

Ing. Michal Nemeč

Autoreferát dizertačnej práce

**Diagnostika kremíkových heteroštruktúr
pre moderné fotovoltické aplikácie**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor v študijnom odbore doktorandského štúdia:

5.2.13

študijného programu:

Elektronika,

Mikroelektronika

Bratislava, júl 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave elektroniky a fotoniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Michal Nemeč
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroniky a fotoniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Ladislav Harmatha, PhD.
Konzultant: Ing. Miroslav Mikolášek, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroniky a fotoniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Štefan Luby, DrSc.
Slovenská akadémia vied
Fyzikálny ústav
Dúbravská cesta 9
845 07 Bratislava 45

Doc. Ing. Vladimír Šály, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa:o.....hod. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa:

v študijnom odbore 5.2.13 Elektronika
študijný program Mikroelektronika

na Dekanáte Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3/A 1, poschodie.

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

Obsah

Úvod	3
Súčasný stav a história danej problematiky.....	5
Ciele dizertačnej práce.....	6
Experimentálna časť	6
Analýza vplyvu podepozičného žihania na $I-U$ charakteristiky solárnych článkov s a-Si:H(n)/c-Si(p) heterorozhraním.....	7
Analýza kvality a-Si: H (n)/c-Si (p) rozhrania pomocou kapacitných metód	10
Hlavné prínosy dizertačnej práce	13
Záver.....	14
Summary.....	16
Zoznam citovanej literatúry.....	17
Články autora.....	19

Úvod

S neustálym rastom svetovej populácie rastie i dopyt po energii, pretože dostupnosť a spotreba elektrickej energie úzko súvisia s kvalitou života. Výroba elektrickej energie pomocou spaľovania fosílnych palív a jadrového štiepenia má negatívny dopad na životné prostredie. Zhoršovanie životného prostredia je jasným varovaním, že i súčasná realizácia ľudského pokroku má svoje obmedzenia. Ďalej si musíme uvedomiť, že zásoby fosílnych palív na Zemi sú tiež obmedzené, preto je potrebné hľadať alternatívne riešenia. Medzi energetické zdroje, ktoré sú šetrné k životnému prostrediu a sú aj trvácnejšie, patria obnoviteľné zdroje energie. Poznáme päť základných obnoviteľných zdrojov energie: veterná energia, biomasa, geotermálna energia, hydrodynamická a solárna energia (tepelná a fotovoltická). Hoci je elektrická energia vyrobená z obnoviteľných zdrojov stále drahšia, ako elektrická energia vyrobená z tradičných zdrojov, stáva sa najefektívnejším riešením pre dve miliardy ľudí v mnohých častiach sveta bez prístupu k elektrickej sieti.

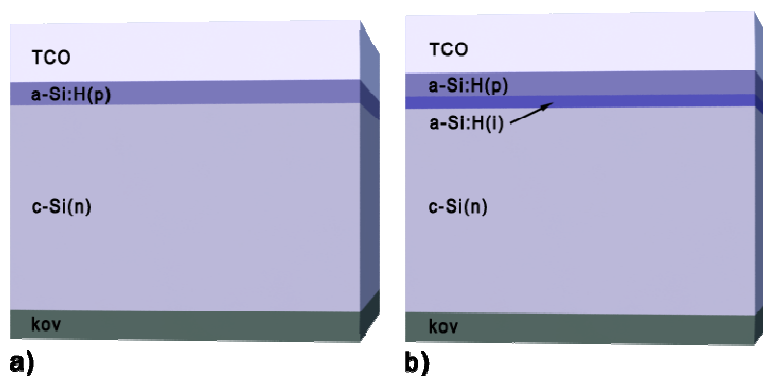
Z dôvodu, že Slnko poskytuje Zemi viac ako 10000-krát viacej energie ako sme schopní v súčasnej dobe spotrebovať, má práve fotovoltika potenciál stať sa veľkým a ekologicky neškodným zdrojom energie [1]. Fotovoltika je technológia, ktorá zmenila spôsob akým premýšľame o energii [2]. Pomocou solárnych článkov môžeme vyrábať elektrickú energiu pre rôzne aplikácie v rôznom podnebí a v rôznej geografickej polohe. Využitie fotovoltiky v širokom rozsahu si vyžaduje, aby energia vynaložená na výstavbu, prevádzku a vyradenie z prevádzky bola čo najmenšia, v porovnaní s vyrobenou energiou počas životnosti solárneho článku. To znamená, že doba návratnosti energie by mala byť čo najkratšia. Prvý moderný solárny článok bol vyrobený v roku 1954. Tento článok bol vytvorený na substráte z monokryštalického kremíka a mal účinnosť 6 %. Technológia solárnych článkov využívajúca objemový monokryštalický (c-Si), alebo multikryštalický (mc-Si) kremík je považovaná za prvú generáciu solárnych článkov. Táto technológia je najstaršou a zároveň najpoužívanejšou technológiou. Je síce vyspelá, ale stále dominujú materiálové náklady, ako je napr. cena kremíkových dosiek [3,4]. Záujem o znižovanie nákladov na materiál v kombinácii s aktuálnym nedostatkom kryštalického kremíka, bol podnetom na výskum

nízko nákladových tenkovrstvových solárnych článkov, ktoré predstavujú druhú generáciu solárnych článkov. Medzi polovodičové materiály vhodné pre tenkovrstvovú technológiu patria najmä hydrogenizovaný amorfný kremík (a-Si:H), hydrogenizovaný mikrokryštalický kremík ($\mu\text{-Si:H}$), kadmium telúr (CdTe) a chalkopyrity (CuInGaSe₂-CIGS). K pokročilejším tenkovrstvovým technológiám, ktoré vykazujú rýchly pokrok patria napr. články obsahujúce na farbivo citlivý oxid titaničitý (TiO₂) a zmesi polythiofénu a C₆₀ (P3HT:PCBM) [5]. Tieto technológie predstavujú organické solárne články. Solárne články využívajúce tenké vrstvy z india a telúru síce vykazujú vynikajúci pomer medzi cenou prípravy a efektívnosťou, ale ich nevýhodou sú významne menšie zásoby týchto prvkov [6, 7] oproti kremíku. Tenkovrstvové články na báze amorfného a mikrokryštalického kremíka sú vďaka nízkej spotrebe materiálu a nižšej teplote potrebnej pri výrobe vhodným kandidátom pre nízko nákladovú fotovoltickú technológiu. Znevýhodňuje ich však nízka účinnosť spôsobená horšími vlastnosťami absorbérov. Skombinovaním vysokej účinnosti objemových článkov a nízkych produkčných nákladov tenkovrstvových článkov vznikli solárne články s heteropriechodom medzi amorfným a kryštalickým kremíkom (a-Si:H/c-Si). Hoci sa tieto články skladajú z amorfného a kryštalického kremíka, nevykazujú silnú degradáciu výkonu pri osvetlení vyskytujúcu sa pri tenkovrstvových a-Si:H solárnych článkoch, alebo silnú teplotnú závislosť od výkonu vyskytujúcu sa v objemových solárnych článkoch na báze c-Si. Absorbčnou vrstvou článkov s heteropriechodom a-Si:H/c-Si je tenký kremíkový substrát, vďaka čomu je možné dosiahnuť vysokú účinnosť a stabilitu počas osvetlenia [8]. Hlavnou výhodou kremíkových solárnych článkov s heteropriechodom je nízka teplota depozície amorfného kremíka, ktorá je okolo 200 °C. Napriek tomu, je zaujímavé skúmať vplyv podepozičného žihania na takéto solárne články. Motiváciou pre takúto štúdiu môže byť hneď viac dôvodov. Žihanie kremíkových solárnych článkov s heteropriechodom je bežný proces, ktorý je vyžadovaný po sieťotlačí elektród na vrstve transparentného vodivého oxidu (TCO) [9]. Podepozičné žihanie bolo tiež skúmané ako technologický krok s možnosťou zlepšiť pasiváciu a-Si:H na c-Si [10]. Potreba sledovania vplyvu žihania na kremíkové solárne články s heteropriechodom môže vychádzať aj z aplikačného hľadiska. Praktické využitie solárnych článkov v pozemných solárnych elektrárnach, alebo aplikovanie v koncentrátorových systémoch môže viesť k zvýšenej prevádzkovej teplote takýchto článkov.

Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava s podporou projektov VEGA 0507/09, VEGA 1/0377/13 a s podporou projektu ERG. Projekt ERG získal príspevok z programu ENIAC Joint Undertaking na základe zmluvy na grant č. 270722-2 a z národných programov/príspevkov Belgicka, Nemecka, Írska, Talianska, Slovenska, Španielska, Holandska a Spojeného kráľovstva.

Súčasný stav a história danej problematiky

Myšlienka vyrábať solárny článok využívajúci kremíkový heteropriechod je pomerne stará. Prvýkrát bola publikovaná v roku 1974 Waltherom Fuhson a jeho spolupracovníkmi z univerzity Marburg (Nemecko) [11]. Prvý takýto solárny článok bol realizovaný skupinou Hamakawa et al. [12] v roku 1985. Prvotná myšlienka vychádzala z konceptu heteroštruktúry zobrazenej na Obr. 1a, ktorá dosahovala účinnosť 12,3 % [13]. Nízka účinnosť bola spôsobená vysokou hustotou defektov na rozhraní a-Si:H/c-Si (približne pokles účinnosti o 4 % pri hustote defektov 10^{12} cm^{-2}), čo viedlo k zvýšeniu rekombinácie cez poruchové stavy na rozhraní a zníženiu U_{oc} . V roku 1991 prišla firma SANYO s možnosťou ako zvýšiť účinnosť tohto typu solárneho článku. Podstata spočívala vo vložení veľmi tenkej intrinzickej a-Si:H(i) vrstvy (rádovo 5 až 10 nm) medzi vrstvu a-Si:H a kryštalický substrát Obr. 1b, ktorá zlepšila vlastnosti tohto rozhrania. Táto technológia ukázala vynikajúcu povrchovú pasiváciu (rozhrania a-Si:H/c-Si) a zvýšenie účinnosti solárneho článku na 14,8 % [14]. Vytvorená heteroštruktúra dostala označenie HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) [15]. Ďalšou optimalizáciou technológie výroby (napr. obojstranný HIT článok) a použitím nových metód čistenia povrchov dosiahla v roku 2007 firma SANYO na svojich HIT článkoch účinnosť 23 % [16], (na prípravu jednotlivých vrstiev použili plazmou podporenú chemickú depozíciu (PE-CVD)). Snaha o ďalšie zlepšenie účinnosti vyvrcholila v roku 2012, keď firma Panasonic (bývalá divízia SANYO) vytvorila solárny článok s týmito parametrami: rekordná účinnosť 24,7 %, napätie naprázdno 0,750 V, prúdová hustota prúdu nakrátko $39,5 \text{ mA/cm}^2$ a plniaci faktor 83,2 % [17]. Ďalšie úspechy boli dosiahnuté pri použití inej technológie napr. pomocou technológie chemickej depozície z pár s excitáciou na horúcom drôte (HW-CVD) sa podarilo skupine v Národných Laboratóriách pre Obnoviteľné zdroje v USA (NREL) [18], dosiahnuť účinnosť 19,3 %. Skupina v Inštitúte pre Mikrotechniku na Univerzite v Neuchateli (IMT Neuchatel), pomocou plazmou podporenej chemickej depozície z pár pri vysokej frekvencii (VHF-PECVD) vytvorila solárny článok s účinnosťou 19,1 % [19]. Neustále zdokonaľovanie HIT technológie však nezabránilo pokračovať vo vývoji článkov bez pasivácie a-Si:H/c-Si rozhrania. Jedným takýmto prípadom je napr. solárny článok vytvorený skupinou Schmidt et al., ktorý s článkom z kryštalického kremíka n- typu a s BSF tvoreným pomocou vrstvy amorfneho kremíka dopovaného na n- typ dosiahli účinnosť 19,8 %.



Obr. 1 a) Základná štruktúra solárneho článku s a-Si:H/c-Si heteropriechodom. b) Štruktúra solárneho článku s pasivačnou intrinzičnou vrstvou amorfneho kremíka (HIT štruktúra).

Ciele dizertačnej práce

Na základe analýzy súčasného stavu technológie a vývoja moderných fotovoltických článkov s heteropriechodom amorfneho a kryštalickeho kremíka boli stanovené nasledovné ciele pre dizertačnú prácu:

- Oboznámiť sa so súčasným stavom problematiky vývoja fotovoltických článkov. Pozornosť sústrediť na tenkovrstvovú kremíkovú technológiu, jej praktické využitie k dosiahnutiu vysokej účinnosti a výkonu fotovoltického článku.
- Vytvoriť technické podmienky a metodiku merania prúdových a kapacitných charakteristík v širokom rozsahu teplôt pre štruktúry s fotovoltickou aplikáciou.
- Optimalizovať technologický proces podepozičného žihania v FGA a O₂ na výkon kremíkových solárnych článkov s heteropriechodom a-Si:H/c-Si, pripravených ICP-CVD technológiou a PE-CVD technológiou.
- Zistiť vplyv teploty žihania na stabilitu výstupných fotovoltických parametrov solárneho článku na báze amorfneho a kryštalickeho kremíka.
- Rozvinúť metodiku kapacitných a vodivostných meraní na diagnostiku kvality štruktúr s heteropriechodom.
- Na základe výsledkov prúdových a kapacitných meraní zhrnúť získané poznatky na objasnenie vzájomných súvislostí porúch na heteropriechode amorfneho a kryštalickeho kremíka, rekombinačných procesov toku voľných nosičov náboja s možnosťou charakterizácie kvality fotovoltického javu.

Experimentálna časť

Experimenty uvedené v predloženej dizertačnej práci sú zamerané na skúmanie vplyvu podepozičného žihania v FGA a O₂ na výkon kremíkových solárnych článkov s heteropriechodom a-Si:H/c-Si pripravených ICP-CVD a PE-CVD technológiou.

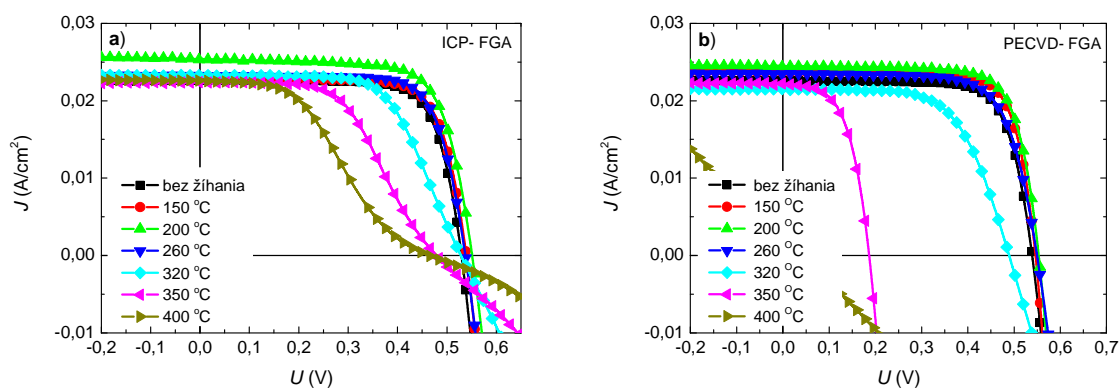
Vplyv podepozičného žihania môžeme analyzovať z dvoch pohľadov. Z pohľadu vplyvu žihania na kvalitu heterorozhrania a amorfneho emitora, alebo z pohľadu vplyvu žihania na výstupný výkon solárneho článku. Analýza vplyvu žihania na vlastnosti heteroštruktúr bola uskutočnená pomocou prúdovo napät'ových a kapacitných meraní.

Za účelom skúmania vyššie spomínaných javov boli pripravené dve skupiny vzoriek. Vzorky boli vyrobené v Inštitúte pre mikroelektroniku a mikrosystémy (IMM) v Catanii v Taliansku, s nasledovnou vertikálnou štruktúrou: c-Si(p+)/c-Si(p)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n)/AZO. Ako substrát bol použitý kremík p- typu s orientáciou (100) a hrúbkou 500 μm. Spodná časť kremíkoveho substrátu obsahuje pp+ priechod, ktorý zabezpečuje dobrý ohmický kontakt s účinkom zadného povrchového poľa (BSF). Vrstva p+ má hrúbku 200 nm a bola vytvorená difúziou trimetylboránu (TMB) pri teplote 1000 °C. Na vrchnú časť substrátu boli nadeponované vrstvy amorfneho kremíka. Vrstvy amorfneho kremíka hrúbky 20 nm a pasivačného intrinzičného amorfneho kremíka hrúbky 10 nm boli pripravené pre dve sady vzoriek použitím rôznych depozičných techník. Pomocou plazmou podporenej chemickej

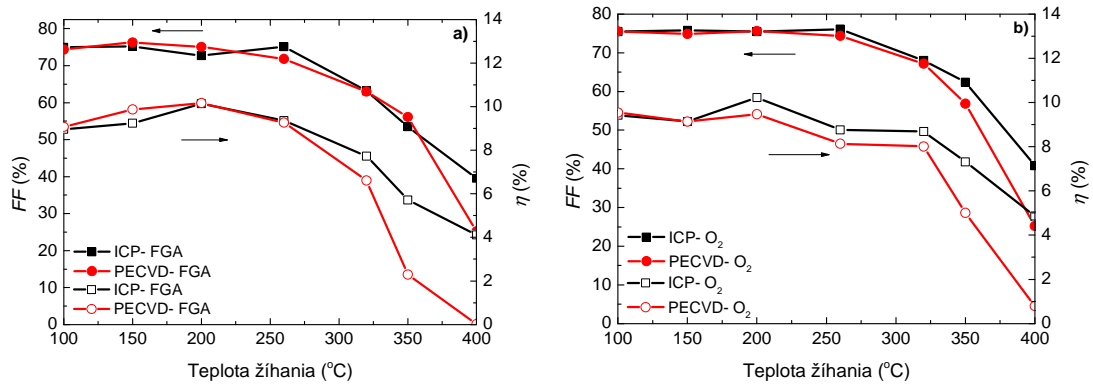
depozície z pár (PE-CVD) pri teplote substrátu 190 °C a indukčne viazanou plazmou podporenej chemickej depozície z pár ICP-CVD pri teplote substrátu 90 °C. Reakčné plyny použité pri príprave intrinzickej vrstvy a amorfnej vrstvy n- typu boli SiH_4 a H_2 a ako dotujúci plyn bol použitý PH_3 . Pred depozíciou intrinzického amorfného kremíka bol kremíkový substrát očistený v roztoku kyseliny fluorovodíkovej (HF). Depozícia vrchnej ZnO:Al vrstvy (AZO) bola vykonaná magnetrónovým naprašovaním a výsledný tvar štruktúry bol definovaný fotolitograficky. Pred depozíciou ZnO:Al vrstvy bola vrstva z amorfného kremíka taktiež očistená v roztoku kyseliny fluorovodíkovej (HF). AZO kruhové kontakty s priemerom 800 μm slúžili na definovanie MESA leptania. Reaktívne iónové leptanie viedlo cez vrstvu ZnO:Al, vrstvu amorfného kremíka až po kryštalický kremík. Na spodnú stranu kryštalického kremíka p+- typu bol na Ústave elektroniky a fotoniky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave naparený celoplošný hliníkový kontakt s hrúbkou 120 nm. V ďalšom kroku boli vzorky narezané na malé kúsky a prilepené pomocou vodivej Ag pasty na päťicu. Vrchný kontakt bol prepojený s päťicou pomocou zlatého drôtika, ktorý bol prilepený pomocou Ag pasty priamo na AZO. Na vyschnutie Ag pasty boli vzorky žíhané po dobu 15 minút pri teplote 100 °C. Posledným krokom prípravy vzoriek bolo ich žíhanie v bežnej O_2 atmosfére, alebo vo formovacom plyne v teplotnom rozsahu od 150 °C do 400 °C po dobu 30 minút po každej sérii meraní. Každý teplotný cyklus sa skladal zo zahriatia vzorky na požadovanú teplotu a žíhania po dobu 30 minút.

Analýza vplyvu podepozičného žíhanie na I - U charakteristiky solárnych článkov s a-Si:H(n)/c-Si(p) heterorozhraním

V prvej časti experimentu sme zisťovali vplyv podepozičného žíhanie na výstupný výkon solárneho článku. Na charakterizovanie výstupného výkonu solárnych článkov sa zvyčajne používajú tri hlavné parametre: prúd nakrátko, napätie naprázdno a plniaci faktor [20]. Tieto parametre môžeme odčítať z I - U charakteristík pri osvetlení Obr. 2.

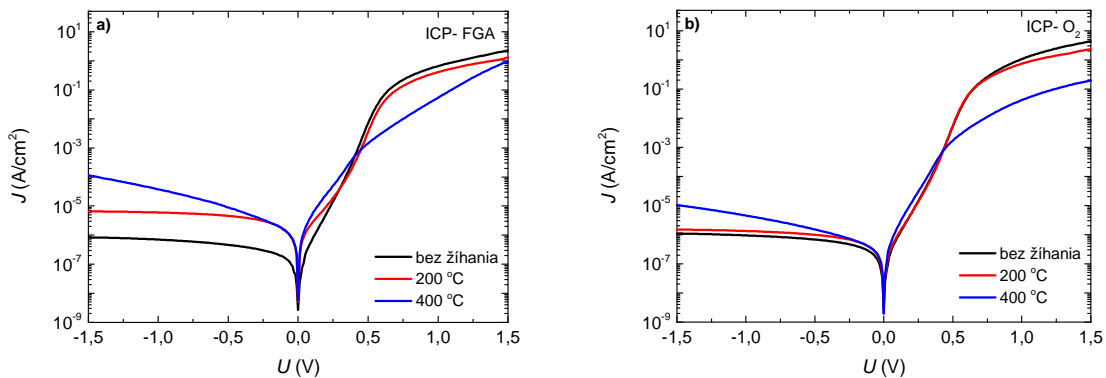


Obr. 2: I - U charakteristiky osvetlených solárnych článkov žíhaných v FGA pri rôznych teplotách: a) ICP- FGA, b) PECVD- FGA.

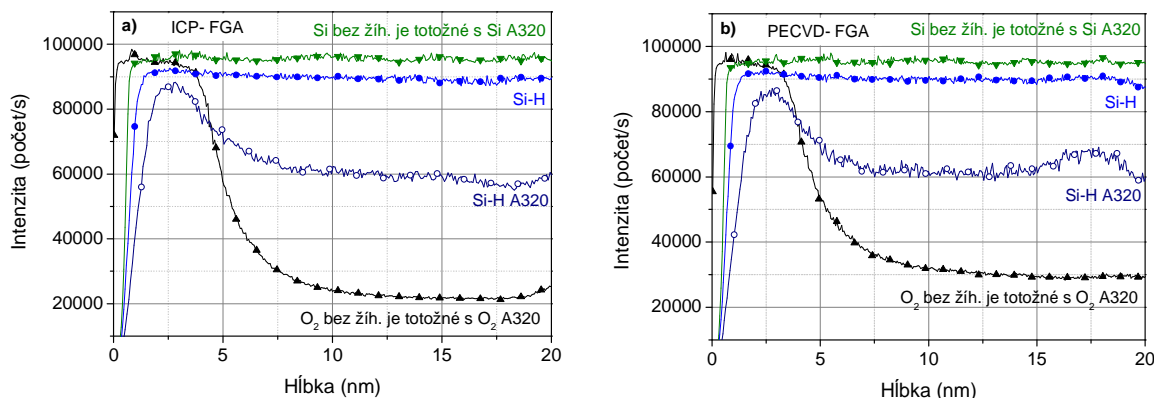


Obr. 3: Základné výstupné parametre solárnych článkov v závislosti od teploty žihania v FGA a O_2 určených z $I-U$ charakteristík za svetla. a) faktor plnenia a účinnosť ICP- FGA a PECVD- FGA vzoriek. b) faktor plnenia a účinnosť ICP- O_2 a PECVD- O_2 vzoriek.

Porovnaním vzoriek, pripravených rôznou technológiou rastu amorfného kremíka môžeme vidieť, že vzorka ICP- FGA vykazuje fotovoltické správanie aj po tepelnom žíhaní pri 400 °C (Obr. 2a) zatiaľ, čo vzorka PECVD- FGA po žíhaní pri 400 °C vykazuje významnú zmenu $I-U$ charakteristík pri osvetlení (Obr. 2b). Táto zmena $I-U$ charakteristiky má za následok zhoršenie fotovoltického výkonu. Tento výrazný pokles fotovoltického účinku vzhľadom ku solárnym článkom pripraveným ICP-CVD bol pozorovaný ako pri žíhaní v FGA tak aj v O_2 . Vplyv podepozičného žihania bol analyzovaný v dvoch teplotných oblastiach. V oblasti s nízkou teplotou sa pri žíhaní v FGA pozorovalo mierne zvýšenie výstupného výkonu, s maximálnou účinnosťou pri teplote 200 °C ako pre FGA- PECVD, tak aj FGA- ICP vzorku (Obr. 3a). Vzorky žíhané v O_2 v oblasti žihania pri nižších teplotách nepreukazovali žiadnu zmenu (Obr. 3b). Zlepšenie účinnosti solárnych článkov naznačuje mierne zlepšenie kvality rozhrania, čo mohlo byť spôsobené jeho lepšou pasiváciou v FGA. Zlepšenie korešponduje s najvyššou hodnotou napätia naprázdno. Zvýšenie výstupného výkonu solárnych článkov po žíhaní mohlo byť tiež spôsobené difúziou vodíka v amorfnej vrstve emitora ako je vysvetlené v práci Pyscho et al. [21]. Autori v práci predpokladajú, že žíhanie aktivuje difúziu slabo viazaného vodíka. Táto difúzia vodíka potom vytvára oveľa stabilnejšie medziatomárne väzby s kremíkom a saturuje poruchové stavy nenasýtených



Obr. 4. Namerané $I-U$ charakteristiky za tmy na vzorkách: a) ICP- FGA, b) ICP- O_2 , c) žíhaných v FGA a pri rôznej teplote.



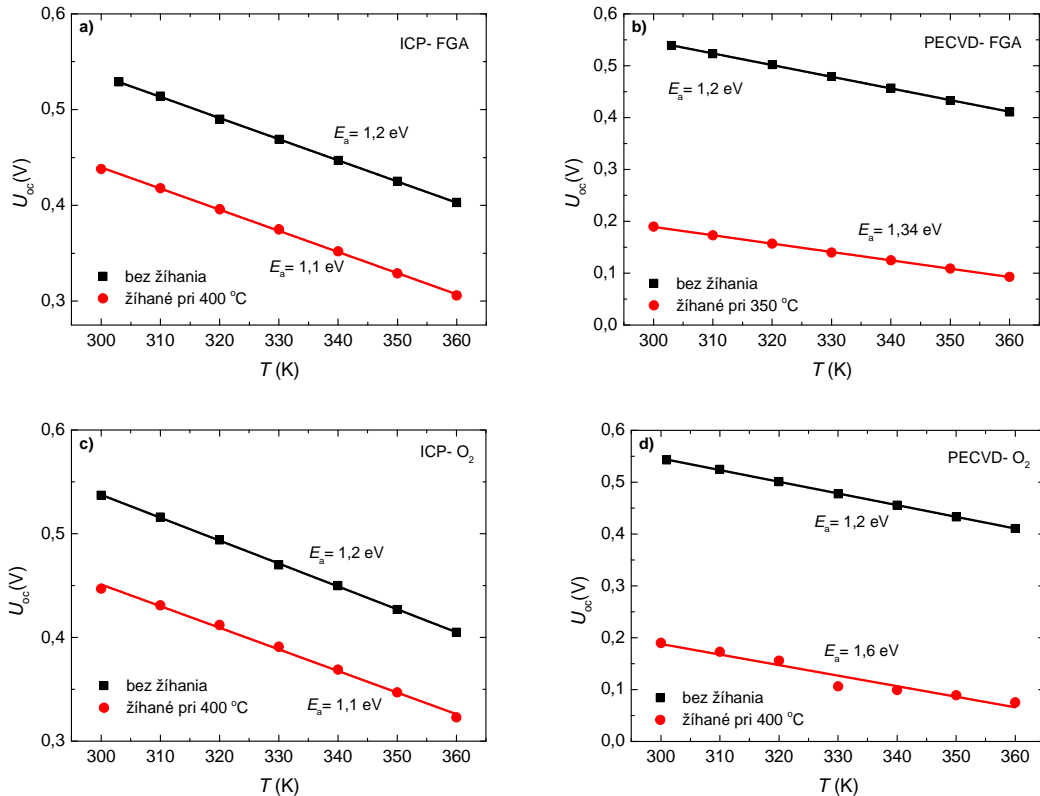
Obr. 5 SIMS odozvy pre vzorky nežíhané a žíhané v FGA pri teplote 320 ° C (A320) po odleptaní ZnO. a) ICP-FGA, b) PECVD- FGA

väzieb v amorfnej vrstve, rovnako ako na rozhraní amorfny kremík/ kryštality kremík. Zlepšenie kvality amorfnej vrstvy emitora, ako aj kvality heterorozhrania, môže byť zodpovedné za zníženie rekombinácie. Ďalej, zo simulácie predloženej v tejto práci [21] vyplýva, že oveľa dôležitejšie je zníženie hustoty defektov heterorozhrania.

Nárast kvality rozhrania vzoriek žíhaných v FGA potvrdzuje aj zmena sklonu nameraných $I-U$ charakteristik za tmy. Aproximáciou tejto lineárnej časti $I-U$ charakteristiky za tmy sme získali faktor ideality, ktorý naznačuje prevládanie iného transportného procesu ako je rekombinácia v oblasti priestorového náboja, ktorá bola pozorovaná pri vzorkách žíhaných v O_2 . Oblasť s teplotami žíhania nad 200 °C sa vyznačovala znížením fotovoltického výstupného výkonu pre vzorky žíhané v FGA, tak aj pre vzorky žíhané v O_2 . Prudké zhoršenie výkonu solárnych článkov po vysokoteplotnom žíhaní sme odôvodnili únikom vodíka. Tento predpoklad sme overili pomocou SIMS merania. Zaznamenaný pokles koncentrácie vodíka v a-Si:H emitore spôsobil zníženie pasivácie nenasýtených väzieb, čoho dôsledkom je zvýšenie koncentrácie porúch v amorfnej vrstve. Degradáciu pasivácie spôsobenú únikom vodíka uvádza De Wolf et al. [22], ktorý tento efekt pozoroval už pri žíhaní pri teplote 240 °C počas 30 min.

Na hlbšiu analýzu elektrofyzikálnych vlastností a-Si:H(n)/c-Si(p) heteroštruktúr boli využité aj teplotné merania $I-U$ závislostí. Teplotná závislosť $I-U$ charakteristik je spôsobená predovšetkým teplotnou závislosťou rovnovážnej koncentrácie nosičov náboja a to elektrónov alebo dier. Je zrejme, že by sme mali byť schopní zo štúdie teplotnej závislosti rekombináčného prúdu určiť aktivačnú energiu a následne rozlišovať prevládajúci vplyv procesu rekombinácie na rozhraní alebo v objeme. Vzhľadom k tomu je napätie naprázdno U_{oc} fotovoltický parameter, ktorý je bezprostredne ovplyvňovaný rekombináciou. Závislosť napätia naprázdno od teploty je pre merané vzorky zobrazená na Obr. 6. Na týchto charakteristikách môžeme pozorovať silnú lineárnu závislosť napätia naprázdno od teploty merania. Pomocou lineárnej aproximácie tejto závislosti a využitím vzťahu

$$U_{oc} \approx \frac{E_a}{q} - \frac{n_{id}kT}{q} \ln \left(\frac{J_{00}}{J_{sc}} \right). \quad (1.1)$$



Obr. 6. Závislosť napätia naprázdno od teploty merania oboch sérií vzoriek, bez žihania a po žíhaní pri teplote 400 °C. a) vzorka ICP- FGA, b) vzorka PECVD- FGA, c) vzorka ICP- O₂, d) vzorka PECVD- O₂

môžeme získať hodnotu aktivačnej energie E_a solárneho článku. Z rovnice 1.1 vyplýva, že aktivačná energia je rovná hodnote napätia naprázdno pri teplote 0 K a preto ju môžeme určiť z priesečníka závislosti U_{oc} od teploty s osou y . Aktivačná energia získaná z tejto analýzy naznačila, že dominantným transportným mechanizmom je rekombinácia v OPN amorfneho kremíka, čo je spôsobené práve zvýšením porúch v a-Si:H. Takéto zvýšenie hustoty porúch v objeme vrstvy má priamy účinok na a-Si:H/c-Si rozhranie, čo sa prejaví na zvýšení rekombinácie prostredníctvom pascí rozhrania, následne aj zníženia napätia naprázdno.

Z hľadiska optimalizácie podepozičného žihania sa dosiahli najlepšie výsledky výkonu solárnych článkov prvej sady vzoriek pripravených technológiou ICP-CVD aj PE-CVD s teplotou podepozičného žihania pri 200 °C v prostredí FGA. Ďalej bola pozorovaná lepšia odolnosť voči vysokej teplote pre solárne články s heteropriechodom a-Si:H(n)/c-Si(p) pripravené depozičnou technikou ICP-CVD pri oboch typoch žihania.

Analýza kvality a-Si: H (n)/c-Si (p) rozhrania pomocou kapacitných metód

Analýza $I-U$ charakteristík nameraných na vzorkách žíhaných v rôznych prostrediach a pri rôznych teplotách nám poskytne základný pohľad na to, ako podepozičné žihanie vplyva na solárny článok s heteropriechodom a-Si:H(n)/c-Si(p). Heteropriechod medzi a-Si:H(n)/c-Si(p) je veľmi zaujímavý pre fotovoltaické aplikácie vzhľadom k vysokému potenciálu účinnosti solárneho článku s týmto heteropriechodom [23]. Okrem toho solárne

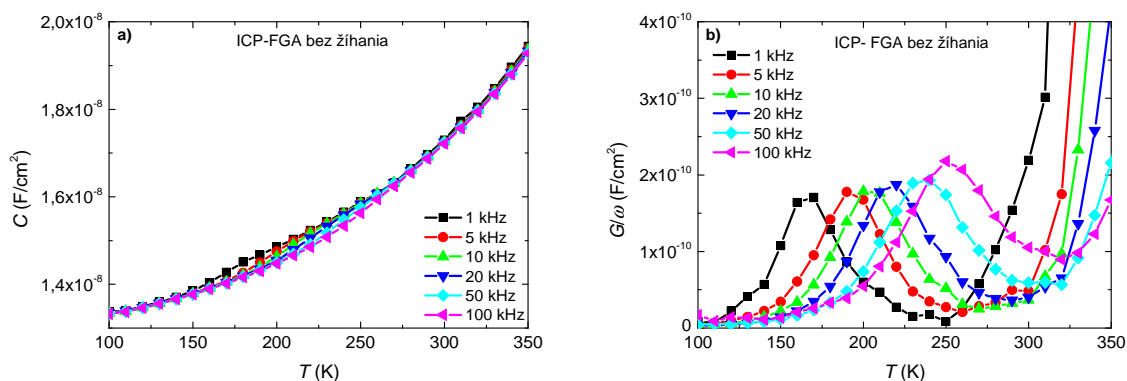
články s heteropriechodom a-Si:H(n)/c-Si(p) môžu byť vyrobené pri nízkej teplote, čo umožňuje významne znížiť náklady výroby.

Účinnosť článku je výrazne závislá na vlastnostiach a-Si:H/c-Si rozhrania, tj. od prípravy c-Si povrchu, od depozičných parametrov a-Si:H vrstvy a jej pasivácie. Preto vplyv podepozičného žihania na pasiváciu a-Si:H vrstvy a rozhranie a-Si:H/c-Si predstavuje dôležitú otázku pri optimalizácii solárneho článku z hľadiska dosiahnutia vysokého výstupného výkonu. Na skúmanie substrátu a vlastností rozhrania jednotlivých vrstiev solárnych článkov sú obzvlášť vhodné kapacitné merania, alebo všeobecnejšie povedané merania admitancie. Tieto meracie metódy sú založené na malom signáli kapacity, ktorý je citlivý na záchyt nosičov a emisiu zo záchytných stavov ($C = dQ/dU$). Existuje veľa meracích techník využívajúcich túto citlivosť a pokúšajúcich sa preskúmať hustotu stavov zakázaného pásma. Na skúmanie vplyvu podepozičného žihania na kvalitu a-Si:H(n)/c-Si(p) heterorozhrania v priloženej práci použijeme dve z nich.

Ako prvú metódu sme použili metódu merania kapacity a vodivosti v závislosti od teploty a frekvencie ($C-T-\omega$ a $G-T-\omega$) za tmy. Druhá metóda bola zameraná na meranie kapacity ako funkcia frekvencie v priepustnom smere ($C-V-F$) pri osvetlení.

Na zmeranej $C-T-\omega$ charakteristike bol identifikovaný kapacitný schod pri nízkych teplotách a jemu zodpovedajúce maximum vodivosti na $G-T-\omega$ charakteristike (Obr.7). Pomocou interpolácie týchto maxím bola vyhotovená Arrheniová závislosť a z jej smernice bola určená aktivačná energia. Keďže sa maximum $G-T-\omega$ charakteristiky nachádzalo pri nízkej teplote, mohli sme ho k aktivácii transportu nosičov náboja, respektíve k odozve stavov v oblasti Fermiho hladiny v a-Si:H emitore.

Vypočítaná aktivačná energia zodpovedá rozdielu medzi dolným okrajom vodivostného pásma a Fermiho hladinou v a-Si:H vrstve, čo zodpovedá aktivačnej energii dopovania emitora, ktorej hodnota pre všetky vzorky bez žihania bola v rozmedzí 0,2 až 0,23 eV. Žíhaním pri teplotách nad 320 °C došlo k nárastu hodnôt aktivačnej energie, teda k posunu Fermiho hladiny v a-Si:H vrstve. Najzreteľnejší posun sme pozorovali pri vzorkách pripravených PE-CVD technológiou, kde aktivačná energia pre PECVD- FGA mala hodnotu 0,55 eV a pre PECVD- O₂ bola 0,41 eV. Posun Fermiho hladiny súvisí so zmenou koncentrácie voľných nosičov náboja ako dôsledok nárastu hustoty porúch v tejto vrstve,



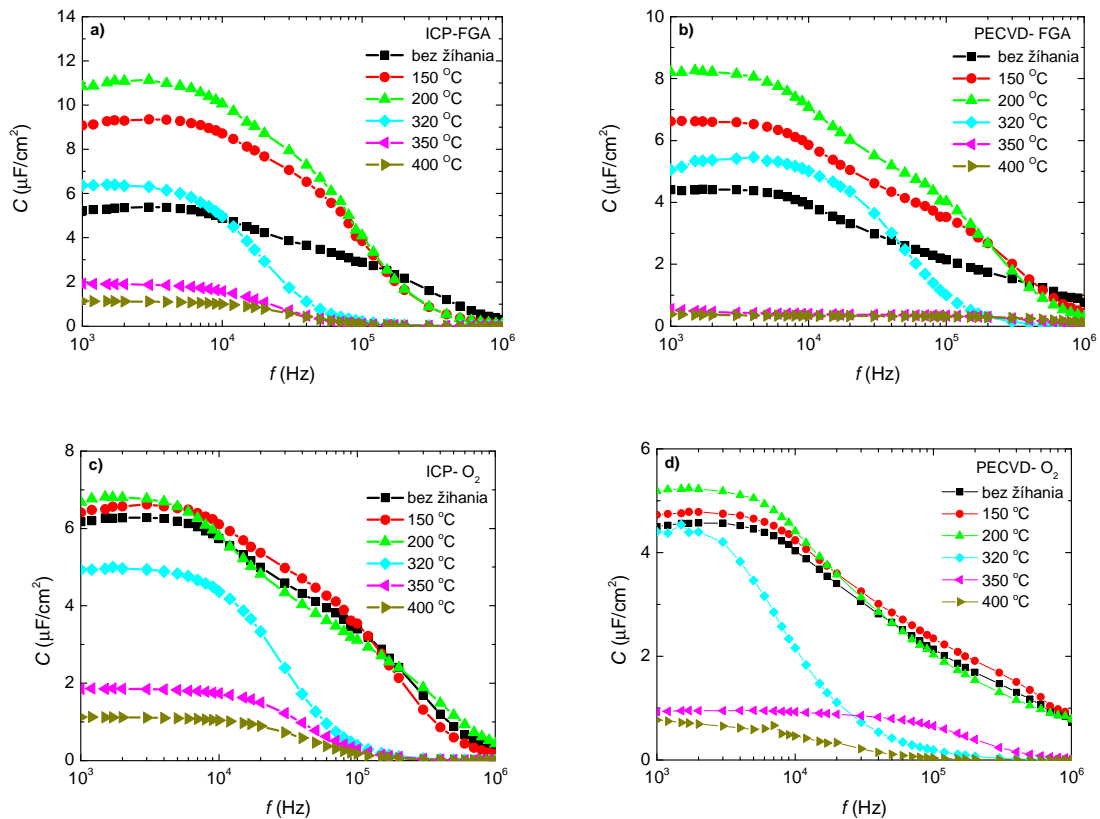
Obr. 7. Teplotné a frekvenčné závislosti kapacity (vľavo) a vodivosti (v pravo) merané za tmy pri predpätí 0 V vzorky ICP- FGA bez žihania.

ktoré mohli byť spôsobené únikom vodíka zachyteného na SIMS odozvách.

Zvýšená hustota porúch v objeme a-Si:H kompenzuje zámerné dopovanie fosforom, ktoré spôsobí zníženie Fermiho hladiny vo vrstve. Zníženie úrovne Fermiho hladiny v amorfnej vrstve emitora môže zapríčiniť zmenu zarovnania pásiem na a-Si:H/ZnO rozhraní a môže byť jedným zo zdrojov parazitnej bariéry a S- tvaru pozorovaného pri $I-U$ charakteristikách pri osvetlení. Pritomnosť pozorovaného zakrivenia $I-U$ charakteristiky môže mať taktiež pôvod vo vysokej hustote poruchových stavov na a-Si:H/c-Si rozhraní, v dôsledku čoho mohlo dôjsť ku ukotveniu Fermiho hladiny v tomto rozhraní [21].

Pomocou $C-T-\omega$ a $G-T-\omega$ merania sa nám nepodarilo jednoznačne vyjadriť hustotu pascí rozhrania D_{it} . Presnosť metódy je v určení energetickej distribúcie pascí rozhrania v rade $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Keďže sa nám nepodarilo nájsť maximá vodivosti pri vyšších teplotách $G-T-\omega$ charakteristík, zodpovedajúce za emisiu elektrónov a dier z poruchových stavov rozhrania, môžeme konštatovať, že hustota pascí skúmaných vzoriek bola nižšia a uplatnenie poruchových stavov pri S- zakrivení je málo pravdepodobné.

Na vyjadrenie veľkosti hustoty pascí rozhrania v a-Si:H/c-Si bola použitá metóda merania závislosti kapacity od frekvencie pri osvetlení, ktorej citlivosť na D_{it} stúpla na $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Porovnaním nízkofrekvenčných kapacít (C_{LF}) skúmaných vzoriek sa zistilo, že zlepšenie pasivácie amorfného kremíka a a-Si:H/c-Si heterorozhrania bolo pri podmienkach podepozičného žihania v FGA pri 200 °C. Pre obe vzorky ako ICP-FGA, tak aj



Obr. 8. $C-V-F$ charakteristiky pri osvetlení vzoriek pripravených PECVD a ICP-CVD technológiou žíhaných v FGA a v O_2 pri rôznych teplotách a priepustnom napätí -0,55V. a) ICP- FGA, b) PECVD- FGA, c) ICP- O_2 , d) PECVD- O_2 .

PECVD- FGA dosiahla nízkofrekvenčná kapacita najvyššiu hodnotu. Žíhanie v kyslíku do 200 °C nepreukázalo žiadne zmeny (Obr. 8c, d). D. Zhang et al. vo svojej práci dospel k podobnému nepreukázalo žiadne zmeny (Obr. 8 c, d). D. Zhang et al. vo svojej práci dospel k podobnému výsledku, keď žíhanie v O₂ pri nižších teplotách nemalo žiadny vplyv na pasiváciu rozhrania [24].

Ďalej sa nám potvrdilo, že žíhanie v FGA aj v O₂ nad 350 °C zhorší vlastnosti pasivácie a-Si:H a rozhrania a-Si:H/c-Si, kedy nastal výrazný pokles nízkofrekvenčnej kapacity. Takéto zníženie nízkofrekvenčnej kapacity je spôsobené znížením nadbytočných voľných nosičov náboja v dôsledku rekombinácie narozhraní.

Pomocou metódy merania závislosti kapacity od frekvencie sme ukázali, že nízkofrekvenčné plató kapacitného merania pri osvetlení s pripojeným priepustným predpätím v blízkosti U_{oc} je vynikajúci indikátor kvality rozhrania solárneho článku.

Hlavné prínosy dizertačnej práce

Praktický prínos práce predstavujú výsledky elektrických meraní a ich analýza pri optimalizácii procesu teplotného žíhania. Skúmal sa vplyv podepozičného žíhania v FGA a O₂ na výkon kremíkových solárnych článkov s heteropriechodom a-Si:H/c-Si pripravených ICP-CVD technológiou a PE-CVD technológiou.

Vedecký prínos práce spočíva v hlbšom poznaní elektrofyzikálnych vlastností kremíkového solárneho článku s heteropriechodom a-Si:H/c-Si. Zavedením nových metodík kapacitných meraní a analýzou teplotných závislostí prúdu, kapacity a vodivosti heteroštruktúr bola zistená redukcia pascií na rozhraní amorfného a kryštalického kremíka pri vhodne zvolených podmienkach stabilizačného podepozičného žíhania v FGA.

Hlavné výsledky a nové poznatky, ktoré dizertačná práca prináša môžeme zhrnúť do nasledovných bodov:

- Rozšírenie pracoviska na elektrickú diagnostiku polovodičových štruktúr pre fotovoltaické aplikácie zavedením kryoteplotných meraní a využitím solárneho simulátora $I-U$ meraní.
- Zavedenie nových kapacitných metodík na určovanie kvality emitora z amorfného kremíka a heterorozhrania a-Si:H/c-Si.
- Pomocou teplotných $I-U$ meraní pri presne definovanom osvetlení a meraní prúdu za tmy bola zaznamenaná zmena charakteru rekombinácie voľných nosičov náboja v objeme amorfného kremíka a rozhrania a-Si:H/c-Si, spôsobená teplotným namáhaním.
- Zistenie výrazného vplyvu teploty podepozičného žíhania na prúdový mechanizmus s prejavom útlmu fotovoltaického účinku. Rastom teploty dochádza k redukcii vodíka v amorfnom emitore, čo má za dôsledok zvýšenie hustoty nesaturovaných väzieb v amorfnej vrstve Si a rozhrania a-Si:H/c-Si.
- Optimalizácia stabilizačného podepozičného žíhania fotovoltaických článkov pripravených technológiou ICP-CVD s teplotou žíhania pri 200 °C v prostredí

FGA. Málo výrazná zmena fotovoltických parametrov pri žíhaní v O_2 vzhľadom k podmienkam žíhania v prostredí FGA.

- Zníženie výkonu fotovoltických článkov pri zvýšení teploty podepozičného žíhania v prostredí FGA aj O_2 a to ako v prípade technológie ICP-CVD, tak aj PE-CVD.
- Úplná strata fotovoltického charakteru solárnych článkov pripravených PE-CVD technológiou po stabilizačnom žíhaní pri teplote $400\text{ }^\circ\text{C}$ v FGA aj v O_2 .
- Z nameraných frekvenčných a teplotných závislostí kapacity a vodivosti v podmienkach za tmy, bez pripojeného napätia, ako aj frekvenčných $C-V-F$ meraní pri osvetlení štruktúry, v priepustnom stave a-Si:H(n)/c-Si(p) heteropriechodu, bola zaznamenaná a potvrdená fyzikálna predstava zmien fotovoltických parametrov, ktorá bola získaná z prúdových meraní.
- Určením veľkosti aktivačnej energie z teplotných meraní kapacity a vodivosti v širokom frekvenčnom pásme sa vyjadrila úroveň kvality amorfnej vrstvy a rozhrania a-Si:H/c-Si.
- Zvyšovanie hustoty porúch v amorfnej vrstve Si a pascí na rozhraní a-Si:H/c-Si vplyvom teplotného namáhania nad $200\text{ }^\circ\text{C}$ bolo spôsobené najmä únikom vodíka. Zvýšenie hustoty pascí rozhrania pozorované z nízkofrekvenčných kapacitných meraní v priepustnom smere a v súvislosti s tým aj nárast aktivačnej energie vysvetľujeme poklesom voľných nosičov náboja rekombináciou, prostredníctvom pascí rozhrania a emitora z amorfného kremíka. Uvedené zmeny koncentrácie nosičov náboja a tým aj posun Fermiho hladiny má negatívne príčiny na základné fotovoltické parametre.

Záver

V predloženej práci je uvedená analýza problematiky vplyvu podepozičného žíhania v FGA a O_2 na výkon kremíkových solárnych článkov s heteropriechodom a-Si:H/c-Si pripravených pomocou ICP-CVD a PE-CVD technológie. Analýzu vplyvu podepozičného žíhania sme rozdelili na dve časti. V prvej časti sme sa venovali prúdovo napäťovým meraniam a v druhej kapacitným metódam analýzy solárnych článkov.

V časti venovanej prúdovo napäťovým meraniam sme skúmali vplyv podepozičného žíhania na výstupný výkon solárnych článkov s heteropriechodom a-Si:H/c-Si. Experimenty ukázali, že so zvyšovaním teploty žíhania boli pozorovateľné dva trendy. Prvý trend mal charakter, ktorý ukázal, že žíhanie v FGA pri teplotách nižších ako $200\text{ }^\circ\text{C}$ zvyšuje výstupný výkon solárnych článkov pripravených obidvomi technológiami. Zlepšenie bolo pripísané aktivácii difúzie slabo viazaného vodíka a relaxácii a-Si:H mriežky. Tieto dva vplyvy mali za následok zlepšenie kvality amorfného kremíka a pasivácie a-Si:H/c-Si heterorozhrania. Najvyššia hodnota výstupného výkonu bola pri oboch vzorkách dosiahnutá žíhaním v FGA pri teplote $200\text{ }^\circ\text{C}$. Žíhanie v O_2 pri teplotách nižších ako $200\text{ }^\circ\text{C}$ nepreukazovalo také výrazné

zmeny na výstupnom výkone solárnych článkov pripravených obidvomi technológiami, ako tomu bolo pri žíhaní v FGA.

Druhý trend mal charakter, ktorý ukázal, že ďalšie zvyšovanie teploty žíhania v FGA aj v O₂ až po teplotu 400 °C spôsobilo postupne zhoršovanie ažúplnú stratu fotovoltického charakteru pre vzorky pripravené PE-CVD technológiou. Vzorky pripravené ICP-CVD technológiou ešte aj po žíhaní pri 400 °C preukazovali merateľný výstupný výkon. Predpokladom zhoršenia výstupného výkonu bolo unikanie vodíka a tým zvýšenie hustoty nenasýtených väzieb v amorfnej vrstve kremíka a na a-Si:H/c-Si heterorozhraní. Tento predpoklad bol overený zmeraním SIMS odozvy.

Na hlbšiu analýzu elektrofyzikálnych vlastností a-Si:H(n)/c-Si(p) heteroštruktúr boli využité aj teplotné prúdovo napäťové merania.

V časti práce venovanej kapacitným metódam sme skúmali vplyv podepozičného žíhania na kvalitu emitora z amorfného kremíka a heterorozhrania a-Si:H/c-Si. Na analýzu vlastností aktívnej časti emitora boli použité dve modifikované kapacitné metódy. Prvá metóda bola založená na meraní kapacity a vodivosti s nulovým predpäťím v závislosti od teploty a frekvencie za tmy (metóda $C-T-\omega$ a $G-T-\omega$). Druhá metóda bola realizovaná s priepustným predpäťím v blízkosti napätia naprázdno U_{oc} pri osvetlení ($C-V-F$ metóda).

Analýzou $C-T-\omega$ a $G-T-\omega$ meraní bolo potvrdené zvýšenie hustoty porúch v objeme a-Si:H pri teplotách žíhania nad 350 °C pre vzorky pripravené PE-CVD technológiou. Takéto zvýšenie hustoty porúch kompenzuje zámerné dopovanie fosforom. Dôsledkom je zníženie Fermiho hladiny v amorfnej vrstve. To môže naznačovať, že zníženie úrovne Fermiho hladiny v amorfnej vrstve emitora zmení zarovnanie pásiem na a-Si:H/ZnO rozhraní. Energetická diskontinuita na rozhraní amorfnej vrstvy s vrstvou ZnO môže byť zdrojom parazitnej bariéry, čo vysvetľuje zmeny S-tvaru nameraných $I-U$ charakteristík pri osvetlení. Ďalšou možnou príčinou vzniku atypického S-tvaru je zmena v nespojitosti energetických pásiem medzi amorfným a kryštalickým kremíkom. Miera nespojitostisa môže meniť s obsahom vodíka v a-Si:H vrstve [24], v dôsledku čoho dochádza tiež k výraznému zvýšeniu hustoty pascí na a-Si:H/c-Si heterorozhraní [21].

Dva trendy podepozičného žíhania pozorované pri prúdových meraniach boli zaznamenané aj pomocou kapacitnej $C-V-F$ metódy. Obe série vzoriek ako ICP-FGA, tak aj PECVD-FGA dosiahli najvyššiu hodnotu nízkofrekvenčnej kapacity pri žíhaní v FGA pri teplote 200 °C. Zvýšená difúzna kapacita bola spôsobená zvýšením hustoty minoritných nosičov ako dôsledok zníženia rekombinačných procesov na rozhraní a v objeme amorfného kremíka. Takýto charakter nízkofrekvenčnej kapacity potvrdil zlepšenie kvality amorfného kremíka a pasivácie heterorozhrania a-Si:H/c-Si. Žíhanie v kyslíku do 200 °C nepreukázalo žiadne zmeny, ako bolo pozorované aj pri prúdovo napäťových meraniach. Zníženie nízkofrekvenčnej kapacity vzoriek žíhaných v FGA aj v O₂ nad 350 °C potvrdilo predpoklad z prúdovo napäťových meraní o zhoršení vlastností a-Si:H a heterorozhrania a-Si:H/c-Si.

Summary

The submitted thesis presents an analysis of the impact of post-deposition annealing in FGA and O₂ on the performance of silicon solar cells with heterojunction a-Si:H/c-Si prepared by ICP-CVD and PE-CVD technologies. The impact analysis of post-deposition annealing has been divided into two parts. The first part was dedicated to the current-voltage measurements and the second part to the capacitance methods of solar cells analysis.

In the section dedicated to the current-voltage measurements, we investigated the effect of post-deposition annealing on the output performance of the silicon heterojunction solar cells. The experiments have shown two trends with increasing annealing temperature. The first effect indicates a slight improvement of the output performance of solar cells with annealing in FGA at temperatures up to 200 °C for samples prepared with both technologies. The improvements have been attributed to the thermal activated diffusion of weakly bonded hydrogen and to the relaxation of a-Si:H lattice. These two effects have resulted in an improving of the quality of amorphous silicon and the passivation of a-Si:H/c-Si heterointerface. The highest value of the output performance was achieved on both samples by annealing in the FGA at temperature of 200 °C. Annealing in O₂ at temperatures below 200 °C did not show such significant changes in the output performance of solar cells prepared by both technologies as was the case in the FGA annealing.

The nature of the second trend showed that further increase of the annealing temperature in FGA and O₂ up to 400 °C caused a complete loss of the photovoltaic character for samples prepared by PE-CVD technology. The samples prepared by ICP-CVD technology, even after annealing at 400 °C showed measurable output performance. It is suggested that worsening of the output performance was due to the hydrogen outdiffusion and thus increase of the dangling bonds density in the amorphous silicon layer and at the a-Si:H/c-Si heterointerface. This assumption was verified by the measurements of SIMS spectrum.

For deeper analysis of electrophysical properties of a-Si:H(n)/c-Si(p) heterostructures were also utilized thermal current-voltage measurements.

In the section of work dedicated to the capacitance methods, we examined the effect of post-deposition annealing on the quality of the a-Si:H emitter and a-Si:H/c-Si heterointerface. There were two modified capacitance methods used for the analysis of the active part of emitter. The first method was based on measuring of the capacitance as well as conductance at zero bias depending on the temperature and frequency in the dark ($C-T-\omega$ and $G-T-\omega$). The second method was realized with forward bias close to the open-circuit voltage and under illumination ($C-V-F$ method). The analysis of the $C-T-\omega$ and $G-T-\omega$ measurements confirmed an increased density of defects in the volume of a-Si:H at the annealing temperatures above 350 °C for the samples prepared by PE-CVD technology. This increased density of defects compensates for the intentional phosphorus doping and causes lowering of the Fermi level in the amorphous layer. Therefore, it can be suggested that the lowering of the Fermi level in the amorphous layer of emitter changes the band alignment at the a-Si:H/ZnO interface. Energy discontinuity at the a-Si:H/ZnO interface can be a source of the parasitic barrier. This explains

the changes of S- shape observed in J - V curves under illumination. Another possible reasons for the S- shape occurrence could be the change of the band discontinuity between amorphous and crystalline silicon, which can vary with the hydrogen content in the a-Si:H layer [24] as well as strong increase of the defect at the a-Si:H/c-Si heterointerface [21].

Two trends of the post-deposition annealing observed in the current measurements were recorded also by using a capacitance method C - V - F . Both series of samples, ICP-FGA as well as FGA-PECVD, reached the highest value of the low- frequency capacity in the FGA annealing at 200 °C. The increased diffusion capacity was caused by increasing the density of minority carriers as a consequence of reduced recombination processes at the interface as well as in the volume of the amorphous silicon. Such a character of low- frequency capacity confirmed an improvement of the quality of amorphous silicon and passivation of a-Si:H/c-Si heterointerface. Annealing in oxygen up to 200 °C showed no changes, as observed in current-voltage measurements. Reduction of the low- frequency capacity of the samples annealed in FGA and O₂ above 350 °C confirmed the assumption from the current-voltage measurements about the deterioration of the a-Si:H and a-Si:H/c-Si heterointerface properties.

Zoznam citovanej literatúry

- [1] Schiermeier Q., Tollefson J., Scully T., Witze A., Morton O., Energy alternatives: Electricity without carbon. In: Nature, vol. 454, 2008, pp. 816- 823.
- [2] Gray J.,L., The Physics of the Solar CellIn: Luque A., Hegedus S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley and Sons, 2003, pp. 907-912. ISBN: 0471491969.
- [3] Zeman M., Introduction to photovoltaic solar energy.
http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/SolarCells/res00025/CH1_Introduction_to_PV_solar_energy.pdf
- [4] Swanson, R.M. A Vision for Crystalline Silicon Photovoltaics. In: Prog. Photovolt: Res. Appl, 2006, 14, pp. 443–453.
- [5] Goetzberger, A., Hebling, C., Schock, H.-W., Photovoltaic materials, history, status and outlook. In: Mater. Sci. Eng. R, vol 40, 2003, pp. 1–46.
- [6] Feltrin A., Freundlich A., Material challenges for terawatt level deployment of photovoltaics. In: Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference, vol. 2, 2006, pp. 2469-2472.
- [7] Feltrin A., Freundlich A., Material considerations for terawatt level deployment of photovoltaics. In: Renewable Energy, vol. 33, 2008, pp. 180-185.
- [8] Mikolášek M., Meranie a simulácia kremíkových heteroštruktúr pre pokročilé solárne aplikácie. Dizertačná práca, L. Harmatha (školiteľ) Bratislava 2011.

- [9] Wolf S. De, Descoedres A., Holman Z. C., Ballif C., High-efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: A Review. In: Green, vol. 2, 2012, pp. 7- 24.
- [10] Schulze T. F., Beushausen H. N., Leendertz C., Dobrich A., Rech B., Korte L., Interplay of amorphous silicon disorder and hydrogen content with interface defects in amorphous/crystalline silicon heterojunctions. In: Applied Physics Letters, vol. 96, 2010, pp. 252102.
- [11] Fuhs W., Niemann K., Stuke J.: Heterojunctions of amorphous silicon and silicon single crystals. In: Tetrahedrally Bonded Amorphous Semiconductors, AIP Conference Proceedings, vol. 20,1974, pp. 345–350.
- [12] Hamakawa, Y. et al., New types of high efficiency solar cells based on a-Si. In: Applied Physics Letters, vol. 43, 1983, pp. 644-646.
- [13] Tanaka M., Taguchi M., Marsuyama T., Sawada T., Hanafusa, H., Kuwano, Y., Development of New a-Si/c-Si Heterojunction solar cells: ACJ-HIT (Artificially constructed junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer). In: Jappanies Journal of Applied Physics, vol. 31, 1992, pp. 3518-3522.
- [14] Sawada, T., Terada, N., Tsuge, S., Baba, T., Takahama, T., Wakisaka, K., Tsuda, S., Nakano, S., High-efficiency a-Si/c-Si heterojunction solar cell. In: Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion – WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC), vol. 2, 1994, pp. 1219-1226.
- [15] Noguchi S., Iwata H., Sano K., United States Patent 5,213,628, May 25, 1993.
- [16] Mishima T., Taguchi M., Sakata H., Maruyama, E., Development status of highefficiency HIT solar cells. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 95, 2011 pp. 18–21.
- [17] Green M.A., Emery k., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D., Solar cell efficiency tables (version 43). In: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 22, 2014. Fujii R., Gotoh Y., Liao M.Y., Tsuji H., Ishikawa J., Work function measurement of transition metal nitride and carbide thin films. In: Vacuum, vol. 80, 2006, pp. 832 – 835
- [18] Wang Q. et al., Efficient heterojunction solar cells on p-type crystal silicon wafers. In: Applied Physics Letters, vol. 96, 2010, pp. 013507.
- [19] Fesquet L., Olibet S., Vallat-Sauvain E., Shah A., Ballif C., High quality surface passivation and heterojunction fabrication by VHF-PECVD deposition of amorphous silicon on crystalline Si: Theory and experiments. In: Proceedings of the 22th EU-PVSEC, Milano, Italy, 2007.
- [20] Green M.A., Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, Englewood Cliffs, N.J. :Prentice-Hall, 1982, ISBN-10: 0138222703

- [21] Pysch D., Ziegler J., Becker J.-P., Suwito D., Janz S., Glunz S. W., Hermle M., Stretched-exponential increase in the open-circuit voltage induced by thermal annealing of amorphous silicon-carbide heterojunction solar cells. In: Applied Physics Letters, vol. 94, 2009, p. 093510.
- [22] Wolf S. De, Kondo M., Boron-doped a-Si:H/c-Si interface passivation: degradation mechanism. In: Applied Physics Letters, vol. 91, 2007, pp.112109.
- [23] Tanaka M., Okamoto S., Tsuge S., Kiyama S., Development of HIT solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialization of highest performance hit modules. In: Proceedings of the Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, vol. 1, 2003, pp. 955–958.
- [24] Zhang D., Tavakoliyaraki A., Wu Y., van Swaaij R. a. C. M. M., Zeman M., Influence of ITO deposition and post annealing on HIT solar cell structures. In: Energy Procedia, vol. 8, 2011, pp. 207–213.

Články autora

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch:

- [1] Mikolášek M., Nemeč M., Vojs M., Jakabovič J., Řeháček V., Zhang D., Zeman M., Harmatha L.,: Electrical transport mechanisms in amorphous/crystalline silicon heterojunction: Impact of passivation layer thickness. In: Thin Solid Films, ISSN 0040-6090, vol., 558 (2014), s. 315-319.
- [2] Mikolášek M., Stuchlíková Ľ., Harmatha L., Vincze A., Nemeč M., Racko J., Breza J.,: Capacitance study of carrier inversion at the amorphous/crystallinesilicon heterojunction passivated by different thicknesses of i-layer. In: Applied Surface Science, 2014

Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

- [1] Mikolášek M., Nemeč M., Kováč Jaroslav, Harmatha Ladislav, Minařík Lukáš,: Electrical and capacitance diagnostic techniques as a support for the development of silicon heterojunction solar cells. In: Journal of Electrical Engineering, ISSN 1335-3632, vol., 65, No. 2 (2014), s. 111-115.

Príspevky publikované na zahraničných vedeckých konferenciách

- [1] Benkovská J., Stuchlíková L., **Nemec M.**, Šebok J., Stuchlík M., Rybár, J., Petrus M.,: Renewable Energy Sources for Pupils of Elementary Schools. In: Nové technologie ve výuce. 5. ročník [elektronický zdroj]: Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2011. Brno : Masarykova univerzita, 2012, ISBN 978-80-210-5942-9, CD-ROM.
- [2] Mikolášek M., **Nemec M.**, Kováč J., Vincze A., Foti M., Gerardi C., Mannino G., Valenti L., Lombardo S.,: Impact of Annealing on the Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Heterojunctions Solar Cells. In: 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition : Proceedings. Paris, France, 30 September - 4 October 2013. München : WIP, 2013, ISBN 3-936338-33-7, s. 1903-1907.
- [3] Příbytný P., Mikolášek M., Marek J., Donoval D., Chvála A., Molnár M., **Nemec M.**,: Analysis and Optimization of Silicon Heterojunction Solar Cells with Back Contact Arrangement by 2-D Numerical Modeling and Simulation. In: WOCSDICE 2013 : 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Warnemünde, Germany, May 26- 29, 2013. Berlin : Ferdinand Braun Institut, Leibnitz Institut für Höchstfrequenztechnik, 2013, ISBN 978-3-00-041435-0, s. 137-138.
- [4] Stuchlíková L., Benkovská J., Varga Š., Rybár J., **Nemec M.**, Šebok J.,: Ako efektívne vyvíjať kvalitné e-learning kurzy. In: Nové technologie ve výuce. 4. ročník : Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2010, Brno : Masarykova univerzita, 2010, ISBN 978-80-210-5333-5, s. 1-4.
- [5] Stuchlíková L., Benkovská J., Jakuš J., Harmatha L., **Nemec M.**, Benko P., Kósa A., Juhász P.,: DLTFs Study of Deep Traps in Schottky Diodes Based on AlGaIn/GaN Heterostructure. In: EDS'13. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2013 : Proceedings; Brno, Czech Republic, 26-27 June 2013, Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2013, ISBN 978-80-214-4754-7, s. 98-103.
- [6] Stuchlíková L., Benkovská J., **Nemec M.**, Kósa A., Juhász P., Jakuš J., Benko P.,: E-Learning in Engineering Education. (<http://wrack.ped.muni.cz/konference2012/>) In: Nové technologie ve výuce [elektronický zdroj] : 6. ročník mezinárodní konference, Postkonferenční sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků, Brno, 15. 11. 2012, Brno : Masarykova univerzita, 2013. ISBN 978-80-210-6402-7. CD-ROM.

- [7] Stuchlíková Ľ., Šebok J., Rybár J., Petrus M., **Nemec M.**, Harmatha L., Benkovská J., Kováč J., Škriniarová J., Lalinský, T., Paszkiewicz B., Tlaczala M.,: Investigation of Deep Energy Levels in Heterostructures based on GaN by DLTS. In: ASDAM 2010. The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, 25 - 27 October 2010, Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010, ISBN 978-1-4244-8572-7, s. 135-138.
- [8] Stuchlíková Ľ., Harmatha L., Rybár J., Jakuš J., Kováč J., **Nemec M.**, Petrus M., Sciana B., Radziewicz D., Pucicki D., Dawidowski W., Tlaczala M.,: Investigation of Emission and Capture Processes in Schottky and p-i-n Structures Based on InGaAsN/GaAs Heterostructure. In: EDS'13. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2013 : Proceedings; Brno, Czech Republic, 26-27 June 2013. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2013, ISBN 978-80-214-4754-7, s. 195-200.
- [9] Stuchlíková Ľ., Benkovská J., Benko P., Rybár J., Petrus M., **Nemec M.**, Šebok J., Harmatha L.,: Quality Criteria in Practice of Electronic Education. In: Nové technologie ve výuce. 5. ročník [elektronický zdroj] : Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2011. Brno : Masarykova univerzita, 2012. ISBN 978-80-210-5942-9, CD-ROM [5].
- [10] Šebok J., Stuchlíková Ľ., **Nemec M.**, Benkovská J., Harmatha L., Donoval D.,: eLearning as a Support in Education of Young Experimenters. In: EWME 2010. 8th European Workshop on Microelectronics Education : Darmstadt, Germany, 10.-12.5.2010, Darmstadt : Technische Universität Darmstadt, 2010, s. 64-69.
- [11] Šebok J., **Nemec M.**, Stuchlíková Ľ., Harmatha L., Csabay O.,: E-Learning ve výchove mladých experimentátorov. In: Nové technologie ve výuce. 3. ročník : Mezinárodní konference, Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2009, Brno : Masarykova univerzita, 2009, ISBN 978-80-210-5092-1, CD-ROM.

Príspevky publikované na domácich vedeckých konferenciách

- [1] Harmatha L., Stuchlíková Ľ., Mikolášek M., Nemec M.,: DLTS Study of the a-Si:H/c-Si Heterostructure for Solar Applications. In: Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013, Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, ISBN 978-80-89402-64-9, s. 387-390.

- [2] Harmatha L., Žiška M., Šagátová A., Hybler P., Benko P., **Nemec M.**: Effects of Electron-Irradiation on Electrical Properties of AgCa/Si Schottky Diodes. In: APCOM 2013. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 19th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 19-21, 2013, Bratislava : STU v Bratislave, 2013, ISBN 978-80-227-3956-6, s. 178-181.
- [3] Harmatha L., Mikolášek M., **Nemec M.**, Racko J., Stuchlíková Ľ., Ballo P.: Properties and Diagnostics of Silicon Heterostructures for Advanced Photovoltaic Applications. In: Power Engineering 2012. Renewable Energy Sources 2012 [elektronický zdroj] : 3rd 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. 279-280.
- [4] Harmatha L., Mikolášek M., **Nemec M.**, Hrubčín L., Skuratov V. A.: Radiation hardness of solar cells with a heterojunction of amorphous and crystalline silicon. In: Proceedings of the 5th International Scientific Conference OZE 2014, Renewable Energy Sources, Tatranské Matliare, Slovak Republic, May 20 - 22, 2014, ISBN 978-80-89402-73-1, pp.143-146.
- [5] Mikolášek M., **Nemec M.**, Kováč J., Mannino G., Gerardi C., Tringali C., Harmatha L., Lombardo S.: Electrical Characterisation of a-Si:H(n)/c-Si(p) Heterostructures for Solar Cell Applications. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012, Piscataway : IEEE, 2012, ISBN 978-1-4673-1195-3, s. 115-118.
- [6] Mikolášek M., **Nemec M.**, Kováč J., Řeháček V., Jakabovič J., Harmatha L.: Influence of Thermal Annealing on the Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013, Žilina : University of Žilina, 2013, ISBN 978-80-554-0689-3, s. 97-100.
- [7] Mikolášek M., **Nemec M.**, Racko J., Harmatha L., Kováč J., Žiška M.: Investigation of Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Interface for Heterojunction Solar Cell Applications. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings

- of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012, Bratislava : STU v Bratislave, 2012, ISBN 978-80-227-3720-3, s. 255-258.
- [8] Mikolášek M., **Nemec M.**, Kováč J.,: Band Alignment Analysis of the Amorphous Silicon Crystalline Silicon Heterojunction. In: In: ADEPT 2014: 2nd International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies, Tatranská Lomnica, High Tatras, Slovakia, June 1-4, 2014, s. 91-94.
- [9] **Nemec M.**, Mikolášek M., Harmatha L.,: Current Transport Mechanism in Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Hetero-Junction Solar Cells. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012, Bratislava : STU v Bratislave, 2012, ISBN 978-80-227-3720-3, s. 259-262.
- [10] **Nemec M.**, Jurkovič M., Harmatha L., Mokryš P., Weber B, Písečný P, Fröhlich K.,: Characterization of MOS Structures by Conductance Method. In: APCOM 2010. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 16th International Conference. Malá Lučivná, Slovak Republic, 16.-18.6.2010, Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2010, ISBN 978-80-227-3307-6, s. 150-153.
- [11] **Nemec M.**, Mikolášek M., Harmatha L., Kováč J.,: Impact of the Annealing on the Interface Quality of Silicon Heterojunction Solar Cells. In: Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013, Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, ISBN 978-80-89402-64-9, s. 439-442.
- [12] **Nemec M.**, Benko P., Neupauer M., Čičo K., Harmatha L., Fröhlich K.,: Preparation and Characterization of Thin ZrO₂ Layers for Gate Insulation in MOSFET. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011, Žilina : Žilinská univerzita, 2011, ISBN 978-80-554-0386-1, s. 98-101.
- [13] **Nemec M.**, Mikolášek M., Kováč J., Řeháček V., Jakabovič J., Harmatha L.,: Study and Analysis of the Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell Output Performance at High Temperatures. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013, Žilina : University of Žilina, 2013, ISBN 978-80-554-0689-3, s. 225-228.

- [14] Petrus M., Stuchlíková L., Šebok J., Harmatha L., Kováč J., **Nemec M.**, Škriniarová J.,: Study of Electrical Properties of AlGaIn/GaN Structures by DLTS Method. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011, Žilina : Žilinská univerzita, 2011, ISBN 978-80-554-0386-1, s. 135-138.
- [15] Písečný P., Harmatha L., **Nemec M.**,: Diagnostika rozhrania medzi izolačnou vrstvou a polovodičovým substrátom v elektronike. In: Progresívne (nano)technológie a diagnostické postupy pre elektroniku a fotoniku : Vedecký seminár. Bratislava, 27.8.2010, Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2010, ISBN 978-80-970493-0-0, s. 15-20.
- [16] Príbytný P., Mikolášek M., Marek J., Donoval D., Chvála A., Molnár M., **Nemec M.**,: Optimization of Silicon Heterojunction Solar Cell Contacts by 2D Numerical Modelling and Simulation. In: Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013, Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, ISBN 978-80-89402-64-9, s. 451-454.
- [17] Príbytný P., Mikolášek M., Marek J., Donoval D., Chvála A., Molnár M., **Nemec M.**,: Recombination Mechanisms in a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells Studied by 2D Numerical Modeling and Simulation. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013, Žilina : University of Žilina, 2013, ISBN 978-80-554-0689-3, s. 101-104.
- [18] Stuchlíková L., Benkovská J., Stuchlík M., **Nemec M.**, Šebok J., Rybár J., Petrus M.,: Future of Power Engineering Depends on Young People. In: Power Engineering 2012. Renewable Energy Sources 2012 [elektronický zdroj] : 3rd 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. 259-260.
- [19] Šebok J., Stuchlíková L., Pecháček J., Písečný P., Petrus M., Kováč J., **Nemec M.**, Harmatha L., Škriniarová J.,: Study of Electrical Properties of AlGaIn/GaN Structures by Capacitance Method. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic,

- June 22-24, 2011, Žilina : Žilinská univerzita, 2011, ISBN 978-80-554-0386-1, s. 139-142.
- [20] Šebok J., Petrus M., Stuchlíková L., Harmatha L., Kováč J., **Nemec M.**, Benkovská J., Škriniarová J.,: Study of Electrical Properties of GaN by Capacitance Methods. In: APCOM 2010. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 16th International Conference. Malá Lučivná, Slovak Republic, 16.-18.6.2010, Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2010, ISBN 978-80-227-3307-6, s. 154-157.
- [21] Žiška M., Harmatha L., **Nemec M.**, Benkovský I.,: Influence of Electron Irradiation on MOS Structure with CZ and NCZ Silicon Substrate. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011, Žilina : Žilinská univerzita, 2011, ISBN 978-80-554-0386-1, s. 102-105.

Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií

- [1] Fülöp M., Harmatha L., Žiška M., **Nemec M.**, Benkovský I.,: R&D Laboratory with Linear Accelerator for Radiation Processing. In: NUTECH-2011 : International Conference on Development and Applications of Nuclear Technologies. Krakow, Poland, 11-14 September 2011, Krakow : AGH University of Science and Technology, 2011, ISBN 978-83-925779-1-1.
- [2] Kováč J., Mikolášek M., **Nemec M.**, Kováč J., Vincze A., Lombardo S., Mannino G., Gerardi C., Tringali C.,: Structural and Electrical Characterisation of a-Si:H(n)/c-Si(p) Heterostructures Prepared by ICP and PECVD. In: IVC - 19th International Vacuum Congress : Paris, France, September 9-13, 2013, [s.l.] : IUVESTA, 2013, s. 518-519.
- [3] Mikolášek M., **Nemec M.**, Jakabovič J., Řeháček V., Vojs M., Kováč J., Harmatha L.,: Electrical Transport Mechanisms in Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunctions: Impact of Passivation Layer Thickness. 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. 149-150.
- [4] Mikolášek M., **Nemec M.**, Novotný I., Řeháček V., Jakabovič J., Vojs M., Kováč J., Harmatha L.,: Electrical Transport Mechanisms in ZnO:Al/p-Si Heterojunctions. In:

JVC-14. Programme and Book of Abstracts : 14th Joint Vacuum Conference. 12th European Vacuum Conference. 11th Annual Meeting of the German Vacuum Society. 19th Croatian-Slovenian Vacuum Meeting. Dubrovnik, Croatia, June 4-8, 2012, Zagreb : Croatian Vacuum Society, 2012. ISBN 978-953-98154-1-5. s. 164.

Abstrakty príspevkov z domácich konferencií

- [1] Mikolášek M., Stuchlíková Ľ., Harmatha L., **Nemec M.**,: Capacitance Study of Inversion at the Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunction Passivated by different Thicknesses of i-Layer. In: 8th Solid State Surfaces and Interfaces : Extended Abstract Book. Smolenice Castle, Slovak Republic, November 25-28, 2013, Bratislava : Comenius University, 2013, ISBN 978-80-223-3501-0, s. 113-114.

Redakčné a zostavovateľské práce (bibliografie, encyklopédie, katalógy, slovníky, zborníky...)

- [1] Benko P. [editor], Stuchlíková Ľ. [editor], Benkovská J. [editor], **Nemec M.**, [editor],: ŠVOČ 2010. Fakultné kolo. Sekcia: Mikroelektronika a Optoelektronika, Mikroelektronické a Optoelektronické systémy, e-Learning a web technológie v Elektronike : Bratislava, 21. 4. 2010, Bratislava : FEI STU, 2010, 114 s.
- [2] Benko P. [editor], **Nemec M.** [editor], Stuchlíková Ľ. [editor],: ŠVOČ 2011. Fakultné kolo. Sekcia: Mikroelektronika a Optoelektronika, Mikroelektronické a Optoelektronické systémy, e-Learning a web technológie v Elektronike : Bratislava, 4. 5. 2011, Bratislava : FEI STU, 2011, 121 s.