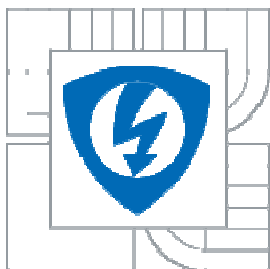


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologií
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MĚŘENÍ NÁBOJE V DIELEKTRICKÝCH VRSTVÁCH

ELECTRIC CHARGE MEASUREMENT IN DIELECTRIC LAYERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAROSLAV ŠŤAVÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ONDŘEJ HÉGR, PH.D.

BRNO 2010

ABSTRAKT:

Tato práce se zabývá moderním měřením elektrického náboje v dielektrických vrstvách. Jedná se hlavně o měření C-V charakteristiky a speciální metody měření povrchové energie ze smáčivosti povrchu. Práce je brána jako základ pro další zkoumání nových metod pro měření náboje v dielektriku.

ABSTRACT:

This work deal with modern measurement of electrical charge in the dielectric layers. It is mainly about measuring CV characteristics and special methods of measuring the surface energy of the surface wettability. Work is taken as a basic for further exploration of new methods for measuring the charge in the dielectric.

Klíčová slova:

CV měření, smáčení, elektrický náboj, dielektrikum, RF MEMS, fotovoltaiický článek, pasivace, back-side field.

Keywords:

CV measurement, wetting, electric charge, dielectric, RF MEMS, photovoltaic cell, passivation, back-side field

Bibliografická citace díla:

ŠŤAVÍK, J. *Měření náboje v dielektrických vrstvách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Hégr, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. 6. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Hégrovi, Ph.D., za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji Ing. Daně Skácelové a Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za poskytnutí prostoru k realizaci experimentálních měření.

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK	5
2.1	FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK	5
2.1.1	Fotovoltaický jev - popis	5
2.1.2	Fotovoltaický jev - Kvantové vysvětlení	6
2.2	MATERIÁLY PRO VÝROBU SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	7
2.2.1	Křemík	8
2.3	VÝROBA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	8
2.4	TEORIE VÁZANÉHO NÁBOJE	10
2.5	TECHNOLOGIE VÝROBY A PASIVACE POVRCHU SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	12
2.5.1	Pasivace	12
2.5.2	Magnetronové naprašování	13
2.5.3	Backside field	15
3	SOUČASNÉ METODY MĚŘENÍ VÁZANÉHO NÁBOJE	16
3.1	MĚŘENÍ PARAMETRŮ DIELEKTRICKÝCH VRSTEV METODOU OPAKOVANÉHO NABÍJENÍ POVRCHU	16
3.2	QUASI-STEADY-STATE PHOTOCONDUCTANCE (QSSPC) METODA	18
3.2.1	Příprava vzorku	19
3.2.2	Stanovení optické konstanty pro QSSPC měření	19
3.2.3	QSSPC a CV měření Al/Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ /Si	20
3.3	NÍZKONAPĚŤOVÉ MIKROMECHANICKÉ ZKUŠEBNÍ KONSTRUKCE	23
3.4	SMÁČENÍ OXIDOVÝCH VRSTEV NA KŘEMÍKU A SLEDOVÁNÍ VLOŽENÉHO NÁBOJE	27
3.4.1	Závislost na tloušťce pasivované vrstvy	29
3.4.2	Závislost na pozici fixního náboje	30
3.4.3	Závislost na jiných oxidových vrstvách	32
4	PRAKTICKÁ ČÁST	33
4.1	TYPY VZORKŮ A JEJICH VÝROBA	33
4.2	C-V MĚŘENÍ	33
4.2.1	Naměřené hodnoty C-V charakteristik	34
4.3	METODA SMÁČENÍ OXIDOVÝCH VRSTEV	39
4.3.1	Postup	40
5	ZÁVĚR	43
6	POUŽITÁ LITERATURA	43
7	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	45

1 Úvod

Pokusy z oblasti elektřiny a magnetismu patří mezi nejstarší fyzikální experimenty. Mezi první patří známé nabíjení ebonitové tyče třením liščího ohonu. Takovéto experimenty dokazují, že je možné změnit stav tělesa - dá se elektricky nabít. Do jaké míry je těleso nabito určuje veličina elektrický náboj, kterou označujeme Q a jejíž jednotkou je coulomb. Tato jednotka byla pojmenována na počest Charlese - Augustina Coulomba (1736 - 1806), zakladatele elektrostatiky. Jednotka je definována jako elektrický náboj, který je přenesen elektrickým proudem o velikosti 1 ampéru za dobu 1 sekundy.

Materiály se z hlediska elektrické vodivosti dělí na vodiče (vedou el. proud), polovodiče (vedou el. proud za určitých okolností) a nevodiče (nevedou el. proud). Poslední skupinu nazýváme dielektriky, nebo častěji v technické praxi jako izolanty. Zkoumáme-li dielektrikum z mikroskopického hlediska, zjistíme, že materiály obsahují molekuly uspořádané tak, že jedna část nese kladný náboj a druhá náboj záporný. Tento útvar se nazývá elektrickým dipólem. Dielektrika jsou velice širokou skupinou materiálů. Jejich využití v elektronice a dalších oborech je obrovské a pro účely fotovoltaických článků je nezbytné vědět, jaké množství elektrického náboje je v dielektriku.

Hodnota elektrického náboje v dielektriku se může měnit v závislosti na výrobním procesu (teplota, čas atp.). Pro zajištění co nejvyšší účinnosti je důležité vědět, jaký výrobní proces zajistí největší množství volných nosičů náboje v objemu.

K přeměně na elektřinu lze využít pouze část spektra slunečního záření. Fotony, jejichž energie odpovídá šířce zakázaného pásu (pro Si 1,1 eV), jsou využity plně. Ty, jejichž energie je menší, buď článkem projdou, nebo jsou pohlceny a jejich energie je přeměněna na teplo. U fotonů s vyšší energií je využita jen ta energie odpovídající šířce zakázaného pásu a zbytek je rovněž přeměněn na teplo. Teoretická účinnost křemíkového článku pro běžné spektrum slunečního záření je kolem 33 %, nejlepší komerční články mají účinnost kolem 22 %. Tyto údaje odpovídají první a druhé generaci solárních článků.

2 Fotovoltaický článek

2.1 Fotovoltaický článek

Je polovodičová velkoplošná součástka (alespoň s jedním PN přechodem), přeměňující světelnou energii na energii elektrickou. První, tomu dnešnímu podobný, článek byl vyrobený roku 1954 v Bell Laboratories při pokusech na dopovaném křemíku. Jeho účinnost byla 6% Tyto fotovoltaické (solární) články pracují na základě fotovoltaického jevu [1], jenž je popsán níže.

2.1.1 Fotovoltaický jev - popis

Fotovoltaický jev je jev, který v roce 1887 poprvé popsal Heinrich Hertz. Pozoroval tehdy z pohledu tehdejší fyziky nevysvětlitelné chování elektromagnetického vlnění při dopadu na povrch kovu. Kvantové vysvětlení poskytl Albert Einstein roku 1905. Za svůj přínos k teoretické fyzice dostal poté roku 1921 Nobelovu cenu. Studium fotoelektrického jevu mělo vliv na pochopení duality vln a částic.

Fotoelektrický jev či fotoefekt je fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány (vyzařovány, emitovány) z látky (nejčastěji z kovu) v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. rentgenové záření nebo viditelného světla) látkou. Emitované elektrony jsou pak označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoelektrická emise (fotoemise).

Pokud jev probíhá na povrchu látky, tzn. působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky tak hovoříme o vnějším fotoelektrickém jevu. Fotoelektrický jev však může probíhat i uvnitř látky, kdy uvolněné elektrony látku neopouští, ale zůstávají v ní jako vodivostní elektrony. V takovém případě hovoříme o vnitřním fotoelektrickém jevu.

Pokud na látku dopadající elektrony způsobují vyzařování fotonů, mluvíme o tzv. inverzním (opačném, obráceném) fotoelektrickém jevu.

Bylo zjištěno, že při osvětlení některých látek (především kovy) se tyto látky nabíjí. Např. zinek osvětlený ultrafialovým světlem se nabije kladně. Při ozáření vzorku spektrem elektromagnetického vlnění byly přitom pohlceny krátké vlnové délky a delší vlny ve spektru zůstaly. Pro krátké vlnové délky došlo k emisi vodivostních elektronů z kovu. Počet těchto

elektronů rostl s intenzitou vlnění. Jev byl ale pozorován jen pro krátké vlnové délky, pro velké délky vln jev nenastal při libovolné intenzitě. Pro krátké vlnové délky se zvýšením intenzity dopadajícího záření zvyšoval počet uvolněných elektronů, avšak intenzita neovlivnila energii těchto elektronů [1].

Podle představ klasické fyziky by elektronům měla být předána kinetická energie dopadajícího elektromagnetického vlnění. Energie elektromagnetických vln souvisí s intenzitou záření, tzn. energie vyzařovaných elektronů by měla záviset na intenzitě dopadajícího záření. Experimenty však ukázaly, že kinetická energie vyzařovaných elektronů je závislá na frekvenci a nikoliv na intenzitě dopadajícího záření. Experimentálně bylo zjištěno, že pokud frekvence dopadajícího záření klesne pod tzv. prahový (mezní) kmitočet f_0 , fotoemise se neobjevuje. Mezní frekvence je charakteristickou vlastností všech látek. Pokud je frekvence f dopadajícího záření vyšší než mezní frekvence f_0 , mají fotoelektrony energii v rozmezí od nuly do určité maximální hodnoty E_{MAX} . Maximální hodnota energie E_{MAX} je lineární funkcí frekvence a platí pro ní vztah (2.1):

$$E_{MAX} = h \cdot (f - f_0) = hf - hf_0 \quad (2.1)$$

kde h je Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Js)

Tyto vlastnosti není klasická fyzika schopná vysvětlit.

2.1.2 Fotovoltaický jev - Kvantové vysvětlení

Podivné chování světla při interakci s vlněním vysvětlil až Einstein v roce 1905 s využitím poznatků právě se rodící kvantové teorie. Byla to především Planckem prezentovaná teorie, že elektromagnetické vlnění předává svou energii při interakci s jinými částicemi nespojitě, po tzv. kvantech. Velikost kvanta energie závisí na frekvenci (vlnové délce) elektromagnetického záření, přičemž platí:

$$E = h \cdot f = \hbar \omega \quad (2.2)$$

Kde h je Planckova konstanta, f je frekvence elektromagnetického záření, $\omega = 2\pi f$ je jeho kruhová frekvence a $\hbar = h/2\pi$ je redukovaná Planckova konstanta. Pro toto kvantum světla se vžil název foton.

Světlo při dopadu předává energii elektronům na povrchu zkoumané látky. Je-li vlnová délka λ světla dostatečně malá, pak frekvence f a tedy i energie ($c=f*\lambda$), kterou záření po dopadu předá elektronu, může dosáhnout dostatečné hodnoty pro uvolnění tohoto elektronu z vazby v obalu atomu. Hodnota této energie potřebné k uvolnění elektronu z látky se označuje jako ionizační energie. Velikost ionizační energie, kterou potřebují elektrony k uvolnění z látky, se někdy označuje jako fotoelektrická bariéra. Předáním dostatečné energie elektronům je možné tuto bariéru překonat (hovoří se také o výstupní práci). Minimální frekvence, při níž dopadající fotony předávají elektronům energii potřebnou k překonání této bariéry, se označuje jako prahová frekvence.

Při velkých vlnových délkách (nízkých frekvencích a tedy i energiích) se jev neprojeví, protože energie fotonu nestačí na uvolnění elektronu z obalu atomu. Pokud je energie větší než je potřebná k jeho uvolnění (větší než výstupní práce), pak fotoelektronu část energie zůstane. Tato energie má formu kinetické energie elektronu.

Výstupní práce elektronu je závislá na tom, jak hluboko se elektron v látce nachází, proto leží energie fotoelektronů v rozmezí od nuly do E_{MAX} . Ačkoliv intenzita dopadajícího záření nemá žádný vliv na energii uvolněných elektronů, ovlivňuje jejich počet. Při větší intenzitě záření je větší také počet uvolněných elektronů [1].

2.2 Materiály pro výrobu solárních článků

O účinnosti, a tedy i výkonu rozhodují vlastnosti solárních fotovoltaických článků. Tyto články jsou vyrobeny v objemu desek z polovodičových materiálů. O vhodnosti polovodiče pro použití v solárních článcích rozhoduje jeho šířka zakázaného pásu energií. Tato hodnota leží v rozmezí od 1,1 eV do 1,7 eV. Je také vyžadována velká pohyblivost a doba života minoritních nosičů náboje. Existuje celá řada polovodičů, které splňují uvedené požadavky. Jsou to zejména křemík (Si), arsenid galia (GaAs), telurid kadmia (CdTe), fosfid india (InP), antimonid hliníku (AlSb) a další [2].

Ale protože je křemík nejdůležitějším a nejpoužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků, a pravděpodobně i dlouho bude, tady je o něm krátká zmínka.

2.2.1 Křemík

Nejdůležitějším materiálem pro výrobu krystalických solárních článků je křemík. V přírodě se nenachází v čistém stavu, ale je chemicky vázaný v oxidu křemičitém, který je vedle kyslíku nejrozšířenějším prvkem na Zemi. Z křemenného písku musí být nejprve tavením s uhelným práškem odloučen nežádoucí kyslík. Výsledkem je tzv. metalurgický křemík s čistotou 98%. Pro použití v elektronice je však dovolena pouze jedna miliardtina procenta nečistot, a proto je surový křemík dále chemicky čištěn. Výsledný vysoce kvalitní křemík je použit k výrobě článků.

Polykrystalické články jsou vyráběny odléváním a následným ochlazováním křemíkových ingotů. Vzniklé bloky jsou řezány na tyče, a ty pak na plátky tloušťky 0,3 mm ($\mu = 13 - 16 \%$). Monokrystalické články pro použití na Zemi jsou nejčastěji vyráběny Czochralského procesem, jehož výsledkem jsou válcové monokrystaly o průměru 0,3 m a délce až několik metrů. Ty jsou nejčastěji řezány do osmistěnných tyčí a dále na plátky o tloušťce 0,3 mm ($\mu = 15 - 18\%$) [3].

2.3 Výroba fotovoltaických článků

Solární články se skládají z více vrstev. Nejrozšířenějším je fotovoltaický článek s jedním přechodem PN, který je vytvořen v malé hloubce (1 μm) pod předním povrchem křemíku. Přední i zadní povrch je nakontaktován dle vybraného motivu zpravidla technologií nanášení sítotiskových past.

Většina solárních článků se vyrábí dotovaným P^+ křemíkem, a to buď monokrystalickým, polykrystalickým, nebo amorfním křemíkem (obr. 2.1). Články se vyrábějí ve čtvercovém, nebo pseudo-čtvercovém tvaru. Polykrystalické destičky se obvykle řezou na délku hrany 125mm – 150mm, monokrystalické destičky se řezou na průměr 100mm – 150mm.



Obr. 2.1: Typy panelů monokrystalického, polykrystalického a amorfního typu

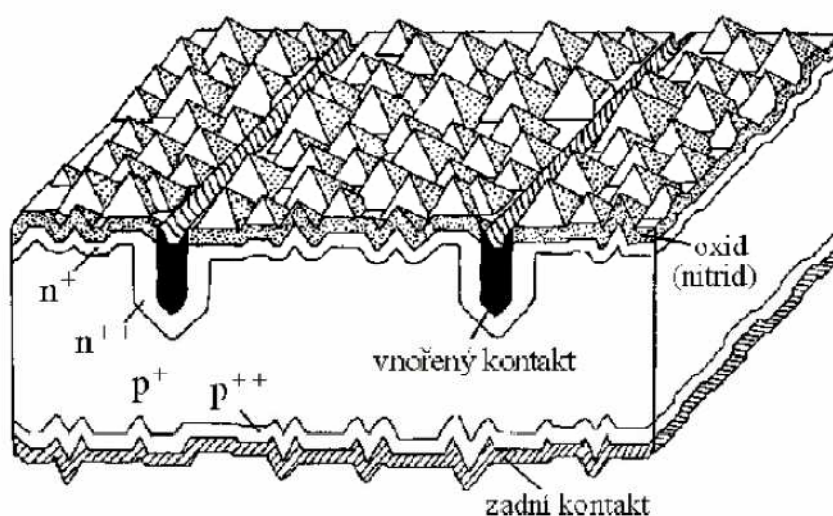
Mezi hlavní kroky při výrobě solárních článků patří:

- **Leptání**, kterým se vytvoří textura (destička zmatní)
- **Vytvoření PN přechodu (difúze)**, vybaví se antireflexní vrstvou a sítotiskem se vytvoří na přední i zadní straně metalizace (vodivý motiv).
- **Vytvoření textury** je velice důležité pro odrážení dopadajícího světla a na jeho lom. Proto se provádí alkalické leptání roztokem KOH (NaOH) + alkohol, pomocí kterého se vytvoří “převrácené“ pyramidy na přední straně krystalu křemíku – to je také ta strana která má kvalitnější povrch (obr 2.2).
- **PN přechod** se obvykle vytváří n^+ dopingem s fosforem. To se děje buď prostřednictvím depozicí dopovaného skla a následnou difuzí v pásové peci, nebo v trubkové peci za použití Chloridufostoru $POCl_3$. Depozice dopovaného skla je velmi jednoduchá a může se provádět v nepřetržitém procesu v pásové peci. Nicméně tato metoda vyžaduje dva kroky navíc v porovnání s $POCl_3$ metodou, protože dopované sklo musí být nejprve deponováno a poté odebráno. Dnes se více využívá $POCl_3$ dopingu, ale v minulosti se dávala přednost spíše metodě dopovaného skla, protože náklady na horizontální pece byly nižší a celkově tak i celý proces.
- **Pasivace**, která zdokonalí elektrické a optické vlastnosti křemíkového substrátu. Tento proces je velice důležitý pro zlepšení účinnosti solárního článku a bude podrobněji rozebrán v další části textu.
- **Kontaktování solárních článků** se provádí pomocí síťového nanášení tenkého kovového filmu (pasty). Pro kontaktování zadní strany se převážně používá hliníková pasta. “Sběrné“

kontakty na přední straně se často skládají ze stříbra. Tyto tenké filmy jsou poté vloženy na pásový dopravník a dají se vypálit v peci. Vypálení může být provedeno za vyloučení kyslíku nebo dokonce za sníženého tlaku (tvořící plyn).

- Po **testování** solárních článků se složí tak, aby mohly být zapájeny at' už sériově, nebo paralelně. K tomu se dá použít pájecí pec (teplota 260 °C). Pájet se dá také se sníženým tlakem nebo pod tlakem dusíku.

-Posledním krokem je **balení** mezi skleněné desky a testování [4].



Obr 2.2: - Řez strukturovaným solárním článkem s vnořenými kontakty

2.4 Teorie vázaného náboje

Elektrický náboj

S ohledem na silové působení a vznik silového pole přisuzujeme protonům a elektronům určitou vlastnost tím, když říkáme, že nesou elektrický náboj. Protonům se přisuzuje kladný náboj, elektronům náboj záporný. Jednotkou náboje je Coulomb.

Vlastnosti náboje

Náboj protonu a elektronu je stejně velký a opačný, přisuzujeme mu velikost $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Tento náboj nazýváme elementární, není možné ho dále dělit, nebyly prokázány jiné menší částice, které by vykazovaly s ohledem na silové působení obdobnou vlastnost. Náboje nikde nevznikají ani nezánikají, nabitě částice se mohou v rámci určitých hmotných těles

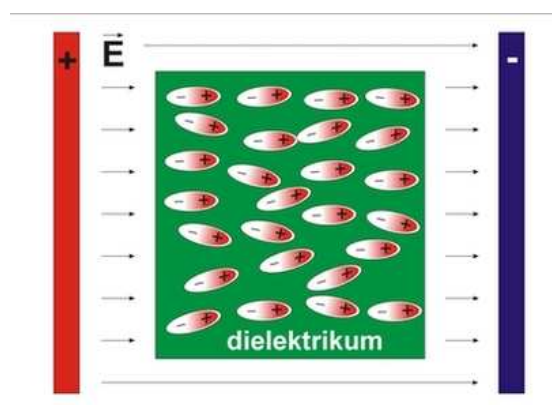
přemísťovat, posouvat, hromadit, čímž se elektromagnetické jevy projevují i na tělesech větších rozměrů. V makroskopické teorii elektromagnetického pole nedělíme obvykle materiál na jednotlivé elektrony a protony, zabýváme se pouze jejich sumárními účinky.

Vázaný náboj

Vázané náboje se nemohou volně pohybovat, pouze posouvat. Vznik vázaných nábojů je charakteristický pro dielektrické materiály. Elektrony jsou pevně vázány k jádrům a není možné je odtrhnout, tyto látky však mají schopnost vytvářet elektrické dipóly-dvojice s kladným a záporným nábojem. Dipóly se mohou ve vnějším elektrickém poli natáčet a posouvat. Z makroskopického pohledu se tento posuv projeví jako vázaný náboj, který se objeví na povrchu dielektrika, nebo prostorový vázaný náboj rozložený s určitou hustotou v objemu tělesa. [10]

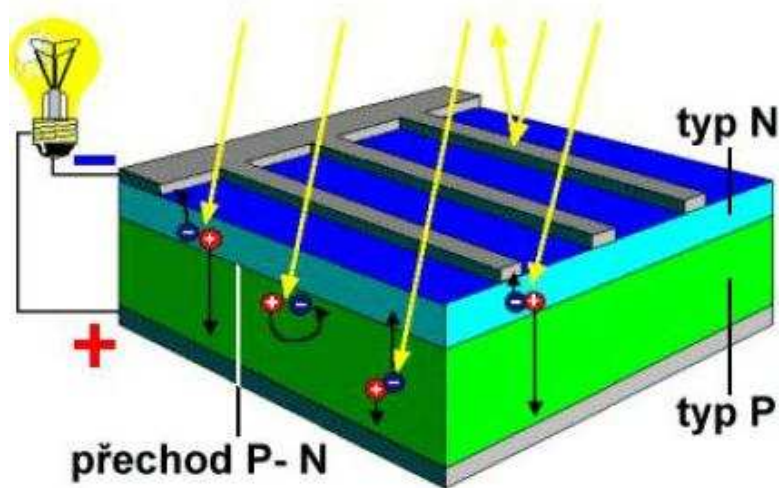
Dielektrikum v elektrostatickém poli

Jestliže těleso z izolantu vložíme do elektrického pole, působí elektrická síla na celý atom nebo molekulu a nastane v nich určitý posun elektrických nábojů. Z atomů a molekul se stávají elektrické dipóly a tento jev nazýváme elektrická polarizace. Byla objevena v roce 1758 *Johannem Carlem Wilckem*. Elektrické náboje, které se indukují v atomech a molekulách dielektrika, se nazývají vázané náboje, protože nejdou z tělesa odvést. Náboj je záporný na té straně tělesa, do níž vstupují siločáry vnějšího elektrického pole, a kladný na té straně, kde siločáry z tělesa vystupují. Uvnitř dielektrika jsou kladné a záporné náboje pomíchány a navenek se neprojevují (obrázek 2.3).



Obrázek 2.3: Dielektrikum v elektrostatickém poli

2.5 Technologie výroby a pasivace povrchu solárního článku



Obrázek 2.4: Princip solárního článku

Na obrázku 2.4 (struktura fotovoltaického článku) je vidět zadní vodivá vrstva pro odvod elektrického proudu. Nad ní je vrstva p^+ s vysokou dotací příměsí (tzv. BackSide Field), která má tloušťku v zhruba 0,1 μm . Nad ní je vrstva p vysoká v řádech stovek μm a poslední vrstvou je vrstva n o tloušťce do 0,1 μm , která je pokrytá vodivou sběrnou sítí s napasivovanou antireflexní vrstvou.

Následkem reflexe (odrazivosti) a nedostatečnému pohlcení slunečního záření dochází k optickým ztrátám. Pro polovodičové materiály je činitel odrazu poměrně veliký. Pro křemík je to 30%, a proto se přední část fotovoltaického článku pasivuje různými antireflexními vrstvami, aby se odrazivost snížila (až pod 10%). Používá se látek buď anorganických (SiO_2 , Al_2O_3 , SiO , Si_3N_4 , TiO_2 , ZnS) nebo na bázi polyamidů (Kapton, Mylar, Aclar).[2] Pro další zdokonalení se na povrchu článku leptáním vytvoří texturovaný povrch ve formě malých pyramid, které odrážejí světlo dále směrem dolů a tím se ho ještě méně odrazí zpět.

2.5.1 Pasivace

Pasivací můžeme nazývat různé způsoby úpravy povrchu fotovoltaického článku. Zpravidla se používá pro zlepšení elektrických a optických vlastností křemíku. Tyto vrstvy jsou také velice důležité pro ochranu článku před vnějšími vlivy, a stejně tak na nich závisí i

konečný výkon celého článku. Z různých způsobů pasivace povrchu je nejběžnější a nejvíce používaná metoda PECVD, LPCVD a metoda magnetronového naprašování, která patří mezi alternativní možnosti pasivace. Pasivace patří mezi nejdůležitější kroky při výrobě.

V tabulce 1 jsou uvedeny typy pasivace povrchu a materiály, které pro ní nejvíce používají. Pasivace pomocí $\text{SiN}_x\text{:H}$ je vhodná nejen kvůli pasivaci povrchu, ale může taky vytvořit objemovou pasivaci křemíkového substrátu, kde redukuje defekty a nečistotu krystalu.

Pasivační metoda	Materiál
PECVD	TiO ₂
	SiO ₂
	SiN:X
	Karbid křemíku
	SiN
LPCVD	SiN
Magnetronové naprašování	TiO ₂
	Karbid křemíku

Tab. 1: Typ pasivace a nejčastěji používaný materiál

Protože pro měření bylo použito článků pasivovaných reaktivním magnetronovým naprašováním různých materiálů, tak tady je o něm krátká zmínka.

2.5.2 Magnetronové naprašování

Tato technologie patří mezi tzv. PVD techniky (PVD = Physical Vapour Deposition, čili fyzikální depozice z plynné fáze) a poprvé byla použita v 70. letech 20. století Chapinem.

Klasický magnetronový systém je diodový systém využívající magnetické pole. Terč materiálu na který se bude rozprašovat, je katodou, substrát na který se deponuje vrstva je anodou. Anoda může být:

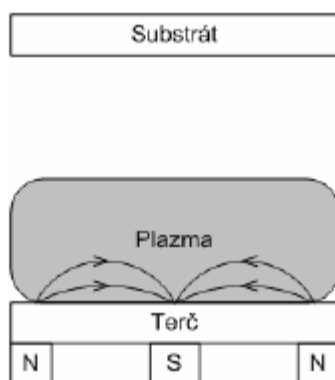
- uzemněna
- na plovoucím potenciálu (záporný)
- na předpětí

Reaktivní magnetronové naprašování v principu znamená rozprašování elementárních (tzn. jednoprvkových) terčů za přítomnosti chemicky reaktivního plynu, který reaguje s rozprášenými atomy terče a umožňuje tak formování materiálu. Použitými reaktivními plyny mohou být například N_2 , O_2 , CO_2 , NH_3 apod.

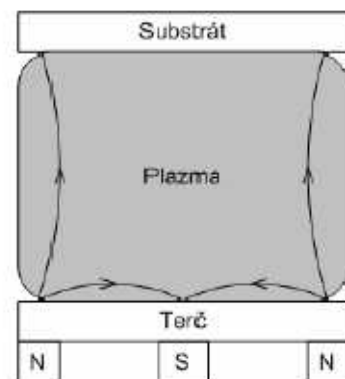
V generátoru jsou dva druhy magnetu: vnitřní a vnější. Vnitřní je uprostřed terče, vnější kruhový magnet je vně terče. Takovéto magnetické pole zamezuje úniku elektronů, které vlivem magnetických siločar obíhají v blízkosti terče. Tento způsob zvyšuje počet ionizačních srážek a tím přispívá k:

- intenzivnějšímu rozprašování
- zvýšení depoziční rychlosti
- možnost depozice za sníženého tlaku
- možnost depozice za sníženého napětí

V zásadě existují dva typy magnetronů: konvenční (obr. 2.5) a nevyvážený (obr. 2.6), který se potom liší uspořádáním magnetického obvodu.[11]



Obr. 2.5: Konvenční magnetron v klasickém uspořádání



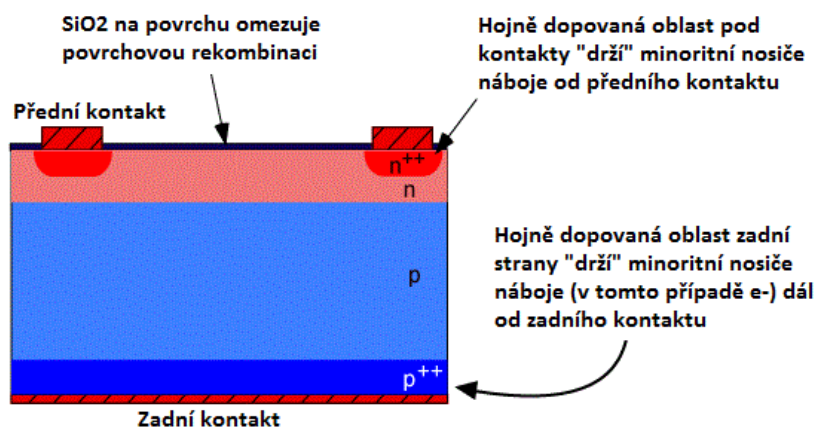
Obr. 2.6: Nevyvážený magnetron

Na obr. 2.5 je vidět vyvážený magnetron. Na obr. 2.6 je magnetron nevyvážený, kde je hlavní rozdíl v rozvržení magnetického pole. Častějším případem je, že magnet vnější je silnější než magnet vnitřní, tím se některé magnetické siločary nad terčem neuzavřou a mohou směřovat na potřebné místo, tedy k substrátu. Podél těchto siločar se pohybují elektrony, které cestou k substrátu ionizují plyn. Díky tomuto řešení se plazma nachází v celém poli mezi terčem a substrátem, což je velmi důležité pro depozici. Existuje mnoho typů nevyvážených magnetronů lišících se hlavně uspořádáním magnetického obvodu, nebo podle potřeby, zvýšením počtu magnetronů.

2.5.3 Backside field

Za účelem snížení nákladů, je výhodné, aby se solární články vyráběly s co možná nejtenčí. Tloušťka je však v některých případech tak malá, že se přibližuje difuzní délce nosičů náboje, které se přibližují k zadnímu kontaktu, kde rekombinují. Takto "ztracené" minoritní nosiče snižují účinnost článku.

Proto, se zadní strana solárních článků pasivuje vrstvou, která snižuje rekombinační rychlost. Další elektrické pole vytvořené na zadní straně má dobrý vliv na efektivitu solárního článku. Zejména zadní strana dopovaná p^+ oblastí. Oblast p^+ na zadní straně křemíku přispívá k injekci děr zpět do p -typu křemíku a vytváří vysokou hustotu děr v objemu. Na druhou stranu oblast p^+ typu na zadní straně tvoří překážku pohybu elektronů na zadní kontakt (obrázek 2.3), a tímto se snižuje rychlost povrchové rekombinace na zadní části článku.



Výsledkem je co největší možná rekombinace nosičů v objemu

Obrázek 2.5: Dopování zadního kontaktu solárního článku pomocí p^+ oblasti

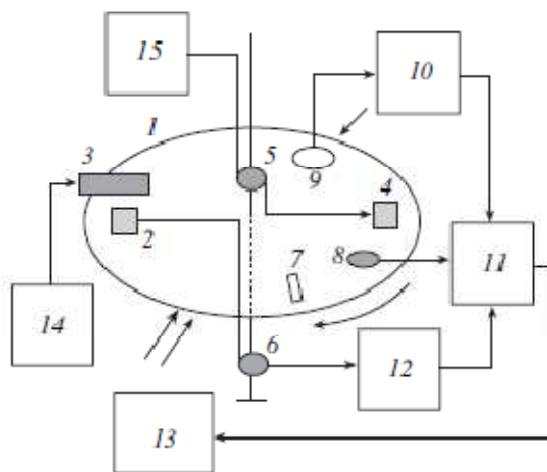
3 Současné metody měření vázaného náboje

3.1 Měření parametrů dielektrických vrstev metodou opakovaného nabíjení povrchu

Pro změření elektrických vlastností je nutné vytvořit kapacitu z pasivované dielektrické vrstvy např. na křemíkovém waferu. V tomto případě se testovací vrstva pokryje vodivou vrstvou z obou stran a následně se k nim připojí elektrody, nebo se měřená vrstva stlačí mezi dvě kovové destičky. Poté se používá elektrických pulzů nebo harmonického signálu k měření elektrických parametrů. Tato metoda je však nepoužitelná pro měření vlastností vrstvy pokud je vystavena světlu nebo jiným přírodním podmínkám. Dalším nedostatkem je možné zničení vrstvy při měření s elektrodami.

Nejlepším způsobem jak změřit elektrické a fotoelektrické vlastnosti je bezkontaktní měření, při kterém je dielektrická vrstva vystavena toku částic. Měří se potenciál této vrstvy a akumulace náboje do vrstvy.

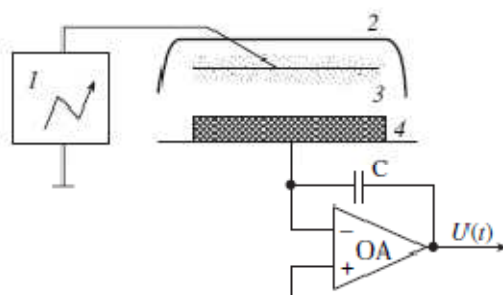
Systém slouží k měření elektrických parametrů a charakteristik dielektrických a fotoelektrických vrstev. Měřená vrstva se pravidelně vystavuje potřebnému množství náboje (obrázek 3.1).



Obr 3.1: Schéma měřicího systému: (1) otáčející se disk (2) testovací vrstva, (3) iontový generátor, (4) kovová vrstva (5, 6) kontakty, (7) synchronizátor, (8) časovač, (9) sonda povrchového měniče potenciálu (10), (11) PC s ADC, (12) měnič náboje (akumulátor), (13) zdroj světla, (14) vysokonapěťový zdroj, (15) kalibrovaný zdroj napětí

Skládá se z rotujícího disku z kovového materiálu, iontového zdroje, měniče náboje, povrchového měniče potenciálu a kalibrovaného zdroje napětí připojeného přes kolektor na kovovou vrstvu (je nezbytný pro kalibraci při měření povrchového potenciálu). Všechny výsledky ve formě napěťových signálů jsou přenášeny do počítače pomocí ADC. Světelný zdroj systému slouží k nabíjení fotocitlivé vrstvy. Počítač také synchronizuje systém a stanovuje expoziční čas a dobu trvání celého procesu. Disk se otáčí konstantní úhlovou rychlostí pro docílení pravidelného ozařování vrstvy. Velikost vkládaného náboje je pak závislá na rychlosti otáčení a rychlosti generování iontů. Když je testovací vrstva vystavena účinkům iontového generátoru, měří se akumulovaný náboj, poté je vrstva přenesena na elektrodu povrchového měniče potenciálu kde měří jeho povrchový potenciál a také potenciál povrchové vrstvy kovu. Tyto údaje jsou zpracovány počítačem, kde jsou převedeny na: náboj nahromaděný na povrchu testovaného materiálu a jeho povrchový potenciál. Z těchto údajů můžeme dále vypočítat Q-V, C-V charakteristiky.

Náboj nahromaděný na dielektrické vrstvě se měří při vystavení vzorku iontovému zářiči. Ten se skládá z vysokonapěťového zdroje a systému elektrod mezi kterými dojde k výboji díky ionizaci molekul vzduchu. Iontový generátor produkuje tok kladně nebo záporně nabitých iontů (závisí na znaménku na elektrodě) narážejících na plochu vrstvy. Samotný počet náboje nahromaděného na povrchu se měří měřičem náboje obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Měřicí systém pro měření akumulovaného náboje
(1) vysokonapěťový zdroj, (2) iontový generátor, (3) dielektrická vrstva, (4) substrát, (C) kondenzátor, (OA) Operační zesilovač

Jako měřiče náboje se používá operační zesilovač s vysokou vstupní impedancí a kondenzátor s nízkým vstupním proudem, vložený do zpětné vazby. Napětí na výstupu je přímo úměrné

nahromaděnému náboji Q . $U=k*Q$ kde $k=1/C$ a C je rovno kapacitě zpětnovazebního kondenzátoru. Napěťový signál z měřiče náboje jde opět do počítače kde s jeho pomocí vypočteme nahromaděný náboj. Kondenzátor C je pak zkratován (vybit) aby mohla proběhnout další měření.[6]

3.2 Quasi-Steady-State Photoconductance (QSSPC) metoda

Kvazi-statický přístup k měření doby života nosičů náboje pomocí fotokonduktance je založen na následujících klíčových myšlenkách:

Vzorek je dlouze/krátce vystaven rozpadlému světelnému pulsu. Časová konstanta tohoto záblesku by měla být nejméně 10 krát pomalejší než je životnost nosiče náboje. To znamená, že přebytek nosičů je stále v ustáleném stavu, nebo v jeho těsné blízkosti, což znamená, že generace a rekombinace jsou v rovnováze.

Zároveň je měření vodivosti vzorku a intenzity záblesku funkcí času. Každému okamžiku v čase odpovídá mírně odlišná hodnota ustáleného stavu nosiče náboje. Vodivost se měří RF cívkou indukčně vázanou ke vzorku, zatímco intenzita záblesku se měří pomocí kalibrovaného světelného senzoru.

Převedení konduktance na průměrnou hodnotu počtu nosičů náboje (Δn) pro každý okamžik v čase. Toho je možno dosáhnout jednoduše tak, že se využijí stávajících modelů pro nosiče jako funkce dopování a injekce. Hustota nosičů je dána rozdílem hodnot před a po osvětlení dielektrika.

Převedení měřené hodnoty záblesku na hodnotu generace elektron-díra (G) ve vzorku pro každý okamžik v čase. To vyžaduje odhad množství absorbovaného světla do vzorku pomocí optických konstant z tabulky.

Výpočet doby života(τ) jako funkce hodnoty hustoty nosičů prostřednictvím ustáleného stavu (Δn) = G_T .

Úroveň pasivace povrchu se kvantitativně vyjadřuje pomocí efektivní rychlosti povrchové rekombinace (SRV - Surface Recombination Velocity). SRV se odhaduje z předpokládané nekonečné životnosti, takže je možné vypočítat horní mezní efektivní hodnotu SRV: $SRV \leq W/(2*\tau_{ef})$, kde W je tloušťka substrátu. Obraz hustoty nosičů náboje (CDI -

Carrier Density Imaging) se používá pro zjištění jednotnosti pasivované vrstvy a podporuje rozvoj infračerveného mapování povrchu (ILM - Infrared Lifetime Mapping).

Zařízení se skládá z: a) IR zářiče, b) vertikálně pohyblivého držáku zářiče s okýnkem pro umístění filtru, c) černého podstavce s terčem a d) rozhraním pro připojení na PC.

3.2.1 Příprava vzorku

Je důležité mít připravený takový vzorek, aby se co nejvíce podobal skutečnému - mimo laboratoř používanému výrobku. Příkladem bude PERC solární článek, jehož výroba probíhá takto:

Vytvoření textury a její leštění, difúze přední strany, pasivace strany zadní, antireflexní coating pomocí SiN_x , laserově se odstraní část zadní pasivované vrstvy (lokálně), metalizace (kontaktáž) povrchu (přední strana stříbrem, zadní hliníkem) a nakonec se provede výpal.

Výhody:

V jednom snadném a rychlém kroku změří hodnoty života nosičů náboje v objemu.

Vzhledem k tomu, že je vzorek měřen v téměř ustáleném stavu, hodnoty měření při osvětlení připomínají chování solárních článků.

Vypočtená životnost je odvozena z absolutních hodnot měřených veličin, než z jejich derivátů, a je tedy méně náchylná na šum.

Nevýhody:

Je důležité znát absolutní hodnotu rychlosti generace nosičů G nebo hodnotu optické konstanty materiálu, protože část dopadajícího světla je pohlcena (absorbována) vzorkem.

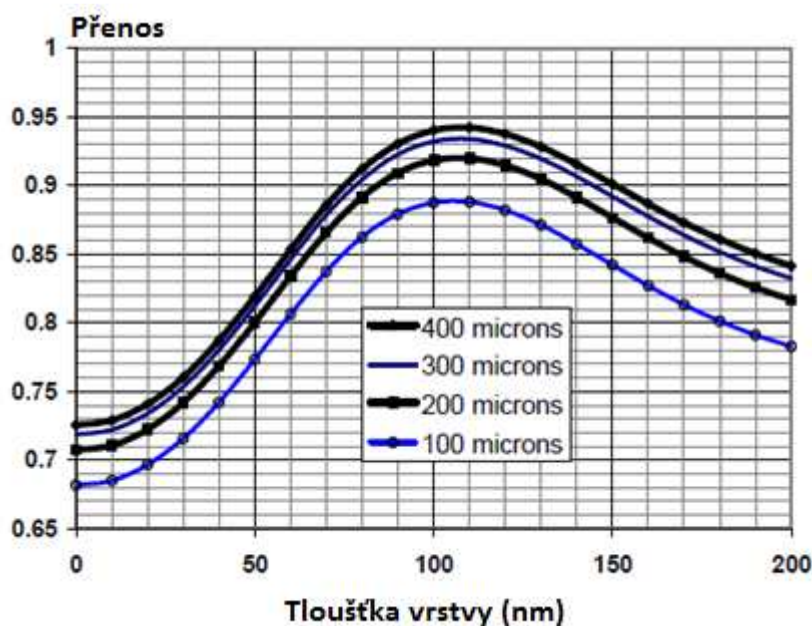
3.2.2 Stanovení optické konstanty pro QSSPC měření

Naštěstí hodnota optické konstanty se dá dobře odhadnout, a to v rozmezí 5% a celková hodnota doby života nosičů je jen málo závislá na malé změny tzn. 5% chyba optické konstanty = 5% chyba doby života. Optická konstanta se spočítá z optických modelů založených na známých hodnotách koeficientů absorpce a indexů lomu křemíkového waferu s různou pasivací.

Na obrázku 3.3 je příklad pro čtyři křemíkové destičky 4 různých tloušťek a každá s tenkou vrstvou oxidu. Vrstva oxidu působí jako optimální antireflexní povlak na tloušťce kolem 110 nm, kdy optická konstanta překračuje hodnotu 0,95. Destička bez vrstvy oxidu má hodnotu

optické konstanty kolem 0,7 a velmi tenké solární články mohou mít i méně. Pasivace povrchu zvyšuje hodnotu optické konstanty a při použití optimální metody, je možné tuto hodnotu navýšit až na 1. Pro velmi široké vzorky s texturou a antireflexním coatingem, může být tato hodnota větší než 1.

Ještě je možné odhadnout optickou konstantu z měření odrazivosti a křivky propustnosti vytvořené pomocí spektrometru v celém spektru záblesku, který přístroj generuje.



Obrázek 3.3: Optická konstanta pro 4 různé destičky vztahovaná na tloušťku povlaku

3.2.3 QSSPC a CV měření $Al/Ta_2O_5/SiO_2/Si$

Ta_2O_5 se používá pro paměťové kondenzátory, hlavně kvůli své vysoké dielektrické konstantě (20 - 25). Hlavním problémem využití Ti_2O_5 jako dielektrika je jeho vysoký unikající proud. Jedním řešením může být oboustranná pasivace pomocí SiO_2 . Při použití jakožto skladovacích kondenzátorů bylo zjištěno, že technologie MTOS může být nabíjena při daleko nižších napětích než konvenční MNOS technologie.

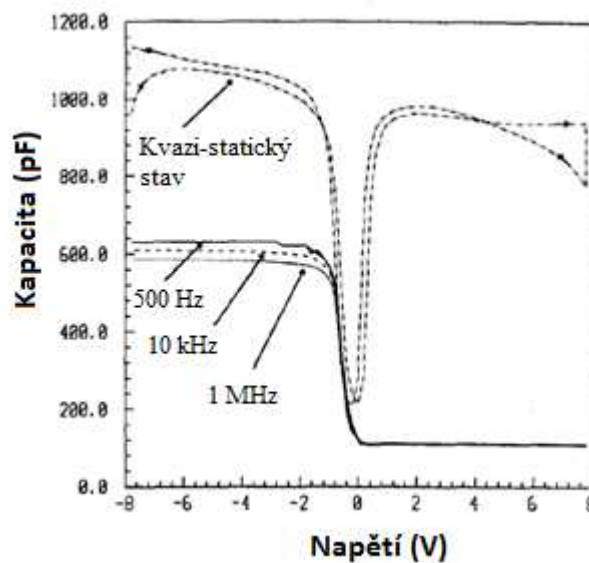
Příprava vzorku

Jako substrátu pro MTOS kondenzátory se používá n-typ a p-typ křemíku rezistivity 8 - 10 Ωcm . Po očištění se materiál nechá oxidovat v suchém prostředí při 1000 $^{\circ}\text{C}$ do požadované tloušťky. Ta_2O_5 se deponují na SiO_2/Si pomocí vysokofrekvenčního naprašování

při tlaku argonové atmosféry $5 \cdot 10^{-3}$ Torru. Výkon r.f. naprašovače je 100W a teplota substrátu 200 °C.

C-V charakteristika

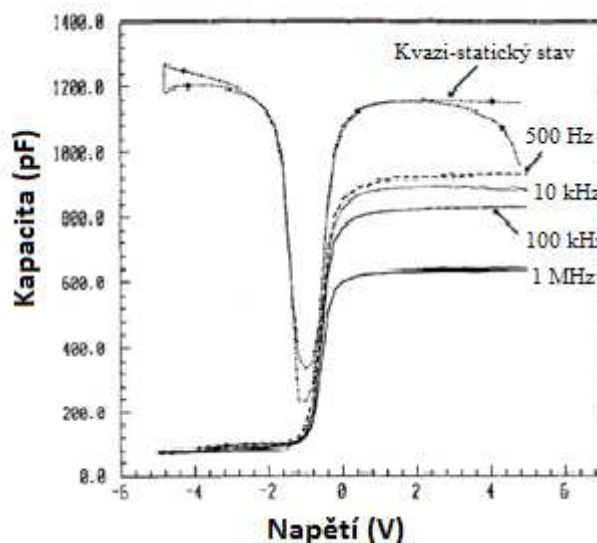
Kvazi-statická a vysokofrekvenční C-V křivka MTOS kondenzátoru s p-typem substrátu je na obrázku 3.4. Ve frekvenčním rozsahu 500 Hz až 1 MHz kapacita klesá ze 610 pF na 590 pF. Kapacita v inverzi zůstává konstantní při 100 pF.



Obrázek 3.4: C-V charakteristika pro frekvence 500 Hz, 10 kHz a 1 Mhz a kvazi-statického stavu u MTOS kondenzátoru (p-typ křemíku)

Kvazi-statické měření ukazuje výrazný rozdíl. Kapacita je větší než u vysokofrekvenční metody po celé délce propustného napětí, a také vykazuje hysterezi.

C-V výsledky MTOS kondenzátoru na n-typu substrátu jsou vidět na obrázku 3.5. Vyrůstající kapacita ze 600 pF do 900pF je výraznější než u p-typu křemíkového substrátu. Kapacita v záporných hodnotách, v tomto případě, zůstává konstantní. Kvazi-statická kapacita je opět větší než u nejvyšší měřené frekvence u C-V měření.



Obrázek 3.5: C-V charakteristika pro frekvence 500 Hz, 10 kHz a 1 MHz a kvazi-statického stavu u MTOS kondenzátoru (n-typ křemíku)

Změnou tloušťky oxidu Ta_2O_5 na $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$, kde se vycházelo z dielektrické konstanty $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$, se na kov hromadí elektrony, a to snižuje elektrické pole v SiO_2 až dojde k selhání SiO_2 vrstvy. Rozdíl mezi kvazi-statickou a vysokofrekvenční C-V metodou je obvykle přičítána unikajícímu proudu přes pasivovanou vrstvu a sériovému odporu.

Kapacitně - napěťová charakteristika

Z rozměrů dielektrické vrstvy můžeme podle vzorce $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S/d$ vypočítat její geometrickou kapacitu. S je plocha dielektrika a d celková tloušťka dielektrické vrstvy, ϵ ($\epsilon_0 \cdot \epsilon_r$) je permitivita dielektrika. Druhá možná rovnice pro výpočet náboje je: $C = Q/V$, kde Q je vázaný náboj a V je rozdíl potenciálů dvou elektrod (napětí). Výsledkem tohoto měření je C-V charakteristika.

Odhad náboje v materiálu

Při odhadování náboje v kondenzátorech tvořených dvěma dielektriky je náboj se kumuluje na jejich rozhraní. To je dáno rozdílem v permitivitách těchto materiálů. Podle Gaussova zákona je náboj u $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dán: $Q = \epsilon_0 \epsilon_{\text{tx}} E_{\text{tx}} - \epsilon_0 \epsilon_{\text{sx}} E_{\text{sx}}$. Kde Q je meziplošný náboj ϵ jsou permitivity (s nulou - vakua a s indexem - příčného materiálu) a E jsou elektrické pole přes tyto materiály.

Pak kapacita na jednotku plochy je dána vztahem (2.3).

$$C_Q = \varepsilon V \left[\frac{\varepsilon_{tx} R_{tx}}{d_{tx}(R_{sx} + R_{tx})} - \frac{\varepsilon_{sx} R_{sx}}{d_{sx}(R_{sx} + R_{tx})} \right] \quad (2.3)$$

Kde d jsou tloušťky materiálů dielektrika, $R_{tx} = 10^{13} \, \Omega$, $R_{sx} = 10^{15} \, \Omega$ je odpor materiálu zjištěný z proudově - napěťové charakteristiky, $\varepsilon_{tx} = 24$ a $\varepsilon_{sx} = 3,8$.

Díky kvazi-statickému C-V měření se dá změřit náboj na rozhraní Ta_2O_5/SiO_2 , který přispívá k výpočtu celkové kapacity, která je frekvenčně závislá. Tato frekvenční závislost kapacity funguje díky meziplošné polarizaci. S přihlédnutím na unikající proud, můžeme pozorovat, že meziplošný náboj také přispívá k rozdílům v kvazi-statickém měření. [7]

3.3 Nízkonapěťové mikromechanické zkušební konstrukce pro měření zbytkového el. náboje v dielektrických vrstvách

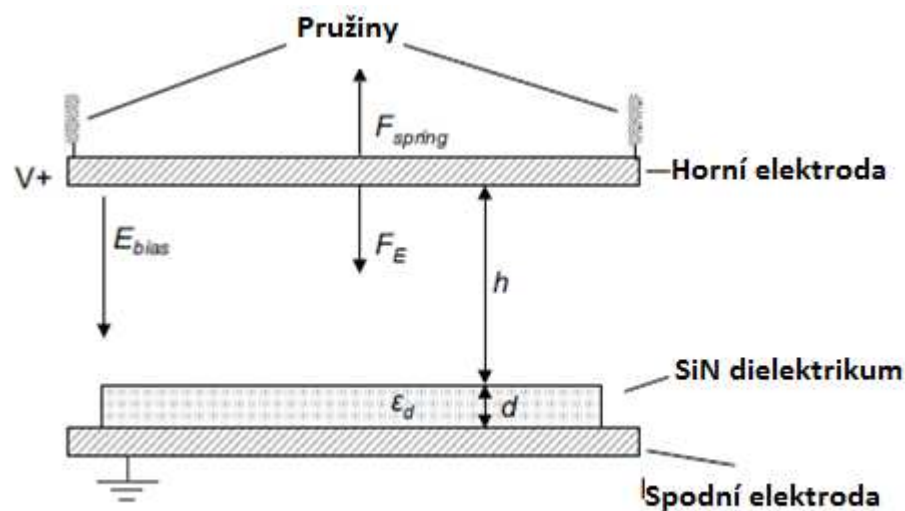
Analýza zbytkového elektrického náboje použitím mikromechanických konstrukcí je často obtížná, protože zkreslující vysoké napětí procházející tenkým dielektrikem mění velikost náboje v jeho objemu a tím zkresluje výsledky měření.

Kapacitní mikro-elektromechanické systémy jako např. měřiče zrychlení nebo tlakové senzory, zpravidla využívají dielektrické vrstvy k zabránění ohmického zkratu mezi pevnou elektrodou a pohyblivými mechanickými prvky. Nicméně, zbytkový náboj je v dielektrickém materiálu už od výrobního procesu. Tento náboj je v určitých aplikacích nežádoucí, protože může vést ke špatným provozním vlastnostem, nebo dokonce k selhání zařízení (hlavně RF přepínače).

Metoda bezkontaktního měření celkového náboje dielektrické vrstvy na polovodičovém substrátu využívá působení opakovaného korónového výboje do dielektrické vrstvy a následné měření fotovoltického napětí po každém takovém výboji. Hustota náboje každého výboje je měřena coulombmetrem. Tato hustota a hodnota povrchového napětí je důležitá pro výpočet celkové hodnoty náboje dielektrika. Tato metoda se obecně vztahuje k testování polovodičových waferů a zejména pro měření celkového zatížení dielektrika při výboji.

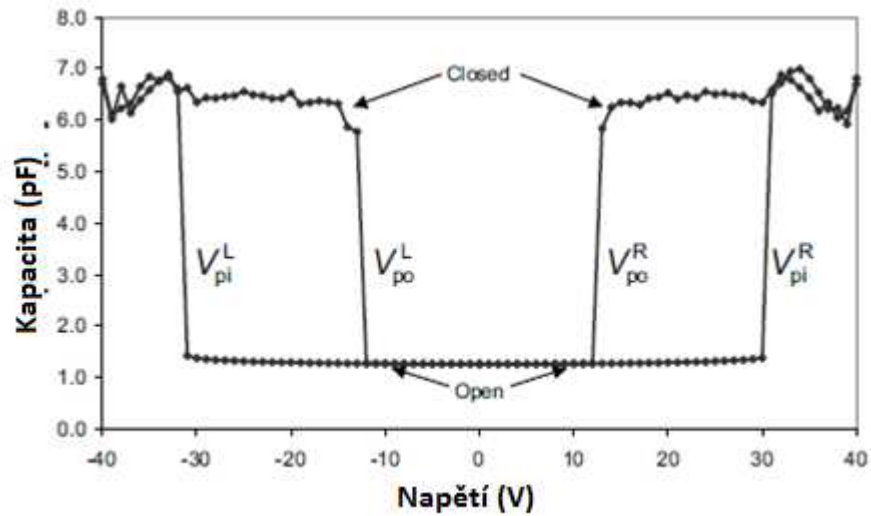
Výroba dielektrických vrstev, zejména tenkých oxidačních vrstev, je základem pro výrobu integrovaných obvodů na polovodičových waferech nebo se používá jako deponovaná vrstva na solárních článcích, kde zlepšuje vlastnosti a zefektivňuje jejich práci. Samozřejmě je

mnoho dalších aplikací v elektronice, kde se používá těchto tenkých dielektrických vrstev. Většina takovýchto zařízení je velice citlivých na indukovaný náboj v jejich blízkosti a ve většině případů jsou silně závislé na koncentraci volných nosičů náboje v křemíkovém waferu. V důsledku toho mohou být nežádoucí rozdíly ve výkonnosti zařízení zavedením náboje na dielektrikum a jeho rozhraní s waferem. Tento náboj může např. způsobit statické nabíjení dielektrika, špatné vytvoření izolační vrstvy, nadměrnou iontovou kontaminaci dielektrika, metalickou kontaminací uvnitř dielektrika, nebo může dojít k vytvoření nechtěné vodivé vrstvy na povrchu. Proto roste zájem o zjišťování celkového nebo čistého náboje v dielektriku.



Obrázek 3.7 Schema měřicí soustavy RF MEMS

Obrázek 3.7 ukazuje, že systém se skládá z horní elektrody, která je ovládána tenkými pružinkami. Zároveň je jí možno přitáhnout napětím přivedeným přes vzduchovou mezeru mezi dvěma elektrodami. Pokud toto napětí (nazývané přitahovaným) překročí určitou rovnovážnou hodnotu, spínač je sepnut, a pokud je naopak menší nebo rovno rovnovážnému napětí, elektroda se oddálí. Toto napětí se označuje jako V_{pi} , pro spínání a V_{po} , pro napětí rozpínací. Obě hodnoty se dají najít měřením hystereze na kapacitně-napěťové křivce (obr 3.8).



Obrázek 3.8 C-V křivka pro výpočet spínacího a rozpínacího napětí

V uzavřeném stavu je velikost elektrického pole asi 1MV/cm. Díky tomu je dielektrikum nabíjeno, mění elektrické pole mezi oběma deskami a takto změněné pole posouvá C-V křivku. Nicméně velké množství náboje vnikajícího do dielektrika může vést ke selhání spínače. Aby se zabránilo navlhnutí spínače, přístroj je uzavřen ve schránce s dusíkovou atmosférou.

Pokud předpokládáme, že nám spínač vytvořil deskový kondenzátor, je možné vypočítat elektrostatickou sílu (2.4).

$$F_E = -\nabla(U_V + U_E) = \frac{d}{dh} QV - A \frac{d}{dh} \left(\int_0^d \frac{\epsilon_0 k |E(z)|^2}{2} dz + \int_0^{d+h} \frac{\epsilon_0 k |E(z)|^2}{2} dz \right) \quad (2.4)$$

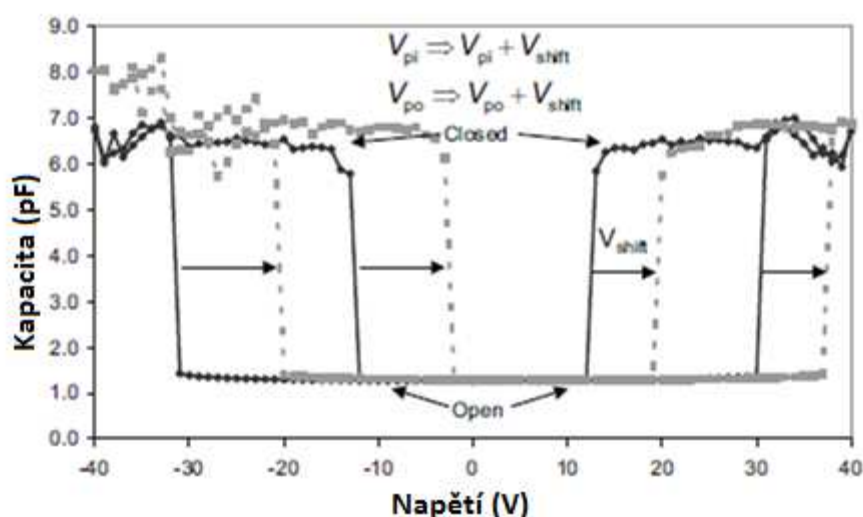
Kde U_V je napětí zdroje, U_E je napětí na kondenzátoru, A je plocha vrstvy, Q je elektrický náboj, d je tloušťka vrstvy dielektrika, k je relativní permitivita, ϵ_0 je permitivita vakua, h je vzdálenost od pláště po vrch dielektrika a $E(z)$ je velikost elektrického pole mezi elektrodami. Velikost $E(z)$ je různá podle toho, jestli už bylo dielektrikum nabíjeno nebo se provádí nové měření. S tím, že známe rovnici pro výpočet náboje: $Q = CV = \frac{\epsilon_0 AV}{h + \frac{d}{k}}$ jsme schopni vypočítat elektrostatickou sílu (2.5).

$$F = \frac{\varepsilon_0 A V^2}{2} \frac{d}{dh} \left(\frac{1}{\frac{d}{k} + h} \right) = - \frac{\varepsilon_0 A V^2}{2 \left(\frac{d}{k} + h \right)^2} \quad (2.5)$$

Pokud je hustota náboje ve vrstvě rovna $z=z_\sigma$, povrchový náboj na vrchní a spodní elektrodě již nejsou stejné. Změny v elektrickém poli ($z_\sigma=d$) zapříčiní, že náboj na povrchu změní znaménko síly. Tento efekt je dán horizontálním posunutím v C-V křivky, a je označován jako V_{SHIFT} (2.6).

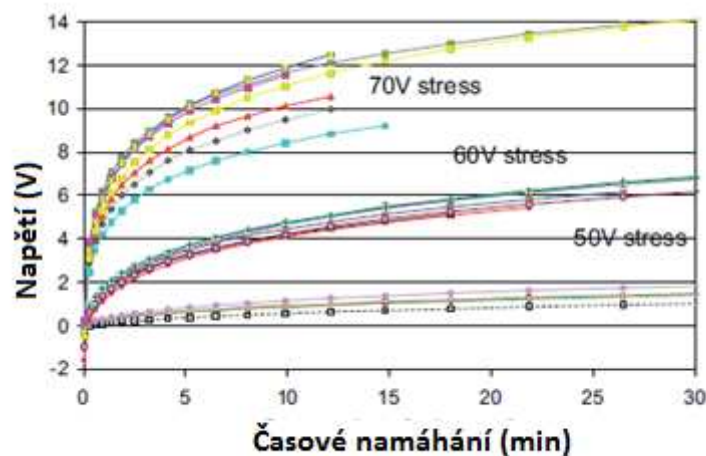
$$V_{shift} = \frac{z_\sigma \sigma d}{k \varepsilon_0} \quad (2.6)$$

Příklad tohoto posunu je uveden na obrázku 3.9. Posun C-V křivky může vést k selhání, jestliže se negativní rozpínací napětí posouvá kolem osy y. V tomto případě se spínač neotevře do doby než na něm bude nulové napětí. Dalším problémem může být, že pokud je V_{SHIFT} větší než nula, je třeba většího ovládacího napětí pro uzavření přepínače.



Obrázek 3.9 CV křivka před (černá) a po (šedá) po nabíjení při 65V po dobu 12 minut

V_{SHIFT} je funkcí napětí a času a je třeba jej měřit po každém procesu nabíjení dielektrika. Na obrázku 4 je vidět posun křivky CV při třech různých nabíjecích napětích. Jak se dá očekávat, při vyšších nabíjecích napětích je změna V_{SHIFT} rychlejší, větší a je také patrné větší rozšíření měřeného napětí.



Obrázek 3.10 Změna rozšíření CV křivky jako fce. času a napětí o hodnotách 50, 60 a 70V

Není jasné jestli je toto rozšíření způsobeno rozdíly v tloušťce d dielektrika nebo na drsnosti horní elektrody. Což vede k zbytkové vzduchové mezeře mezi dielektrikem a horní elektrodou (h_{closed}) při uzavřeném spínači.

Posunu středu křivky C-V charakteristiky je možné využít pro měření náboje v objemu dielektrika. Při vyšším napětí je rychlost a rozšíření C-V křivky větší a také samotný posun křivky je větší což je možné připsat rozšíření dielektrika nebo drsnosti povrchu. Po rychlém stoupání křivky V_{SHIFT} se po určitém čase posun začne snižovat. To dokazuje dva různé mechanismy nabíjení dielektrika pracujících v různých intervalech.[8]

3.4 Smáčení oxidových vrstev na křemíku a sledování vloženého náboje

Smáčivost tenkých oxidových vrstev na křemíkovém substrátu je ovlivněna fixním nábojem v blízkosti vnějšího povrchu oxidu. Je dokázáno, že podle výsledků lze analyzovat jak hloubku, tak i koncentraci fixního náboje. Přesné hodnoty ukazují hloubku pár Angstromů a koncentraci několikrát 10^{-13} cm^{-2} . Tyto hodnoty jsou závislé na teplotě, při které byla prováděna pasivace a díky měření úhlu smáčení se dá počítat fixní náboj.

Z pozorování je dobře známo, že bezprostředně po odstranění pasivované vrstvy z křemíkového substrátu, voda nesmáčí křemíkový substrát, zatímco růst oxidu pouhých 40 Å může povrch smáčet úplně. Tento jev byl studován Williamsem a Goodmanem (1974) bez vyhovujících závěrů. Stoneham a Tasker (1985) poznamenali, že výsledky mohou být

připsány fixnímu náboji v blízkosti vnějšího povrchu. Fixní náboj vytváří polarizaci, která ovlivňuje rozdíl v meziplošné energii, kde jedna část je vzduch (s nízkou permitivitou) a médiem - vodou (s vysokou permitivitou). Bere se na vědomí, že úhel smáčení je dán podmínkami meziplošných energií (2.7).

$$\cos\theta = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_W} \quad (2.7)$$

Kde σ_W je povrchová energie vody (rovnající se povrchovému napětí kapalin) a $\Delta\sigma$ je rozdíl energií vrstva-vzduch a vrstva-kapalina. $\Delta\sigma = \sigma_{0A} - \sigma_{0W}$

Tento rozdíl $\Delta\sigma$ se skládá ze dvou podmínek. První, $\Delta\sigma_0$ je energetický rozdíl pro ideální vrstvu bez elektrického náboje. Druhá, $\Delta\sigma_1$ vzniká kvůli polarizaci spojené s fixním nábojem v oxidové vrstvě tzv. "představa okolností".

Pro velmi silné vrstvy pasivovaných vrstev s jednotkovým nábojem Q_e ve vzdálenosti x od vnějšího povrchu, polarizační energie vystihuje vztah 2.8. to platí v případě, že je na pasivovaném povrchu voda.

$$Q^2 u(x) = \left(\frac{Q^2 e^2}{4\epsilon_S x} \right) \left(\frac{\epsilon_S - \epsilon_W}{\epsilon_S + \epsilon_W} - \frac{\epsilon_S - \epsilon_A}{\epsilon_S + \epsilon_A} \right) \quad (2.8)$$

Kde ϵ_S je permitivita oxidu křemičitého, ϵ_A permitivita vzduchu a ϵ_W je permitivita vody. V konečném měřítku jsou tyto konstanty $\epsilon_S=4,6$, $\epsilon_A=1$ a $\epsilon_W=80$. Pokud je hustota náboje ρ_x na jednotku plochy rozložena po celé šířce dielektrika (v praxi je jejich rozluka větší než hloubka x), pak náboj v této hloubce odpovídá rozdílu povrchových napětí:

$$\Delta\sigma_1 = \rho(x) Q^2 u(x) \quad (2.9)$$

Nicméně tato "představa okolností" není použitelná pro tenké vrstvy pasivovaných oxidů, takže můžeme následovat metodu Smythe (1939), která ukazuje výpočet pro tloušťky t , $u(x)$.

$$\frac{e^2}{2\epsilon_S} \int_0^\infty dk \left(\frac{\alpha + \beta - 2\alpha\beta}{\alpha\beta - 1} - \frac{\alpha_0 + \beta - 2\alpha_0\beta}{\alpha_0\beta - 1} \right) \quad (2.10)$$

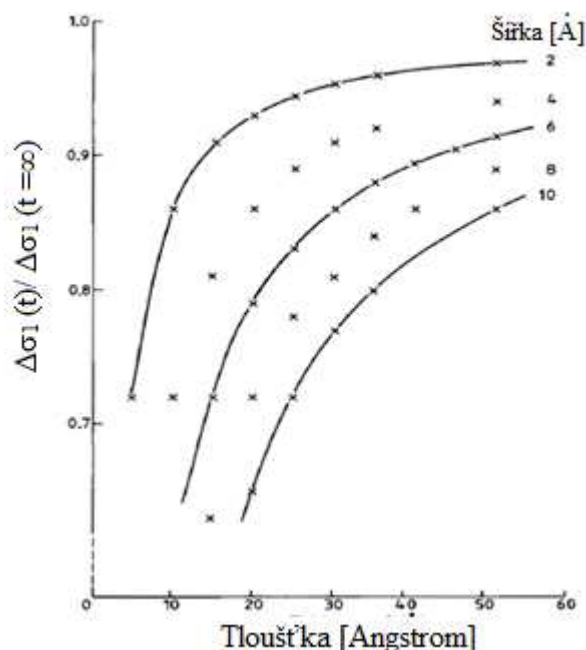
Z rovnice 2, kde se $\Delta\sigma_1$ mění s Q^2/x násobeným permitivitou, předpokládáme, že náboje jsou dostatečně daleko od sebe, aby mohly být považovány za nezávislé. Následují dva body. Za prvé, náboje v blízkosti povrchu jsou dominantní kvůli faktoru $1/x$. Za druhé, velké nominální náboje Q mají velký vliv. Pro elektrický náboj $2e$ v hloubce $x = 1\text{Å}$ je to:

$\frac{Q^2}{4x\epsilon_S} \sim 3,13 \text{ eV}$ což pro hustotu 10^{13} cm^{-2} znamená: $\Delta\sigma_I = 90 \text{ erg cm}^{-2}$. Za třetí, dokud jsou náboje považovány za nezávislé, jejich znaménko je bezvýznamné. Mohou zde být náboje kladné ($Q = +2$), záporné ($Q = -2$), nebo jsou si rovny. Není nutné požadovat po dipólové vrstvě nebo "pracujícím" náboji, aby odpovídaly $\Delta\sigma_I$, ačkoli bude možná nutná korelace $\Delta\sigma_I$. Nakonec, závislost na ϵ_W (permitivitě kapaliny) je důležitá, nicméně ne tak velká. Pro příklad: změnou kapaliny - vody ($\epsilon_W = 80$), kterou nahradíme kapalinou s nižší permitivitou ($\epsilon_W = 2$), sníží $\Delta\sigma_I$ pouze 4 krát. Takže, kapaliny s velkým ϵ_W mají v praxi výhodu, nicméně ostatní kapaliny (obvykle s $\epsilon_W > 20$) se používají tam, kde je jich zapotřebí. S permitivitou kapalin je to ovšem jinak pro oxidové vrstvy malých tloušťek.

3.4.1 Závislost na tloušťce pasivované vrstvy

Za předpokladu, že je náboj v hloubce x od vnějšího povrchu, můžeme použít rovnici č. 4, abychom byli schopni určit závislost $\Delta\sigma_I$ na tloušťce oxidové vrstvy a také na hodnotě permitivity kapaliny ϵ_W , abychom viděli jak náboj v hloubce x ovlivňuje kapalinu. Je zřejmé, že nemůžeme uvažovat tloušťky t menší než x , ale obvykle předpokládáme $x < 5 \text{ \AA}$ a $10 \text{ \AA} < t < 50 \text{ \AA}$ jako interval našeho zájmu. Ověřením se dá zjistit, že $\Delta\sigma_I$ je monotónně rostoucí funkcí t , takže je snadné pro námi zvolené hodnoty určit trend (obr. 3.11). Také lze ověřit, že tvar funkce je nezávislý na ϵ_W a stejně tak lze pozorovat nepatrnou závislost $\Delta\sigma_I$ ($t = \infty$) na ϵ_W .

Pokud se zaměříme na hodnoty $\Delta\sigma_I(t) / \Delta\sigma_I(t = \infty)$ pro různé tloušťky, můžeme nalézt velmi malou závislost na zvolené hodnotě t . To je méně než 2 - 3 % pro tloušťky v rozmezí 20 - 50 $\text{\AA}$, a to i pro velké změny ϵ_W k hodnotám 2 - 6. Pro lepší aproximaci může být $\Delta\sigma_I$ rozložena do faktorů závislých na Q oddělené od x , t a od ϵ_W .



Obrázek 3.11: Různorodost $\Delta\sigma_1(t) / \Delta\sigma_1(t=\infty)$ na tloušťce t

3.4.2 Závislost na pozici fixního náboje

Je známo, že čím blíže je náboj k vnějšímu povrchu (čím menší je x), tím rychleji se $\Delta\sigma_1(t)$ nasycuje s deponovanou vrstvou. Při pozorování široké škály výsledků s tloušťkami

$2 < x < 10 \text{ Å}$, $10 - 50 \text{ Å}$, spolu s mezními hodnotami u velmi silných vrstev se přišlo na to, že odpovídají jednoduchému stavu, a to:

$$\frac{\Delta\sigma_1(t)}{\Delta\sigma_1(\infty)} = 1 - 0,7 \frac{x}{t} \quad (2.11)$$

Je zřejmé, že pro určité rozsahy x a t , je tato rovnice nepoužitelná a bylo by jí nutné upravit pro další dielektrické konstanty, ale celkově docela dobře odpovídá. Dalším shromažďováním výrazů najdeme:

$$\Delta\sigma_1 \cong (20 \text{ erg cm}^{-2}) Q^2 \left(\frac{1}{x} - \frac{0,7}{t} \right) \rho(x) \quad (2.12)$$

Pro vodu na vrstvičce oxidu křemičitého pasivovaného na křemíkový wafer s nábojem pouze v hloubce x . Q je v hodnotách Coulomb, x a t je v jednotkách Å a $\rho(x)$ je v jednotkách 10^{13} cm^{-2} .

Porovnáním dvou skupin údajů Williamse a Goodmana, jmenovitě: $\cos \theta$ jako funkce tloušťky vrstvy rostoucí při pokojové teplotě a při 600°C , zjistíme, že data leží v blízkosti

společné křivky, ale pro větší přehlednost je lepší je analyzovat odděleně. Při analýze, bereme na vědomí, že $Y(t)$ je experimentálně definováno jako:

$$Y(t) = \frac{\cos(\theta(t)) - \cos(\theta(t=0))}{\cos(\theta(t \rightarrow \infty)) - \cos(\theta(t=0))} \quad (2.13)$$

je dáno teoreticky jako:

$$Y(t) = 1 - 0,7 \frac{x}{t} \quad (2.14)$$

a pokud je jednotná vrstva náboje v hloubce x , tak lze použít vztah 2.15:

$$x = \frac{t(1-Y(t))}{0,7} \quad (2.15)$$

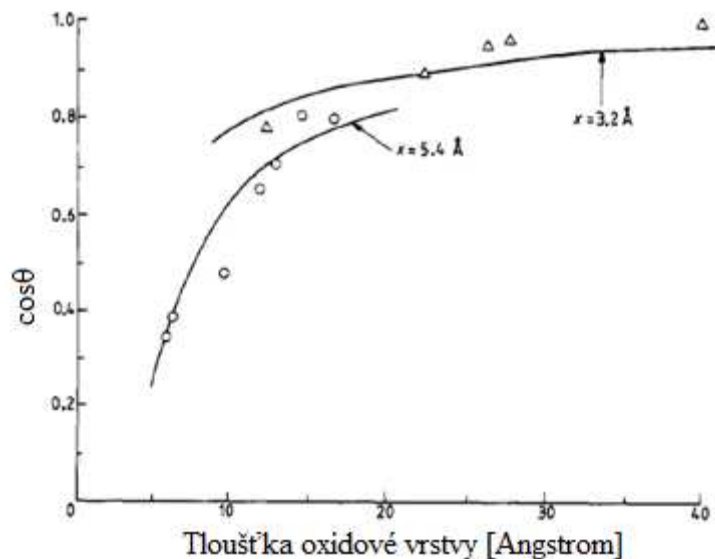
Při vyhodnocování x z výsledků Williamse a Goodmana, byly nalezeny následující výsledky (obrázek 3.12):

V případě, že se oxidační vrstva tvořila při pokojové teplotě, je $x \sim 5,4 \text{ Å}$ s odchylkou $0,9 \text{ Å}$ (ta mohla vzniknout měřením různých skupin lidí a následným porovnáváním výsledků).

Při růstu vrstvy při 600°C je hloubka náboje $x \sim 3,2 \text{ Å}$ s odchylkou $0,7 \text{ Å}$.

Odchyly mohou přispět k lepšímu rozložení náboje, nicméně je zde jasný náznak posunu náboje s růstem teploty. Drobné rozdíly ve tvaru křivky na obr. 2 by mohly být snadno upraveny dvěma nebo více vrstvami náboje, ale to by vedlo k ne-tak detailní analýze problému.

Pokud použijeme hloubku náboje pro další analýzu, můžeme se dopočítat k hustotě náboje v objemu. Použitím hodnoty povrchového napětí vody - 73 deg cm^{-1} , nalezneme patřičné hodnoty ρQ^2 . Pokud je hustota náboje $\rho = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ a Q je náboj, pak zjistíme, že u vrstev tvořených za pokojové teploty je $\rho Q^2 \approx 32$ a pro vrstvy vytvořené při 600°C je $\rho Q^2 \approx 18$.



Obrázek 3.12: závislost $\cos\theta$ na tloušťce oxidové vrstvy
 ○ - vrstva deponovaná při pokojové teplotě
 Δ - vrstva deponovaná při teplotě 600 °C

3.4.3 Závislost na jiných oxidových vrstvách

Náboje v pasivační vrstvě na silikonovém substrátu byly v popředí zájmu pro jejich možné účinky na celkové chování zařízení. Náboje jsou obvykle rozděleny do čtyř skupin. První představuje přenosný iontový náboj, především alkalické ionty, a je pravděpodobné, že je zdrojem nábojů, které se pokoušíme měřit. Druhá skupina obsahuje zachycené náboje, které fungují díky elektronům a dírám v objemu oxidové vrstvy (především díky defektům). Tato složka je v tomto měření nepodstatná, částečně protože se uvažuje velmi tenká pasivovaná vrstva, a také proto, že zachycený náboj v objemu je způsoben procesy relevantními (ionizační záření, lavinová injekce). Třetí skupinu tvoří rozhraní zachycených nábojů, které se nachází na rozhraní křemík-oxidová vrstva. Čtvrtou skupinu tvoří tzv. fixní oxidový náboj. Ten má obvykle hodnotu pár desítek Angstromů uvnitř na křemíkově-oxidovém rozhraní a závisí na podmínkách, za kterých byla tato vrstva pasivována. Zjevná závislost navlhčení na teplotě deponování oxidové vrstvy a fakt, že pro tenké vrstvy oxidu, se může fixní náboj rozšířit po celé délce vrstvy (způsobeno jak fixním nábojem, tak i fixním nábojem v oxidu). Tyto dva nejsou totožné, nicméně v blízkosti vnějšího povrchu ovlivňují smáčení.[9]

4 Praktická část

Tato část pojednává o praktickém měření náboje v dielektriku pomocí C-V měření, popsaného v kapitole 3.3 a metodou smáčení povrchu popsanou v kapitole 3.4.

4.1 Typy vzorků a jejich výroba

Pro následující měření byly využity kulaté křemíkové substráty o rozměru 3", tloušťky 450 μm , p-typ <111>, kde přední strana vzorku byla leštěná a zadní lapovaná. Povrchy substrátů byly pokryty pasivační a antireflexní vrstvou materiálů SiN_x , Al_2O_3 , a nativní SiO_2 .

4.2 C-V měření

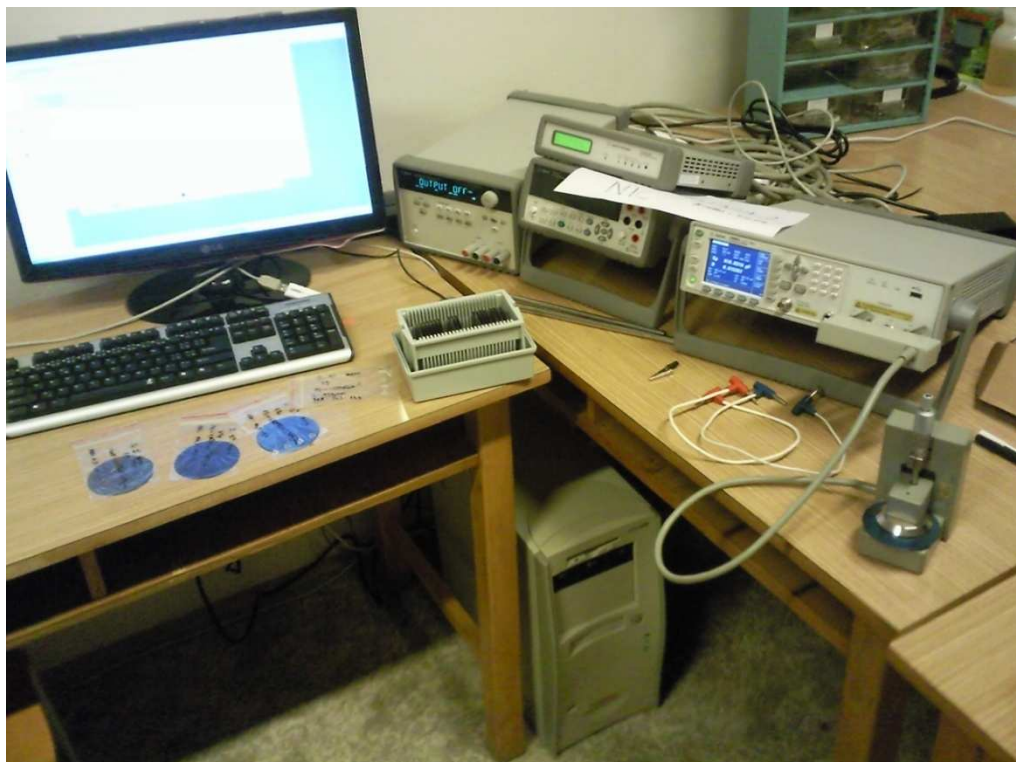
Na obr. 4.1 je vidět měřicí pracoviště Ústavu elektrotechnologie VUT v Brně, kde probíhalo měření a v tabulce 2 jsou uvedeny typy přístrojů, kterými bylo měření prováděno.

Přístroj	Použití
AgilentE4980A	LCR Meter
Agilent 16451B	Dielectric test fixture (držák s kontakty)
Agilent E3649A	Power Suply (zdroj)
Agilent Vee Pro	PC program firmy Agilent pro CV měření

Tab. 2: Použité přístroje

Křemíkový substrát byl vložen do přitlačného držáku, který umožňuje vodivé kontaktování. Měření kapacity se provádí pomocí LCR metru Agilent E4980A (20 Hz - 2 Mhz), jehož výstup je propojen s PC, kde byly výsledky měření zpracovány příslušným softwarem. Na měřicí kontakty bylo přivedeno napětí externího zdroje.

Při měření bylo použito napětí od -20 V do 20 V a frekvence 100 Hz, 1000Hz, 10000 Hz a 100000Hz. Při pokusech v laboratoři byl proveden pokus na elektrickou pevnost dielektrické vrstvy. Při tomto zkoušení se přišlo na to, že průrazné napětí (udává nejmenší velikost napětí, které způsobí průraz při dané tloušťce dielektrika) se pohybuje kolem hodnoty 50 V. Po překročení této hodnoty jsou výsledky nesmyslné, protože v dielektriku dochází k vodivým spojení, kterými může procházet elektrický proud. Při tomto měření nedošlo k trvalému průrazu dielektrika, bylo jen ověřeno do jaké hodnoty napětí lze měřit.



Obr. 4.1 Měřící pracoviště Ústavu elektrotechnologie

4.2.1 Naměřené hodnoty C-V charakteristik

V tabulkách 3 - 5 jsou uvedeny hodnoty největší naměřené kapacity při patřičném přiloženém napětí a ze vztahu $Q = U \cdot C$ je vypočten celkový náboj v dielektriku.

Materiál	Nejvyšší kapacita [nF]	Napětí [V]	Celkový náboj [nC]
Al ₂ O ₃ [40 μm]	1,143	20	22,86
Al ₂ O ₃ [60 μm]	2,017	20	40,34
Al ₂ O ₃ [80 μm]	2,026	20	40,52
Nativní oxid	2,818	20	56,36
SiNx Vzorek 1	0,617	20	12,34
SiNx Vzorek 2	0,765	20	15,31

Tab. 3: Vypočtený celkový náboj v dielektriku pro různé materiály při 1 kHz

Materiál	Nejvyšší kapacita [nF]	Napětí [V]	Celkový náboj [nC]
Al ₂ O ₃ [40 μm]	1,485	20	29,68
Al ₂ O ₃ [60 μm]	1,966	20	39,31
Al ₂ O ₃ [80 μm]	2,045	20	40,09
Nativní oxid	7,231	20	144,62
SiNx Vzorek 1	0,635	20	12,71
SiNx Vzorek 2	0,861	20	17,22

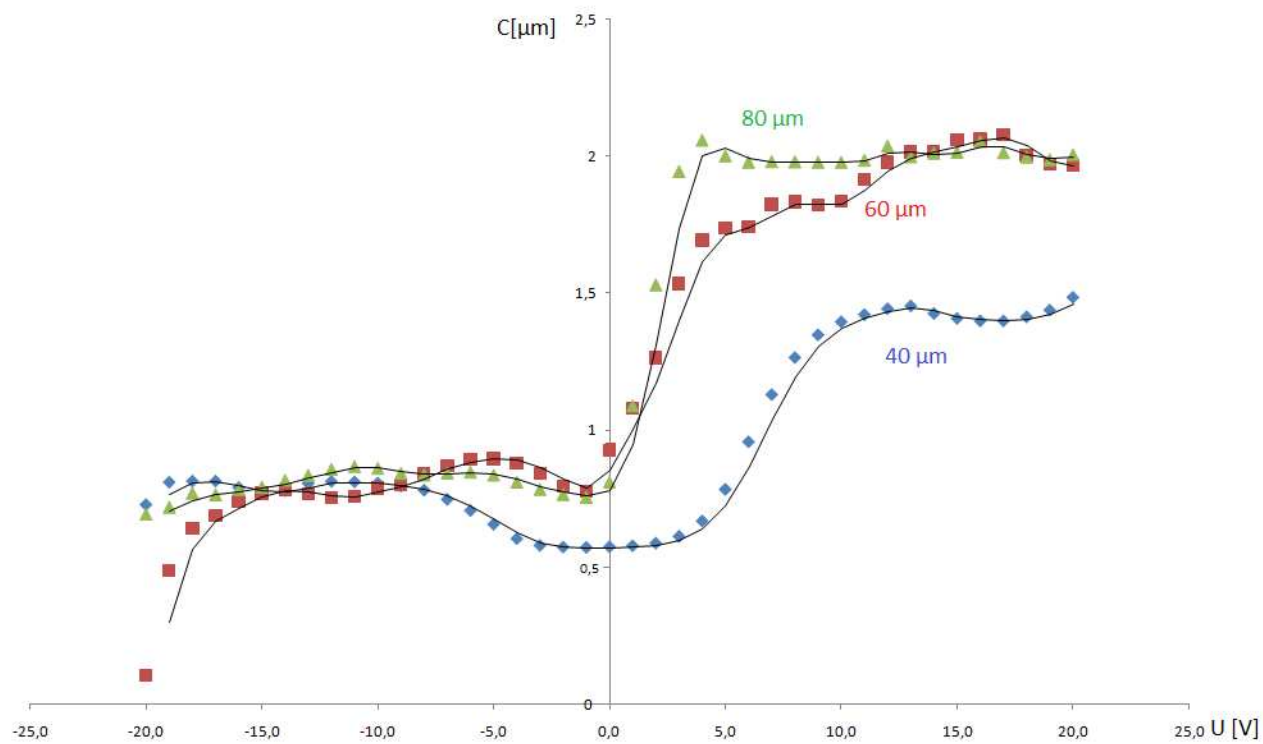
Tab. 4: Vypočtený celkový náboj v dielektriku pro různé materiály při 10 kHz

Materiál	Nejvyšší kapacita [nF]	Napětí [V]	Celkový náboj [nC]
Al ₂ O ₃ [40 μm]	1,143	20	22,86
Al ₂ O ₃ [60 μm]	2,017	20	40,34
Al ₂ O ₃ [80 μm]	2,026	20	40,52
Nativní oxid	2,333	20	46,66
SiNx Vzorek 1	0,611	20	12,22
SiNx Vzorek 2	0,753	20	15,06

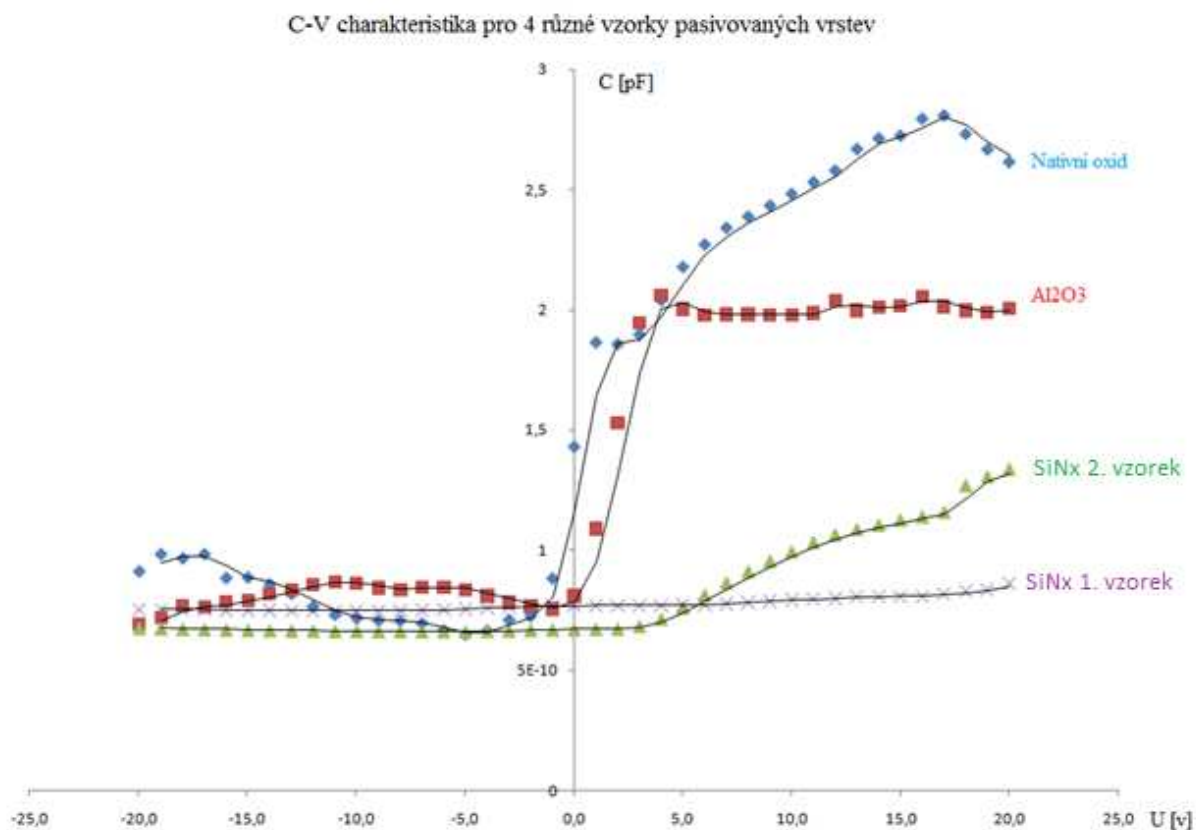
Tab. 5: Vypočtený celkový náboj v dielektriku pro různé materiály při 100 kHz

První měření bylo prováděno na křemíkovém substrátu pasivovaného Al₂O₃. Pro měření byly k dispozici vzorky s vrstvami tloušťky 40 μm, 60 μm a 80 μm. Výsledné porovnání C-V charakteristik je uvedeno na obr. 4.2. Je patrné, že vliv tloušťky pasivační vrstvy má vliv na velikost celkové kapacity a z ní plynoucího celkového náboje. Nárůst kapacity u tenčí vrstvy je méně prudký než u širších vrstev. Tato hranice se pohybuje pravděpodobně kolem hodnoty 50nm. To je pravděpodobně dáno nedostatkem volných nábojů v dielektriku.

Vliv tloušťky vrstvy Al_2O_3 na kapacitu při $f = 1 \text{ kHz}$



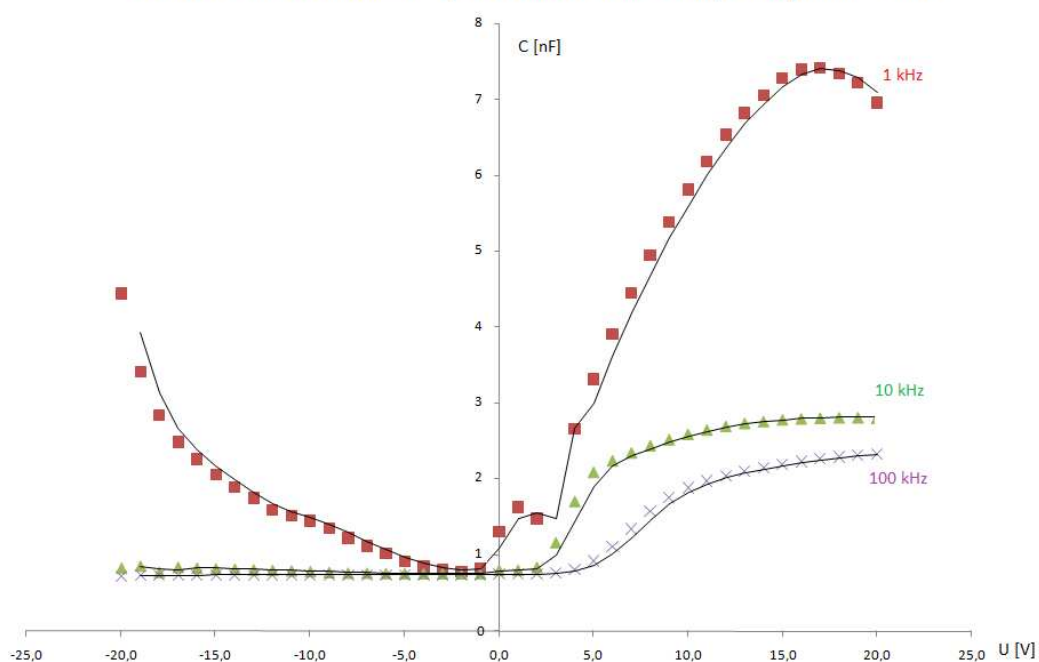
Obrázek 4.2: Vliv tloušťky Al_2O_3 vrstvy na kapacitu při $f = 1 \text{ kHz}$



Obr. 4.3 C-V charakteristika pro 4 různé pasivační vrstvy

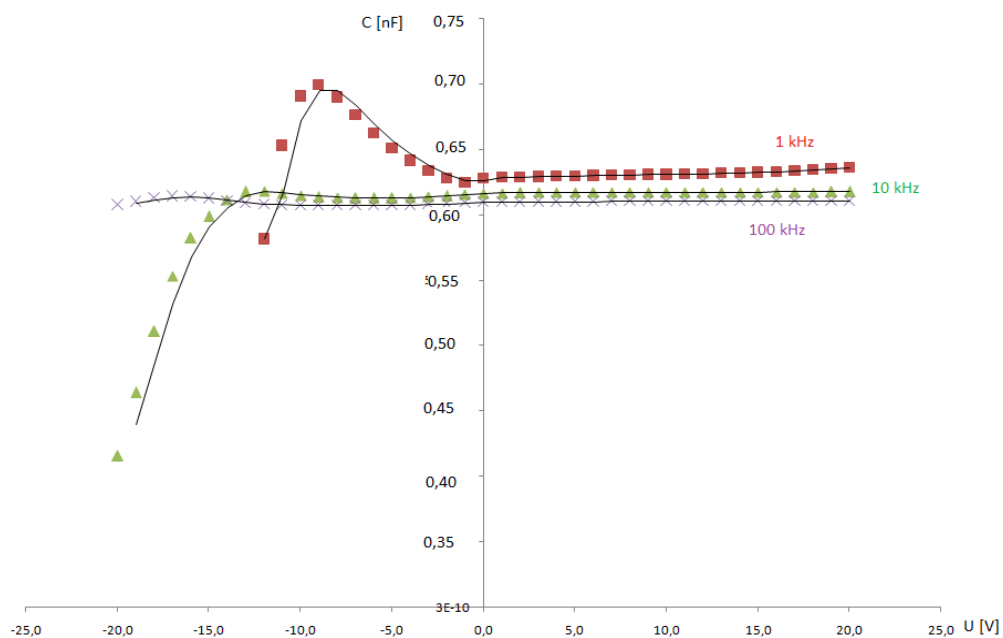
Na obrázku 4.3 je vidět vzájemná C-V charakteristika různých materiálů při frekvenci 1 kHz. Je patrné, že nejvyšší hodnotu kapacity má křemík s vrstvou nativního oxidu. Měření této vrstvy bylo stejné jako v předchozích případech a na obr. 4.4 je vidět závislost na přiložené frekvenci. S rostoucí frekvencí vzrostla i hodnota celkové kapacity vrstvy. Tento jev je stejný pro všechna C-V měření protože s rostoucí frekvencí se zmenšuje hodnota kapacitance.

C-V charakteristika křemíkové desky s vrstvou nativního oxidu při různých frekvencích

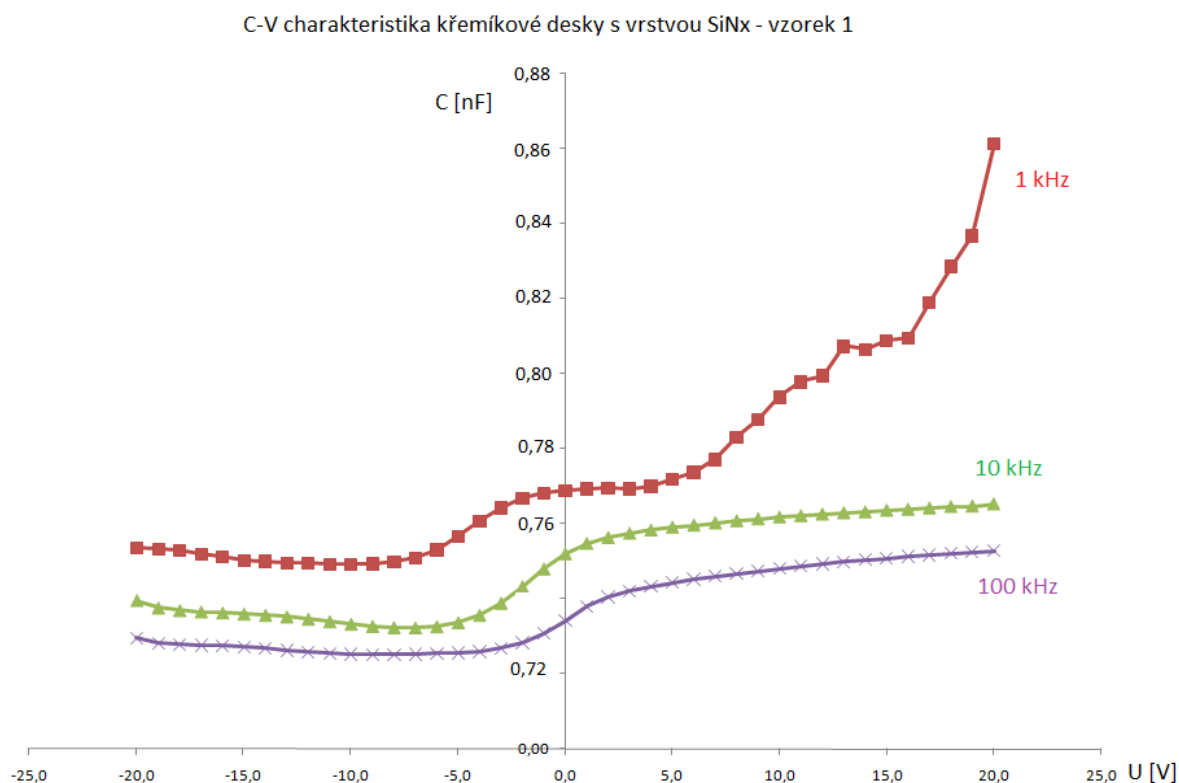


Obr. 4.4: C-V charakteristika pro křemíkovou desku s vrstvou nativního oxidu při různých frekvencích

C-V charakteristika pro křemíkovou desku s vrstvou SiNx - vzorek 2



Obr. 4.5: C-V charakteristika pro křemíkovou desku s vrstvou SiNx - vzorek 2 pro různé frekvence



Obr. 4.6: C-V charakteristika pro křemíkovou desku s vrstvou SiNx - vzorek 1 pro různé frekvence

4.3 Metoda smáčení oxidových vrstev

Pro tuto metodu bylo využito stejných vzorků jako v předchozím měření. Měření bylo prováděno přístrojem AdveX Instruments, vyvinutého Masarykovou univerzitou v Brně připojeného k PC. Dále bylo použito softwaru See System 6.3 speciálně vytvořeného pro tuto metodu měření. Program obsahuje několik chemických modelů, podle kterých se dá vypočítat povrchová energie materiálu. K výpočtu je zapotřebí znát velikost kapky kápnuté na povrch, úhel kapky a typ roztoku. V tomto měření bylo využito těchto kapalin:

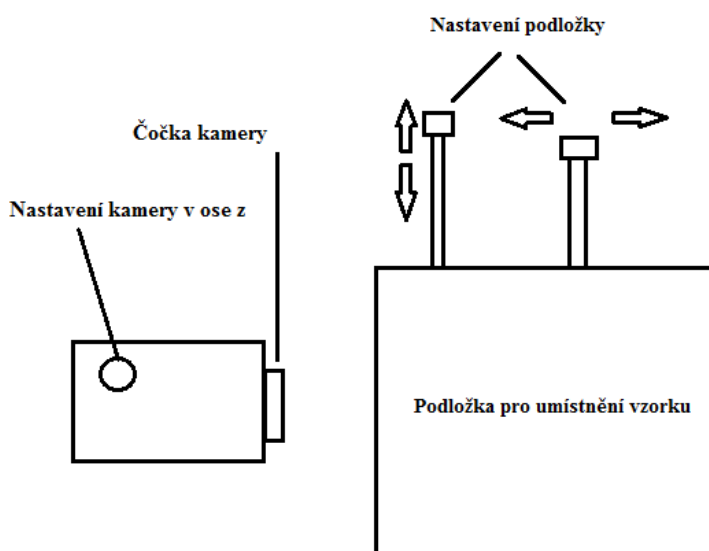
Voda - chemicky H_2O je sloučenina vodíku a kyslíku a spolu se vzduchem resp. zemskou atmosférou tvoří základní podmínky pro existenci života na Zemi. Za normálních podmínek je bezbarvá a bez pachu a díky svým vlastnostem se používá v mnoha aplikacích. V přírodě se nachází ve třech skupenstvích (pevném - led, kapalném - voda, plynném - pára).

Diiodomethane - nebo také methylen jodid je kapalina nerozpustná ve vodě, nicméně je rozpustný v éteru a alkoholu. Má poměrně vysoký index lomu (1,741). Je to bezbarvá tekutina

a díky své molární hmotnosti se používá pro stanovení hustoty minerálů a jiných pevných látek. Také se jej používá v refraktometrech. Je toxický a velice viskózní. Jeho molekulární vzorec je: CH_2I_2

Glycerol -nebo také glycerín, je hygroskopická bezbarvá viskózní kapalina bez zápachu. Glycerol je trojsytný alkohol. Je důležitou biogenní organickou sloučeninou, neboť je ve formě svých esterů součástí tuků. Jeho sumární vzorec je: $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$

Při měření bylo použito pipety s přesně nastaveným objemem 1 μl a Acidobazický chemický model, který potřebuje k výpočtu 3 typy kapalin. Na obrázku 4.7 je vidět blokové schéma měřícího ústrojí.



Obr. 4.7 Schematický náčrtek měřícího přístroje Advex Instruments

4.3.1 Postup

Všechny vzorky byly před i po měření očištěny isopropylalkoholem a osušeny bezprachovou utěrkou pro kvalitnější výsledky. Takto očištěný vzorek se položil na podložku, kamera na držáku se nastavila do patřičné polohy - aby bylo vidět substrát a následně i kapka kápnutá na povrch. Dále byl pipetou odebrán vzorek tekutiny, který byl kápnut na povrch vzorku. Pomocí mechanických čepů se nastaví podložka do patřičné polohy oproti kameře tak, aby kapka nebyla rozmazaná (obr. 4.8). Poté se pořídí snímek kamerou.



Obr. 4.8 Kapka glycerolu na křemíkovém článku s vrstvou SiN_x se změřeným úhlem

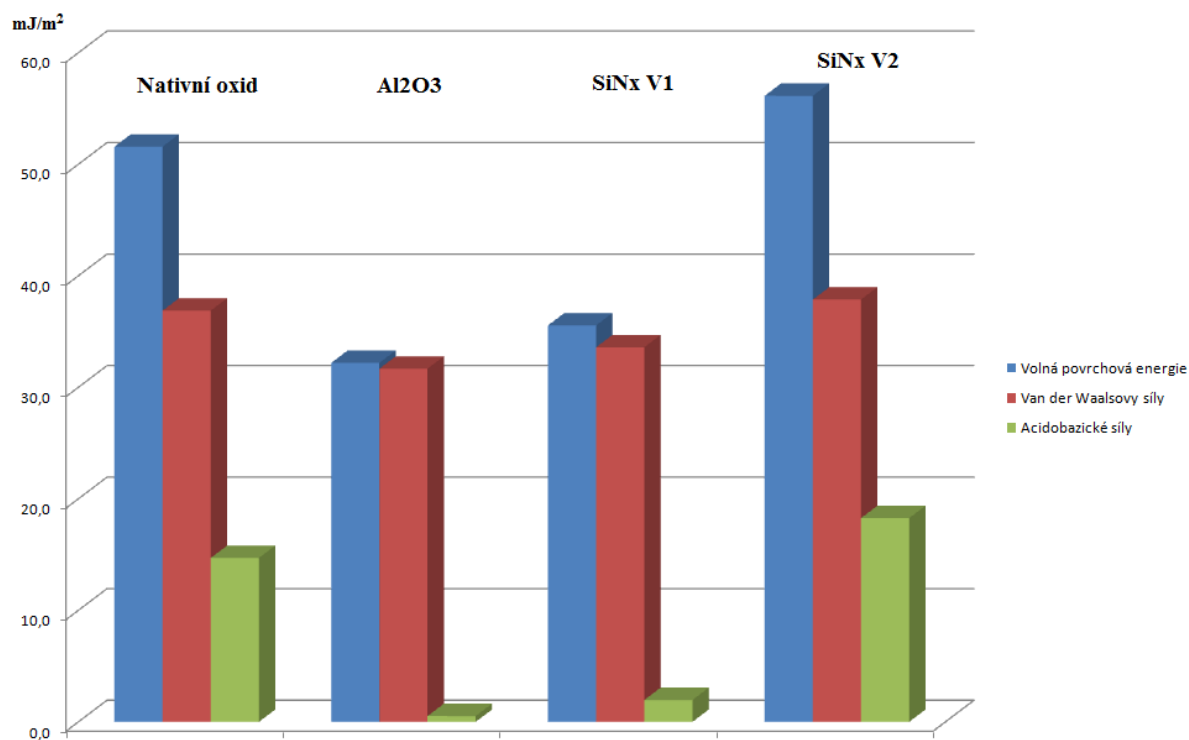
Takto bylo změřeno deset měření pro každou kapalinu, aby se dobře kompenzovala případná chyba. Jakmile bylo vyfoceno 30 a více snímků, bylo potřeba označit alespoň tři body na kapce - vrchol a body, kde se dotýká substrátu, aby program mohl vypočítat úhel kapky. Po vyhodnocení, program předloží výsledky v textovém souboru, kde je vidět celková hodnota volné povrchové energie, Van der Waalsovy síly a Acidobazické síly. V tabulce 4 jsou vidět výsledky měření pro 4 vzorky a jejich absolutní povrchová energie, Van der Waalsovy síly a Acidobazické síly.

Veličina	Volná povrchová energie	Van der Waalsovy síly	Acidobazické síly
Nativní oxid	51.58 [mJ/m ²]	36.88 [mJ/m ²]	14.70 [mJ/m ²]
Al ₂ O ₃	32.19 [mJ/m ²]	31.67 [mJ/m ²]	0.52 [mJ/m ²]
SiN _x vzorek 1	35.55 [mJ/m ²]	33.59 [mJ/m ²]	1.96 [mJ/m ²]
SiN _x vzorek 2	56.14 [mJ/m ²]	37.87 [mJ/m ²]	18.27 [mJ/m ²]

Tabulka 6: Výsledky měření pro 4 různé vzorky fotovoltaických článků

Z měření je patrné, že největší hodnota povrchové energie je u vzorku 2 SiN_x a nativního oxidu. Z hodnot Van der Waalsovy síly a acidobazických sil lze odvodit smáčivost povrchu. Čím vyšší je hodnota VdW sil oproti (procentní podíl) AB síle, tím méně je povrch smáčivý. U výsledků je vidět, že Al₂O₃ je téměř nesmáčivý a je to dáno zřejmě dobrým zakončením OH radikálů na povrchu substrátu. Na obrázku 4.3 je graficky vidět poměr těchto energií.

Poměr Van der Waalsových a Acidobazických sil k celkovému volnému povrchovému náboji



Obr. 4.9 Poměr povrchových energií

Pozorované změny smáčení povrchu oxidu jsou způsobeny zejména fixním nábojem v blízkosti vnějšího povrchu. Mohou být buď znaménko plus nebo minus. Pokud bychom analyzovali smáčení jako funkci tloušťky oxidové vrstvy, bylo by možné odvodit hloubku a koncentraci těchto nábojů. Bylo by nejlepší nechat si přesně změřit volný náboj v objemu, a vytvořit modely, které by odpovídaly měřeným energiím. Pak by bylo možné měřit touto metodou i volný náboj v objemu.

5 Závěr

Práce pojednává o používaných způsobech měření náboje v dielektriku a o některých alternativních způsobech jeho měření. Mezi klasické metody, které se nejběžněji používají v praxi patří hlavně C-V měření, z kterého se dá jednoduše odvodit celkový náboj dielektrika. V těchto případech je však nutné znát všechny rušivé elementy jako např. parazitní kapacitu vedení atp.

Při měření v laboratořích Ústavu elektrotechnologie byla vyzkoušena C-V metoda měření s reálnými výsledky. Při měření bylo zjištěno, že přiložený kmitočet má přímý vliv na hodnotu celkové kapacity, a je tedy lepší měřit při vyšších kmitočtech. Stejně tak tloušťka vrstvy má přímý vliv na celkovou kapacitu, protože s rostoucí tloušťkou pasivační vrstvy, roste kapacita a zní plynoucí hodnota celkového náboje.

U metody smáčení povrchu byla změřena povrchová energie vrstvy, která by se dala využít při měření vázaného náboje. Tato metoda se v praxi nepoužívá, ale její další řešení, které je v plánu do budoucna, by mohlo vést k podstatě jednoduššímu a měření náboje v dielektrických vrstvách. Při tomto měření je nejdůležitější čistota povrchu měřeného materiálu, což je lehce splnitelné. Pro výpočet vázaného náboje by bylo vhodné pro co možná nejvíce pasivačních materiálů. Metody následně porovnat a pozorovat vzájemné vazby. Na základě těchto vztahů by bylo možné odvodit určitý model, podle kterého by se dále dal náboj počítat pouze metodou smáčení povrchu.

Hlavním cílem práce bylo vyzkoušet si tyto metody v praxi, aby byly získány základy pro další měření a pokusy. Experimenty uvedené v práci představují základ pro vývoj nové metody měření vázaného náboje v dielektriku, kde hlavní výhodou bude schopnost měřit náboj u velmi tenkých vrstev (řádově desítky nanometrů).

6 Použitá literatura

- [1] Wikipedia – Fotovoltaický jev
http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotoelektrick%C3%BD_jev
- [2] HÉGR O.: *Analýza povrchové rekombinace a kvalita pasivace pro vybrané vrstvy*.
Diplomová práce, FEKT VUT v Brně, 2005
- [3] <http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz>
- [4] TOBIAS I., DEL CAÑIZO O. AND ALONSO J. - *Crystalline Silicon Solar Cells and Modules*
- [5] GUIDO AGOSTINELLI (Brussels - BE), JOZEF SZLUFCHIK (Wilsle - BE), PETKO VITANOV (Sofia -BG), ANTOANETA HARIZANOVA (Sofia - BG) - *Method for Backside Surface Passivation of Solar Cells and Solar Cell with Such Passivation*
- [6] ZHILINSKAS P. J., MONTRIMAS E. and LOZOVSKI T. - *Measuring the Parameters of Dielectric Layers by Periodically Charging the Surface*. Vilnius University, Lithuania
- [7] SINTON R., MACDONALD D. - *Photoconductance Lifetime Tester and optional Suns- V_{OC} Stage (User Manual) SINTON 2006*. Boulder, Colorado, U.S.A.
- [8] HERFST R.W., HUIZING H.G.A., STEENEKEN P.G. and SCHMITZ J. - *Characterization of dielectric charging in RF MEMS*. Philips Research Laboratories Eindhoven
- [9] STONEHAM A.M. and TASKER P.W. - *The wetting of oxide films on silicon and the monitoring of fixed charge*. Theoretical Physics Division, AERE Harwell, Didcot, Oxon, UK
- [10] http://www.elmag.org/lib/exe/fetch.php/wiki:user:pankrac:x17tep:prednaska_1.pdf
- [11] MEISNER M.: *Reaktivní magnetronové nanášení fotoaktivních vrstev TiO_2 a Vlastnosti*.
Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2007

7 Seznam použitých obrázků

Obr. 2.1: Typy panelů monokrystalického, polykrystalického a amorfního typu

Obr. 2.2: Řez strukturovaným solárním článkem s vnořenými kontakty

Obr. 2.3: Dielektrikum v elektrostatickém poli

Obr. 2.4: Princip solárního článku

Obr. 2.5: Konvenční magnetron v klasickém uspořádání

Obr. 2.6: Nevyvážený magnetron

Obr. 2.7: Dopování zadního kontaktu solárního článku pomocí p^+ oblasti

Obr. 3.1: Schéma měřicího systému metody opakovaného nabíjení povrchu

Obr. 3.2: Měřicí systém pro měření akumulovaného náboje

Obr. 3.3: PC1D simulace Australské národní univerzity

Obr. 3.4: C-V charakteristika pro frekvence 500 Hz, 10 kHz a 1 Mhz a kvazi-statického stavu u MTOS kondenzátoru (p-typ křemíku)

Obr. 3.5: C-V charakteristika pro frekvence 500 Hz, 10 kHz a 1 Mhz

Obr. 3.6: C-f charakteristika pro $Al/Ta_2O_5/Si$ (plná čára) a MTOS kondenzátor (přerušovaná čára)

Obr. 3.7: Schema měřicí soustavy RF MEMS

Obr. 3.8: C-V křivka pro výpočet spínacího a rozpínacího napětí

Obr. 3.9: CV křivka před (černá) a po (šedá) po nabíjení při 65V po dobu 12 minut

Obr. 3.10: Změna rozšíření CV křivky jako fce. času a napětí o hodnotách 50, 60 a 70V

Obr. 3.11: Různorodost $\Delta\sigma_1(t)/\Delta\sigma_1(t=\infty)$ na tloušťce t

Obr. 3.12: Závislost $\cos\theta$ na tloušťce oxidové vrstvy 0 - vrstva deponovaná při pokojové teplotě Δ - vrstva deponovaná při teplotě 600 $^{\circ}C$

Obr. 4.1: Konvenční magnetron v klasickém uspořádání

Obr. 4.2: Vliv tloušťky Al_2O_3 vrstvy na kapacitu při $f = 1kHz$

Obr. 4.3: C-V charakteristika pro 4 různé pasivační vrstvy

Obr. 4.4: C-V charakteristika pro křemíkovou desku s vrstvou nativního oxidu při různých frekvencích

Obr. 4.5: C-V charakteristika pro křemíkovou desku s vrstvou SiN_x - vzorek 2 pro různé frekvence

Obr. 4.6: C-V charakteristika pro křemíkovou desku s vrstvou SiN_x - vzorek 1 pro různé frekvence

Obr. 4.7: Schematický nákres měřicího přístroje AdveX Instruments

Obr. 4.8: Kapka glycerolu na křemíkovém článku s vrstvou SiN_x se změřeným úhlem

Obr. 4.9: Poměr povrchových energií