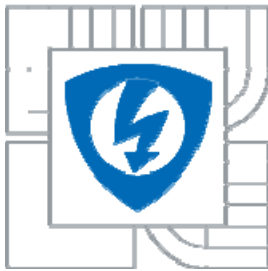




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV FYZIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF PHYSICS

TRANSPORT ELEKTRICKÉHO NÁBOJE V TANTALOVÉM KONDENZÁTORU

TRANSPORT OF ELECTRIC CHARGE IN TANTALUM CAPACITOR

ZKRÁCENÁ VERZE DOKTORSKÉ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JAROMÍR PELČÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. LUBOMÍR GRMELA, CSc.

BRNO 2011

Obsah

1. ÚVOD	3
2. DOSAVADNÍ VÝVOJ	4
3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	16
4. STAV ŘEŠENÍ	18
5. ZÁVĚR	32
6. VLASTNÍ PUBLIKACE	34
7. LITERATURA	35

1. Úvod

Tantalové kondenzátory se řadí mezi moderní pasivní součástky používané v HiTech elektronických zařízeních. Stále se zdokonalující technologie výroby tantalových kondenzátorů nabízí možnosti další miniaturizace, zvyšování spolehlivosti, snižování parazitních parametrů a tím i zlepšení celkové funkčnosti kondenzátoru.

Tantalové kondenzátory vynikají svými výbornými elektrickými parametry a řadí se mezi nejstabilnější typy kondenzátorů jak z hlediska teplotního, tak i časového. Z důvodů použití pevného elektrolytu u nich nedochází k radikální změně elektrických parametrů za působení vnějších vlivů (času, změna teploty, vlhkosti, mechanického namáhání, napěťových podmínek, atd.), tak jak je tomu u jiných druhů kondenzátorů. Příkladem mohou být elektrolytické kondenzátory hliníkové, polymerové nebo keramické vícevrstvé kondenzátory.

Výborných vlastností tantalového kondenzátoru je hlavně využito v zařízeních vyžadujících komponenty miniaturních rozměrů při dosažení vysokých kapacit v rozsahu stovek až tisíců mikrofaradů.

Soustavná miniaturizace má ovšem za následek zhoršování některých parazitních (nežádoucích) parametrů kondenzátorů, jako je sériový odpor a stejnosměrný zbytkový proud kondenzátoru. Tato změna parametrů může vést k celkové změně funkce zařízení, ve kterém jsou kondenzátory použity. Ze zmíněných důvodů se proto hledají způsoby redukce nežádoucích parametrů kondenzátorů. Pro jejich optimalizaci je třeba znát fyzikální vlastnosti, principy a chování tantalového kondenzátoru.

Změna a optimalizace parametrů kondenzátorů taktéž vyžadují vývoj nových technologických postupů a vylepšení, čehož může být dosaženo na základě správného pochopení fyzikálních jevů probíhajících v tantalovém kondenzátoru.

Mezi moderní metody zdokonalování parametrů tantalových kondenzátorů patří zavedení fyzikálního modelu kondenzátorů popisujícího jeho skutečnou funkci a chování. Toto chování je závislé na mnoha faktorech, jelikož reálný kondenzátor nemá pouze požadovanou kapacitu, ale taktéž další parazitní vlastnosti, kterými jsou například sériový odpor, parazitní indukčnost, paralelní odpor způsobující svodový proud a další. Tyto nežádoucí parametry negativně ovlivňují funkci kondenzátoru a tím mohou mít i znatelný vliv na chod celého obvodu, ve kterém se kondenzátor nachází.

Cílem této práce je zaměřením se na vysvětlení a pochopení podstaty a fyzikálního základu tantalového kondenzátoru pro zjištění principů transportu a akumulace náboje.

Výchozím bodem jsou experimentálně zjištěné charakteristiky kondenzátoru a vytvoření fyzikálního modelu a náhradního elektrického obvodu kondenzátoru v závislosti na přiloženém napětí, frekvenci a teplotě vzorku. Na základě srovnání teoretických závěrů a interpretace experimentálně získaných charakteristik bude objasněno rozdělení náboje. Znalost fyzikální struktury a reálného chování kondenzátoru je taktéž požadována pro správné pochopení jeho podstaty, na čemž se dá dále provádět zdokonalení a přiblížení se ideálním parametrům a optimalizaci výrobních procesů.

2. Dosavadní vývoj

2.1. Technologie výroby tantalového kondenzátoru

Ve své práci analyzuji vzorky tantalových kondenzátorů od jedné z renomovaných firem, která patří mezi hlavní výrobce tantalových kondenzátorů s pevným elektrolytem. Pro prozkoumání chování a pochopení principu tantalových kondenzátorů je taktéž potřeba znát technologický postup a samotnou technologii výroby tantalových kondenzátorů. Touto problematikou a popisem jednotlivých technologických kroků výrob se budu zabývat v následujících podkapitolách popisujících postup výroby.

2.1.1. Lisování tantalové anody

Anoda kondenzátoru je vyrobena slisováním tantalového prachu různé zrnitosti. Tantalový prach je namíchaný s vhodným pojivem a za vysokého tlaku je slisován kolem anodového drátu do požadovaného tvaru. Anodový drát je rovněž vyroben z tantalového materiálu. Výsledná kapacita kondenzátoru je závislá na velikosti a tvaru kovových zrn. Prach tvořený částicemi větších rozměrů se používá na kondenzátory s vysokým jmenovitým napětím až do 50 V [14].

2.1.2. Sintrování tantalové anody

Sintrace je procesem, v němž se jednotlivé částice a kousky tantalového prachu spékají a spojují k sobě tak, že vzniká porézní a pevná struktura anody. Proces se provádí ve vakuu za teplot kolem 1500°C. Vzniklá struktura je odolná mechanickému namáhání. Dochází k propojení jednotlivých zrn a vytvoření houbovité struktury. Současně dojde ke zlepšení kontaktu mezi prachovými zrny a kovovým drátkem [14].

2.1.3. Formování dielektrika Ta₂O₅

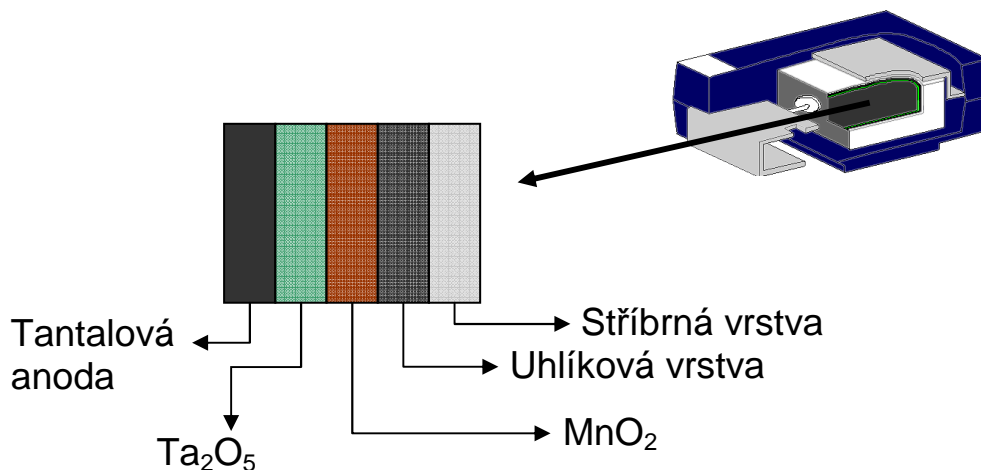
Formování dielektrika slouží k vytvoření izolační vrstvy z pentoxidu tantalu (Ta₂O₅) na povrchu houbovité struktury tantalové anody. Tento proces probíhá pomocí elektrochemické anodizace. Sintrovaná anoda se ponoří do slabého koncentráту kyseliny fosforečné. Anodou se nechá protékat stejnosměrný formovací proud. Teplotou lázně, velikostí napětí, proudu a dobou anodické oxidace se určuje výsledná tloušťka dielektrika, která zajišťuje kondenzátoru správnou nominální kapacitu a dielektrickou pevnost související s definovaným jmenovitým napětím kondenzátoru. Narůstající amorfní oxid vytváří na tantalovém povrchu jednolitou homogenní vrstvu. Dielektrická vrstva se formuje na anodě při teplotách v rozmezí 22°C až 85°C. Tloušťka anody se projevuje rozdílnou barvou, poněvadž na dielektriku vzniká difrakce světla, která má za následek zobrazení rozdílné barvy v závislosti na tloušťce dielektrika.

2.1.4. Manganizace a vytvoření separačních vrstev kontaktu katody

Dalším krokem je vytvoření katody kondenzátoru. Vodivá vrstva se vyrábí pyrolýzou dusičnanu manganatého Mn(NO₃)₂, při níž dochází ke vzniku burelu MnO₂. Anoda se ponoří do vodního roztoku dusičnanu manganatého, a pak v peci za teploty přibližně 250°C dochází k vytvoření vrstvy MnO₂. Ponoření anody do lázně se několikrát opakuje, tak aby burel co nejlépe vyplnil strukturu tantalového kondenzátoru a dokonale vytvořil povrch na kontaktování na dielektrickou vrstvu Ta₂O₅. V další fázi se vytvoří tenká grafitová vrstva. Anoda se namočí do grafitové disperse na povrchu burelu. Tato vrstva zlepšuje charakter povrchu a usnadňuje adhezi následné vrstvy.

Vzniklá grafitová vrstva se usuší a vyžihá. Grafitová vrstva také brání difúzi stříbra do burelu MnO_2 . Poslední operací je proces stříbření. Při tomto procesu vznikne vrstva stříbra, která slouží k optimálnímu kontaktování na vývody kondenzátoru.

Na Obr. 2.1 je patrný řez strukturou tantalového kondenzátoru, dielektrika Ta_2O_5 , vrstvy burelu a separační vrstvy grafitu a kontaktní vrstvy stříbra [7, 14].



Obr. 2.1: Zobrazení vrstev ve struktuře tantalového kondenzátoru

2.1.5. Kontaktování

Tantalový drát vedoucí z anody je připevněn k SMD kontaktu pomocí laserového svařování. Druhý kontakt vzniká přilepením pomocí epoxidu stříbra k druhému kontaktu na katodu. Ke kontaktování se vesměs používá epoxidová vodivá pasta na bázi stříbra.

2.1.6. Montáž a pouzdření

Montáž je krok, při němž se spojuje vyrobená struktura kondenzátoru se svorkovými vývody. Anodový vývod (kladná svorka) se obvykle vytváří laserových svařením Ta/NbO drátku s plíškovým vývodem vyrobeným ze slitiny niklu a železa. Katodový vývod (záporná svorka) se vytvoří nalepením plíškového vývodu ke stříbrné vrstvě. K nalepení se obvykle používá vodivá pasta na bázi stříbra. Proces pouzdření je jedním z posledních kroků výroby kondenzátoru. Slouží k vytvoření pevného obalu pro ochranu aktivní části součástky a vytvoření konečného tvaru SMD pouzdra.

2.1.7. Značení kondenzátoru

Při poslední výrobní operaci je součástka očištěna, opískována a omyta vodou. Laserem jsou na ni pak vypáleny informace o parametrech kondenzátoru (polarita, kapacita, jmenovité napětí a výrobní číslo). Tyto informace se pak dále vkládají do systému. Kondenzátor je možno zpětně trasovat, kdy a jakým způsobem byl vyroben včetně mnoha dalších informací.

2.1.8. Testování kondenzátoru

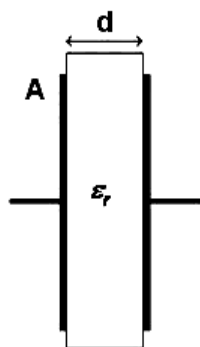
Pro Ta kondenzátory je charakteristická stále se snižující intenzita poruch a není znám žádný únavový mechanismus při provozu za běžných podmínek. Díky důkladnému zahořování a testování se téměř všechny poruchy projeví a detekují již

během výrobního procesu. Základním požadavkem zahořování je ustálení elektrických vlastností a vyloučení součástek s nižší kvalitou díky zrychlené degradaci nestabilních struktur. Základní metodou zahořování je vystavení součástky napětovému a teplotnímu namáhání.

2.2. Teoretický úvod

2.2.1. Princip deskového kondenzátoru

Základní fyzikální model kondenzátoru se skládá ze dvou paralelních kovových desek nebo elektrod, které jsou odděleny dielektrickým materiálem. Elektrický náboj je uložen na deskách kondenzátoru tak, že pozitivně nabitá deska se nazývá anoda a negativně nabitá deska je katoda kondenzátoru. Jestliže elektrické pole na dielektriku kondenzátoru roste, což odpovídá nárůstu elektrického náboje, má to za následek nárůst rozdílu napětového potenciálu, který proporcionálně narůstá v závislosti na náboji. Podíl nárůstu velikosti náboje a rozdílu napětového potenciálu mezi deskami kondenzátoru je definován jako kapacita kondenzátoru a tím pádem pro ideální deskový kondenzátor platí následující vzorec (2.1).



Obr. 2.2: Struktura ideálního deskového kondenzátoru

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.1)$$

kde

ΔQ – je náboj uložený na desce,

ΔV – rozdíl napětového potenciálu mezi deskami kondenzátoru,

d – vzdálenost mezi deskami a potažmo i tloušťka dielektrika kondenzátoru,

ϵ_r – dielektrická konstanta,

ϵ_0 – permitivita vakua,

A – plocha desky kondenzátoru.

Jelikož rozdíl potenciálů roste proporcionálně vůči uloženému náboji, podíl dQ/dV je konstantní pro daný kondenzátor. Tudíž kapacita kondenzátoru je ukazatelem, jak moc kondenzátor dokáže nahromadit a uložit elektrický náboj [5].

2.2.2. Vývoj tantalového kondenzátoru

Nižší kvalita a hlavně elektrická spolehlivost řadila klasické elektrolytické kondenzátory do nižší třídy a omezovala jejich použití v levných a komerčních aplikacích. Proto v případě vývoje tantalové anody získal tantalový kondenzátor značného zdokonalení ve srovnání s klasickým hliníkovým elektrolytickým kondenzátorem, hlavně díky vysoké dielektrické konstantě oxidu tantalů a chemické stabilitě jak tantalové anody, tak i dielektrika vytvořeného za pomoci oxidace.

Přechod k tantalové technologii rozšířil teplotní rozsah použitelnosti a umožnil použití elektrolytu s vysokou vodivostí a nízkým bodem tuhnutí. Navzdory těmto zdokonalením ale zůstalo několik omezení spojeného se všemi typy elektrolytických kondenzátorů s tekutým elektrolytem, jako například velké množství objemu pouzdra kondenzátoru vyplněného elektrolytem. Dále je nutno pouzdro kondenzátoru utěsnit a chránit před únikem elektrolytu; nízká teplota je také nežádoucí z důvodu zmrznutí kapaliny a tím zvětšení jejího objemu a množství dalších nežádoucích vlastností. Hlavním kladem pro používání kondenzátorů s tekutým elektrolytem je, že elektrolyt udržuje dielektrikum kondenzátoru v konformním stavu pomocí již dříve zmíněného samoopravování kondenzátoru. Tato výhoda měla svou stinnou stránku použitelnosti díky tekutině, která se při vyšších teplotách mění v plyn a tím pádem nedokáže snášet teplotní cykly. Další zdokonalení přišlo s lepším způsobem kontaktování katody. Technologie tantalových elektrolytických kondenzátorů byla novým průlomem v elektrolytických kondenzátorech. Pokračovalo se zde cestou použití stabilních anorganických pevných elektrolytických materiálů. Namísto tradičního tekutého elektrolytu bylo použito řešení pomocí burelu MnO_2 , který byl použit jako katodová vrstva, která byla přímo kontaktována na dielektrikum oxidu tantalů Ta_2O_5 . Výsledkem bylo, že dielektrická vrstva byla pokryta oxidem manganu (MnO_2) jako tuhého elektrolytu. Chemické složení MnO_2 umožnilo kontaktování anodové vrstvy na dielektrickou vrstvu rovnoměrně a v pevném provedení. Tantalové kondenzátory tak od této chvíle potřebovaly menší objem pro pouzdření, už nebylo nutno používat hermetického uzavření a zároveň se pomocí tohoto procesu zlepšila i teplotní a elektrická stabilita kondenzátoru včetně prodloužení životnosti. Jakmile byly tantalové kondenzátory vyvinuty, zvětšil se na trhu požadavek na vývoj a výrobu kondenzátorů menších rozměrů s tlakem na cenu. Vylepšení pouzdřících technologií umožnilo zapouzdření tantalových kondenzátorů do epoxidové pryskyřice. Díky jejich skvělé funkčnosti ve srovnání s hliníkovými elektrolytickými kondenzátory a jejich malých rozměrů, dosáhli velkého vlivu na trhu se spotřební elektronikou. V průběhu vývoje tantalových kondenzátorů se ukázaly dva směry, kterými se vývoj ubíral. Prvním směrem bylo upřednostňování vývoje pouzdření a druhým byl vývoj a zdokonalování dielektrického filmu, kontaktování a krytí pomocí MnO_2 . Cena základního tantalového materiálu dramaticky rostla a nadále roste, což způsobilo cenové znevýhodnění ve srovnání s hliníkovými elektrolytickými kondenzátory a dalšími typy kondenzátorů. Reakcí výrobců na nárůst ceny tantalů byla redukce množství tantalů v kondenzátoru v co možná největší míře bez ztráty kapacity a udržení dobrých elektrických parametrů. Výsledkem bylo zdokonalení tantalového prachu s menšími částicemi, které umožnily výrobu kondenzátorů menších rozměrů se zachováním velké kapacity na úkor použití

mnohem menšího množství tantalového materiálu. Benefitem byla znatelná redukce velikosti kondenzátoru a potažmo i jeho ceny [5].

Redukce velikosti a ceny tantalových kondenzátorů zastavila jejich nahrazování jinými typy kondenzátorů. Nicméně vývojáři nových aplikací byli stále zdráhaví používat tantalové kondenzátory ve velké míře díky předchozímu zdražování a vysokým cenám tantalových kondenzátorů. Další technologická výhoda přišla s masivním nástupem SMD technologií, které vyžadovaly použití miniaturních bezvývodových kondenzátorů. Tato technologie umožnila tantalovým kondenzátorům další vývojový stupeň v SMD provedení. Jelikož mají tantalové kondenzátory daleko větší odolnost vůči teplotním ohřevům než hliníkové elektrolytické kondenzátory, tato vlastnost jim dala další přednosti pro použití k SMD osazování pomocí osazovacích automatů pick and place a následné zapájení pomocí reflow pecí, kde teplota pájení dosahuje až 260°C, se kterou mají již zmiňované hliníkové kondenzátory značné potíže. Pokračující výhodnou pro SMD technologie byla malá velikost pouzdra kondenzátoru i v případě dosažení podstatně větší kapacity v SMD pouzdře ve srovnání se standardní vývodovou verzí.

Mobilní elektronika se na trhu stále víc a víc uplatňovala a rozšiřovala. Požadavek na technické možnosti byl stále větší, tak jako na spotřebu, bezpečnost a životnost zařízení. Tato kritéria nastavila nové možnosti tantalovým kondenzátorům a nastal další rozmach v miniaturizaci a kompaktnosti těchto komponentů. Aby tantalové kondenzátory mohly držet krok s tímto trendem, musely se značně přizpůsobit náročným požadavkům vývojářů a konstruktérů finálního hardwaru a mít tím pádem schopnost udržet větší náboj i za cenu miniaturizace. Také bylo nezbytné pracovat na vývoji kondenzátorů pracujících na nižším pracovním napětí, vyšších frekvencích, majících vysokou spolehlivost a bezpečnost [1, 5].

S těmito novými výzvami začíná vývoj dalších typů tantalových kondenzátorů za použití amorfních organických látek, polymerních materiálů použitelných hlavně v oblasti katodové vrstvy.

2.2.3. MIS struktura

MIS (kov-izolant-kov) struktura chovající se jako MIS dioda je nejvíce používanou strukturou pro studium povrchu. Spolehlivost a stabilita všech polovodičových součástek je přímo úměrná jejich povrchovým vlastnostem. Pro její funkčnost je důležité pochopení fyziky povrchu za pomoci MIS struktury. Dále je nutno se zabývat primárně problematikou MOS struktury (kov-oxid-polovodič), jelikož izolant v tantalových kondenzátorech představuje oxidová vrstva. Tento systém byl intenzivně studován, poněvadž je přímo spojený s planární součástkou a dalšími jejich seskupeními, kterými jsou tranzistory, integrované obvody a případně další komponenty na bázi polovodiče.

MIS struktura byla prvně navržena v roce 1959 (Moll, Pfann a Garrett) jako struktura kondenzátoru závislá na napětí (napěťově závislý kondenzátor). Charakteristiky MIS kondenzátoru byly pak Franklem a Lindnerem analyzovány. MIS struktura a její funkce jako polovodičové diody byla prvně uplatněna Termanem, Lehovcem a Slobodskoyem ve studiu termálně oxidovaného povrchu křemíku [1].

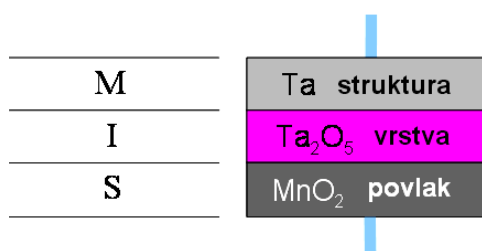
Princip vázaných nábojů byl prvně prezentován Boylem a Smithem v roce 1970.

2.2.4. MIS struktura tantalového kondenzátoru

Tantalové kondenzátory s pevným dielektrikem jsou velmi komplexním systémem, pokud zvážíme jejich materiálové spojení a geometrickou strukturu. Vývojem lepšího chápání těchto součástek a pochopení jejich funkce je jedním z klíčových parametrů ve stálém zdokonalování a optimalizaci jejich vlastností.

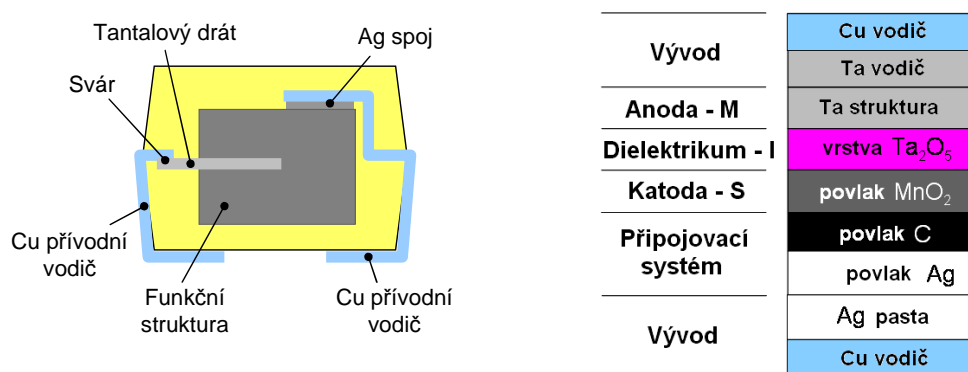
Pokud se podíváme na složení tantalového kondenzátoru, tak zjistíme, že má specifickou strukturu, která se svým složením nepochodá klasickému popisu lineárních kondenzátorů (MIM struktura).

Pokud si strukturu nakreslíme, zjistíme, že svým složením a topologií odpovídá již zmiňované struktuře MIS polovodiče, jak je patrné na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: MIS struktura tantalového kondenzátoru

U kondenzátoru představuje kovovou elektrodu anoda-tantalový drátek s nalisovaným kovovým prachem. Na anodě je naformována izolační vrstva izolantu – Ta_2O_5 a na ní pomocí manganizace vytvořena polovodičová vrstva z burelu MnO_2 . Na Obr. 2.4 je schematicky znázorněno mechanické složení tantalového kondenzátoru a znázorněna struktura MIS kondenzátoru s úvahou všech kontaktních vrstev včetně přívodních vodičů a kontaktních bariér.



Obr. 2.4: a) Konstrukční provedení, b) Strukturální složení tantalového kondenzátoru

VA charakteristiky MIS struktury v normálním a reverzním režimu jsou nesymetrické, čímž se vysvětluje odlišnost od MIM struktury, která má VA charakteristiky symetrické k počátku souřadnic. Z tohoto důvodu lze usoudit, že nesymetričnost pramení z polovodičové katody, tvořící druhou elektrodu a tím i úplnou MIS strukturu kondenzátoru.

Studium struktury a fyzikálního chování tantalových kondenzátorů ve výrobním průmyslu není tak časté. Zatímco materiály součástky jsou často vyvíjeny různými

výrobci, fyzikální podstatu jejich funkčnosti nikdo detailněji nezkoumá. V poslední době získal velkou pozornost oxid tantal Ta_2O_5 pro použití v polovodičovém průmyslu jako komponent vhodný pro tvorbu dielektrika s vysokou dielektrickou konstantou. Dielektrická konstanta Ta_2O_5 je relativně vysoká, $\epsilon_r = 27$. Tento typ materiálu může být použit jako vhodný materiál tenké tloušťky dokonce i v integrovaných obvodech [1, 5].

2.2.5. Vodivostní mechanismy

V dřívějších kapitolách bylo nastíněno několik vodivostních mechanismů oxidu tantalu Ta_2O_5 v MIM a MIS struktury jak v individuálním, tak i integrovaném tantalovém kondenzátoru. Abychom lépe pochopili a rozuměli tantalovým kondenzátorům jako struktuře MIS, musíme nejdříve pořádně pochopit jejich vodivostní mechanismy. V průběhu této práce byla zmíněna široká škála vodivostních mechanismů, a proto se v této sekci soustředíme na dominantní typy mechanismů, zejména Poole-Frenkelův jev, prostorový náboj limitovaného proudu, Fowler-Nordheimovo tunelování a Schotkyho jev.

2.2.5.1 Ohmická složka proudu

Ohmický proud je první složkou zbytkového proudu při intenzitě elektrického pole menší než 1 MV/cm, kdy platí:

$$I_{\Omega} = G_{\Omega}U \quad (2.1)$$

kde G_{Ω} je ohmická vodivost, kterou lze pro nízkou intenzitu elektrického pole definovat vztahem:

$$G_{\Omega} = Aen\mu/d \quad (2.2)$$

kde A je plocha kondenzátoru, e je elementární náboj, n je koncentrace nosičů, μ je pohyblivost nosičů náboje a d je tloušťka dielektrika. Transport nosičů náboje v izolačních vrstvách se liší od transportu náboje v polovodičích, takže koncentrace a pohyblivost je třeba chápat jako efektivní hodnoty odpovídající přeskokovému mechanismu nosičů náboje mezi jednotlivými centry [7, 12, 13]

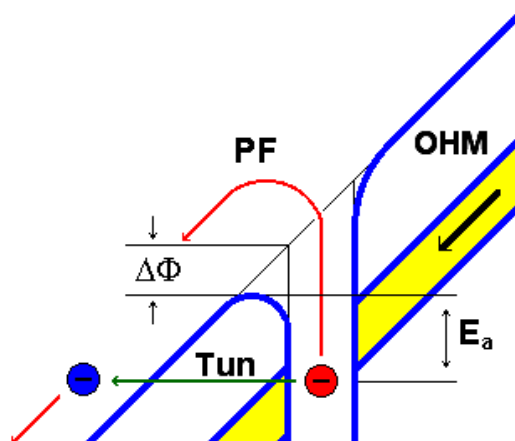
2.2.5.2 Poole-Frenkelova složka proudu

Současně mohou být elektrony z příměsového pásu emitovány do vodivostního pásu a přejít do anody, jak je schematicky zobrazeno na Obr. 2.5. Elektrony přechází tepelnou excitací z příměsového pásu do vodivostního pásu izolantu. Tento jev se nazývá Poole-Frenkelův a tvoří významnou složku zbytkového proudu, protože na hladině příměsového pásu je koncentrace elektronů asi 10^6 až 10^9 krát vyšší než na hladině vodivostního pásu. Je tomu tak proto, že příměsový pás je asi 0,4 až 0,6 eV pod vodivostním pásem Ta_2O_5 , takže při teplotě 300 K je příměsový pás o 16 až 24 kT pod vodivostním pásem.

Na základě Maxwell-Boltzmannovy statistiky platí, že ve vodivostním páse izolantu Ta_2O_5 je koncentrace elektronů nižší než v příměsovém páse. Označíme-li koncentraci elektronů ve vodivostním páse n_c , potom je koncentrace elektronů n_p na energetické hladině příměsového pásu:

$$n_p = n_c \cdot \exp(E_A/kT) \quad (2.3)$$

kde n_p je koncentrace elektronů v příměsovém páse, n_c je koncentrace elektronů ve vodivostním páse a E_A je aktivační energie.



Obr. 2.5: Jednotlivé složky zbytkového proudu – ohmická, Poole-Frenkelova a tunelová.

V našem případě pro $E_A = 0,4 \text{ eV} = 16 kT$ dostaneme $n_p = n_c \cdot e^{16}$, takže veškerý zbytkový proud při pracovním napětí protéká příměsovým pásem.

Transport elektronů prostřednictvím Poole-Frenkelova jevu je popsán rovnicí:

$$I_{PF} = G_{PF} U \exp(\beta_{PF} \sqrt{U}) \quad (2.4)$$

kde G_{PF} je vodivost Poole-Frenkelova jevu, β_{PF} je Poole-Frenkelův součinitel.

Poole-Frenkelův součinitel závisí na relativní permitivitě izolantu a tloušťce izolační vrstvy a je dán vztahem:

$$\beta_{PF} = (e^3 / \pi \epsilon_0 \epsilon_r d)^{1/2} / kT \quad (2.5)$$

kde e je elementární náboj, ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r je relativní permitivita izolantu, d je tloušťka izolační vrstvy a kT je tepelná energie.

Příměsový pás je v Obr. 2.5 vyznačen žlutou barvou. $\Delta\Phi$ značí snížení potenciálové bariéry v důsledku Poole-Frenkelova jevu. Jsou tam taktéž znázorněny kvantové přechody elektronu vázaného v izolační vrstvě. Při nižší intenzitě vnějšího elektrického pole přechází elektron přes bariéru s aktivací energií E_A , při vyšší intenzitě vnějšího elektrického pole dojde k dalšímu zúžení bariéry a pravděpodobnost tunelování přes bariéru se zvýší [7, 8, 13].

2.2.5.3 Tunelová složka proudu

Při napětí vyšším než je pracovní se u Ta kondenzátorů objevuje vedení elektrického proudu prostřednictvím tunelového jevu. Elektrony, které jsou transportovány z příměsového pásu, mohou při dostatečně vysoké intenzitě pole přejít do vodivostního pásu tunelováním. Tunelový proud je popsán rovnicí [6]:

$$I_T = I_{T0} U^a \exp(-U_T / U) \quad (2.6)$$

kde I_{T0} je součinitel tunelového proudu závisící na tvaru bariéry a U_T je charakteristická hodnota tunelového napětí. Exponent a , který zahrnuje vliv intenzity elektrického pole na tunelový proud, se pohybuje v rozsahu 0 až 2 a v našem případě jsme dostali nejlepší shodu naměřených charakteristik s teoretickým vyjádřením VA charakteristiky pro součinitel $a = 0$.

Charakteristická hodnota tunelového napětí U_T je dána vztahem [6]:

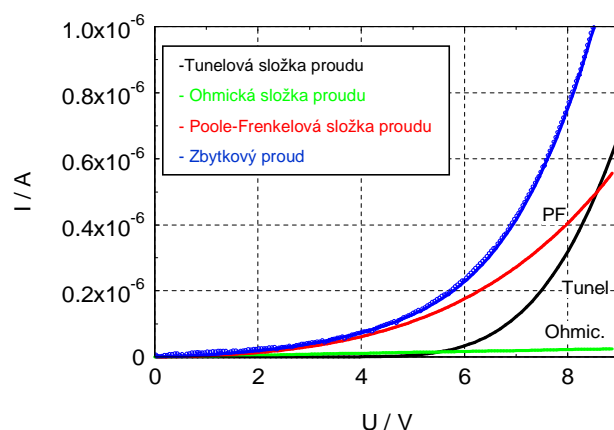
$$U_T = (8\pi\sqrt{2m^*}/3eh)(e\Phi_0)^{1.5}t_0 \quad (2.7)$$

Kde m^* je efektivní hmotnost elektronů, $h = 6.6 \times 10^{-34}$, J_s je Planckova konstanta, $e\Phi_0$ udává výšku potenciálové bariery na rozhraní polovodič-izolant.

2.2.5.4 Celková hodnota zbytkového proudu kondenzátoru

Celková hodnota zbytkového proudu závisí na intenzitě elektrického pole přiloženého na izolační vrstvu. Jednotlivé složky zbytkového proudu jsou pro kondenzátor zobrazeny na Obr. 2.6. Celkový zbytkový proud kondenzátoru je dán součtem jednotlivých složek a je vyjádřen následujícím vztahem součtu jednotlivých složek [13, 14]:

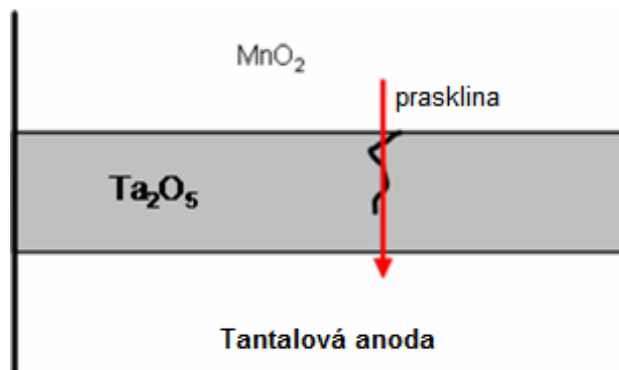
$$I_L = G_\Omega U + G_{PF} U \exp(\beta_{PF} \sqrt{U}) + I_T \exp(U_T / U) \quad (2.8)$$



Obr. 2.6: Jednotlivé složky zbytkového proudu – ohmická, Poole-Frenkelova a tunelová

2.2.5.5 Polarizační a svodový proud izolační vrstvy

Při experimentálním sledování zbytkového proudu se uplatňuje polarizační proud určený nabíjením elektrod. Složka tohoto proudu závisí na rychlosti měření, a jak ukážeme dále, tuto složku jsme od zbytkového proudu odečetli.



Obr. 2.7: Praskliny v dielektriku během procesu formování

Během procesu formování dielektrika roste na zesintrované anodě vrstva pentoxidu tantalu. Aby tato vrstva měla lepší elektrické vlastnosti, žíhá se při vysoké teplotě. Během žíhání však v důsledku různé teplotní roztažnosti materiálů může docházet v dielektriku k vytváření prasklin a ty potom mohou výrazně ovlivnit šum součástky a případně i celkovou hodnotu zbytkového proudu. V okolí prasklin dojde ke zvýšení intenzity elektrického pole a k lokálnímu nárůstu proudové hustoty, jak je schematicky zobrazeno na Obr. 2.7 [14].

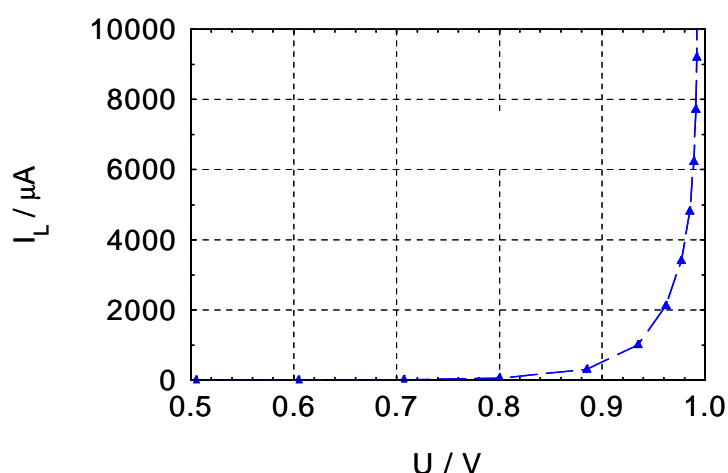
2.2.6. Reverzní režim

Informaci o charakteru daného průběhu je možno získat z Obr. 2.8, kde odporová a potenciálová složka je oddělena a charakteristika může být tím pádem aproximována exponenciální funkcí proudu v závislosti na přiloženém stejnosměrném napětí [2].

V reverzním režimu má v tomto důsledku VA charakteristika nelineární závislost odpovídající aproximaci exponenciálního charakteru popsaného následující rovnicí, která popisuje závislost proudu a napětí.

$$I = I_0 (\exp(\beta U) - 1) \quad (2.9)$$

kde β je hodnota od 20 do 25 V^{-1} . Tato hodnota parametru β koresponduje faktoru vysoké idealizace $n \geq 2$. I_0 je saturační proud, ze kterého se dá stanovit Schottkyho potenciálová bariéra [6, 19].



Obr. 2.8: Reverzní režim VA charakteristiky v lineární stupnici

2.2.7. Teplotně závislé VA charakteristiky

Závislost zbytkového proudu na teplotě v normálním a reverzním režimu se dá popsat pomocí Arrheniusovy aproximace:

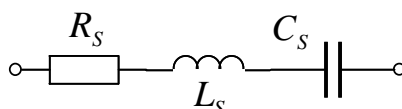
$$I = I_0 \exp(E_A/kT) \quad (2.10)$$

kde, E_A je aktivační energie [11, 14, 17].

2.2.8. Vlastnosti a parametry tantalového kondenzátoru

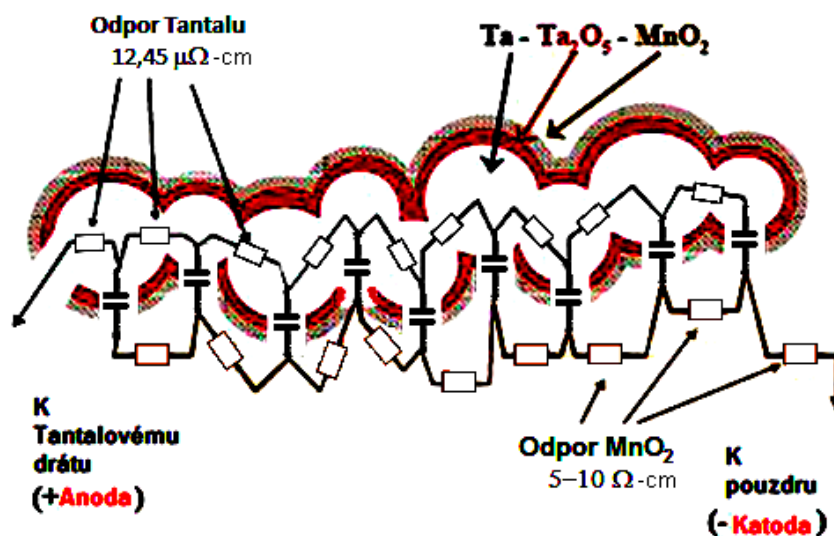
Všechny typy kondenzátorů mají nežádoucí parazitní vlastnosti. Ekvivalentní sériový odpor (*ESR*) se ve všech typech kondenzátorů uplatňuje z důvodu, že desky kondenzátoru nejsou dokonalým vodičem elektrického proudu, mají konečný odpor daný vodivostí použitého materiálu. Taktěž dielektrikum není dokonalým izolantem a

má vodivost, která se dá v praxi vyjádřit odporem řádově v oblasti 10-1000 M Ω . Tato parazitní vodivost se podílí na parametru udávající ztráty v dielektriku a je součástí vztahu popisujícího ztrátový činitel dielektrika. Ekvivalentní sériová indukčnost (*ESL*) je vytvořena konstrukčním provedením desek kondenzátoru a dalších kontaktních přívodních vodičů, které taktéž markantně ovlivňují celkovou parazitní indukčnost kondenzátoru. Obecně se dá říct, že základní elektrické chování kondenzátoru lze popsat jeho sériovým zapojením kapacity kondenzátoru se sériovým odporem *ESR* a sériovou indukčností *ESL*, tak jak je patrné z Obr. 2.9.



Obr. 2.9: Základní náhradní schéma skutečného kondenzátoru

Většina parazitních členů/elementů není stanovena jenom typem materiálu, ale také konstrukcí celého provedení kondenzátoru a i samotnými výrobními procesy. Výběry vhodných materiálů, zdokonalování konstrukčního provedení a vylepšování výrobních procesů jsou součástí stálého zdokonalování vlastností kondenzátorů a snižování parazitních vlastností kondenzátoru [4]. V průběhu konstrukce tantalových kondenzátorů je tantalový prach lisován a následně sintrován do kvádového tvaru anody. Tato struktura vytváří rozloženou kapacitní síť, tak jak je ilustrováno na Obr. 2.10. Části tantalového prachu jsou spojeny ve tvaru anody. Na povrchu je vytvořeno dielektrikum Ta_2O_5 , vytvářející kapacitu kondenzátoru. Toto dielektrikum má taktéž ztrátový odpor R_L , který může být demonstrován jako odpor připojený paralelně k elementům kapacity kondenzátoru.



Obr. 2.10: Rozložené elementy *R*, *C* hodnot ve struktuře tantalového kondenzátoru

Další sítí odporových elementů může být vyjádřeno kontaktování MnO_2 na povrchu dielektrika. Tato reprezentace elektrických členů kondenzátoru se tím pádem stává komplexním *RC* „žebříkem“ kondenzátorů a odporů vytvořených z individuálních tantalových členů asociovanými jejich odporem. Za předpokladu, že jednotlivé elementy kapacity budou rozděleny rovnoměrně, se dá říci, že časová konstanta bude delší pro elementy blízko centra anodové struktury než časová konstanta blízko povrchu spojení s katodovou vrstvou. Při nízké frekvenci jsou schopny reagovat všechny členy kapacity

a odporu. V případě, že bude frekvence růst, přídavný odpor členů, které jsou hlouběji ve struktuře, vytvoří situaci, při které RC časová konstanta je tak nízká, že nereaguje na odezvy způsobené touto vyšší frekvencí. Zvyšováním frekvence se dále efektivně eliminují kapacitní elementy z obvodu pohybujícího se z hlubších vrstev pelety do vrstev v blízkosti postříbřeného povrchu katodového kontaktu. Tento efekt je znám jako „roll-off“ kapacity a je jeden z nejvíce převládajících způsobů pozorování negativního efektu hodnoty sériového odporu ESR v těchto typech součástek [4, 5].

3. Cíle disertační práce

Tantalový kondenzátor je kvalitní moderní součástka elektronických obvodů s širokým použitím v praxi. Nicméně při neustálém tlaku na miniaturizaci se zvyšují problémy s projevením některých parazitních vlastností součástek tohoto druhu. V současné době jsou k dané problematice publikovány materiály, řešící jen dílčí hlediska a neposkytující dostatečně komplexní nástroje pro optimalizaci výroby.

Cílem této práce je analýza fyzikálních vlastností MIS struktury tantalového kondenzátoru za účelem zjištění transportu a akumulace náboje v kondenzátoru. Je taktéž nutné zaměřením se na vytvoření náhradního obvodu kondenzátoru popisujícího jeho reálné chování.

Výchozím bodem jsou experimentálně zjištěné charakteristiky kondenzátoru a vytvoření fyzikálního modelu kondenzátoru v závislosti na přiloženém napětí, frekvenci a teplotě vzorku. Na základě srovnání teoretických závěrů a interpretace experimentálně zjištěných charakteristik bude objasněno rozdělení náboje na elektrodách a lokalizovaných stavech amorfního izolantu. Analýza vlastností tantalového kondenzátoru a jeho modelování s cílem vytvoření vhodných teoretických nástrojů pro zlepšování jeho reálných vlastností a pro optimalizaci jeho výroby.

Dalším dílčím výsledkem práce bude návrh a výpočet prvků náhradního obvodu reprezentujícího frekvenční a teplotní závislost impedance, ekvivalentního sériového odporu, ekvivalentní sériové kapacity a ztrátového úhlu.

Skutečné elektronické součástky mají poněkud odlišné vlastnosti než je tomu v případě ideálních pasivních komponentů. Nicméně, pro zjednodušení výpočtů při návrhu elektronických obvodů se počítá s použitím ideálních součástek, v jejichž důsledku vzniká dosažení ne zcela přesných a skutečnosti odpovídajících výsledků. Tudíž tato kalkulace je jen předběžná a požaduje detailní ověření na základě použití skutečných součástek.

Znalost fyzikální struktury a reálného chování kondenzátoru je taktéž požadována pro správné pochopení jeho podstaty, na jejímž základě se dá dále provést zdokonalení a přiblížení se ideálním parametrům z hlediska výrobních postupů.

Z důvodu těchto podnětů se hledají řešení ke zjištění náhradního modelu popisujícího skutečné fyzikální a elektrické chování kondenzátorů.

Mnoho simulačních programů (OrCAD PSpice, atd.) sloužících k návrhu elektronických obvodů používá knihovní prvky aktivních součástek sloužících pro vytváření obvodových zapojení. Žádný z těchto softwarů však neobsahuje skutečné knihovny pasivních komponentů, jako jsou odpory, kondenzátory a cívky. Tyto součástky jsou v programech obsaženy pouze v idealizované podobě bez obsažení jejich parazitních parametrů, které mají vliv na jejich celkové chování. Elektrické parametry ideálních součástek jsou bohužel odlišné od chování skutečných pasivních součástek, čímž vznikají nepřesnosti při modelování chování obvodu v simulačních programech. Tyto nepřesnosti mohou mít markantní vliv na očekávaný výsledek chování obvodu.

Práce je zaměřena na optimalizaci náhradního obvodu tantalového kondenzátoru. Výchozím bodem studia je fyzikální model kondenzátoru a experimentálně zjištěné charakteristiky kondenzátoru (kapacita, ekvivalentní sériový a paralelní odpor a ztrátový činitel) v závislosti na přiloženém napětí, frekvenci a teplotě vzorku. Na základě srovnání teoretických závěrů a interpretace experimentálně zjištěných charakteristik

bude objasněno rozdělení náboje na elektrodách a lokalizovaných stavech amorfního izolantu.

Dalším dílčím výsledkem práce bude návrh a výpočet prvků náhradního obvodu reprezentujícího frekvenční a teplotní závislost impedance, ekvivalentního sériového odporu, ekvivalentní sériové kapacity a ztrátového úhlu.

Jádro problému řešení této problematiky je hledání vhodného náhradního schématu tantalového kondenzátoru s kmitočtově nezávislými parametry prvků, které umožňuje nejsnazší a nejefektivnější analýzu vlastností i s tím ohledem, že tyto hodnoty jsou funkcemi dalších veličin. Dále je ale třeba, aby toto náhradní schéma co nejlépe odpovídalo co nejvíce skutečné struktuře uspořádání a poměrně složité fyzikální funkci tohoto kondenzátoru a s tím i zjevné souvislosti elektrických parametrů s technologií výroby. Na druhou stranu je třeba podotknout, že vytvoření vhodného náhradního schématu není jednoduchou úlohou, protože je nutné modelovat poměrně složitou strukturu, která má při detailním přístupu charakter obvodu s rozloženými parametry. Proto bude model poměrně složitý a bude nutné vyhodnotit míru vlivu jednotlivých prvků tohoto složitého schématu na přesnost pro získání přijatelného kompromisu z hlediska dostatečné přesnosti a na druhou stranu přijatelné složitosti z hlediska vyhodnocení pro optimalizaci výroby.

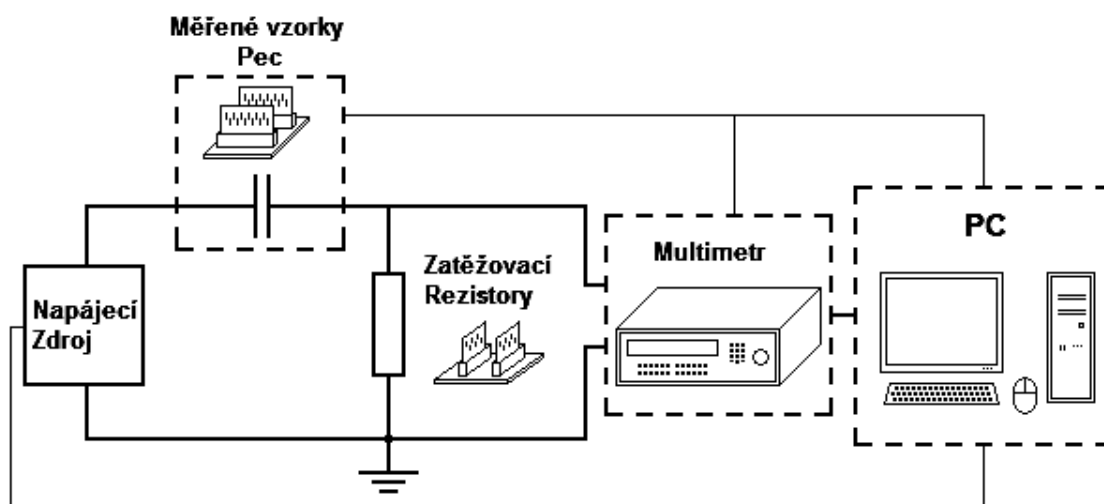
4. Stav řešení

4.1. Měřicí pracoviště a procedury

4.1.1. Měřicí pracoviště pro měření VA charakteristik

Pro měření VA charakteristik bylo vybudováno automatizované pracoviště sestávající z měřících přístrojů řízených počítačem, který taktéž slouží ke sběru dat a vyhodnocování měření do grafické podoby. Program, přes který je počítač ovládán byl vytvořen v programovém prostředí Matlab. Pomocí Matlabu byla data zformátována do podoby, která je vhodná pro další počítačové zpracování v příslušných tabulkových a grafických kalkulátorech.

Z obrázku Obr. 4.1 je patrné schéma zapojení jednotlivých přístrojů měřicího pracoviště pro měření VA charakteristik. Na dalším Obr. 4.2 je zobrazení fyzického provedení měřicího pracoviště. Jako zdroj stejnosměrného napětí byl použit programovatelný zdroj Agilent 6624A, který je pro nastavení napětí řízen počítačem umožňujícím měření v normálním a reverzním režimu. Pro uchycení a kontaktování vzorků je použito měřících přípravků v provedení PCB desek. Měření je prováděno v jedné sekvenci po 5 kusech tak, že se proměří první vzorek při stanovených podmínkách teploty, a pak následuje automatické/programované přepnutí na druhý a následný vzorek, dokud není provedeno proměření všech testovaných součástek. Flexibilně je možno měnit připojení zatěžovacích odporů, které se provádí kontaktováním pomocí konektorů s kabely. Takto je pak možno měnit hodnoty odporů pro měření různých průběhů zbytkového proudu [7].



Obr. 4.1: Blokové schéma zapojení měřících přístrojů pro měření VA charakteristik

Pro měření na teplotách odlišných od pokojové teploty je použita teplotní komora, ve které je možno provádět měření na kladných i záporných hodnotách teplot. Vzorky jsou uchyceny v měřící komoře za pomoci speciálního držáku, který je konstrukčně těmto teplotám přizpůsoben. V průběhu měření VA charakteristik se na měřené vzorky přivádí napětí, tak aby bylo možno za pomoci zatěžovacích rezistorů snímat proud, který měřeným kondenzátorem v průběhu měřicího procesu prochází. Měřené hodnoty napětí a proudu jsou detekovány měřící aparaturou a přeneseny do programu v počítači, který je převede do grafického zobrazení. Výsledná výstupní data jsou pak transformovatelná

do tabulkových procesorů typu Excel a dalších. Všechny pět průběhů daného měření je pak vloženo do jedné tabulky a zobrazeno v grafech [7].



Obr. 4.2: Zobrazení pracoviště pro měření VA charakteristik

4.1.2. Princip a funkce měřícího zařízení frekvenčních charakteristik

Měření elektrických frekvenčních charakteristik tantalového kondenzátoru je založeno na detekci střídavého napětí na měřené diskrétní součástce (v našem případě tantalového kondenzátoru), střídavého proudu procházejícího prvkem a fázového posuvu mezi veličinami napětí a proudu. Z těchto naměřených hodnot lze pak stanovit absolutní hodnotu impedance Z a fázového posuvu φ při dané frekvenci, z čehož je poté možné spočítat reálnou a imaginární složku impedance měřené součástky.

Po sestavení automatizovaného měřícího pracoviště je možno získat frekvenční závislosti elektrických parametrů – sériové kapacity C_S , sériového odpor R_S , absolutní hodnoty impedance Z a ztrátového činitele $tg\delta$ v závislosti na teplotě okolí a přiloženém stejnosměrném napětí (DC bias voltage). Tyto veličiny jsou získány na základě matematického rozkladu jednotlivých složek impedance. Z parametrů Z a φ lze taktéž dále stanovit celkovou hodnotu sériové indukčnosti L_S .

Pracoviště je složeno z RLC mostu připojeného přes IEEE-488 (GPIB sběrnice) k řídicímu a vyhodnocovacímu počítači. Měřený kondenzátor se připojí pomocí sondy čtyřvodičového zapojení k měřicímu mostu přes zdroj napětí umožňující nastavení stejnosměrného předpětí. Čtyřvodičové zapojení sondy se používá z důvodu snímání střídavého napětí na kondenzátoru a střídavého proudu protékajícího kondenzátorem, což umožňuje stanovení velikosti napětí, proudu a fázového posuvu mezi těmito veličinami, na jejichž základech se pak provádí vyhodnocení jednotlivých reálných a imaginárních složek kondenzátoru. Další výhodou čtyřvodičového měření je možnost použití delších přívodů, které jsou nezbytné k umístění kondenzátoru do teplotní komory potřebné pro nastavení podmínek okolní teploty. Vliv délky přívodu se značně omezí nebo téměř zcela eliminuje kalibrací před začátkem měření.

Pro měření závislostí elektrických parametrů kondenzátoru na teplotě a stejnosměrného napětí je zapotřebí nastavení požadovaných počátečních podmínek. Vliv teploty kondenzátoru je zkoumán v teplotní komoře, která umožňuje plynulé nastavení okolní teploty a tím chlazení nebo ohřev kondenzátoru v rozsahu od -55°C do 125°C .

K nastavení stejnosměrného předpětí (DC bias voltage) slouží zdroj napětí, který je připojen k sondě.

Průběh měření je automatizován, obsluha je omezena pouze na vložení měřeného vzorku, nastavení počátečních napěťových/teplotních podmínek a spuštění měření. Počítač po spuštění řídí průběh měření, zaznamenává a vyhodnocuje měřená data automaticky. Jediným parametrem, který se musí manuálně nastavit na požadovanou hodnotu, je teplota okolí. Tato teplota se nastavuje na termizační peci, která vyhřívá součástku na požadovanou hodnotu v daném rozsahu.

Dalším nezbytným měřením sloužícím ke zjištění chování kondenzátoru v reverzním a normálním směru je měření zbytkového proudu I_{LI} kondenzátorem. Využívá se stejného měřicího pracoviště jako pro měření frekvenčních charakteristik, ale přístroj pracuje ve stejnosměrném režimu umožňujícím plynulé nastavení napětí na kondenzátoru a snímání hodnot stejnosměrného proudu protékajícím kondenzátorem, čímž se získá závislost proudu na napětí a tím i požadovaná VA charakteristika.

Velikost zbytkového proudu je závislá na velikosti přiloženého stejnosměrného napětí na kondenzátoru. Změnou napětí (v kladném nebo záporném směru), lze měřit zbytkový proud v obou polaritách, na jehož základech lze pak získat stejnosměrné podmínky/parametry náhradního modelu kondenzátoru.

4.2. VA charakteristiky při pokojové teplotě

Jak již bylo dříve zmíněno, tantalový kondenzátor se skládá z tantalové anody, amorfní dielektrické vrstvy tvořené Ta_2O_5 a polovodičové katody MnO_2 . Kondenzátorová struktura může být v první fázi považována za ideální MIS strukturu. Mechanismus transportu nosičů náboje a uložení náboje v izolační vrstvě jsou důležitými parametry pro použití těchto součástek. Dominantními mechanismy transportu nosičů náboje je ohmická vodivost pro nízká elektrická pole, zatímco dominantním mechanismem na větších napětích a tím i vyšších elektrických polích v rozsahu 1-2.5 MV/cm je Poole-Frenkelův mechanismus.

Dielektrikum oxidační vrstvy obsahuje kyslíkové vakance s koncentracemi v oblasti $10^{18}/\text{cm}^3$, které zde působí jako donorové hluboké pasti a jsou nabitě v průběhu aplikace elektrického pole přiložením stejnosměrného napětí. Než se začne s měřením VA charakteristik kondenzátoru, je třeba měřený kondenzátor zcela vybit. Pro prozkoumání vlastností pak může být MIS struktura modelu reálného kondenzátoru vhodně modifikována v souladu s výsledky měření a analýzy zbytkového proudu kondenzátoru.

Experimentální analýza v teplotním rozsahu může poskytnout informace o rozdílné velikosti složek zbytkového proudu, kterými jsou ohmická složka, Poole-Frenkelova a tunelová složka. Budou změřeny VA charakteristiky tantalových kondenzátorů PV10-6 v teplotním rozsahu 298K až 373K. Výsledky měření budou použity pro podrobnou analýzu. Tloušťka dielektrika d u PV vzorků je zhruba 150 nm. Výsledkem měření zjistíme její skutečnou tloušťku. Dále zde počítáme s relativní permitivitou Ta_2O_5 dielektrika kondenzátoru $\epsilon_r = 27$, která je vytvořena anodickou oxidací Ta anody. Na již dříve popsání aparatuře byla provedena řada měření vzorků PV10-6 jak v normálním, tak i v reverzním režimu, které byly následně podrobeny detailní analýze jejich parametrů.

4.2.1. VA charakteristiky v normálním režimu typu PV10-6

4.2.1.1 VA charakteristiky v normálním režimu vzorku 19

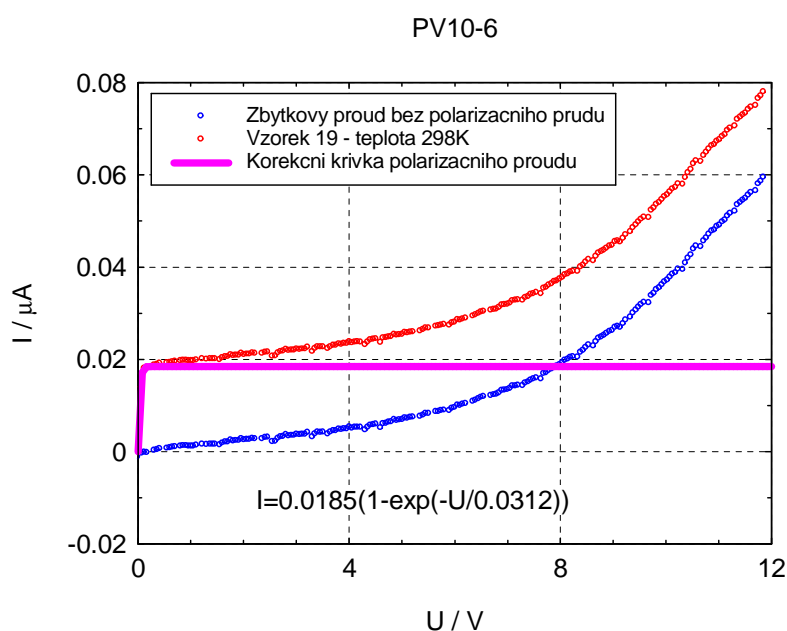
Nejprve je provedena analýza vzorku 19, který měl z měřených vzorků nejlepší a tudíž nejnižší zbytkový proud při jmenovitém napětí 6V. Dále jsou obdobným způsobem provedeny i analýzy vzorku 12 a 17.

Vzorek 19, který je v grafu Obr. 4.3 vynesena červenými body znázorňující část VA charakteristiky pro rozsah napětí do 1,5 V, kde se zejména efekt polarizačního proudu uplatňuje. V tomto rozsahu napětí se projeví pouze polarizační proud a částečně i ohmický proud. Další složky zbytkového proudu jsou zanedbatelné.

Růžovou aproximační křivkou je znázorněn průběh polarizačního proudu. Z charakteru křivky vyplývá popis polarizační proud následující rovnicí:

$$I_{pol} = 1.85 \cdot 10^{-2} \left(1 - \exp\left(\frac{-U}{3.12 \cdot 10^{-2}}\right) \right) \quad (4.1)$$

Na Obr. 4.3 je taky patrné, jak bude vypadat průběh zbytkového proudu bez polarizační složky (modrá křivka), který vznikne odečtením korekční křivky polarizačního proudu znázorněné růžově od naměřeného průběhu (červená křivka).



Obr. 4.3: Korekce polarizačního proudu u vzorku 19

Pro další analýzu budeme již pracovat s korigovaným průběhem znázorněným modře v grafu. Tento průběh budeme dále rozkládat na jeho jednotlivé složky, kterými jsou již výše zmíněná ohmická, Poole-Frenkelova a tunelová složka. Z toho vyplývá, že celkový proud se dá popsat součtem jednotlivých složek, tak jak je vyjádřeno rovnicí:

$$I_L = I_{\Omega} + I_{PF} + I_T \quad (4.2)$$

Její rozvinutím dostaneme detailní vyjádření:

$$I_L = G_{\Omega} U + G_{PF} U \exp(\beta_{PF} \sqrt{U}) + I_{T0} U^{\alpha} \exp(U_T / U) \quad (4.3)$$

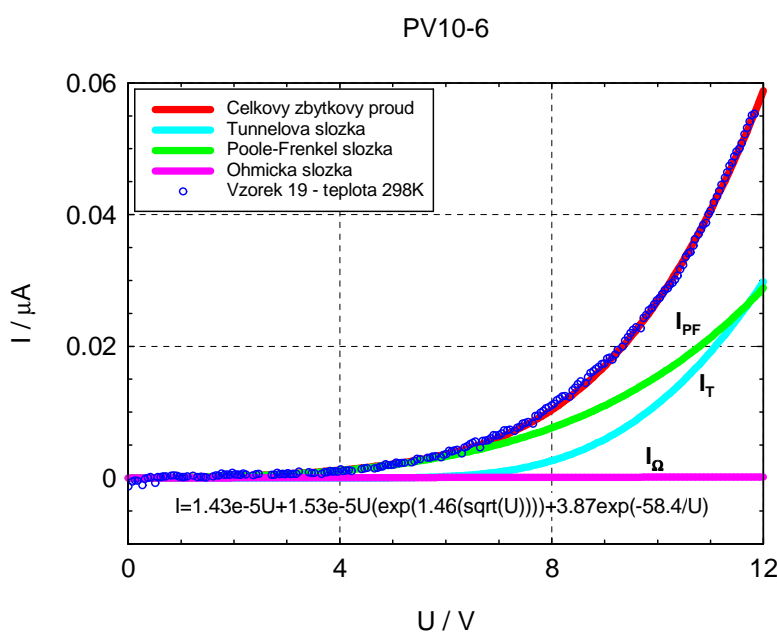
kde I_{T0} je součinitel tunelového proudu, který závisí na tvaru bariéry, přičemž U_T je charakteristická hodnota tunelového napětí. Exponent α zahrnuje vliv intenzity elektrického pole na tunelový proud. Tento koeficient se pohybuje v rozmezí 0 až 2. V našem případě byla nejlepší shoda optimalizace křivky s koeficientem $\alpha = 0$ z čehož následně vyplývá finální vztah:

$$I_L = G_\Omega U + G_{PF} U \exp(\beta_{PF} \sqrt{U}) + I_T \exp(U_T / U) \quad (4.4)$$

Na Obr. 4.4 je patrná VA charakteristika vzorku 19 po kompenzaci polarizačního proudu (modrý průběh). Tento zbytkový proud budeme v měřeném rozsahu napětí modelovat závislostí podle vztahu (4.4). Po jejich vyjádření pak dostaneme finální podobu průběhu popsanou rovnicí:

$$I_L = 1.43 \cdot 10^{-5} U + 1.53 \cdot 10^{-5} U \exp(1.46 \sqrt{U}) + 3.87 \exp(-58.4 / U) \quad (4.5)$$

kde hodnota $G_\Omega = 1.43 \cdot 10^{-5}$ odpovídá velikosti ohmické vodivosti, $G_{PF} = 1.53 \cdot 10^{-5}$ odpovídá vodivosti Poole-Frenkelova jevu, $\beta_{PF} = 1.46 \text{ V}^{-1}$ je velikost Poole-Frenkelova součinitele. $I_T = 3.87 \text{ uA}$ je součinitel tunelového proudu a $U_T = 58.4 \text{ V}$ je charakteristická hodnota tunelového napětí.



Obr. 4.4: Zbytkový proud a jeho složky u vzorku 19

Korekcí vztahu vyjádření Poole-Frenkelova součinitele β_{PF} dostaneme

$$\beta_{PF} = (e^3 / \pi \epsilon_0 \epsilon_r d)^{1/2} / kT, \quad (4.6)$$

z čehož pak lze vyjádřit tloušťku dielektrika kondenzátoru

$$d = \frac{e^3}{\pi \epsilon_0 \epsilon_r (kT \beta_{PF})^2}, \quad (4.7)$$

kde e je elementární náboj, ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r je relativní permitivita izolantu (v našem případě $\epsilon_r=27$), d je tloušťka izolační vrstvy a kT je tepelná energie.

Po dosazení hodnot do vztahu dostáváme tloušťku dielektrika tantalového kondenzátoru vzorku 19:

$$d = \frac{e^3}{\pi \epsilon_0 \epsilon_r (kT \beta_{PF})^2} = \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^3}{\pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 27 \cdot (1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 1.46)^2} = 151.4 \text{ nm} \quad (4.8)$$

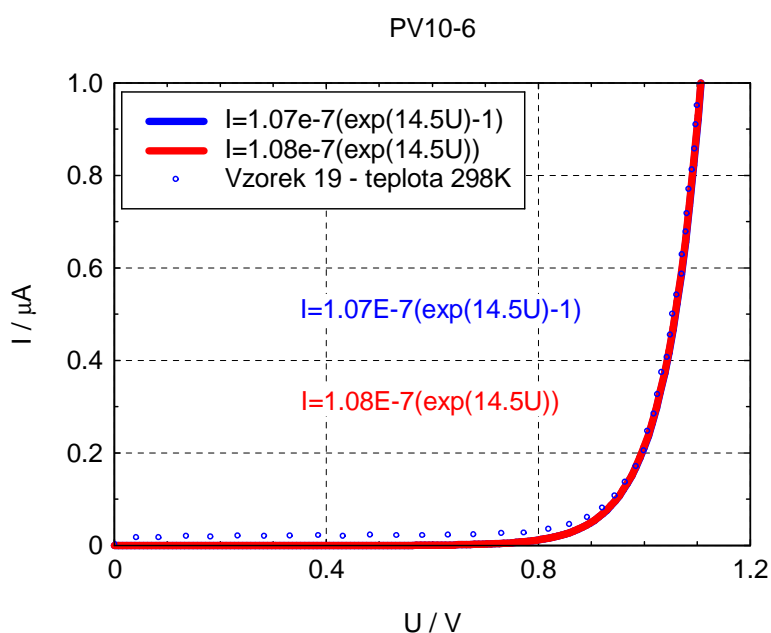
4.2.2. VA charakteristiky v reverzním režimu typu PV10-6

4.2.2.1 VA charakteristiky v reverzním režimu vzorku 19

VA charakteristika v reverzním režimu je zobrazena na Obr. 4.5. Modrými tečkami jsou zde vyneseny hodnoty reverzního proudu v závislosti na napětí. Z grafu je patrné, že průběh proudu má exponenciální charakter. Tento průběh má velkou podobnost s polovodičovými diodami a také se zde uplatňuje exponenciální průběh funkce popisující reverzní proud v závislosti na napětí aplikovaném na diodovou MIS strukturu.

$$I = I_0 \exp(\beta \cdot U) \quad (4.9)$$

Po odečtení z grafu dostáváme konstantu $\beta = 14.5 \approx 20 \text{ V}^{-1}$. Tato hodnota parametru β zhruba odpovídá faktoru ideality $n = 2$.



Obr. 4.5: VA charakteristiky v reverzním režimu vzorku 19 při teplotě 298K a jeho aproximace v lineárních souřadnicích

Při popisu průběhu reverzního proudu ze vzorce (4.9) dále dostáváme výslednou aproximaci:

$$I = 1.07 \cdot 10^{-7} \exp(14.5 \cdot U) \quad (4.10)$$

a obdobně pak platí i následující vztah:

$$I = 1.08 \cdot 10^{-7} (\exp(14.5 \cdot U) - 1) \quad (4.11)$$

Z výsledků měření a aproximace křivky je patrné, že ideální hodnota proudu by byla $I_0 = 1.07 \cdot 10^{-7} \mu\text{A}$, což v praxi ovšem není možné dosáhnout, jelikož se zde uplatňují parazitní vlastnosti materiálů a zejména pak vliv úbytku napětí na vrstvě burelu MnO_2 , která je dána ohmickou složkou proudu. Velikost konstanty $\beta = 14.5 \text{ V}^{-1}$ odpovídá faktoru ideality $n \geq 2$. Je zde ovšem nutno podotknout, čím je vyšší kvalita izolační vrstvy v našem případě vrstvy Ta_2O_5 , tím je konstanta β při teplotě 300K vyšší.

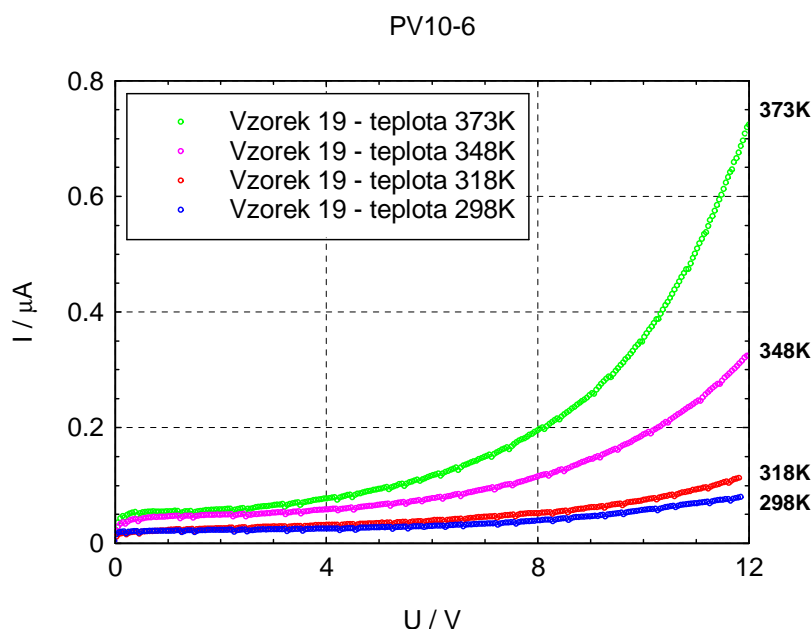
4.3. VA charakteristiky v teplotním rozsahu 298K-373 K

4.3.1. VA charakteristiky v normálním režimu PV10-6

VA charakteristiky sad kondenzátorů typu PV10 byly měřeny v teplotním rozsahu 298 K – 373 K v normálním režimu. Pro zkoumání teplotně závislých charakteristik budeme vycházet z VA charakteristiky při pokojové teplotě. Další informace získáme proměřením VA charakteristik vytypovaných vzorků na dalších teplotách, kterými jsou včetně 298 K taktéž teplotní body 318 K, 348 K a 373 K.

4.3.1.1 VA charakteristiky v normálním režimu vzorku 19

Na Obr. 4.6 jsou zobrazeny teplotně závislé charakteristiky zbytkového proudu včetně polarizačního proudu. Z obrázku je patrné, že zbytkový proud kondenzátoru je přímo úměrný růstu teploty; čím je teplota vzorku, potažmo teplota okolí vyšší, roste i zbytkový proud včetně polarizačního proudu kondenzátoru. Dá se předpokládat, že tento fakt bude mít i efekt na teplotní závislost a změnu velikosti jednotlivých složek zbytkového proudu (ohmická složka, Poole-Frenkelova složka a tunelová složka zbytkového proudu).



Obr. 4.6: VA charakteristiky zbytkového proudu se složkou polarizačního proudu u vzorku 19 měřené v rozsahu teplot 298 K až 373 K

Pro prozkoumání velikosti aktivační energie v normální režimu, která je závislá na teplotě je nutno nejprve provést rozložení zbytkového proudu zbaveného složky polarizačního proudu na jednotlivé složky (ohmická, Poole-Frenkelova a tunelování),

tak jak tomu bylo v předchozí kapitole při analýze chování zbytkového proudu při pokojové teplotě. Zde budeme podrobně zkoumat velikosti jednotlivých složek pro různé teploty v rozsahu 298K až 373K. Díky aproximaci zbytkového proudu pomocí vzorce popisujícího jeho funkci dostaneme rovnice, které vycházejí z naměřených a analyzovaných grafů po rozložení na jednotlivé složky v závislosti na teplotě.

Z aproximací zmiňovaných grafů budeme dále pracovat na vytvoření teplotní závislosti aktivační energie E_A ohmické, Poole-Frenkelovy a tunelové složky proudu a zároveň i aktivační energie E_A zbytkového proudu. Nejdříve ovšem separujeme jednotlivé složky proudu, tak jak je popsáno v rovnici (4.2), čímž obdržíme složky platné pro napětí U s parametrem teploty a tím pádem obdržíme vztahy s koeficienty:

$$I_L = 1.43e-5U + 1.53e-5U \exp(1.46(\sqrt{U})) + 3.87 \exp(-58.4/U) \quad \text{– při 298K} \quad (4.12)$$

$$I_L = 3.816e-5U + 1.88e-5 \exp(2.12(\sqrt{U})) + 5.9 \exp(-62.1/U) \quad \text{– při 318K} \quad (4.13)$$

$$I_L = 1.37e-4U + 2.09e-5U \exp(1.73(\sqrt{U})) + 12.9 \exp(-55.4/U) \quad \text{– při 348K} \quad (4.14)$$

$$I_L = 3.71e-4U + 1.32e-4U \exp(1.49(\sqrt{U})) + 50.6 \exp(-60.0/U) \quad \text{– při 373K} \quad (4.15)$$

kde v každé složce dosadíme za $U = 9$ V. Bylo zvoleno napětí 9 V, protože při tomto napětí se již uplatňuje charakter všech tří složek. Při napětí $U = U_R = 6$ V byla tunelová složka proudu minimální a tímto nedostatečná pro její analýzu.

Po dosazení $U = 9$ V do rovnice dostaneme hodnoty jednotlivých složek proudu včetně celkového zbytkového proudu. Složky zbytkového proudu jsou pak vyneseny do grafů v závislosti na $1000/T$ (K^{-1}), z čehož obdržíme směrnici, ze které lze vypočítat hodnoty aktivačních energií těchto složek.

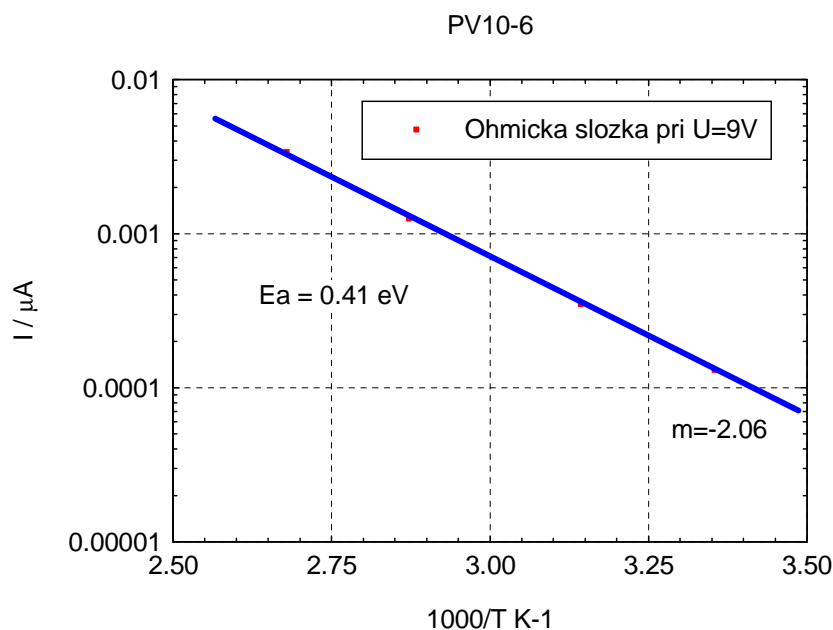
Závislost zbytkového proudu na teplotě v normálním a reverzním režimu se dá popsat pomocí Arrheniusovy aproximace:

$$I = I_0 \exp(E_A/kT), \quad (4.16)$$

kde E_A je aktivační energie. Logaritmickou úpravou této rovnice pak dostaneme vyjádření, kde pro výpočet aktivační energie platí vztah:

$$E_A = -m \cdot 0.2 \text{ (eV)}. \quad (4.17)$$

Hodnota m udává směrnici přímkou v logaritmických souřadnicích, kdy na ose x je vynesena tisíckrát zvýšená převrácená hodnota teploty $1000/T$ (K^{-1}) a na ose y pak vynášíme proud (μA) jednotlivých složek zbytkového proudu.



Obr. 4.7: Teplotní závislost aktivační energie odporové složky vzorku 19 při přiloženém napětí $U=9V$

Po dosazení do vztahu (4.17) dostáváme hodnotu aktivační energie pro ohmickou složku:

$$E_A = -m \cdot 0.2 = 2.06 \cdot 0.2 = 0.41 \text{ (eV)} \quad (4.18)$$

Stejný vztah (4.17) je použit pro výpočet aktivační energie Poole-Frenkelovy složky, kdy obdržíme hodnotu po dosazení $m = -2.053$:

$$E_A = -m \cdot 0.2 = 2.053 \cdot 0.2 = 0.41 \text{ (eV)} \quad (4.19)$$

Dalším výpočtem aktivační energie E_A tunelové složky podle vztahu (4.17), kdy po dosazení hodnoty $m = -2.072$ obdržíme:

$$E_A = -m \cdot 0.2 = 2.072 \cdot 0.2 = 0.41 \text{ (eV)} \quad (4.20)$$

Aktivační energii E_A zbytkového proudu, kdy směrnice přímky $m = -2.103$ dostaneme:

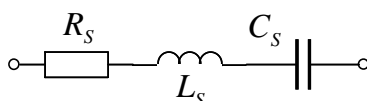
$$E_A = -m \cdot 0.2 = 2.103 \cdot 0.2 = 0.42 \text{ (eV)} \quad (4.21)$$

4.4. Modelování náhradního obvodu Ta kondenzátoru

4.4.1. Tvorba náhradního modelu Ta kondenzátoru

Za předpokladu zjištěných frekvenčních charakteristik parametrů kondenzátoru a znalosti strukturálního a konstrukčního složení je možné vytvořit náhradní model kondenzátoru popisující jeho fyzikální a elektrické chování, přičemž jednotlivé prvky náhradního obvodu určují směrnice frekvenčních charakteristik a udávají závislost parametrů kondenzátoru na teplotě a napětí [4].

K získání tohoto modelu je nejprve nutné vyjít ze základního náhradního modelu kondenzátoru, viz Obr. 4.8. Tento model zanedbává zbytkový proud kondenzátorem a tudíž i ztráty dielektrika. Je popsán na základě impedanční rovnice (4.22).



Obr. 4.8: Základní náhradní schéma kondenzátoru

$$Z = R_s + jX_{L_s} - jX_{C_s} = R_s + j2\pi f L_s - j \frac{1}{2\pi f C_s} \quad (4.22)$$

Na základě naměřených hodnot kondenzátoru 100uF/10V je možné stanovit parametry základního náhradního obvodu, kde hodnoty $R_s(100kHz) = 0,028 \Omega$, $C_s(120Hz) = 100,23 \mu F$ a $L_s(10MHz) = 2,035 nH$ jsou odečteny z tabulky naměřených hodnot. Jsou taktéž stanoveny na různých frekvencích, kde mají dominantní charakter. To znamená, že na nízkých kmitočtech má impedance převládající kapacitní charakter a sériový odpor R_s je konstantní nebo se takřka nemění. Na vysokých kmitočtech se kondenzátor začíná chovat jako indukčnost s převládající induktivní složkou, která je patrná hlavně v oblasti kmitočtů 10MHz.

Dosazením jednotlivých parametrů do vzorce (4.22) lze vyjádření přepsat do tvaru

$$Z(f) = R_s + j2\pi f L_s - j \frac{1}{2\pi f C_s} = \quad (4.23)$$

$$= 0.028 + j(2\pi f \cdot 2.035 \cdot 10^{-9} - \frac{1}{2\pi f \cdot 100.23 \cdot 10^{-6}})$$

kde $Z(f) = |Z|e^{j\varphi}$.

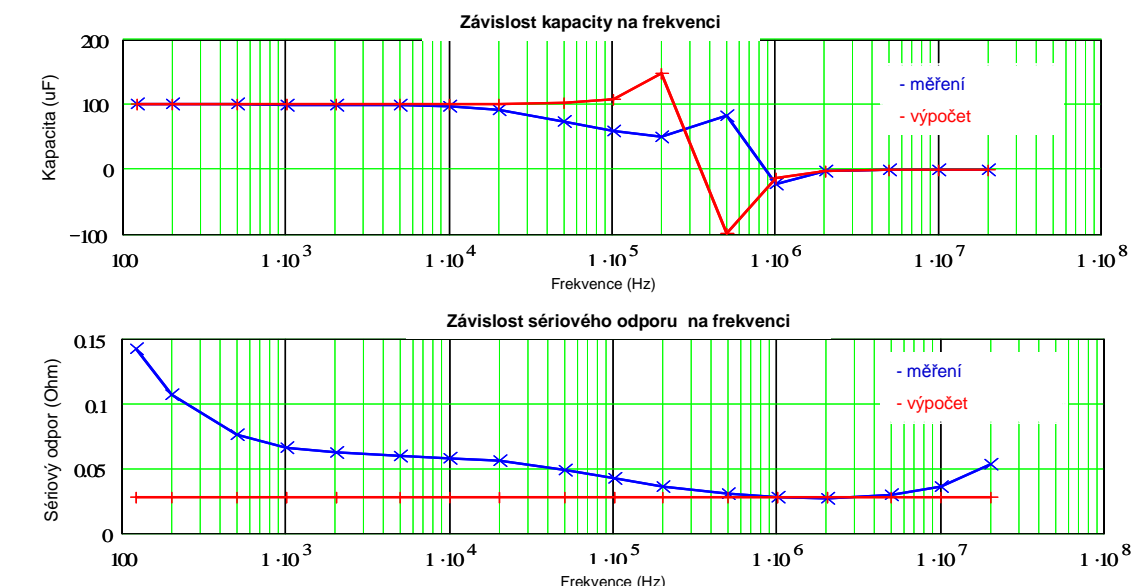
Z vytvořené funkce se dá nalézt matematická závislost $|Z(f)|$ a $\varphi(f)$ na frekvenci. Po vynesení těchto závislostí do grafů naměřených hodnot $|Z(f)|$ a $\varphi(f)$ lze provést srovnání vypočtených parametrů se skutečnými.

Podrobnějším prozkoumáním individuálních parametrů kondenzátoru jsou patrné nepřesnosti aproximace, z důvodu neobsazení všech parametrů v základním náhradním schématu (Obr. 4.9), čímž dochází k chybě zobrazení výsledků a tím tedy pouze hrubému popisu chování kondenzátoru. Nejvíce je patrná tato nedokonalost náhradního modelu na chování sériového odporu R_s , který je u náhradního modelu lineární a nezávislý na frekvenci. V praxi je tato situace ovšem značně odlišná a hodnota tohoto odporu klesá v závislosti na frekvenci do rezonančního kmitočtu, od kterého pak opět pozvolna stoupá (Obr. 4.9).

Abychom do náhradního obvodu zakomponovali všechny vlivy a parazitní vlastnosti kondenzátoru, je potřeba model dále rozšířit o další diskrétní prvky obvodu odpovídající jeho reálnému chování skutečné konstrukce tantalového kondenzátoru.

Jelikož je tantalový kondenzátor nelineární součástka s chováním polovodičové MIS struktury, je potřeba jej zkoumat ze dvou pohledů - a to jak z pohledu lineárního modelu, tak i z nelineární podstaty tantalového kondenzátoru dané jeho MIS strukturou. Pro úvahu týkající se popisu lineárního chování kondenzátoru lze počítat jen s diskrétními lineárními prvky (odpor, kapacita, indukčnost). Další parametry nelineárního charakteru jsou v tuto chvíli zanedbány. Na Obr. 4.10. je patrná struktura

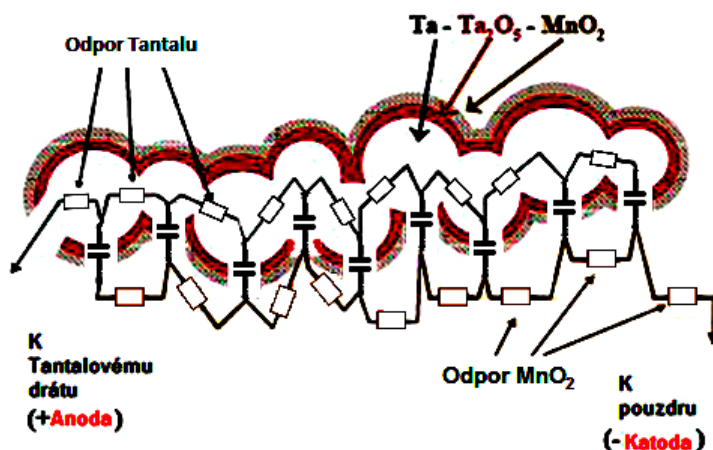
tantalového kondenzátoru, kde je viditelná konstrukce kondenzátoru v rozvinutém tvaru popisující jeho elektrické vlastnosti.



Obr. 4.9: Vypočtené hodnoty individuálních parametrů z naměřených hodnot a náhradního schématu kondenzátoru

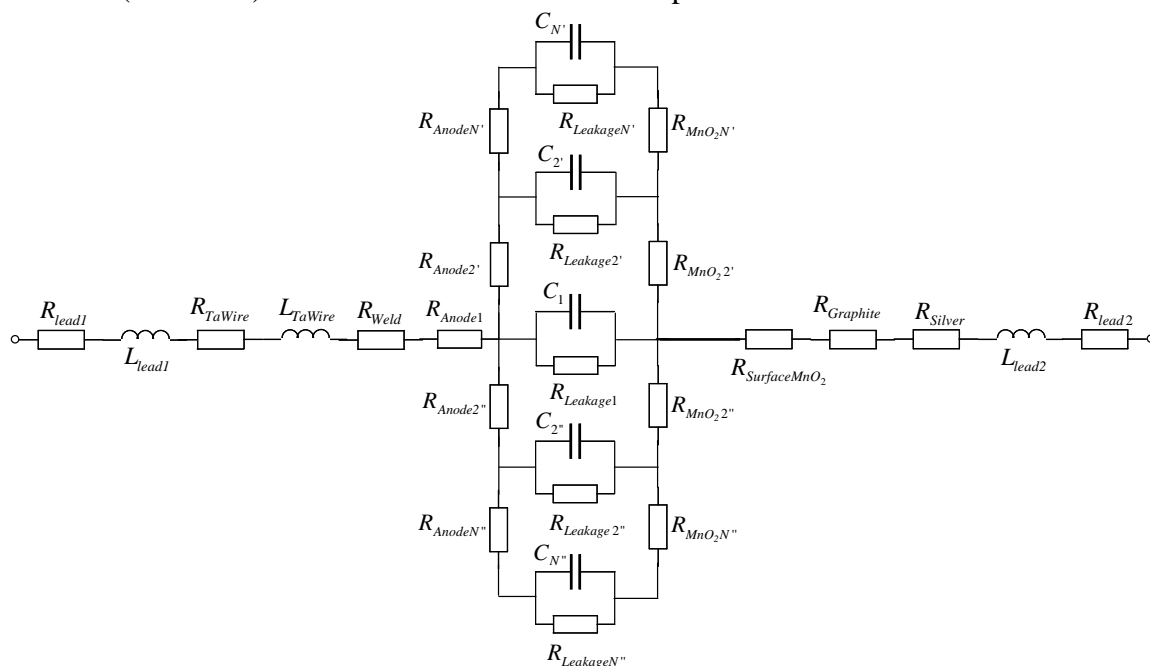
Mechanická konstrukce tantalového kondenzátoru reprezentuje strukturu, která svým tvarem odpovídá náhradnímu spojení jednotlivých diskretních členů. V této struktuře je možno najít souvislost mezi fragmenty sériového odporu, kapacity, svodového odpor, potažmo zbytkového proudu. Vlastní indukčnost kondenzátoru se hlavně projevuje svou velikostí na parazitních vlastnostech kontaktování celé struktury (L_{lead1} , L_{lead2}) a také zde velkou měrou přispívá velikost indukčnosti tantalového drátu L_{TaWire} .

Na základě znalostí konstrukce a obvodového zapojení jednotlivých prvků náhradního modelu lze dále vytvořit náhradní schéma, které odpovídá reálnému chování tantalového kondenzátoru popisující rozložení náboje ve struktuře.



Obr. 4.10: Struktura tantalového kondenzátoru a zohlednění funkce jednotlivých vrstev a mechanických spojení

Rozšířením modelu na základě výše zmíněné hypotézy a následné analýzy dojde k lineární struktuře popisující fyzikální chování kondenzátoru, tak jak to naznačuje obrázek (Obr. 4.11). Tuto strukturu budeme nadále podrobně zkoumat.

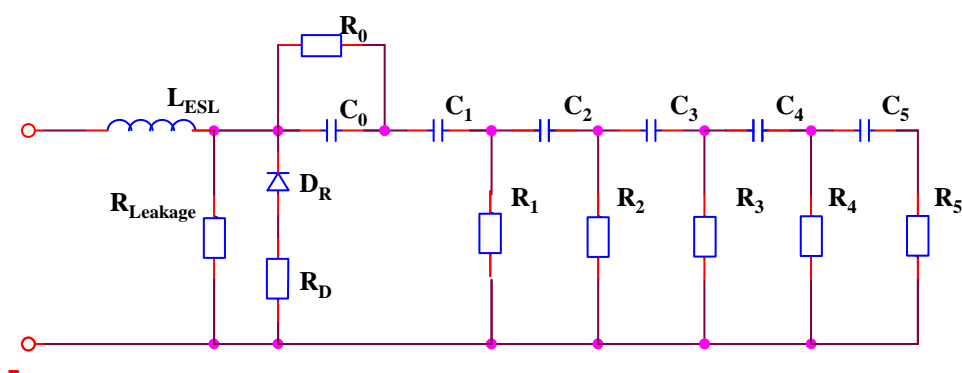


Obr. 4.11: Rozšířené náhradní schéma tantalového kondenzátoru popisující jeho elektrické vlastnosti vztažené k jeho mechanické konstrukci a tvaru

Chování linearizovaného modelu kondenzátoru je v prvním případě popisováno jako řešení, které je pro počáteční zjednodušení nezávislé na teplotě. Tudiž jednotlivé náhradní fragmenty kondenzátoru jsou v tomto případě taktéž nezávislé na teplotě.

Náhradní schéma se skládá ze sérioparalelního řazení diskrétních prvků obvodu, které tvoří fragmenty ideálních odporů, indukčností a kondenzátorů, které jsou pro první zjednodušení nezávislé na teplotě. Odpor R_{Lead1} reprezentuje v obvodu velikost odporu kontaktního přívodu. Indukčností L_{Lead1} je popsána hodnota indukčnosti přívodního kontaktu, která má nezanedbatelnou hodnotu o velikosti řádově desetin nH. L_{TaWire} taktéž značnou mírou přispívá k celkové hodnotě sériové indukčnosti I_{ESL} . L_{TaWire} demonstruje svou hodnotou velikost indukčnosti tantalového drátku, který má obdobně hodnotu odporu R_{TaWire} . Jelikož dochází k mechanickému spojení tantalového drátku s kontaktním přívodem, tato hodnota je popsána velikostí odporu R_{Weld} . Na opačné straně tantalového drátku je kontakt vytvořen s odporem R_{Anode1} . Dále následuje rozvětvená struktura tvořená hodnotami $R_{Anode2'}$ až $R_{AnodeN'}$, která popisuje vliv a rozložení fragmentů odporu tantalového materiálu. Hodnoty C_2' až C_N' a jim zrcadlově symetrické hodnoty C_2'' až C_N'' určují velikost celkové kapacity kondenzátoru. Obdobně tomu je i v případě hodnot zbytkového proudu, který je hlavně určen izolačním odporem dielektrika Ta_2O_5 . Celková hodnota zbytkového proudu je vyjádřena konečným počtem prvků $R_{Leakage2'}$ až $R_{LeakageN'}$ a jim taktéž symetricky totožným prvkům $R_{Leakage2''}$ až $R_{LeakageN''}$. Obdobným způsobem, tak jako je tomu při popisu fragmentů odporu tantalové anody $R_{Anode2'}$ až $R_{AnodeN'}$ a jim zrcadlově symetrickým $R_{Anode2''}$ až $R_{AnodeN''}$, lze popsat i nakontaktování burelu MnO_2 . Ten je tvořen řadou fragmentů odporu $R_{MnO_22'}$ až $R_{MnO_2N'}$ a symetricky ekvivalentních $R_{MnO_22''}$ až $R_{MnO_2N''}$. $R_{SurfaceMnO_2}$ popisuje povrchový kontaktní odpor burelu. Stejnou funkci má $R_{Graphite}$ a R_{Silver} , jejichž hodnoty taktéž popisují hodnoty kontaktních odporů grafitové a stříbřené vrstvy, které jsou na burel nanášeny před kontaktováním. Jedním z posledních parametrů náhradního obvodu je

velikost indukčnosti druhého kontaktu L_{lead2} a R_{lead2} , odpovídající hodnotě odporu kontaktního materiálu. Tantalový kondenzátor je svojí podstatou a fyzikálními vlastnostmi tepelně závislou součástíou, takže pro popis tohoto parametru by bylo nutno uvážit i tepelnou závislost jednotlivých prvků modelu (Obr. 4.11). Model kondenzátoru je svou strukturou tvořen řadou prvků/fragmentů, které mají velký, ale konečný počet. Tento počet členů obvodu je ale značně velký a hodící se pouze pro popis fyzikálního chování kondenzátoru korespondujícího s reálným komponentem. Díky své komplikovanosti je výše popsáný model zcela nevhodný pro matematickou analýzu a syntézu a vytvoření náhradního schématu tantalového kondenzátoru hodícího se do počítačové simulace obvodů. Je tudíž nutno vytvořit jinou, jednodušší strukturu náhradního zapojení, i napříč rozdílnosti a odlišnosti od reálné konstrukce kondenzátoru. Proto bylo vytvořeno teplotně závislé lineární náhradní schéma obvodu, které složeno z lineárních R , L a C členů a je doplněno o další prvky popisující jeho chování v nelineárním režimu a též zohledněno jeho chování jako polární součástky.



Obr. 4.12: Náhradní ekvivalentní schéma popisující nelineárnost a polarizaci tantalového kondenzátoru

Jelikož se kondenzátor v opačném režimu (reverse mode) chová jako dioda v propustném režimu (forward mode), lze tento prvek do obvodu vhodným způsobem zakomponovat pomocí vhodně navržené diskretní diody. Tím pádem je MIS struktura tantalového kondenzátoru modelována pomocí diody D_R a rezistorů R_D zakomponovaného do náhradního obvodového diagramu. Dioda D_R má ohyb VA charakteristiky na napětí, které odpovídá zhruba 10 % jmenovitého napětí kondenzátoru. Hodnota sériového odporu R_D popisuje strmost dV/dI VA charakteristiky. Celkové náhradní schéma tantalového kondenzátoru, které bere v úvahu i nelineárnost a polární závislost součástky je zobrazeno na Obr. 4.12. Zmiňované schéma je dále doplněno o teplotně závislé členy, tak aby bylo možno zohlednit i teplotní závislost všech parametrů kondenzátoru.

4.4.2. Výpočet prvků náhradního modelu kondenzátoru

Všechny výše zmiňované parametry a vlastnosti tantalového kondenzátoru lze matematicky vyjádřit a vypočítat pomocí optimalizačních a syntézových metod. V tomto případě, bylo použito výpočetní metody konečných prvků. Tato metoda se používá v počítačových systémech, kde jsou pro ni vytvořeny vlastní algoritmy. Pro výpočet diskretních prvků obvodu bylo použito vývojové prostředí C++, ve kterém byl vytvořen optimalizační program, za jehož pomoci lze optimalizovat prvky náhradního obvodu zmíněnou metodou konečných prvků. Teplotně závislé frekvenční charakteristiky kondenzátoru byly vloženy do výpočetního programu, jehož výsledkem byla

optimalizace a vypočtení hodnot prvků náhradního obvodu popisujícího reálné chování kondenzátoru.

Stejným způsobem lze pak postupovat v případě dalších hodnot tantalových kondenzátorů. Lze tak vytvořit knihovní prvek všech náhradních obvodů kondenzátorů s jejich indexovými parametry. Tuto knihovnu je pak možno integrovat do návrhových programů a použít pro komplexní návrh a simulaci elektronických obvodů a celých systémů v těchto simulačních programech.

5. Závěr

Ve své práci jsem prostudoval transportní charakteristiky MIS struktury s aplikací modelu MIS struktury na tantalové kondenzátory. Na základě výsledků měření VA charakteristik v normálním a reverzním režimu bylo možno podrobněji prozkoumat mechanismy transportu náboje MIS struktury tantalového kondenzátoru. Těmito mechanismy jsou převážně ohmický, Poole-Frenkelův a tunelový mechanismus.

Experiment transportu tantalového kondenzátoru byl prověřen na sadě devatenácti vzorků PV 10–6, kterými jsou výrobky jednoho světového výrobce tantalových kondenzátorů. Pro tantalové kondenzátory je znám technologický postup na základě čehož bylo možno taktéž stanovit tloušťku dielektrika. Na všech vzorcích byly proměřeny VA charakteristiky v normálním i reverzním režimu. Ze sady vzorků byly vybrány tři vzorky (12, 17 a 19), které byly podrobeny detailnějšímu prozkoumání.

Na základě VA charakteristik byly namodelovány složky zbytkového proudu v normálním režimu a to hlavně složka ohmická, Poole-Frenkelova a tunelová složka, které jsou hlavními mechanismy transportu elektrického náboje v tantalovém kondenzátoru. Jako další složka zbytkového proudu, která má nezanedbatelnou velikost, je polarizační proud. Velikost složky polarizačního proudu závisí na rychlosti měření a době ustálení přiloženého napětí. Tento proud je způsobený polarizací dielektrika a rychlostí depolarizace přechodového děje vybíjení kondenzátoru. Zbytkový proud, který udává výrobce, reprezentuje ustálenou hodnotu proudu bez polarizačního proudu.

Analýza zbytkového proudu byla provedena s kompenzací polarizačního proudu a jednotlivé složky proudu byly vypočteny optimalizačním programem tak, aby byly nalezeny jednotlivé parametry složek. Modelování VA charakteristik stanovilo ohmickou vodivost G_{Ω} , vodivost Poole-Frenkelova jevu G_{PF} , Poole-Frenkelův, součinitel β_{PF} , tunelový proud I_T a charakteristickou hodnotu tunelového napětí U_T . Z těchto hodnot bylo následně možno vypočítat tloušťku dielektrika, které má tloušťku 151,4 nm v případě vzorku 19 a 153,5 nm u vzorku 12 a 17. Celkový zbytkový proud závisí na intenzitě elektrického pole, která je aplikována na dielektrickou vrstvu kondenzátoru. Při nízké intenzitě elektrického pole převažuje ohmická složka. Při intenzitě do 1 MV/cm je transport elektronů realizován prostřednictvím Poole-Frenkelova jevu. Pokud je intenzita elektrického pole vyšší jak 0.5 MV/cm, uplatňuje se zde tunelový jev, který má za následek nárůst zbytkového proudu díky tunelové složce.

Pro měření teplotních závislostí byla použita komora, ve které bylo provedeno měření v rozsahu 300 K–373 K pro měření devatenácti vzorků na jedné kontaktní patičce. Z provedených modelování pomocí fitovacího programu je patrné, že pracovní napětí je obvykle nižší než napětí, kdy se markantněji začíná projevovat tunelová složka proudu. Tyto výsledky byly zjištěny ze závislosti zbytkového proudu na napětí, které bylo dvojnásobné (12V) než jmenovité napětí kondenzátoru.

Dále byla zkoumána aktivační energie a její teplotní závislosti u všech vyšetřovaných vzorků pro přiložené napětí rovné napětí 9 V v případě všech analyzovaných složek zbytkového proudu. Bylo zjištěno, že aktivační energie E_A všech složek zbytkového proudu je ve většině případů blízká hodnotě 0,4 eV, což je typickou hodnotou tantalových kondenzátorů.

Dalším krokem této práce byla realizace náhradního obvodu tantalového kondenzátoru matematicky popisující fyzikální chování, které umožní získání informace o rozložení a transportu elektrického náboje v kondenzátoru. Na základě dat a poznatků

získaných z měření bylo vybráno řešení lineární rovnice popisující chování parametrů kondenzátorů. Tyto lineární rovnice byly pak dále zaintegrovány do nelineárního systému popisujícího nelinearity v normální i reverzním režimu.

V programu C++ byl vyvinut algoritmus popisu modelu kondenzátoru i s jeho optimalizačním procesem. Získané výsledky nám umožňují další zkoumání parametrů kondenzátoru, aniž bychom museli přistupovat ke zdlouhavému a časově i technicky náročnému měření vzorků. Nalezený náhradní model tantalového kondenzátoru je taktéž vhodný pro použití v simulačních programech, které přistupují při simulaci elektronického zařízení jako ke komplexnímu systému zahrnujícímu veškeré reálné parametry jednotlivých komponentů.

Nalezením náhradního modelu kondenzátoru může vést taky k možnosti vylepšení technologických postupů (volba vhodných materiálů, úprava struktury kondenzátoru, atd.) a zdokonalení dosavadních parametrů tantalových kondenzátorů.

6. Vlastní publikace

- [1] PELČÁK, J. Behaviour of tantalum vs ceramic capacitors. In *Student EEICT 2006*. FIT VUT Božetěchova 2, 612 66 Brno, FIT VUT Božetěchova 2, 612 66 Brno. 2006. p. 2 - 6. ISBN 80-214-3162-8.
- [2] PELČÁK, J. Benchmark of Tantalum versus Ceramic Capacitors. *Capacitor and Resistor Technology*. 2005. 2005(3). p. 47 - 56. ISSN 0887-7491.
- [3] PELČÁK, J. Niobium Oxide Capacitors in Electronic Applications. *ECN Magazine*. 2005. 2005(2). p. 32 - 33.
- [4] PELČÁK, J. Capacitors that Sound Sweet in Audio Applications. *Passive Component Industry Magazine*. 2005. 2005(2). p. 24 - 26.
- [5] PELČÁK, J. Niobium Oxide Capacitors in Electronic Applications. *ECN Magazine*. 2004. 2004(8). p. 43 - 44.
- [6] PELČÁK, J. Tantalum and NbO Capacitors Equivalent Circuit Model. *Capacitor and Resistor Technology*. 2004. 2005(2). p. 191 - 199. ISSN 0887-7491.
- [7] PELČÁK, J. Tantalum and Niobium Oxide Capacitors Equivalent Circuit Model Applicability to Simulation Software. *Capacitor and Resistor Technology*. 2003. 2003(10). p. 275 - 280. ISSN 0887-7491.
- [8] PELČÁK, J. AVX technical solution. *Power Sources Manufacturers Association*. 2003. 2003(9). p. 1 - 2.

7. Literatura

- [1] S. M. SZE, *Physics of Semiconductor Device*, Wiley-Interscience, New York, 1981, 868 p.
- [2] A. TEVEROVSKY, *Reverse Bias Behavior of Surface Mount Solid Tantalum Capacitors*. CARTS USA 2002.
- [3] J. SIKULA, *Conductivity Mechanisms and Breakdown of NbO Capacitors*. CARTS USA 2004. ISSN: 0887- 7491.
- [4] J. PRIMAK, *New SPICE[®] Models*. VOL. 8, NO. 2, Kemet Electronics Corp., Greenville, July 1998
- [5] B. HOLMAN, *The electrical characterization of tantalum capacitors as MIS device*.
- [6] J. SIKULA, J. HLAVKA, V. SEDLAKOVA, P. HOESCHL, R.GRILL, Z. SITA, T. ZEDNICEK, M. TACANO, *Niobium Oxide and Tantalum Capacitors: M-I-S Model Parameters Comparison*, CARTS USA 2005.
- [7] M. KUPAROWITZ, *Studium degradace izolační vrstvy Ta₂O₅ za zvýšené teploty v elektrickém poli*.
- [8] J. SIKULA, J. PAVELKA, V. SEDLAKOVA , J. HLAVKA, P. VASINA, T. ZEDNICEK, *Tantalum capacitors as a metal insulator – semiconductor structure*.
- [9] M. KOPECKY, *Electron transportation in Ta nanolayers: Application to tantalum capacitors*. In *PROCEEDINGS OF THE 16TH CONFERENCE - STUDENT EEICT 2010*. 1. nam. Republiky 15, 614 00 , Brno: NOVOPRESS s.r.o., 2010. s. 99-103. ISBN: 978-80-214-4079- 1.
- [10] J. SIKULA, V. SEDLAKOVA, J. HLAVKA, Z. SITA, *Charge Carrier Transport in NbO and Ta Capacitors in Temperature Range 100 to 300 K*. In *Proceeding of CARTS Europe 2006 - 20th annual passive components symposium*. Bad Homburg, Německo: *Electronic Components, Assemblies and Materials Association*, 2006. s. 189-198. ISBN: 0-7908-0110-8.
- [11] J. SIKULA, V. SEDLAKOVA, H. NAVAROVA, J. HLAVKA, TACANO, Z. SITA, *NIOBIUM Oxide and Tantalum Capacitors: Leakage Current and M-I-S Model Parameters*. In *Proceedings of CARTS USA 2007*. USA: *Electronic Components, Assemblies&Materials Association*, 2007. s. 337-345. ISBN: 0-7908-0114-0.
- [12] J. SIKULA, V. SEDLAKOVA, J. HLAVKA, Z. SITA, P. HOESCHL, M. TACANO, *Niobium Oxide and Tantalum Capacitors: Quantum Effects in Charge Carrier Transport*. In *Proceedings CARTS USA 2006 - The 26th Symposium for Passive Components*. Orlando, Florida: *Electronic Components, Assemblies and Materials Association*, 2006. s. 421-427. ISBN: 0-7908-0108-6.
- [13] J. SIKULA, J. HLAVKA, V. SEDLAKOVA, L. GRMELA, P. HOESCHL, T. ZEDNICEK, Z. SITA, *Conductivity mechanisms and breakdown characteristics of niobium oxide capacitors*.
- [14] M. KUPAROWITZ, *Transportní a šumové charakteristiky MIS struktury s aplikací na niob-oxidové kondenzátory*. [Bakalářská práce] VUT Brno, FEKT, 2009, 34 s.

- [15] KWAN CHI KAO, *Dielectric phenomena in solids*. Elsevier, 2004, 579 p. ISBN: 978-0-12-396561-5.
- [16] C. CHANELIERE, J.L. AUTRAN, R.A.B. DEVINE, B. BALLAND, *Tantalum pentoxide (Ta₂O₅) thin films for advanced dielectric applications*. In *Materials Science and Engineering: R: Reports (1998)*, Volume: 22, Issue: 6, Pages: 269-322, ISSN: 0927796X.
- [17] J. PAVELKA, J. SIKULA, P. VASINA, V. SEDLAKOVA, M. TACANO, S. HASHIGUCHI, *Noise and transport characterisation of tantalum capacitors*. *Microelectronics Reliability*, 2002, roč. 42, č. 6, s. 841-847. ISSN: 0026-2714.
- [18] P. VASINA, T. ZEDNICEK, J. SIKULA, J. PAVELKA, *Failure modes of tantalum capacitors made by different technologies*. *Microelectronics Reliability*, 2002, roč. 42, č. 6, s. 849-854. ISSN: 0026-2714.
- [19] J. SIKULA, J. PAVELKA, L. GRMELA, P. DOBIS, *Charge carriers transport and noise of niobium capacitors*. In *CARTS-EUROPE 2002 Proceedings, 16th European Passive Components Conference*. Swindon, England: Electronic Components Institute Internationale Ltd., 2002. s. 32-36.

Curriculum vitae

Jméno a příjmení: Jaromír Pelčák
Datum a místo narození: 4.2.1976, Kyjov, Česká Republika
E-mailová adresa: pelcak@post.cz

Vzdělání:

- 1990-1994, SPŠ elektrotechnická v Rožnově pod Radhoštěm, studijní obor Elektronika a sdělovací technika, maturita s vyznamenáním.
- 1994-1999, VUT v Brně, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, studijní obor Elektronika a sdělovací technika, zakončená státní závěrečnou zkouškou. Téma diplomové práce - Návrh a realizace vstupní jednotky pro příjem družic v pásmu S.
- 2004-2011, VUT v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav Fyziky, Doktorská práce – Transport elektrického náboje v tantalovém kondenzátoru

Odborná praxe:

- 1999 – 2001 Flextronics s.r.o - Design Engineer
- 2001 - 2001 ERICSSON s.r.o. - BTS Engineer
- 2002 –2007 - AVX Czech Republic s.r.o. - Application Engineer
- 2008 – současnost - Rutronik, Praha – Field Application Engineer

Jazyky: Angličtina, základní znalost ruského jazyka

Abstract

The task of the thesis was studying of tantalum capacitors with solid electrolytes properties. Ta – Ta₂O₅ – MnO₂ capacitor by its construction represents MIS structure, where tantalum anode has metal conductivity and MnO₂ cathode is semiconductor. Isolation layer consists of tantalum pentoxide Ta₂O₅ with relative permittivity $\epsilon_r = 27$. Dielectric thickness is typically in range from 30 to 150nm.

The capacitor charge is not only stored and accumulated on electrodes but also in localised states (oxide vacancies) in isolation layer. The capacitor connected in normal mode represents MIS structure polarized in reverse direction when the applied voltage higher potential barrier between semiconductor - MnO₂ cathode and isolation of Ta₂O₅. The transport of charge carriers via isolation layer is determined by Poole-Frenkel mechanisms and tunnelling.

Poole-Frenkel mechanism of charge transport is dominant in low intensity of electric field. Tunnelling determines current at higher electric field intensity. During low intensity of electric field ohmic component is also presented which is determined by volume of resistance of impurities in isolation layer due to donor states of oxygen vacancies.

Based on the modelling of measured VA characteristics is possible to estimate determine dielectric thickness of Ta₂O₅ and determine share of Poole-Frenkelov and tunnel current and charge transportation. The thesis is described charge transport and charge concentration on tantalum capacitor in low frequency area and analysis of capacitor behaviour at frequency band.

The first impulse for the thesis was an effort to create equivalent circuit diagram of tantalum capacitor in respect of its physical and electrical behaviour. There is an opportunity to study and determine electric charge transport and its accumulation based on the equivalent circuit diagram structure. There is also a chance to define and trace potential barriers and charge distribution in the capacitor structure based on an measurement and carried out experiments. This methodology and analysis consists of electrical characteristic determination to create physical model of the capacitor describing its function, properties and behaviour.