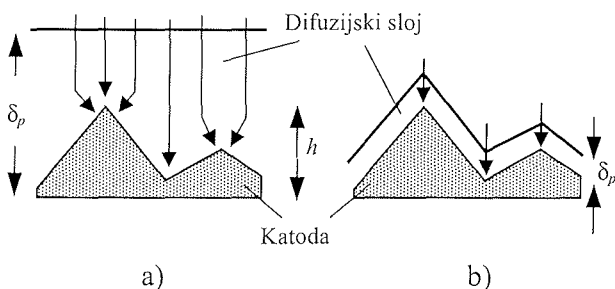


Slika 3: a) Model upornosti v galvanjski kopeli; b) polarizacijska krivulja

R_E je upornost elektrolita, R_p pa je katodna polarizacijska upornost na stiku katoda-elektrolit, ki je definirana z naklonom polarizacijske krivulje. Indeks »c« oz. »r« se nanašata na različni mesti na površini katode. Porazdelitev gostote toka izrazimo z Wagnerjevim številom (Wa)

$$Wa = \frac{R_P}{R_E} = \kappa \frac{d\eta}{di} \frac{1}{l} \quad (3)$$

Večje kot je število Wa , enakomernejša je porazdelitev toka. V izrazu (3) je κ specifična prevodnost elektrolita, l pa je karakteristična dolžina galvanjske kopeli. V odvisnosti od razmerja upornosti R_p in R_E ločimo tri karakteristične primere porazdelitve toka: primarna, sekundarna in terciarna tokovna porazdelitev. Pri impulznem nanašanju težimo k terciarni tokovni porazdelitvi, za katero je značilno, da je $R_E \ll R_p$. Slednje zagotovimo tako, da proces napajamo s tokom, katerega amplituda je reda velikosti mejne vrednosti toka $I_{PC,m}$. V tem primeru poteka ob katodi transport snovi z difuzijo, zato porazdelitev toka ni odvisna zgolj od kriterija (3), ampak tudi od debeline difuzijskega sloja. S tega stališča ločimo dva karakteristična primera, ki sta prikazana na sliki 4. V prvem (slika 4a) gre za tako imenovan mikroprofil, pri katerem je debelina pulzirajočega sloja δ_p večja od karakteristične dimenzije profila h (slika 4). Izpostavljeni deli katode se nahajajo na mestu difuzijskega sloja z večjo koncentracijo ionov, zato je gostota toka na teh mestih večja. Tokovnice v obliki puščic na sliki 4 prikazujejo porazdelitev toka vzdolž profila katode.

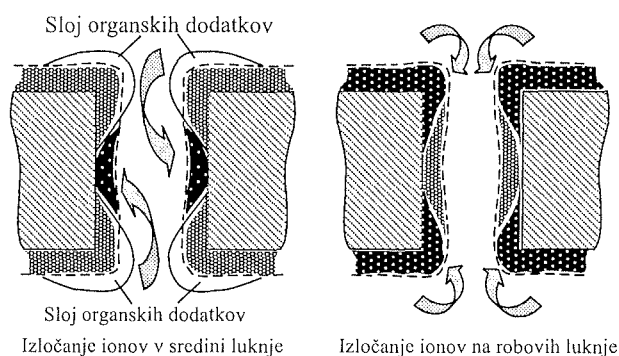


Slika 4: Vpliv difuzijskega sloja na terciarno porazdelitev toka: a) mikroprofil, b) makroprofil

Tipičen primer mikroprofila imamo pri nanašanju bakra v skožnje luknje z enosmernim tokom, in sicer, ko je dimenzija skožnjih lukenj reda velikosti debeline difuzijskega slo-

ja. Le-tega pa določajo hidrodinamične razmere v galvanjski kopeli. Situacijo, ko je debelina difuzijskega sloja manjša od karakteristične dimenzije profila, pa imenujemo makroprofil (slika 4b). V tem primeru difuzijski sloj sledi profilu vzdolž katode, zato izenačevalno vpliva na porazdelitev gostote toka in s tem na enakomerno debelino nanašanja.

Iz povedanega je razvidno, da lahko v pogojih impulznega nanašanja z ustrezno modulacijo debeline difuzijskega sloja stanje mikroprofila prevedemo na makroprofil in s tem zagotovimo enakomerno porazdelitev toka. Pri tem igrajo odločilno vlogo amplitudni in časovni parametri impulznega toka. V proizvodnji tiskanih vezij se vse pogosteje srečujemo s skožnjimi luknjami z velikim AR. Zaradi slabih hidrodinamičnih pogojev znotraj luknje je konvekcijski transport snovi omejen, zato enakomerne porazdelitve toka v luknji ne moremo doseči zgolj z njeno prevedbo na makroprofil. Skrajni primer so slepe skožnje luknje, kjer imamo opraviti z omejenim pretokom elektrolita. Tovrstnim težavam se izognemo z uporabo impulznega toka z anodno polarizacijo (slika 1b), v kombinaciji z ustreznimi organskimi sredstvi (levelers), ki jih dodajamo v elektrolit. Trajanje negativnega impulza je bistveno krajše od pozitivnega, po amplitudi pa je do trikrat večji. V času negativnega impulza se del predhodno nanešenega bakra raztoplja, zato se koncentracija kovinskih ionov ob elektrodi poveča. Reakcija je burnejša na mestih s povečano gostoto toka, to pa je ravno tam, kjer je v fazi nanašanja izločanje kovinskih ionov intenzivnejše. Dodatna reakcija, ki se odvija v času negativnega (anodnega) tokovnega impulza, je transport molekul organskih dodatkov na mesta s povečano gostoto toka. Tam se formira zaščitni sloj, ki v fazi nanašanja zavira izločanje kovinskih ionov. S tega vidika lahko razdelimo trajanje pozitivnega impulza v dva intervala. V prvem se predhodno raztopljeni kovinski ioni izločajo na mestih z manjšo gostoto toka (sredina skožnje luknje). Zaščitni sloj molekul, ki preprečuje izločanje ionov, se v tem času raztoplja. Drugi interval pozitivnega tokovnega impulza pa nastopi v trenutku, ko se zaščitni sloj molekul v celoti raztopi, nakar se prične izločanje kovinskih ionov tudi na mestih s povečano gostoto toka. Pravkar opisan postopek izločanja kovinskih ionov na sredini in na robovih skožnje luknje kaže slika 5.



Slika 5: Mehanizem delovanja organskih dodatkov na primeru skožnje luknje

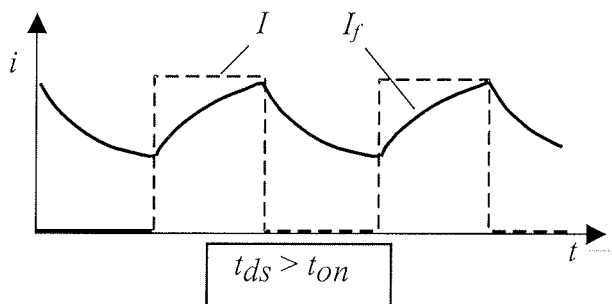
Če nekoliko posplošimo, poteka nanašanje bakra v skozi-
ne luknje po pravkar opisanem postopku v treh fazah. V
času negativnega impulza se na mestih s povečano gostoto
toka kovinski baker raztaplja in se ob nastopu pozitivnega
impulza izloči na mestih z manjšo gostoto toka (sredina
skozi-
ne luknje). Tretja faza nastopi proti koncu pozitivnega
tokovnega impulza, ko se zaščitni sloj dodatkov raztopi, in
se kovinski ioni izločajo na robovih luknje.

4. Vpliv kapacitivnosti dvojnega sloja

Na površini kovinske elektrode, ki je potopljena v elektrolit,
se vzpostavi sloj negativne elektrine, ki tvori s slojem poziti-
vnih kovinskih ionov v elektrolitu električno nevtralnost
obeh medijev. Ob delovanju zunanega električnega polja
se z izmenjavo električnega naboja med omenjenima slo-
jema vzpostavi novo ravnovesno stanje. Potek potenciala
znotraj slojev ustreza poteku potenciala v kondenzatorju,
zato dvojni sloj ponazorimo s kapacitivnostjo C_{ds} . Tok v
galvanski kopeli I je sestavljen iz Faradayeve komponente
 I_f , ki določa hitrost izločanja kovine, in iz kapacitivne kom-
ponente I_C za polnjenje kapacitivnosti C_{ds} .

$$I = I_F + I_C = I_F + C_{ds} \frac{d\eta_A}{dt} \quad (4)$$

Izločanje kovine se prične šele, ko je dosežena napetost
aktivacijskega potenciala (η_A), do katerega moramo napolni-
ti C_{ds} . Pri nanašanju z enosmernim tokom to ne povzroča
nevšečnosti, saj poteka polnjenje kondenzatorja le ob vklo-
pu usmernika. Razmere pa se bistveno spremenijo pri
napajanju procesa z impulznim tokom. Izločanje kovinskih
ionov v obliki kovine se prične šele ko je dosežen aktivaci-
jski potencial med elektrolitom in kovino. Zato moramo ob
vsakem nastopu tokovnega impulza napolniti kapacitivnost
dvojnega sloja na določen potencial. Čas polnjenja dvo-
jnega sloja t_{ds} mora biti bistveno krajši od trajanja toko-
vnega impulza t_{on} . V nasprotnem primeru je oblika Fara-
dayevega toka popačena, v skrajnem primeru celo izgubi
impulzni značaj (slika 6).



Slika 6: Vpliv kapacitivnosti dvojnega sloja na obliko Faradayevega toka

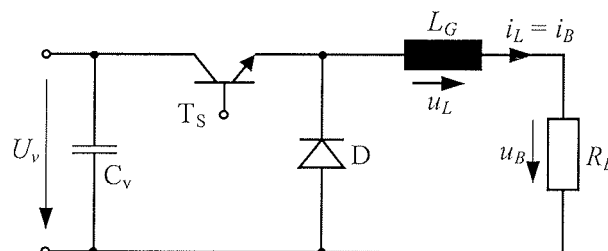
Podobne ugotovitve veljajo za praznjenje dvojnega sloja in
trajanje pavze oz. negativnega tokovnega impulza. Metode
za izračun časov polnjenja in praznjenja dvojnega sloja so
podane v /4/.

Na zmanjšanje vpliva dvojnega sloja, ki nam onemogoča
nastavitve poljubno kratkih časovnih parametrov impulznega
toka, lahko vplivamo z učinkovitim mešanjem elektrolita in
z izbiro ustreznega tokovnega vira. Ta mora biti sposoben
generirati tokovne impulze z veliko strmino, kar bistveno
pripomore k zmanjšanju kapacitivnega vpliva dvojnega slo-
ja.

5. Visokodinamični impulzni tokovni vir

K snovanju topologije impulznega tokovnega vira smo pris-
topili z namenom postopnega uvajanja impulznega nanaša-
nja bakra v proizvodnjo tiskanih vezij. Zahteve, ki jih mora
vir izpolnjevati, so poleg velike strmine generiranih toko-
vnih impulzov še vzdrževanje konstantnega, od bremena
neodvisnega toka med trajanjem impulza, majhna valovi-
tost izhodnega toka v ustaljenem stanju, galvanska ločitev
bremenskega tokokroga od napajalnega omrežja, možnost
generiranja bipolarnih tokovnih impulzov in neodvisna nas-
tavitev parametrov toka v širokem območju /5,6/. Z razvo-
jem elementov močnostne elektronike nam je dana
možnost izgradnje sofisticiranih pretvorniških naprav, ki
delujejo v stikalnem režimu. Prednost tovrstnega pristopa
je višji izkoristek in manjše dimenzije pretvornika. Slednje
dopušča namestitve naprave v neposredno bližino galvan-
ske kopeli, s čimer zmanjšamo potrebo po dolgih pove-
zovalnih kabljih, ki s svojo parazitno induktivnostjo znatno
zmanjšujejo strmine generiranih tokovnih impulzov.

Sodobni procesni tokovni viri, ki so namenjeni aplikacijam
v elektrokemiji, pogosto temeljijo na topologiji pretvornika
navzdol. V območju moči do nekaj 10 kW je to najprimernej-
ša oblika stikalnega pretvornika za napajanje bremena s
konstantnim tokom. Principialno shemo pretvornika navz-
dol kaže slika 7.



Slika 7: Principialna shema pretvornika navzdol

Pretvornik je priključen na vir enosmerne napetosti U_v . Z
ustreznim krmiljenjem stikala T_s vzdržujemo tok skozi gladil-
no dušilko L_G in breme R_B na željeni vrednosti /7,8/.
Zaželena je čim manjša valovitost toka v stacionarnem
delovanju

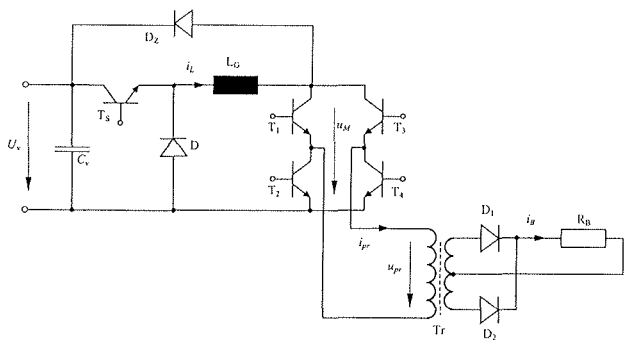
$$\Delta i_L = \frac{U_v}{4 \cdot L_G \cdot f_{st}} \quad (5)$$

pri čemer je f_{st} frekvenca preklpov stikala. Pri generiranju
impulznega toka nas poleg ustaljenega obratovanja zani-

majo tudi razmere v vezju med dinamičnim (impulznim) obratovanjem. Začetna strmina tokovnih impulzov znaša

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_v}{L_G} \quad (6)$$

in je odvisna zgolj od napajalne napetosti in induktivnosti gladilne dušilke. Iz primerjave enačb (5) in (6) ter ob upoštevanju, da je stikalna frekvenca f_{st} tranzistorja navzgor omejena, je razvidno, da je nemogoče zagotoviti zadostno strmino tokovnega impulza, ne da bi to vplivalo na povečanje valovitosti toka Δi . Zato je pretvornik s slike 7 neprimeren za generiranje tokovnih impulzov. Njegova pomanjkljivost izvira iz dejstva, da se gladilna dušilka nahaja v bremenskem tokokrogu. To smo upoštevali pri snovanju nove topologije impulznega tokovnega vira. Rešitev, ki jo v nadaljevanju predstavljamo, je prikazana na sliki 8. Pretvornik navzdol, ki nastopa v vlogi vhodnega pretvornika, smo povezali v kaskado s tokovnim razsmernikom. Ta je sestavljen iz tranzistorskega mostiča in transformatorja. Vhodni pretvornik generira konstantno vrednost enosmernega toka na način, kot je bilo predhodno opisano, s tokovnim razsmernikom pa ta tok pretvorimo v zaporedje tokovnih impulzov. Gladilna dušilka L_G je prestavljena iz bremenskega tokokroga v vmesni enosmerni tokokrog, zato na strmino tokovnih impulzov nima vpliva. Ker si pretvornika "delita" gladilno dušilko L_G , mora biti njuno delovanje časovno usklajeno.

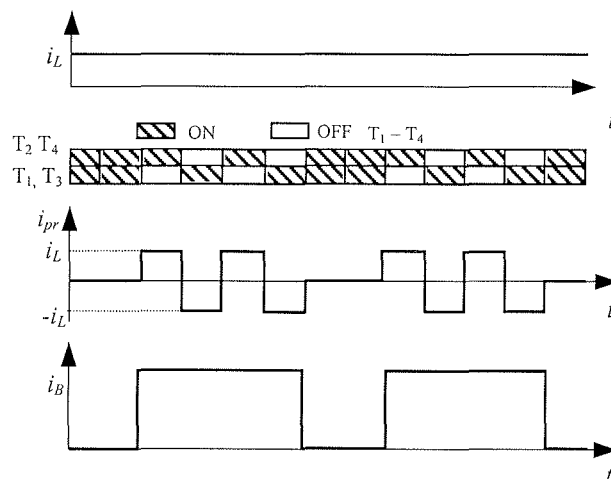


Slika 8: Predlagana topologija impulznega tokovnega vira

V ta namen deluje razsmernik v tako imenovanem kratkostičnem režimu (vsi tranzistorji T_1 do T_4 sočasno prevajajo) ali v razsmerniškem režimu (izmenoma prevajata tranzistorska para T_1 - T_4 in T_2 - T_3). Tok vmesnega tokokroga v nobenem primeru ne sme biti prekinjen. Delovanje pretvorniškega sklopa je razvidno s slike 9.

V kratkostičnem režimu obratovanja se tok vmesnega tokokroga zaključuje preko kratkosklenjenega tranzistorskega mostiča. Primarno navitje transformatorja je v tem primeru kratkostičeno, zato ni prenosa energije v sekundarni tokokrog in tok skozi breme je nič.

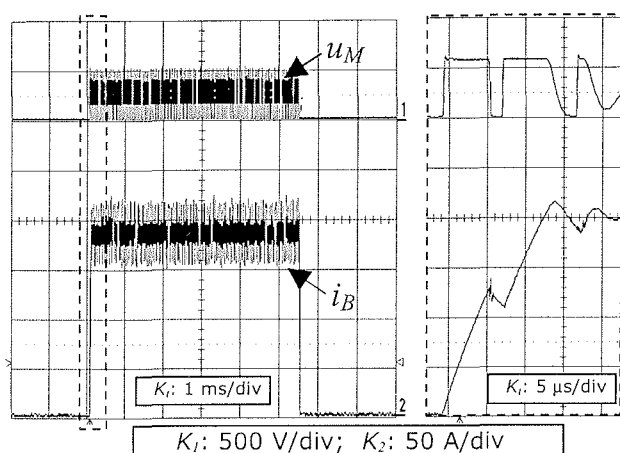
Razsmerniški režim obratovanja nastopi z izmeničnim proženjem diagonalnih parov tranzistorjev. Tok komutira v



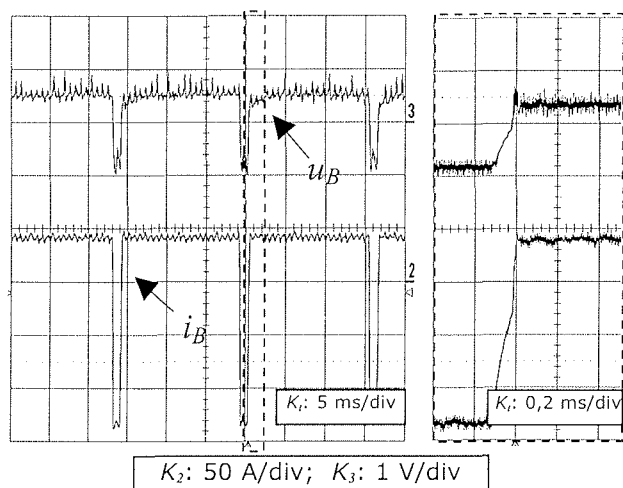
Slika 9: Pricipielno delovanje impulznega tokovnega vira

primarno navitje transformatorja in se z njegovo tokovno prestavo transformira v bremenski tokokrog. S tem sprožimo tokovni impulz skozi breme, ki ga prekinemo s ponovnim kratkostičenjem tokovnega razsmernika (kratkostični režim). Strmino tokovnih impulzov določa komutacija toka iz kratkostičnega tokokroga v primarno navitje, ki je odvisna od stresane induktivnosti transformatorja in parazitne induktivnosti povezav do bremena. Z načrtovano izgradnjo transformatorja /9/ in povezav tokovnega vira z bremenom lahko vpliv omenjenih induktivnosti zmanjšamo, ne moremo pa ga v celoti odpraviti. Komutacija toka v nobenem primeru ne more biti trenutna, zato je v vezju na sliki 8 dodana zaščitna dioda D_z , preko katere speljemo v času komutacije del toka, ki ga primarno navitje ne more prevzeti. Na ta način omejimo napetost U_M na vrednost napajalne napetosti pretvornika. V nasprotnem primeru bi se na izhodu pretvornika navzdol inducirala prenapetost, ki bi ogrozila tranzistorje razsmernika.

Iz delovanja predlagane topologije je razvidno, da omogoča zgolj generiranje impulzov ene polaritete. Zato smo v eksperimentalnem modelu impulznega tokovnega vira zagotovili bipolarno obliko impulznega toka s protiparalelno vezavo dveh tokovnih virov s slike 8. Modularnost virov omogoča tudi vzporedno obratovanje, pri čemer je skupni tok enak vsoti prispevkov posameznega vira. Amplituda toka posameznega vira v modelu je neodvisno nastavljiva v območju od 0 do 200 A. Časovni parametri toka pa so nastavljivi v območju od 1 ms do 10 s za pozitivni impulz oz. v območju 100 μ s do 10 ms za negativni tokovni impulz. Minimalna vrednost časovnih parametrov je pogojena z zmogljivostjo uporabljenega mikrokrmilniškega sistema, s katerim nadzorujemo delovanje modela. Oscilogrami v nadaljevanju prikazujejo karakteristične veličine eksperimentalnega modela impulznega tokovnega vira. Slika 10 kaže primer preprostega tokovnega impulza (i_B) in napetosti U_M na stikalih tokovnega razsmernika. Področje, ki je očrtano s črtkano krivuljo, je na desni strani prikazano povečano. Strmina tokovnega impulza znaša 15 A/ μ s.



Slika 10: Primer preprostega tokovnega impulza



Slika 11: Potek toka in napetosti v galvanjski kopeli

Slika 11 kaže tok i_B in napetost u_B med elektrodama v galvanjski kopeli med procesom impulznega nanašanja. Proces je bil napajen z eksperimentalnim modelom tokovnega vira.

9. Rezultati

Analizo impulznega nanašanja bakra v skožnje luknje smo izdelali v sodelovanju s podjetjem za proizvodnjo tiskanih vezij Intec Tiv iz Kranja. V raziskavo smo vključili vzorčne plošče s skožnjimi luknjami različnih premerov in dolžin. V elektrolit smo dodali najnovejšo serijo komercialno dostopnih organskih dodatkov proizvajalca Atotech. Pri ustvarjanju razmer v galvanjski kopeli (temperatura, koncentracija dodatkov...) smo upoštevali priporočila proizvajalca. Razmerje amplitud katodnega in anodnega tokovnega impulza smo spreminjali med 1,5 in 3, razmerje časovnih parametrov pa med 5 in 15.

Za primerjavo smo nekatere tipe vzorcev vključili v obstoječo proizvodnjo tiskanih vezij, kjer poteka nanašanje z enosmernim tokom. Po končanem testnem nanašanju smo z rezom vzorčnih plošč po sredini skožnje luknje pripravili metalurške obruse, primerne za nadaljnjo analizo. Podatki o posameznih vzorcih so zbrani v tabeli 1, od koder so razvidni rezultati nanašanja (debelina nanosa d na posameznih mestih luknje – A, B C in faktor PTH). Faktor PTH (Plate Through Hole) je podan v odstotkih, pove pa nam, kakšna je razsipna moč impulznega nanašanja na sredini skožnje luknje glede na debelino nanosa na njenih robovih. V praksi težimo k $PTH = 100\%$, kar pomeni, da je debelina kovinskega nanosa na sredini skožnje luknje enaka debelini nanosa na njenih robovih.

V raziskavo smo namenoma vključili tudi manj zahtevne vzorce z razmerjem $AR = 2,6$ in vzorce z $AR = 10$ oz. 12 , ki jih srečamo v kompleksnejših tiskanih vezjih. V primeru vzorca št. 1 z $AR = 2,6$ se porazdelitev bakra znotraj skožnje luknje ni bistveno razlikovala od tiste, dobljene pri impulznem nanašanju. Prednost impulznega nanašanja pred nanašanjem z enosmernim tokom se je pokazala v primeru zahtevnejših vzorcev, kar je razvidno iz analize vzorcev pod zaporednima št. 2 in 3. Razmerje AR je v tem primeru znašalo 10. Nanašanje bakra v primeru vzorca pod zaporedno številko 2 smo izvršili po klasičnem postopku nanašanja z enosmernim tokom. Debelina nanosa na sredini skožnje

Tabela 1: Rezultati analize

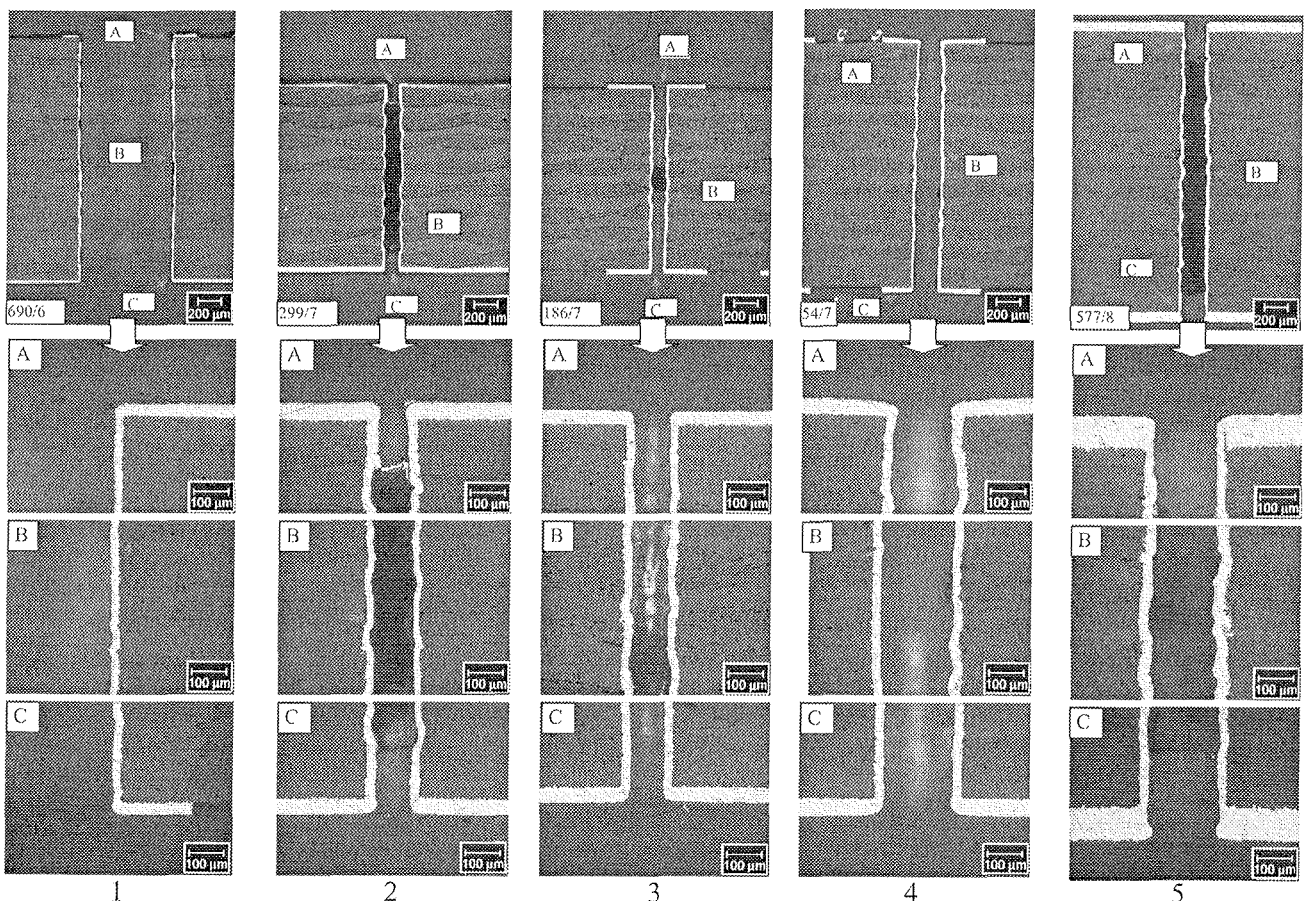
Zap. št.	Oznaka vzorca	2R/D [mm/mm]	AR	Nanašanje	Debelina nanosa na posameznih mestih luknje d [μm]			PTH [%]
					A	B	C	
1	690/6	0,75/2,0	2,6	Impulzno Enosmerno	22,5	22,2	22,6	98
2	229/7	0,15/150	10	Enosmerno	24,2	16,5	25,6	60
3	186/7	0,15/150	10	Impulzno	24,4	22,1	24,4	90
4	54/7	0,2/2,0	10	Impulzno	21,7	24,1	24,5	95
5	577/8	0,2/2,4	12	Impulzno	24,1	28,8	24,1	120

luknje je občutno manjša od debeline na njenih robovih, kar priča o neenakomerni tokovni porazdelitvi. Faktor PTH je temu ustrezno majhen. Nasprotno lahko zaključimo za vzorec št. 3, pri katerem je nanašanje potekalo z impulznim tokom. Še večji PTH smo dosegli v primeru vzorca št. 4, kljub temu, da so bili parametri toka in AR lukenj enaki. Razlog za to pripisujemo večjemu premeru skoznje luknje in zato boljšim hidrodinamičnim pogojem v njej. Vzorec pod zaporedno številko 5 pa je obravnaval luknje z največjim AR. V tem primeru smo na podlagi serije poskusov določili parametre impulznega toka, s katerimi smo dosegli, da je debelina nanosa na sredini skoznje luknje celo večja od debeline nanosa na njenih robovih ($PTH > 100\%$). Na podlagi te ugotovitve lahko zaključimo, da posameznim dimenzijam lukenj ustrezajo različni optimalni parametri toka. Zato je, zlasti v primeru tiskanih vezij z dimenzijsko široko paleto skoznjih lukenj, smiselno razdeliti nanašanje bakra v več korakov, znotraj katerih parametri toka ustrezajo posameznim dimenzijam lukenj, začenši z najzahtevnejšimi luknjami. Na metalurških obrusih iz tabele 1 smo izdelali mikroskopske posnetke skoznjih lukenj in njihovih detajlov. Posnetki so zbrani na sliki 12.

procesu izdelave zahtevnih elektronskih tiskanih vezij. Opisani postopek se od klasičnega nanašanja z enosmernim tokom razlikuje v tem, da je tok impulzne oblike. Ta pristop omogoča v kombinaciji z ustrezno izbranimi parametri impulznega toka določene prednosti, ki se kažejo v izboljšanih mehanskih lastnostih in enakomernejšem nanosu. Za razumevanje prednosti nanašanja z impulznim tokom smo podali fizikalno sliko masnega transporta snovi in porazdelitve toka v neposredni bližini elektrod. Predlagali smo topologijo impulznega tokovnega vira in izdelali eksperimentalni model. Slednji je služil napajanju galvanске kopeli, ki smo jo za potrebe raziskave impulznega nanašanja opremili z ustrezno sestavo elektrolita. Proces smo napajali s pravokotnimi tokovnimi impulzi s katodno in anodno polarizacijo. Raziskava je obsegala vzorčne plošče tiskanih vezij z različnimi dimenzijami skoznjih lukenj. Dobljene rezultate smo analizirali in primerjali z rezultati, dobljenimi v procesu enosmernega nanašanja. Poleg enakomernejšega nanosa v primeru zahtevnejših tiskanih vezij smo zlasti v primeru manj zahtevnih tiskanih vezij opazili možnost za skrajšanje procesa nanašanja, ne da bi s tem bistveno vplivali na kakovost izdelkov. Kljub temu, da to ni bilo predmet raziskave, je ta ugotovitev pomembna predvsem s stališča serijske proizvodnje.

Zaključek

V članku smo predstavili novo tehnologijo elektrokemijskega nanašanja bakra, ki se počasi, a vedno bolj uveljavlja v



Slika 12: Metalografski posnetki vzorčnih obrusov

Literatura

- /1/ A. Aroyo, N. Tzonev, "Pulse Periodic Reverse Plating-possibilities for Electrodeposition of Metal Coatings with Improved Properties" *Plating and Surface Finishing*, v 90, n 2, pp 50-4, 2003.
- /2/ A. J. Cobley, D.R. Gabe, "Methods for achieving high speed acid copper electroplating in the PCB industry", *Circuit World*, pp. 19-25, 27/3, 2001.
- /3/ S. Conghlan, R. Müller M. Schlötter, "Pulse Plating für die Leiterplattengalvanisierung", *ZEV-Leiterplatten*, n 1-2, 1996.
- /4/ C. Puipe, F. Laeman, "Theory and Practice of Pulse Plating", AESF, Orlando, Florida, 1987.
- /5/ D. Höglund, "Gleichrichter für galvanische Prozesse", *Galvanotechnik*, pp. 522, Heft 52, 1998.
- /6/ A. Leban, D. Vončina, "Visokodinamični impulzni tokovni vir", *Elektrotehniški vestnik*, v70, n5, pp. 279 - 284, 2003.
- /7/ T. Sunito, "Analysis and Modeling of Peak-Current-Mode Controlled Buck Converter in DICM," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 1, pp. 127-135, 2001.
- /8/ A. Leban, P. Zajec, D. Vončina, J. Nastran, "Tokovna PWM regulacijska metoda z možnostjo polnega izkrmljenja močnostnega stikala", *Elektrotehniški vestnik*, v71, n3, pp 159-164, 2004.
- /9/ M. S. Rauls, D. W. Novotny, D. M. Divan, "Design Considerations for High-Frequency Coaxial Winding Power Transformers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, v 29, n 2, pp 375-8, 1993.

mag. Aleš Leban, univ. dipl. inž. el.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko,
Tržaška 25, Ljubljana
tel.: +386 1 476 84 66 e-mail: ales.leban@fe.uni-lj.si

doc. dr. Danijel Vončina, univ. dipl. inž. el.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko,
Tržaška 25, Ljubljana
tel.: +386 1 476 82 74, e-mail: voncina@fe.uni-lj.si

dr. Ciril Zevnik, univ. dipl. inž. kem.
Leonardo d.o.o, Storžiška 4, Kranj
tel.: +386 4 235 61 61, e-mail: ciril.zevnik@intectiv.si

mag. Janez Fister, univ. dipl. inž. kem.
Intec Tiv d.o.o.
Ljubljanska cesta 24A, Kranj
tel.: +386 4 280 86 05, e-mail: janez.fister@intectiv.si

Prispelo (Arrived): 10.09.2004 Sprejeto (Accepted): 15.09.2004