

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Milan Perný

Autoreferát dizertačnej práce

**VLASTNOSTI AMORFNÝCH TENKÝCH VRSTIEV SiC A ICH
VYUŽITIE VO FOTOVOLTIKE**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 5.2.12 Elektrotechnológia a materiály

Miesto a dátum: Bratislava, Február 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Oddelení materiálov a technológií ÚEAE FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Milan Perný**
ÚEAE FEI STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Vladimír Šály, PhD.**
ÚEAE FEI STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Alena Pietriková, CSc.**
Fakulta elektrotechniky a informatiky TU v Košiciach
Letná 9
042 00 Košice
Slovenská republika

doc. Ing. Jiří Vanek, PhD.
Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
Ústav elektrotechnologie
Technická 3058/10, Královo Pole,
61600, Brno, Česká republika

(meno a priezvisko oponenta s uvedením jeho titulov a názov ustanovizne, s ktorou je oponent v pracovnom pomere)

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod.
na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky FEI STU, Ilkovičova 3,
Bratislava.

.....
prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan

Obsah

Tézy a ciele dizertačnej práce	4
Úvod	4
1 Aktuálne aplikácie amorfných zliatin SiC vo fotovoltike	5
1.1 Amorfný SiC a jeho aplikácie pri realizácii FV článkov na báze kryštalických tenkých vrstiev (c-SiTF)	5
1.2 Pasivácia povrchu kremíkových článkov prostredníctvom a-SiC	6
1.3 Uplatnenie a-SiC pri konštrukcii FV článkov na báze a-Si	6
2 Analytické metódy	6
3 Príprava a vlastnosti vzoriek	7
3.1 Popis vzoriek, technologické parametre	7
3.2 Použité zariadenia	8
4 Výsledky a diskusia	8
4.1 Elektrické a štrukturálne vlastnosti heteroštruktúr Au/a-SiC/c-Si/Al pripravených metódou PECVD použitím dvoch rádiových módov	9
4.2 Elektrické, dielektrické a štrukturálne vlastnosti heteroštruktúr Au/a-SiC/c-Si/Al pripravených metódou PECVD so skúmaním vplyvu dopácie dusíkom	12
4.3 Štrukturálna charakterizácia a elektrický transport v heteroštruktúrach Au/a-SiC:H/c-Si/Al pripravených pri vysokej teplote substrátu	16
5 Záver	17
Vedecký a praktický prínos práce	17
Summary	18
Zoznam použitej literatúry	19
Publikácie autora	20

Tézy a ciele dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce boli zadefinované v písomnej práci k dizertačnej skúške (Bratislava, 2011) a modifikované vzhľadom na aktuálne okolnosti a dostupnosť technologických a experimentálnych zariadení. Použité vzorky boli pripravené v EIÚ SAV v Bratislave.

Na základe analýzy súčasného stavu a vývoja v oblasti fotovoltiky (FV) a uplatňovaním nových prístupov boli ciele pre dizertačnú prácu stanovené nasledovne:

- Spracovať aktuálny stav problematiky tenkých vrstiev na báze a-SiC a a-C (DLC) ako aj praktické aplikácie v oblasti FV a príbuzných odborov.
- V rámci spolupráce s EIÚ SAV pripraviť tenké vrstvy amorfného SiC na kremíkových substrátoch typu p (MIS) a aplikovať rôzne technologické postupy pri depozícii vrstiev.
- Zrealizovať elektrické a dielektrické merania na pripravených štruktúrach.
- Sledovanie vplyvu teploty na elektrické a dielektrické parametre skúmaných štruktúr.
- Analýza experimentálne nameraných elektrických a dielektrických parametrov. Stanovenie prvkov náhradných obvodov vzniknutých štruktúr a ich súvis s fyzikálnymi procesmi v pripravených štruktúrach.
- Povrchová analýza vrstiev a-SiC prostredníctvom IR spektroskopie a AFM.
- Korelácia výsledkov z jednotlivých analýz, spracovanie súhrnnej správy a odporúčania pre prax.

Úvod

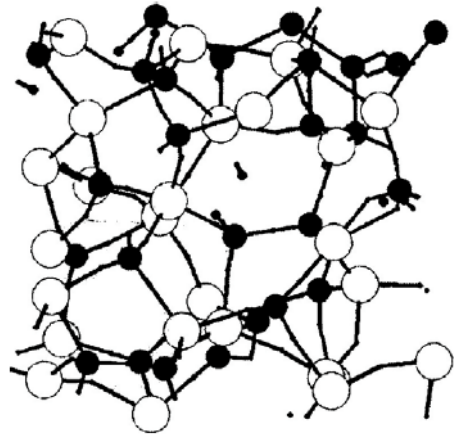
Materiálový výskum sa v súčasnosti vo veľkej miere zaoberá štruktúrou, vlastnosťami a možnosťami využitia nových materiálov. Hlavná výhoda amorfných zliatin SiC spočíva v nízko-teplotných procesoch prípravy a tým súvisiacou šetrnosťou k životnému prostrediu. Tieto štruktúry nachádzajú veľmi zaujímavé technické aplikácie a niektorými fyzikálnymi vlastnosťami a možnosťou uplatnenia v technickej praxi poskytujú viac možností ako kryštalické štruktúry.

Kremík a uhlík sú základné prvky v evolúcii života na tejto planéte. Uhlík možno považovať za základný prvok živej hmoty, a kremík považujeme za prvok, ktorý je zodpovedný za technický pokrok v 20. storočí, vďaka svojej dominantnej úlohe v mikroelektronike (fotovoltiku nevynímajúc).

Amorfný karbid kremíka a-SiC (prípadne presnejšie a-Si_{1-x}C_x:H) možno zaradiť medzi tetraedrálne koordinované zlúčeniny. Tieto zlúčeniny sa vyznačujú veľmi užitočnými vlastnosťami pre prax, najmä chemickou odolnosťou, vysokou teplotnou stabilitou a mechanickou tvrdosťou. Štruktúry a-Si_{1-x}C_x:H môžu byť pripravené rôznymi technologickými postupmi. Najčastejšie je to metódou v tlejivom výboji GDT (Anderson and Spear, 1977, Ray et al, 1987, Akita et al, 1989), metódami plazmou podporovaného chemického nanášania PECVD (Choi et al, 1995, Solomon et al, 1988), reaktívnym naprašovaním (Shimada et al, 1982), rádiovlnovým naprašovaním (Dutta et al, 1982) a najnovšie aj elektrón – cyklotrónovou rezonanciou (ECR) podporovaného chemického nanášania (Liu et al, 1996). Elektrické a štruktúrne vlastnosti vzniknutých vrstiev závisia na použitej metóde depozície a parametroch depozície. Medzi parametre CVD depozície patria napr. rádiovlnový (r.f.) výkon v reaktore, tlak v komore reaktora a teplotu substrátu. Rozhodujúci vplyv na vlastnosti vzniknutej štruktúry majú aj použité prekursor. Vo všeobecnosti platí, že štruktúrne, elektrické a optické vlastnosti vzniknutej štruktúry

a-Si_{1-x}C_x:H (symbol H znamená, že ide o hydrogenizovanú vrstvu, dolné indexy súvisia so stechiometriou) môžu byť primárne ovplyvňované pomerom obsahu kremíka ku uhlíku a mierou hydrogenizácie vrstvy (Friessnegg et al, 1996).

Vyšší obsah uhlíka vo vrstvách (štruktúrach) vedie k zvýšeniu pórovitosti štruktúry (ako je známe, tenké vrstvy amorfných zlúčenín sa vyznačujú tzv. poréznu štruktúrou) a taktiež vedie k zníženiu energetickej medzery. Zakomponovaním vodíka do štruktúry je možné pasivovať nenasýtené väzby - znížiť ich koncentráciu, čoho dôsledkom je koordinovanejšia amorfná sieť. Obsah uhlíka a mieru hydrogenizácie možno najlepšie regulovať metódami GDT a PECVD. Použitím depozičnej metódy PECVD možno obsah uhlíka a stupeň hydrogenizácie ovplyvniť druhom použitých prekursorov ako aj ich prietokom. Počas depozície vrstvy, špeciálne pri vyšších teplotách, amorfná sieť relaxuje s cieľom minimalizácie voľnej energie. Aj napriek tomu v amorfnej sieti zostáva zvyšková deformácia koordinačnej geometrie.

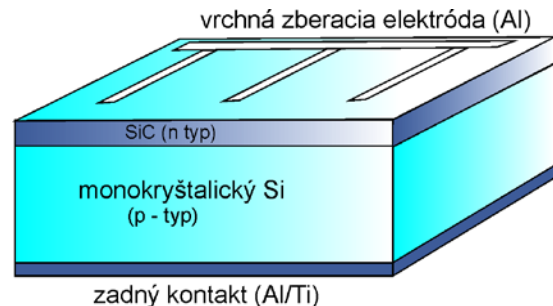


Obr. 1.0 Jedna z možných konfigurácií siete amorfného kremíka (biela) a uhlíka (čierny) so zavedeným vodíkom (malé čierne body) a-SiC: H (McCulloch et al, 2003)

1. Aktuálne aplikácie amorfných zliatin SiC vo fotovoltike

Slnčné články zložené z heteropriechodu t.j. tenkej vrstvy a-SiC nachádzajúcej sa na vrchnej strane článku a substrátom z kryštalického kremíka sú jednou zo sľubných alternatív ku konvenčným FV článkom. Nižšie depozičné teploty (okolo 500 K) a vyššie napätia naprázdno sú hlavnou výhodou v porovnaní s FV článkami s homopriechodom.

Vrstva a-SiC na vrchu FV článku má väčšiu šírku zakázaného pásma (1.8 – 2.3 eV) v porovnaní s často používaným amorfným kremíkom (1,7 eV), čo sa odrazí v redukcii parazitckej optickej absorpcie, zvýšení prúdu nakrátko, prípadne vyššom napätí naprázdno pri použití hrubšej amorfnej vrstvy. Podľa (Pysch et al, 2009) solárne články s heteropriechodom a-SiC/c-Si dosahujú napätia naprázdno okolo 670 mV a konverznú účinnosť 18,2 %.



Obr. 1.1 FV článok s heteropriechodom a vrchnou vrstvou a-SiC (n typu vodivosti)

1.1 Amorfný SiC a jeho aplikácie pri realizácii FV článkov na báze kryštalických tenkých vrstiev (c-SiTF)

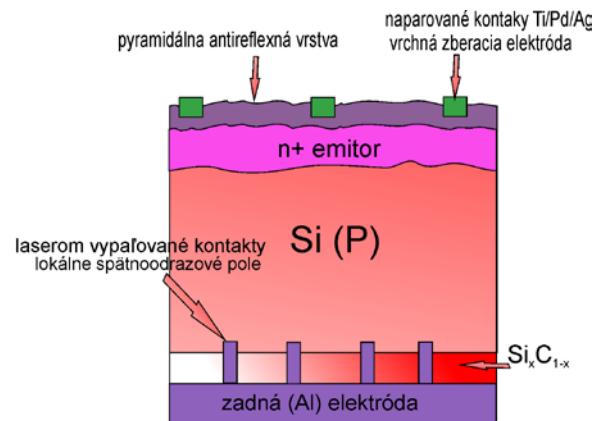
Technológia c-SiTF spája výhody tenkovrstvových štruktúr (úspora materiálu) a mono resp. multi kryštalických štruktúr (elektrické vlastnosti) (Baumgartner et al, 1999). Vyvinuté c-SiTF s použitým SiC substrátom vo forme keramiky dosahujú účinnosti okolo 9,3 % (Hebling, 1997). Ďalším problémom pri depozícii c-SiTF je existencia nečistôt v substráte, ktoré difundujú do vytvárajúcej Si vrstvy. Tieto nečistoty výrazne znižujú dobu života minoritných nosičov náboja, čo sa prejavuje v znížení účinnosti FV článku. Z tohto dôvodu sa na substrát nanáša difúzna bariéra. Hlavnou požiadavkou na difúzne bariéry je dobrá adhézia jednak k substrátu, ako aj k tekutej fáze Si vytvárajúcej aktívnu vrstvu. Najpoužívanejšie difúzne bariéry podľa literatúry sú: Ta, Ni, TiN, SiO₂ resp. multivrstvy SiO₂-SiN-SiO₂. Amorfný SiC je jedným z troch relevantných materiálov, ktorý môže byť použitý ako difúzna bariéra pre HT c-SiTF. Hlavnou výhodou je, že dopovaním B, Al alebo N₂ možno zvyšovať

jeho elektrickú vodivosť (použitie v prípade zadných kontaktov) a k difúzii prvkov ako N, B, Be a Al do aktívnej vrstvy dochádza až nad teplotou 1800 °C (Pysch et al, 2009, Hebling, 1997).

1.2 Pasivácia povrchu kremíkových článkov prostredníctvom a-SiC

Okrem vyššie spomenutých difúzných bariér, dielektrické/semiizolačné vrstvy a-SiC nachádzajú uplatnenie aj ako pasivačné vrstvy, prípadne plnia súčasne aj úlohu difúznej bariéry či reflektora minoritných nosičov náboja (Hebling, 1997). Glunz a kol. vo svojej práci (Glunz et al, 2004) porovnávali pasivačné účinky fosforom dopovanej a nedopovanej vrstvy a-SiC. Štruktúra pozostávala z nosného materiálu t.j. doštičky narezanej z ingotu čisteného zónovou rafináciou, oxidom pasivovanej prednej emitorovej vrstvy a naparenej vrchnej Ti-Pd-Ag elektródy.

Zadné zberacie elektródy boli vytvorené laserovým vypaľovaním hliníkom pokovovanej zadnej pasivačnej vrstvy na báze a-SiC ako je to ilustrované na obr. 2.11. Vyššia účinnosť FV článku (20,3 %) bola dosiahnutá použitím nedopovanej vrstvy a-SiC. Problematikou pasivácie povrchu kryštalického Si sa zaoberali napr. aj M. Vetter a kol. (Vetter et al, 2005). Ako ukazujú, pasivácia zadnej strany solárneho článku tenkou vrstvou a-SiC tvoriaca súčasne funkciu reflektora slúži ako vhodná náhrada za doposiaľ používané tenké vrstvy na báze SiN. Dosiahnuté účinnosti pri použití vrstvy a-SiC presahujú 20%.



Obr. 1.2 Schematický náčrtok FV článku s pasivačnou vrstvou a-SiC (Glunz et al, 2004)

1.3 Uplatnenie a-SiC pri konštrukcii FV článkov na báze a-Si

Intrinžické alebo dopované (n,p) tenké vrstvy a-SiC nachádzajú uplatnenie aj pri konštrukcii FV článkov na báze hydrogenizovaného amorfného kremíka (a-Si:H). Čistý a-Si je vzhľadom k veľkému počtu nenasýtených väzieb a štruktúrnych porúch vo FV priemysle nepoužiteľný. Výhoda a-Si:H podobne ako a-SiC spočíva v možnosti dopovania na oba typy vodivosti. Článok na báze a-Si:H je zložený z intrinžickej absorbujúcej vrstvy a-Si:H, ktorá je medzi p-dopovanou vrstvou SiC a n-dopovanou vrstvou Si:H. Spojenie dopovaných vrstiev s intrinžickým a-Si:H má za následok vytvorenie potenciálovej bariéry, ktorá slúži na separáciu svetlom generovaných nosičov náboja. Článok využíva sklo ako substrát a transparentný vodivý oxid ako zberiaciu elektródu. Zvýšenie účinnosti amorfných článkov je možné dosiahnuť tandemovým radením vrstiev (Crystec, 2012).

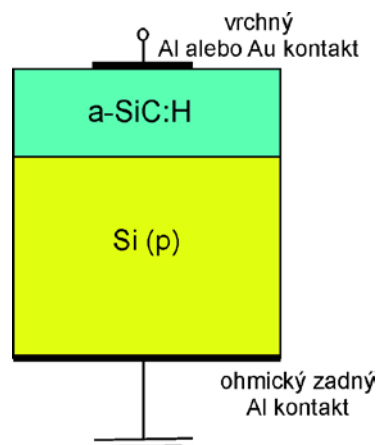
2 Analytické metódy

Pripravené tenké vrstvy, ktoré boli súčasťou heteroštruktúr, boli skúmané analytickými metódami pri skúmaní štruktúry (chemické väzby, morfológia, prvkový profil) a elektrickými meraniami.

Na štruktúrnu analýzu bola využitá Infračervená spektroskopia (FTIR) a AFM (Atomic Force Microscopy) – atómová silová mikroskopia. Elektrické vlastnosti pripravených heteroštruktúr a-SiC:H/c-Si boli skúmané prostredníctvom analýz volt-ampérových (V-A) a kapacitno-napäťových (C-V) kriviek.

3 Príprava a vlastnosti vzoriek

Heteroštruktúry pozostávajú zo skúmanej tenkej amorfnej vrstvy a-SiC, kremíkového substrátu typu p a kontaktov. Heteroštruktúry, ktoré sú znázornené na obr. 1.3 boli pre potreby elektrickej charakterizácie heteroprieochodu opatrené vrchnými kruhovými zlatými alebo hliníkovými elektródami a spodnou súvislou elektródou z hliníka na celej ploche kremíkového substrátu. Kremík typu p, $2 \div 7 \Omega \cdot \text{cm}$, s orientáciou (111) bol použitý ako substrát. Pred samotnou depozíciou tenkých vrstiev bola zrealizovaná štandardná čistiacia procedúra, ktorá slúžila na odstránenie nečistôt z povrchu kremíka. 5 % roztok kyseliny fluorovodíkovej sa použil na odstránenie prirodzených oxidových vrstiev a nečistôt na povrchu kremíka.



Obr. 1.3 Schematické znázornenie skúmaných heteroštruktúr

Skúmané vrstvy a-SiC boli pripravené metódou PECVD v rámci spolupráce na Elektrotechnickom Ústave SAV v Bratislave. Tenké vrstvy a-SiC boli deponované na vyhrievanej podložke v reaktore s kapacitne budenou plazmou. Rádiofrekvenčný výkon s frekvenciou 13,56 MHz a výkonom $0,06 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ bol privádzaný na elektródy s priemerom 20 cm v paralelnom usporiadaní (obr. 1.4 a,b). Elektródy boli od seba vzdialené 10 cm. Depozičná sústava bola evakuovaná rotačnou olejovou a Rootsovou vývevou (jemné vákuum). RF výkon bol privedený na vrchnú elektródu, spodná elektróda sa nachádzala na potenciáli zeme. Plynná zmes $\text{CH}_4 + \text{SiH}_4 + \text{NH}_3$ bola prostredníctvom sprchovej ružice privedená do reaktorovej komory.



a)



b)

Obr. 1.4 Snímok reaktora PECVD a) a plazmatický výboj medzi elektródami v planparalelnom usporiadaní b)

3.1 Popis vzoriek, technologické parametre

Výskum v dizertačnej práci bol zameraný na vplyv zvolenej technológie na cieľové vlastnosti vrstvy ako súčasti heteroštruktúry. Boli zvolené tri oblasti záujmu:

- posúdenie vplyvu elektródového režimu PECVD reaktora (vzorky Mp1b a Mp2b)

- posúdenie miery dopácie na cieľové elektrické a štrukturálne parametre (vzorky P27-P33)
- posúdenie vplyvu vysokej teploty substrátu na cieľové elektrické a štrukturálne vlastnosti (vzorky P19 a P26)

Prehľad depozičných parametrov, t.j. prietoky plynov, tlak v reaktore teplota substrátu a odmerané hrúbky a index lomu pre jednotlivé vzorky je uvedený v tab. 1.

Tab. 1 Depozičné parametre a namerané hrúbky pripravených vzoriek

Vzorka	Hrúbka (nm)	Prietok (sccm)			T (°C)	P (pa)
		CH ₄	SiH ₄	NH ₃		
<i>Mp1b</i>	60	36	8	3	250	50
<i>Mp2b</i>	60	36	8	3	250	50
P27	136,9	26	5	0	250	10
P30	128,2	26	5	1	250	10
P31	129,5	26	5	2	250	10
P26	124,3	26	5	4	250	10
P33	125,3	26	5	8	250	10
P32	135,8	26	5	12	250	10
<i>P19</i>	-	20	5	0	700	10
<i>P26</i>	-	20	5	0	700	10

3.2 Použité zariadenia

Hrúbka a index lomu boli určené elipsometricky prostredníctvom prístroja **SpecEI-2000** (400 – 900 nm) od firmy Micropac a software Scout Wolfgang Theiss využívajúci model O'Leary–Johnson–Lim (OJL). **AFM** merania boli realizované použitím **mikroskopu Dimension Edge** (Veeco, USA). **FTIR** spektrá boli zaznamenané pomocou spektrometra **Bruker Vector 22** s rozlíšením 1 cm⁻¹ metódou totálneho odrazu. Hrotové **kontaktovacie zariadenie** od firmy **MDC** umožnilo vyhrievanie vzoriek až do teploty 200 °C. Teplota vzorky bola meraná integrovaným senzorom teploty a kontrolovaná pomocou bezkontaktného infračerveného merania teploty prístrojom **ST530 NICETY**. **Merania V-A** charakteristík za tmy boli realizované použitím meracieho prístroja **Keithley 237**, ktorý bol ovládaný programom **DCATS**. Analýza získaných experimentálnych kriviek, teda identifikovateľnej lineárnej časti semilogaritmickej I-U charakteristiky bola uskutočnená prostredníctvom programu **DCATS**. **Kapacitno-napät'ové** merania heteroštruktúry a-SiC:H/c-Si boli realizované za tmy využitím meracieho prístroja **Agilent LCR Meter 4284A** ovládaného aplikáciou **CV-Measure**. Dielektrické merania parametrov paralelnej kapacity C_p , vodivosti G_p a stratového čísla $\tan D$ boli merané striedavým mostíkom **Wayne Kerr 136520P/D1**. Merania boli vykonané v rozsahu teplôt 25 až 160 °C a frekvencií 10 až 10⁶ Hz.

4 Výsledky a diskusia

Výskum v práci je zameraný na sledovanie vplyvu zvolenej technológie na elektrické a štrukturálne parametre tenkých vrstiev a-SiC:H, ktoré boli súčasťou heteroštruktúry. Práca

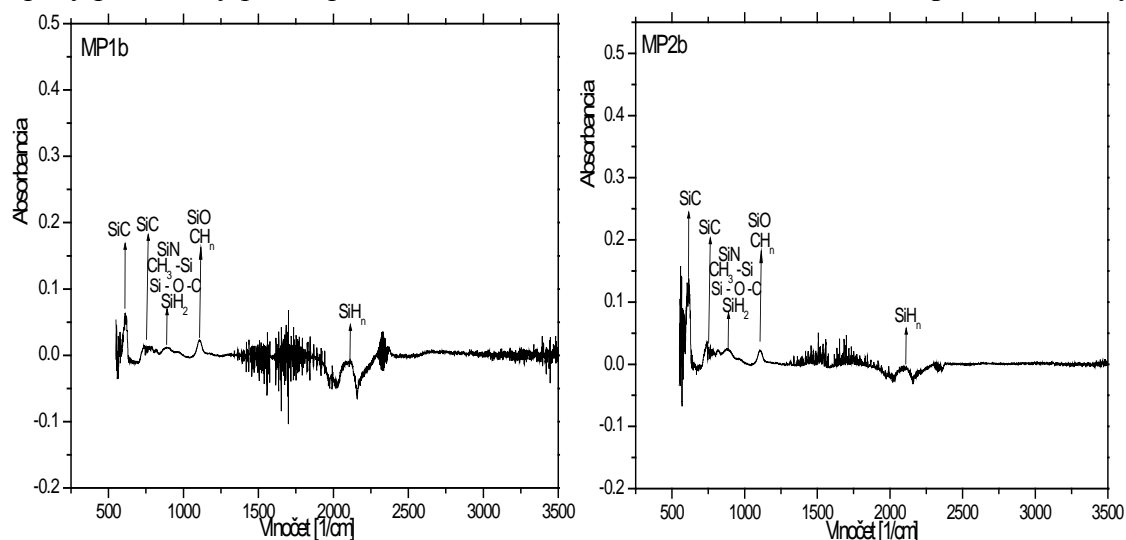
je zameraná na detailné posúdenie vplyvu zvolenej technológie na elektrický transport. Súčasťou výskumu bolo aj posúdenie vplyvu technológie na štrukturálne vlastnosti prostredníctvom FTIR spektroskopie. Morfológia povrchu amorfných vrstiev bola skúmaná AFM mikroskopiou.

4.1 Elektrické a štrukturálne vlastnosti heteroštruktúr Au/a-SiC/c-Si/Al pripravených metódou PECVD použitím dvoch rádiových frekvenčných módo

Hlbšie pochopenie alternatívnych režimov depozície je dôležité pre optimalizáciu výroby tenkých vrstiev a zlepšenie parametrov týchto vrstiev. Prostredníctvom elektrických meraní (meranie V-A charakteristík) a atómovej silovej mikroskopie a FTIR spektroskopie je skúmaný vplyv RF módu PECVD reaktora na cieľové vlastnosti. Pojem RF mód v prípade katódového režimu (vzorka Mp1b) znamená, že elektróda, na ktorej je umiestnený substrát je okrem privádzaného RF výkonu aj na DC potenciáli. V prípade anódového režimu (vzorka Mp2b) je elektróda so substrátom uzemnená.

Štrukturálna charakterizácia

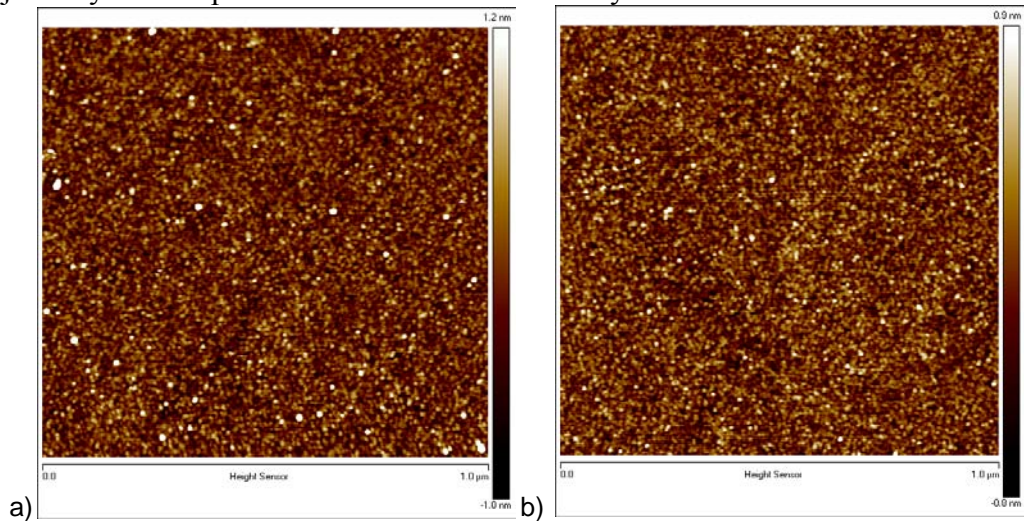
Z odrazeného FTIR spektra na obr. 1.6 skúmaných tenkých vrstiev a-SiC:H je pozorovateľných viacero navzájom sa prekrývajúcich pík. Dominantná oblasť absorpcie leží v oblasti vlnočtov (prevrátená hodnota vlnovej dĺžky) $740\text{ cm}^{-1} \div 970\text{ cm}^{-1}$. Táto oblasť sa podľa príslušných databáz a odbornej literatúry (Ray et al, 1987, Bullot et al, 1987) priraduje valenčným vibráciám SiC. V oblasti vlnočtov $2000\text{ cm}^{-1} \div 2140\text{ cm}^{-1}$ možno v prípade oboch vzoriek nachádzať väzby typu Si-H_n, ktoré sú vo väčšej miere zastúpené v štruktúre MP1b. V spektrách oboch vzoriek možno v oblasti vlnočtov okolo 2000 cm^{-1} nájsť „inverzný absorpčný pik“, ktorý pravdepodobne súvisí s adsorbovanou vrstvou CO na povrchu vzorky.



Obr. 1.5 Namerané FTIR spektrá na vzorkách Mp1b a Mp2b

Existencia väzieb Si-O a CH_n v oblasti vlnočtov okolo 1100 cm^{-1} je pozorovaná v prípade oboch vzoriek (Ray et al, 1987). V okolí 960 cm^{-1} boli v prípade oboch vzoriek pozorované väzby CH₃-Si a niektoré oxidové vibračné módy. Prítomnosť valenčných vibrácií väzieb SiH_n v okolí 960 cm^{-1} a „ohýbacieho“ módu SiH₂ v okolí 885 cm^{-1} bola identifikovaná taktiež v prípade oboch vzoriek. Ďalej možno zo spektier vidieť prítomnosť väzieb Si-N, ktorá je vplyvom kyslíka posunutá do oblasti 880 cm^{-1} . AFM mikroskopia bola použitá na skúmanie topológie povrchu pripravených vzoriek. Na obr. 1.7 sa nachádzajú snímky povrchu vzoriek

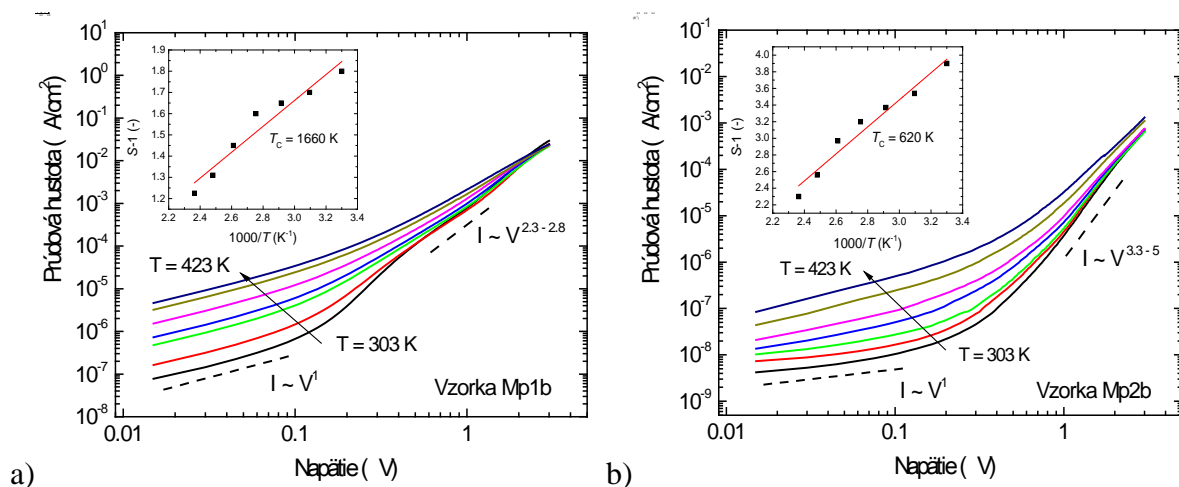
Mp1b a Mp2b. Z hľadiska charakterizácie povrchu možno povedať, že povrchy oboch vzoriek sa javia byť veľmi podobné. Podľa AFM sú vzorky nerozlišiteľné.



Obr. 1.6 AFM snímky veľkosti $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ povrchu vzorky Mp1b a) a vzorky Mp2b b).

Elektrická charakterizácia

V-A charakteristiky merané v priamom smere v teplotnom rozsahu 303 – 423 K v log – log mierke sú uvedené na obr. 1.8 a,b. Z nameraných V-A charakteristík na oboch vzorkách, v závislosti od napät'ovej oblasti, možno pozorovať existenciu dvoch odlišných (s rôznym sklonom) lineárnych oblastí. Obe tieto oblasti $I = f(U)$ vieme aproximovať mocninovou závislosťou (Rose, et al, 1955).



Obr. 1.7 V-A charakteristiky vzoriek a) Mp1b a b) Mp2b merané v teplotnom rozsahu 303 K až 423 K v log – log mierke. Vložená závislosť $s-I = f(1000/T)$ slúžila na určenie charakteristickej teploty T_c .

Pre oblasť vyšších predpätí V-A charakteristiky platí pre vzťah prúdu a napätia relácia $I \sim U^s$, pričom s je nepriamo úmerné vzrastajúcej teplote. Hodnota parametra s sa pohybuje v prípade vzorky Mp1b v rozmedzí $2,3 \div 2,8$ a v prípade vzorky Mp2b v rozmedzí $3,3 \div 5$. Vzhľadom k uvedenej a zistenej mocninovej závislosti meranej prúdovej hustoty v závislosti na napätí, možno v súlade s prácami realizovanými na príbuzných štruktúrach (Marsal et al, 1996) tento jav prisúdiť prúdom obmedzeným priestorovým nábojom (SCLS space charge limitation current). Hustota stavov v polovodičovej resp. izolačnej vrstve je popísaná Rosovým modelom (Rose, et al, 1955) ako:

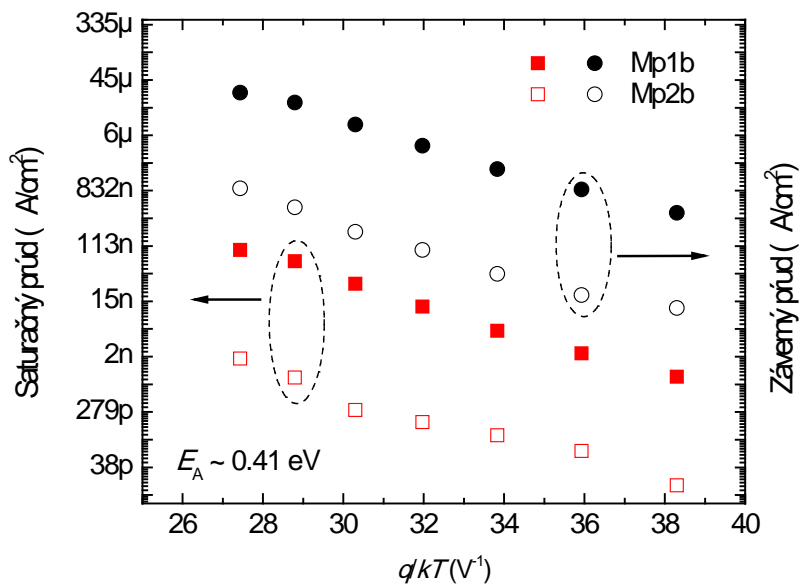
$$g(E) \approx N_0 \exp\left(\frac{E - E_c}{kT_c}\right) \quad (1)$$

kde N_0 je konštanta, T_c je tzv. charakteristická teplota, k je Boltzmanova konštanta a E_c je okraj vodivostného pásma a E je energia.

Aplikovaním Rosovej teórie t.j. meraním teplotnej závislosti V-A kriviek a lineárnou aproximáciou funkcie $s-I=f(1000/T)$ možno určiť charakteristickú teplotu T_c . Určená charakteristická teplota pre vzorku Mp1b je $T_c=1660$ K a pre vzorku Mp2b je $T_c=620$ K. Vyššia hodnota T_c v prípade vzorky Mp1b v porovnaní so vzorkou Mp2b indikuje plytšiu distribúciu lokalizovaných defektných stavov v zakázanom pásme karbidu kremíka.

Závislosť $I \sim U^l$ pozorovaná v nízkonapäťovej oblasti log-log zobrazenia V-A charakteristiky na obr. 1.8 (0,01 ÷ 0,1 V) nám naznačuje ohmický charakter štruktúry v tejto oblasti napätí. Na určenie hodnôt aktivačnej energie pre obe vzorky boli využité teplotné závislosti (posuny) V-A kriviek. Aktivačnú energiu možno spočítať zo sklonu teplotnej závislosti saturačného prúdu. Obr. 1.9 ilustruje pre obe vzorky spôsob výpočtu aktivačnej energie z vypočítanej hodnoty saturačného prúdu ako aj z meranej hodnoty záverného prúdu pri napätí - 0,1 V. Ako vidno z kriviek na obr. 1.9 sklon teplotných závislostí prúdových hustôt je pre obe vzorky rovnaký. Aktivačná energia určená zo sklonu lineárnej závislosti je 0,41 eV čo je v súlade s vedeckými prácami realizovanými na podobných štruktúrach napr. (Marsal et al, 1996).

V prípade polovodičov s vysokou hustotou poruchových stavov, medzi ktoré patrí aj a-SiC sa predpokladá transport sprostredkovaný preskokom cez lokalizované hladiny pravdepodobnejší. Zistená aktivačná energia je však príliš veľká, aby bola prisúdená hoppingu cez jednotlivé hladiny, napriek tomu veľmi malá pre mechanizmus tepelnej excitácie nosičov náboja. Preto aj v súlade s prácou (Marsal et al, 1996) transport pravdepodobne prebieha dvomi mechanizmami.



Obr. 1.8 Arrheniova závislosť meraného záverného prúdu a vypočítanej saturačnej prúdovej hustoty pre vzorky Mp1b a Mp2b. Určená hodnota aktivačnej energie 0,41 eV je rovnaká v prípade oboch vzoriek.

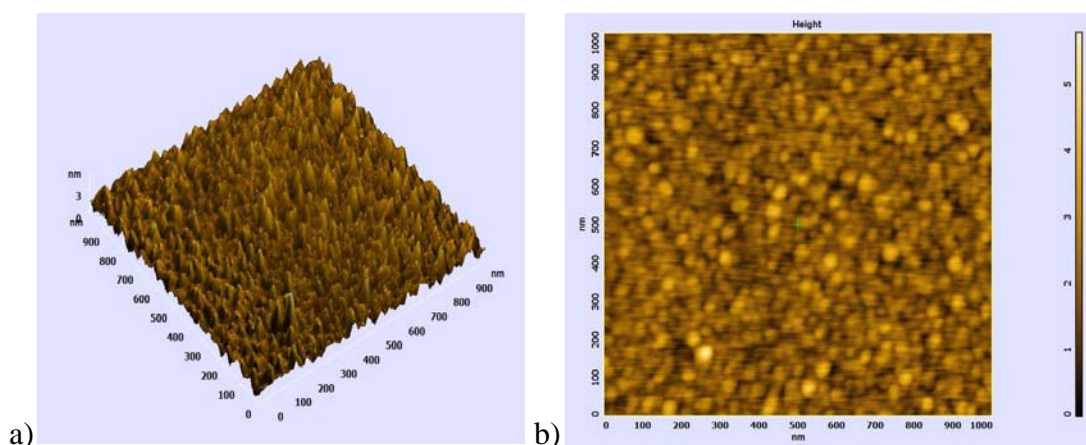
Prvý mechanizmus zahŕňa tepelnú excitáciu nosičov z Fermiho hladiny na príslušný okraj pásmového chvosta. Druhý mechanizmus je hopping, t.j. preskok nosičov cez lokalizované hladiny v zakázanom pásme, podporený zvýšenou populáciou dostupných susedných stavov, ktoré vznikli v dôsledku excitácie. Preto nameranú aktivačnú energiu možno nazvať priemernou transportnou energiou. Napriek odlišnej distribúcii defektných stavov v zakázanom pásme, ktorá bola zistená z Rosovej analýzy, rozdiel v transportnej aktivačnej energii medzi vzorkami nebol zistený.

4.2 Elektrické, dielektrické a štrukturálne vlastnosti heteroštruktúr Au/a-SiC/c-Si/Al pripravených metódou PECVD so skúmaním vplyvu dopácie dusíkom

Ďalším cieľom výskumu bolo posúdenie vplyvu prietoku prekursorového plynu čpavku (NH_3) v PECVD reaktore na výsledné štrukturálne, elektrické a dielektrické parametre.

FTIR a AFM na skúmaných vzorkách

Aj v tomto prípade bola pre potreby štrukturálnej charakterizácie využitá infračervená spektroskopia (FTIR). Namerané FTIR spektrá sa príliš nelíšili od spektier získaných pre vzorky Mp1b a Mp2b preto tu nie sú uvedené. Dominantná absorpčná oblasť leží v oblasti vlnočtov $740 \text{ cm}^{-1} \div 970 \text{ cm}^{-1}$. V oblasti vlnočtov $2000 \text{ cm}^{-1} \div 2140 \text{ cm}^{-1}$ možno v prípade všetkých vzoriek nájsť väzby typu Si- H_n , ktoré sú vo väčšej miere zastúpené vo vzorkách P31 a P32. Existencia väzieb Si-O v oblasti vlnočtov okolo 1100 cm^{-1} je pozorovaná v prípade všetkých vzoriek. V oblasti vlnočtov 1450 cm^{-1} boli v prípade všetkých vzoriek identifikované väzby typu CH_n , ktoré sú najviac viditeľné v prípade vzorky P31. Najväčšie zastúpenie väzieb SiC bolo pozorované na vzorkách P32 a P31. Z nameraných spektier ďalej vyplýva, že súčasťou štruktúr sú aj molekuly CH_4 a SiH_4 , ktoré pravdepodobne vznikli v dôsledku neúplnej disociácie prekursorových plynov.



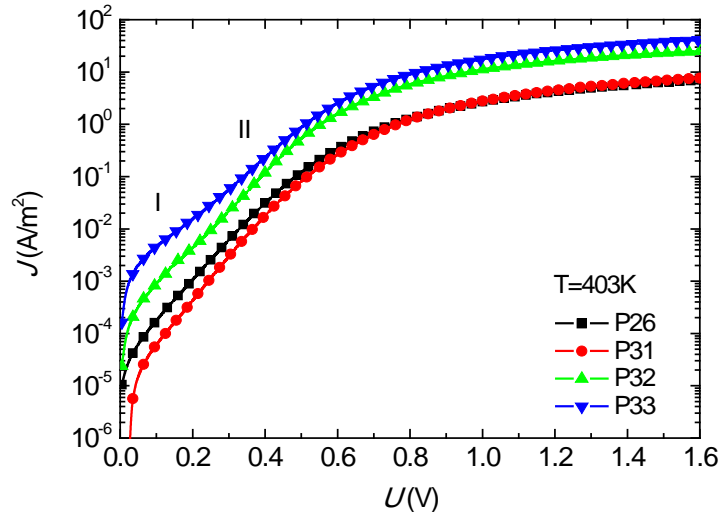
Obr. 1.9 Snímok topografie povrchu vzorky P32. a) 3D snímok povrchu 1x1 μm , b) 2D snímok

AFM mikroskopia bola využitá na skúmanie topológie povrchu všetkých pripravených vzoriek. Drsnosť jednotlivých vrstiev vyzerá byť veľmi malá a nerovnosti sú na úrovni jednotiek nanometrov. Vplyv dopácie na tvar a vlastnosti povrchu sa nepreukázal.

Elektrická charakterizácia

Analýza nameraných V-A kriviek umožňuje určiť, ktorý mechanizmus sa dominantne podieľa na elektrickom transporte. Rovnako sa dá predpokladať, že elektrický transport v heteroštruktúrach je sprostredkovaný viacerými mechanizmami súčasne, ale iba jeden je dominantný. Analýza a identifikácia dominantného mechanizmu vychádza z posúdenia teplotnej závislosti saturačného prúdu (prúdovej hustoty) a exponenciálneho diódového faktora ($A = q/mkT$). Exponenciálny diódový faktor A je nepriamo úmerný faktoru ideality diódy (m). Namerané V-A charakteristiky vybraných skúmaných vzoriek (P26, P31, P32, P33) v priamom smere a semilogaritmickej mierke pri teplote $T = 403 \text{ K}$ sa nachádzajú na obr. 1.11.

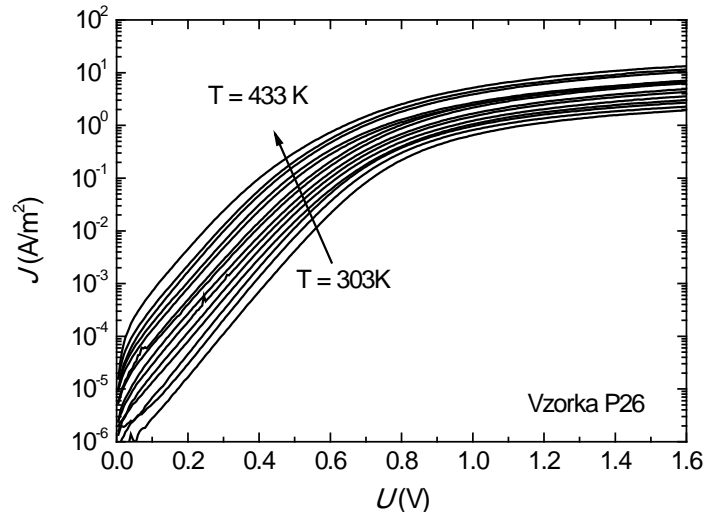
Z uvedených nameraných V-A charakteristík v priamom smere je vidieť jasný rozdiel medzi vzorkou P33 (vyššia úroveň dopovania) a ostatnými vzorkami. Rozdiel spočíva v existencii zakrivenia V-A charakteristiky v oblasti nižších predpätí u vzorky P33, ktoré v prípade ostatných vzoriek nebolo identifikované. Z uvedeného je zrejmé, že v prípade vzorky P33 elektricko-transportné procesy ovplyvňujú dva mechanizmy.



Obr. 1.10 Namerané V-A charakteristiky v priamom smere a teplote 403 K

Teplotná závislosť V-A charakteristiky v priamom smere a semilogaritmickej mierke je pre vzorku P26 uvedená na obr. 1.12.

Ako je zrejmé z V-A charakteristiky na obr. 1.12, platí to aj pre ostatné vzorky, nízko napäťovú oblasť V-A charakteristiky je možné aproximovať priamkou a následne spočítať faktor ideality diódy a saturačný prúd využitím vzťahu: $I = I_s \exp(qU/mkT)$ kde I_s je saturačný prúd získaný extrapoláciou V-A charakteristiky smerom k nulovému napätiu, m je faktor ideality diódy a k je Boltzmanova konštanta.



Obr. 1.11 Nameraná teplotná závislosť V-A charakteristík pre vzorku P26

Podobné teplotné závislosti V-A kriviek, ako v prípade vzorky P26, boli namerané aj na vzorkách P31 a P32. Na rozdiel od vzoriek P26, P31 a P32, z teplotnej závislosti V-A kriviek, vzorky P33 možno v priepustnom smere identifikovať existenciu dvoch lineárnych oblastí. Jedna lineárna oblasť sa nachádza v intervale napätí $0 \div 0,3$ V a druhá oblasť sa nachádza v intervale $U > 0,3$ V. Slabá závislosť diódového exponenciálneho faktora m na teplote zistená z Arrheniových závislostí $A = f(q/kT)$, ktoré tu nie sú uvedené, bola pozorovaná v prípade všetkých skúmaných vzoriek. Teplotná nezávislosť faktora S indikuje, že dominantným transportným procesom je tunelovanie. Závislosť $A = f(q/kT)$ je aproximovateľná lineárnou funkciou. Hodnota smernice S lineárnej závislosti reprezentuje mieru závislosti diódového exponenciálneho faktora od teploty a priamo súvisí s elektrickými transportnými procesmi v heteroštruktúre. Hodnota S okolo 0,5 zodpovedá rekombinácii v oblasti priestorového náboja, pokým hodnota S blížiac sa k jednej súvisí s rekombináciou v neutrálnej časti polovodiča (Schulze et al, 2010). Nízka hodnota sklonu S v našom prípade indikuje, že transport prebieha súčasne tunelovaním a rekombináciou. Možno dospieť k názoru, že tunelovanie je v dominantné v napäťovej oblasti $0 \div 0,3$ V pre vzorku P26 ($S = 0,046$), P33 ($S = 0,046$) a P32 ($S = 0,2$). Najčastejšie sa tunelovanie v príbuzných heteroštruktúrach, t.j.

heteropriechodoch pozostávajúcich z amorfneho kremika a kryštalickeho kremika opisuje multitunelovacím záchytno emisným procesom (MTCE), pôvodne publikovaným Matsuuraom a kol. (Matsuura et al, 1989). Tento proces súvisí s vysokou hustotou defektných stavov nachádzajúcich sa v zakázanom pásme karbidu kremika. V prípade polarizácie priechodu v priepustnom smere, diery z valenčného pásma kryštalickej časti heteropriechodu (c-Si) prechádzajú v oblasti priestorového náboja a-SiC:H z jedného lokalizovaného stavu na ďalší až sa dostanú na okraj oblasti priestorového náboja.

Energetická pozícia pascí E_T pre jednotlivé vzorky je definovaná ako: P26 ($E_T = E_V + 0,46 \text{ eV}$), P33 ($E_T = E_V + 0,4 \text{ eV}$) a P32 ($E_T = E_V + 0,45 \text{ eV}$). V ďalšom kroku sa dostanú buď do valenčného pásma, alebo zrekombinujú s elektrónom vo vodivostnom pásme. Hodnota saturačného prúdu súvisí buď s pozíciou Fermiho hladiny v amorfnej vrstve (lepšie povedané s aktivačnou energiou dopantov), alebo s energetickou pozíciou pascí. Energetická pozícia pascí je funkciou záchytných centier, ktoré sa zúčastňujú multitunelovacieho procesu v oblasti priestorového náboja. Informácie o aktivačnej energii dopantov síce nie sú známe, ale z výrobného procesu (zmena prietoku NH_3) a výsledných V-A charakteristík je zrejmé, že doping významne ovplyvňuje vodivosť pripravených vrstiev. So vzrastajúcim prietokom NH_3 v reaktore je preukázateľný nárast vodivosti vrstvy, čo možno vidieť aj v tab. 2 na zvyšujúcom sa saturačnom prúde vplyvom zvyšujúcej sa dopácie. Ako možno vidieť aj z tab. 2 v nízkonapäťovej oblasti $U < 0,3 \text{ V}$ bola pre vzorky P26, P32, P33 určená približne rovnaká hodnota aktivačnej energie.

Tab. 2 Vypočítané parametre pre vybrané skúmané vzorky

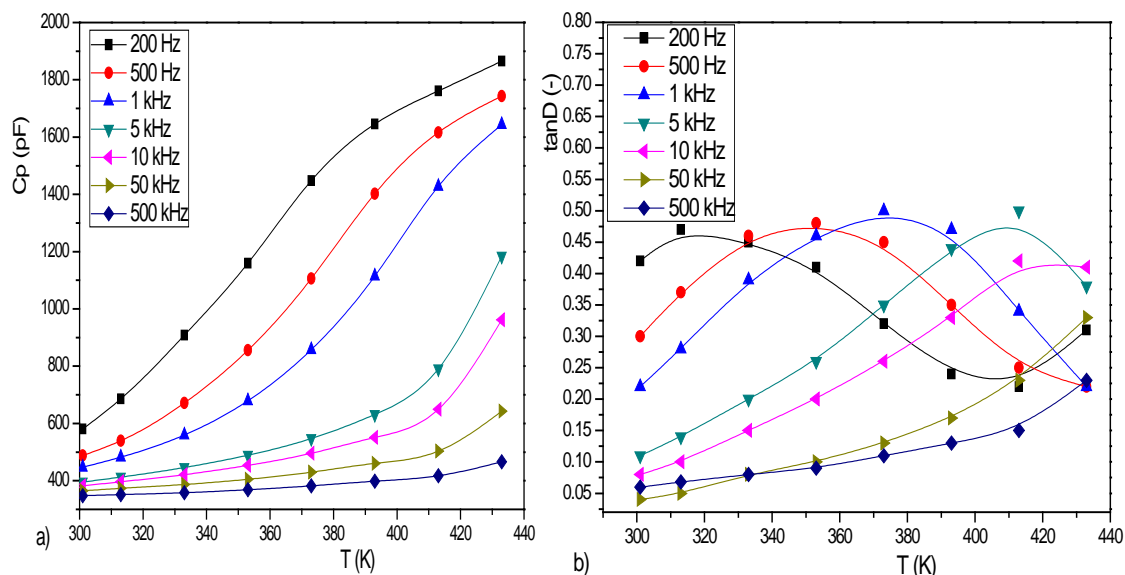
Vzorka/ Napät'. oblasť	P31	P26	P33		P32
			Pre V<0.3	pre V>0.3	
Sklon A (V^{-1})	0,292	0,046	0,32	0,046	0,2
Aktivačná energia E_a (eV)	0,53	0,46	0,4	0,3	0,45
Saturačný prúd $T=303 \text{ K}$ (A/m^2)	$6,0 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-5}$	$5,3 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-6}$

V tomto prípade ide o pozíciu pascí v zakázanom pásme, ktoré sa zúčastňujú tunelovacieho procesu. Avšak, vypočítaná aktivačná energia pre vzorku P31 je rovná približne polovici šírky zakázaného pásma kremika. Hodnota $E_a=0,53 \text{ eV}$ a nenulový sklon aproximovanej lineárnej závislosti diódového exponenciálneho faktora A od teploty poukazuje na prevahu rekombinácie v oblasti priestorového náboja v kryštalickej časti heteropriechodu. Pre napäťovú oblasť $U > 0,3$ vzorky P33 možno v súvislosti so získanou hodnotou aktivačnej energie a malým sklonom závislosti na povedať, že dominantný transportný proces je multi tunelovací emisno záchytný mechanizmus (MTCE). Ďalším zvyšovaním napätia v priepustnom smere sa V-A charakteristiky v prípade všetkých vzoriek vyznačujú odklonom od lineárnej závislosti. Tento jav súvisí s vplyvom sériového odporu, ktorý úzko súvisí s kvalitou kontaktov (Jensen et al, 2000).

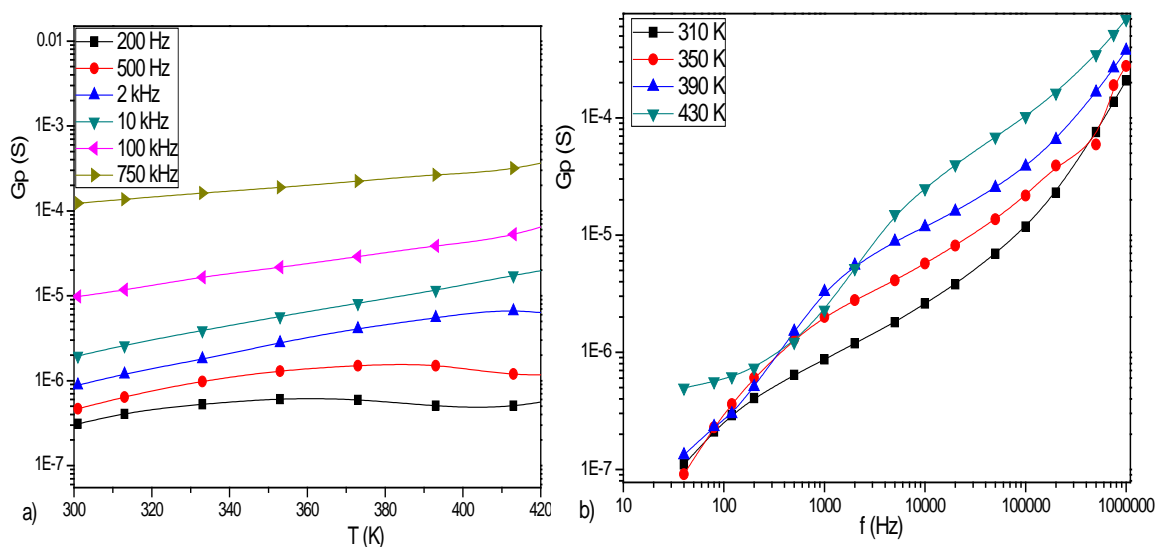
Dielektrická charakterizácia

Ako bolo ukázané dopácia a-SiC dusíkom má za následok zmenu vodivosti pripravených vrstiev. V prípade nižšej, resp. žiadnej dopácie môže byť pripravená amorfna zlúčenina SiC vzhľadom k šírke zakázaného pásma využitá ako tenkovrstvová dielektrická vrstva. Takéto dielektrické vrstvy majú potenciál využitia v mikroelektronických, optických ako aj vo fotovoltických aplikáciách (kap 1.). Z hľadiska dielektrických parametrov bola vybraná ako

vhodná vzorka P30, ktorá bola charakterizovaná dielektrickými meraniami. Teplotné závislosti meranej paralelnej kapacity C_p , stratového čísla $\tan D$ a paralelnej vodivosti G_p sú na obr. 1.13a, b obr. 1.14a, b. Závislosti boli merané v rozsahu frekvencií striedavého meracieho signálu 40 Hz až 1 MHz. Ako vidno z grafu na obr. 1.13 a, meraná kapacita rastie s teplotou v celom teplotnom rozsahu, avšak nárast je strmší v oblasti nižších frekvencií.



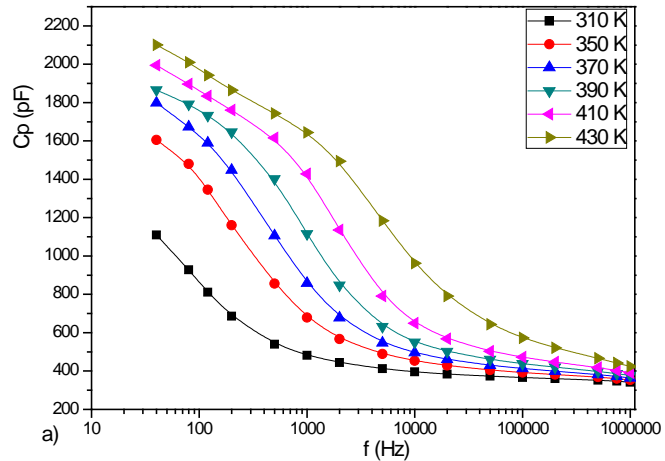
Obr. 1.12 Teplotná závislosť C_p a) a $\tan D$ b) meraná pri rôznych frekvenciách (vzorka P30)



Obr. 1.13 Teplotná závislosť G_p s frekvenciou ako parametrom 5a) a frekvenčná závislosť G_p s teplotou ako parametrom 5b) (vzorka P30)

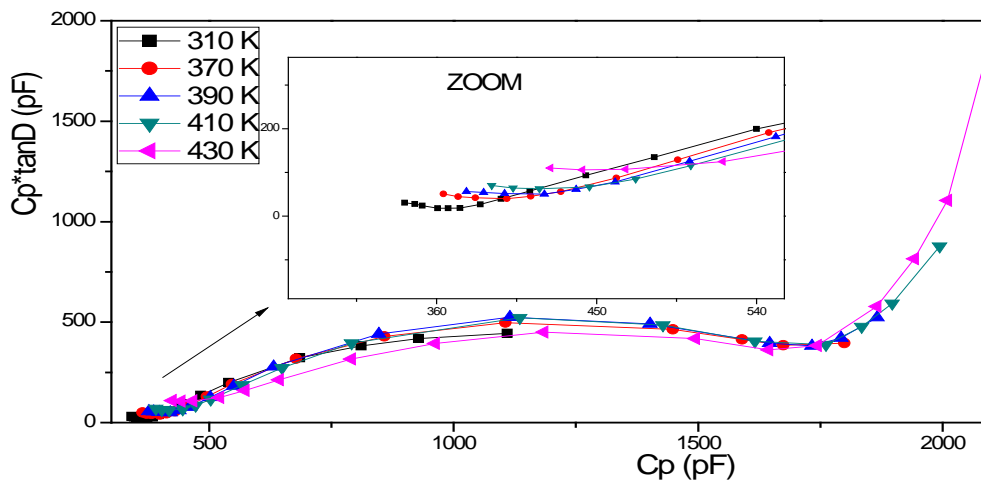
Závislosti stratového činiteľa od teploty na obr. 1.13b vykazujú maximá pri určitých teplotách. So vzrastajúcou frekvenciou sa maximá ako aj celá závislosť $\tan D$ posúva doprava smerom k vyšším teplotám. Teplotné a frekvenčné závislosti ac paralelnej vodivosti sa nachádzajú na obr. 1.14a a b. V rozsahu teplôt od 300 do 430 K vodivosť vzrastie približne o pol rádu. Naopak, nárast vodivosti s rastúcou frekvenciou je významný.

Závislosti $C_p = f(f)$ na obr. 1.15a majú typický tvar zodpovedajúci štruktúre MIM, teda klasickej kondenzátorovej štruktúre s relaxačným procesom, keď sa kapacita mení (vzrastá) z vysokofrekvenčnej hodnoty C_∞ smerom k nízkym frekvenciám. Vplyv polarizácie na elektródach je zrejmy aj z Cole-Coleho diagramu na obr. 1.16 (nárast pri nízkych frekvenciách - vpravo).



Obr. 1.14 Frekvenčná závislosť C_p s teplotou ako parametrom a)

Relaxačné maximum v Cole-Coleho diagrame je pri teplotách od 300 do 430 K pri frekvenciách od 40 Hz do 2 kHz. Náznač druhej polkružnice v blízkosti počiatku súradnicového systému indikuje, že okrem spomenutého relaxačného procesu existuje ďalší s odlišnou relaxačnou dobou (resp. distribúciou relaxačných časov). Nárast imaginárnej zložky komplexnej kapacity smerom k nízkym frekvenciám (možno pripísať procesom na elektródach (Chaudhry et al, 1991). Presná analýza predpokladá ďalšie merania.



Obr. 1.15 Cole-coleho diagram s teplotou ako parametrom (vzorka P30)

4.3 Štruktúrna charakterizácia a elektrický transport v heteroštruktúrach Au/a-SiC:H/c-Si/Al pri vysokej teplote substrátu

Porovnaním dvoch vzoriek pripravených pri teplote substrátu 973 K, tlaku v reaktore $p=10$ Pa a prekurozových plynov P19 (SiH_4 5 sccm, CH_4 20 sccm), P23 (SiH_4 5 sccm, CH_4 26 sccm) sa identifikoval vplyv technológie na cieľové vlastnosti.

Analýzou nameraných V-A charakteristík na sa preukázalo, že obe pripravené štruktúry majú usmerňovací/diódový charakter. Bola zistená existencia dvoch lineárnych oblastí V-A charakteristík v priepustnom smere. Analýza Arrheniových závislostí pre obe vzorky aj pre obe napäťové oblasti ukázala slabú závislosť exponenciálneho diódového faktora od teploty. Na základe teplotných závislostí V-A charakteristík sa zistilo, že transportný proces prebieha viacerými mechanizmami súčasne t.j. tunelovaním a rekombináciou. Z vypočítanej aktivačnej energie pre vzorku P19 a sklonu aproximovanej lineárnej závislosti diódového

exponenciálneho faktora A od teploty sa zistilo, že dominantný transportný proces je multi-tunelovací emisno záchytný mechanizmus (MTCE).

5 Záver

Práca sa zaoberá elektrickou a štruktúrnou charakterizáciou pripravených tenkých vrstiev amorfného karbidu kremíka. Výskum a-SiC, jeho aplikácie a dosiahnuté pokroky vo fotovoltike potvrdzujú predpoklad, že amorfné zlúčeniny SiC môžu postupne výhodne nahrádzať doposiaľ konvenčne používané materiály ako napr. tenké vrstvy SiO a SiN.

Úvod práce je venovaný aktuálnemu prehľadu a vedomostiam o amorfnom SiC ako aj o vybraných technických aplikáciách. Následne sú v krátkosti opísané experimentálne procedúry, vlastnosti vzoriek a meracie prístroje.

Jadro práce, t.j. časť výsledky a diskusia, tvorí výstup z výskumnej činnosti realizovanej na tenkých vrstvách a-SiC, ktoré boli súčasťou heteroštruktúr spolu s kryštalickým kremíkom. Elektrickými meraniami, pomocou AFM mikroskopie a FTIR spektroskopie je monitorovaný vplyv elektródovej konfigurácie reaktora, úrovne dopovania a vysokej teploty substrátu na cieľové vlastnosti pripravenej štruktúry. V rámci elektrickej charakterizácie sú prostredníctvom meraní teplotne závislých V-A charakteristík identifikované elektrické transportné procesy. V práci sú uvedené aj výsledky z dielektrickej charakterizácie vybranej vzorky.

Získané experimentálne výsledky a ich interpretácia posúva hranicu poznania v oblasti fyziky amorfných polovodičov. Elektrická charakterizácia v spojení so štruktúrnymi analýzami je dôležitou spätnou väzbou pre technológiu a ďalšiu optimalizáciu prípravy tenkovrstvových štruktúr.

Vedecký a praktický prínos práce

Hlavný prínos práce spočíva v komplexnom spracovaní a výskume problematiky tenkých vrstiev amorfného karbidu kremíka. Okrem zhrnutia a skutkového stavu problematiky je práca zameraná najmä na rozvinutie oblasti, ktorá nebola v odbornej literatúre dostatočne obsiahnutá. Detailnú elektrickú charakterizáciu pripravených heteroštruktúr a opis transportných prúdových mechanizmov možno považovať za najpodstatnejší prínos práce. Objasnenie vplyvu elektródového módu reaktora a hlbšie pochopenie alternatívnych režimov depozície je dôležité pre optimalizáciu výroby tenkých vrstiev a zlepšenie parametrov týchto vrstiev. Hľadanie šetrnejších riešení (alternatív k doposiaľ používanému plynu PH_3) k životnému prostrediu bolo motiváciou skúmania možností dopingu amorfných vrstiev čpavkom. Prostredníctvom elektrických meraní bola preukázaná súvislosť medzi zmenou prietoku čpavku a cieľovými vlastnosťami štruktúry (ovplyvňovanie vodivosti vrstvy zmenou prietoku NH_3). Ďalšou dôležitou časťou výskumu bolo sledovanie vplyvu vysokej teploty substrátu v reaktore na výsledné elektrické a štruktúrne parametre tenkých vrstiev a-SiC:H. Možno tvrdiť, že v rámci práce sa podarilo naplniť stanovené ciele.

Summary

The main contribution of this thesis lies in the comprehensive treatment and research of thin amorphous silicon carbide. In addition to the description of the problematic's factual issues, it is mainly focused on the development of an area that was not sufficiently covered in scientific literature. Detailed electrical characterization of prepared heterostructures and description of current transport mechanisms can be considered as the most essential thesis contribution. Electrode mode impact clarification and deeper understanding of alternate

regime deposition is important for thin layer optimization of production and parameter improvement of these layers. Finding of more considerate solutions to the environment was the motivation to explore the possibilities of doping amorphous layers with ammonia. By electrical measurements it was demonstrated a correlation between the change of ammonia flow and the target structure properties (influencing layer conductivity by the NH_3 flow change). Next important part of the research was to evaluate the effect of high substrate temperature in the reactor at the result electrical and structural parameters of $\alpha\text{-SiC:H}$ layers. Within the thesis' range, it could be stated, the objectives were successfully achieved.

Zoznam použitej literatúry

- [1] D. A. Anderson, W. E. Spear, *Philosophical Magazine*, Vol. 35, (1977), 1-16
- [2] Swati Ray, Debajyoti Das and A. K. Barua, *Infrared Vibrational Spectra Of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films Prepared By Glow Discharge*, *Solar Energy Materials*, 15, pp. 45 (1987).
- [3] S. Akita, K. Wakita, Y. Nakayama and T. Kawamura, *Highly Photosensitive a- SiC:H Films Prepared At High Deposition Rate By Glow Discharge In SiH₄- C₂H₂ Mixture Gas*, In *Springer Proceedings In Physics* Vol. 34, ed. By G. L. Harris and C. Y. -W. Yang, pp. 77-82, New York (1989).
- [4] W. K. Choi, Y. M. Chan, C. H. Ling, Y. Lee, R. Gopalkrishnan and K. L. Tan, *Structural Properties Of Amorphous Silicon Carbide Films By Plasma- Enhanced Chemical Deposition*, *Journal of Applied Physics*, 77, pp. 827-832 (1995).
- [5] I. Solomon, M. P. Schmidt and H. Tran-Quoc, *Selective Low-Power Plasma Decomposition Of Silane-Methane Mixtures For The Preparation Of Methylated Amorphous Silicon*, *Physical Review B*, 38, pp. 9898-9901 (1988).
- [6] T. Shimada, Y. Katayama, and K.F. Komatsubara, *Compositional and Structural Properties Of Amorphous Si_xC_{1-x}:H Alloys Prepared By Reactive Sputtering*, *Journal of Applied Physics*, 50, pp. 5530 (1979).
- [7] R. Dutta, P. K. Banerjee and S.S. Mitra, *Optical And Electrical Properties Of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide*, *Physics Status Solidi (B)*, 113, pp.277-284 (1982).
- [8] R. Dutta, P. K. Banerjee and S.S. Mitra, *Effect Of Hydrogenation On The Electrical Conductivity Of Amorphous Silicon Carbide*, *Solid State Communications*, 42, pp. 219-222 (1982).
- [9] Y.J. Liu, S.F. Yoon, J. Ahn, W.I. Milne, *Effect Of Hydrogen Dilution On The Deposition Of Carbon-Rich a-SiC:H Films By The Electron Cyclotron Resonance Method*, *Materials Science and Engineering B*, 39, pp. 188-194(1996).
- [10] T. Friessnegg, M. Boudreau, J. Brown and P. Mascher, P. J. Simpson, W. Puff, *Effect Of Annealing On The Defect Structure In a-SiC:H Films*, *Journal of Applied Physics*, 80, pp. 2216-2223 (1996).
- [11] McCulloch, D. G. et. al.: *Wannier function analysis of tetrahedral amorphous networks*. *Diamond and Related Materials* 12 (2003), p. 2026-2031.
- [12] Pysch, D.; Ziegler, J.; Becker, J.-P.; Suwito, D.; Janz, S.; Glunz, S.W.; Hermle, M.; , "Potentials and development of amorphous silicon carbide heterojunction solar cells," *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009 34th IEEE , vol., no., pp.000794-000799, 7-12 June
- [13] http://www.ntb.ch/files/0/2772/thin_film_oct_99_baumgartner.pdf
- [14] HEBLING, C.: *Photovoltaic Material, Past, Present, Future*. In *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (IEEE, New York 1997)* p. 623
- [15] S. W. Glunz, et. al., "Laser-fired contact silicon solar cells on p- and n-substrates", *Proc. of the 19th EU-PVSEC (2004)*, p. 408-411.
- [16] VETTER, M. et. al.: *Comparison of the surface passivation quality of SiCx and SiNx films on p-type and n-type multicrystalline silicon*. *Proc. of the 20th EUPVSEC (2005)*, p. 1454-1456.
- [17] *Hydrogenated amorphous silicon thin film solar cells*. [cit.10.02.2013]. Dostupné na internete: <http://www.crystec.com/triasie.htm>
- [18] J. Bullot, et. al., *Physics of Amorphous Silicon-Carbon Alloys*, *Phys. Stat. Sol B* 143, p. 345., 1987.
- [19] Rose, A. (1955). *Space-charge-limited currents in solids*. *Physical Review*, 97 (6), 1538-1544
- [20] L. F. Marsal, J. Pallare, X. Correig, J. Calderer, and R. Alcubilla, *Electrical characterization of n-amorphous/p-crystalline silicon heterojunctions*. In: *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 11, pp. 8493–8497, 1996.
- [21] T. F. Schulze, L. Korte, E. Conrad, M. Schmidt, and B. Rech. *Journal of Applied Physics*, 107 (2010) 023711.
- [22] H. Matsuura, *IEEE Transactions on Electron Devices* 36 (1989) 2908–2914.
- [23] N. Jensen, U. Rau, *Journal of Applied Physics* 87 (2000) 2639–2645.
- [24] M. I. Chaudhry, *Electrical Transport Properties of Crystalline Silicon Carbide/Silicon Heterojunctions*, *IEEE Electron Device Letters*, 12(12), pp.670-672 (1991).

Publikácie autora venujúce sa problematike a-SiC

- [1] Perný, M., Mikolášek, M., Šály, V., Ružinský, M., Ďurman, V., Pavúk, M., Huran, J., Országh, J., Matejčík, Š. Behaviour of amorphous silicon carbide in Au/a-SiC/Si heterostructures prepared by PECVD technology using two different RF modes, *Applied Surface Science*, Available online 25 September 2012, ISSN 0169-4332, 10.1016/j.apsusc.2012.09.086. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433212016169>
F. Marsal, J. Pallare, X. Correig, J. Calderer, R. Alcubilla, *Journal of applied physics*, 79 (1996) 8493–8497.
- [2] Perný, M., Šály, V., Mikolášek, M., Huran, J. Characterization and Electrical Transport in a-SiC/c-Si Heterojunction Structure. In: *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. - ISSN 1582-5175. - Vol. 60, nr. 2 (2012), s. 38-42
- [3] Perný, M., Šály, V., Huran, J. Elektrické vlastnosti nanokryštalického SiC tvoriaceho súčasť štruktúry MSM. In: *Energetika*. - ISSN 0375-8842. - Roč. 60 (2010), s. 654-657
- [4] Perný, M., Šály, V., Váry, M., Huran, J. Electrical and Structural Properties of Amorphous Silicon Carbide and Its Application for Photovoltaic Heterostructures. In: *Elektroenergetika*. - ISSN 1337-6756. - Vol. 4, No. 3 (2011), s. 17-19
- [5] Perný, M., Mikolášek, M., Šály, V., Huran, J., Országh, J. Current Transport Mechanisms of Amorphous n-Doped Silicon Carbide/Crystalline Silicon Heterostructure: Impact of Nitrogen Dopation. In: *35th International Spring Seminar on Electronics Technology - ISSE 2012 : Bad Aussee, Austria, 9-13 May, 2012*. - : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-2240-9. - S. 25-30
- [6] Perný, M., Šály, V., Huran, J. Electric and Dielectric Properties of Amorphous Silicon Carbide Thin Films Produced at High Temperature. In: *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference : Hamburg, Germany, 5-9 September 2011*. - München : WIP-Renewable Energies, 2011. - ISBN 3-936338-27-2. - S. 317-320
- [7] Perný, M., Šály, V., Huran, J., Mikolášek, M. Electrical Properties of Amorphous Silicon Carbide Films for PV Applications Prepared at High Temperature. In: *ISSE 2012 : 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. Bad Aussee, Austria, May 9-13, 2012*. - Wien : TU, 2012. - S. 14-15
- [8] Perný, M., Šály, V., Ďurman, V., Huran, J. Electrical Properties of Nanocrystalline SiC (SiCN) within MSM Structure. In: *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference/ 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion : Valencia, Spain, 6-10 September 2010*. - München : WIP-Renewable Energies, 2010. - ISBN 3-936338-26-4. - S. 3307-3310
- [9] Perný, M., Šály, V., Váry, M. Amorphous Silicon Carbide - Useful Material for Photovoltaics. In: *Power Engineering 2012. Renewable Energy Sources 2012 : 3th International Scientific Conference OZE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012*. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-48-9. - S. 287-288
- [10] Perný, M., Šály, V., Váry, M., Huran, J. Electrical Properties of Amorphous Nitride-Doped Silicon Carbide and Its Application for Photovoltaics. In: *Power Engineering 2011. Renewable Energy Sources 2011 : Tatranské Matliare, Slovakia, June 7-9, 2011*. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2011. - ISBN 978-80-89402-38-0. - USB flash
- [11] Perný, M., Huran, J. Electrical Properties of Amorphous SiC Prepared by PECVD on Si Substrate. In: *ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010*. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom
- [12] Perný, M., Šály, V., Mikolášek, M., Huran, J., Országh, J. Electronic and Structural Properties of Amorphous N-Doped Silicon Carbide. In: *ISSE 2011 . 34th International Spring Seminar on Electronics Technology : Tatranská Lomnica, Slovakia, 11-15 May 2011*. - Piscataway : IEEE, 2011. - ISBN 978-1-4577-2111-3. - S. 212-215
- [13] Perný, M., Šály, V., Huran, J. Material Properties of SiC and Its Application for Photovoltaic Devices. In: *Dielectric and Insulating Systems in Electrical Engineering : 18th International Conference DISEE 2010. Demänovská Dolina, Slovak Republic, 22.-24.9.2010*. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3366-3. - S. 182-185
- [14] Perný, M., Mikolášek, M., Šály, V., Ružinský, M., Pavúk, M., Huran, J., Rusnák, J. Behaviour of Amorphous Silicon Carbide in Al-a-SiC-Si Heterostructures. In: *SURFINT - SREN III : Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2012. Florence, Italy, May 14-18, 2012*. - Bratislava : Comenius University, 2012. - ISBN 978-80-223-3212-5. - S. 162-163
- [15] Perný, M., Šály, V., Huran, J. Structural and Electrical Characterisations of Amorphous Silicon Carbide Films Prepared at Different Temperatures. In: *Abstracts Proceedings "New Trends in Micro/Nanotechnology" : 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, High Tatras, Slovakia, May 11-15, 2011*. - Košice : TU Košice, 2011. - ISBN 978-80-553-0646-9. - S. 252