



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**GAN MODIFIKOVANÉ SCHOTTKYHO SOLÁRNÍ ČLÁNKY
S ROZHRANÍM GRAFEN/SI**

SCHOTTKY SOLAR CELLS WITH INTERFACE GRAPHENE/SI MODIFIED BY GAN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ivan Mohelský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Ivan Mohelský**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Jindřich Mach, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

GaN modifikované Schottkyho solární články s rozhraním Grafen/Si

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Solární články jsou v současné době velmi usilovně studovány z důvodů získávání takzvané čisté energie. Při výrobě solárních článků se nejčastěji používá křemíkových p–n přechodů. Alternativou k tomuto uspořádání může být Schottkyho přechod rozhraní Grafen/Si, který díky unikátním vlastnostem grafenu může zvýšit odolnost a efektivitu solárních článků. Navíc nanokrystaly GaN umístěné v rozhraní grafen/Si mohou zásadně ovlivnit fyzikální vlastnosti solárních zařízení.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Proveďte rešeršní studii problematiky Schottkyho solárních článků s grafenovou vrstvou.
- 2) Navrhněte a realizujte aparaturu pro charakterizaci solárních článků.
- 3) Připravte Schottkyho solární články modifikované mezivrstvou GaN nanokrystalů.

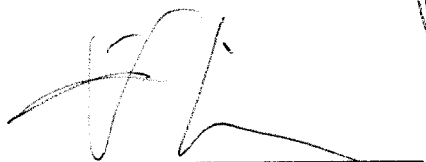
Seznam doporučené literatury:

XU et al, Interface engineering and efficiency improvement of monolayer graphene–silicon solar cells by inserting an ultra-thin LiF interlayer RSC Adv., vol 5. , p.p 46480–46484, 2015.

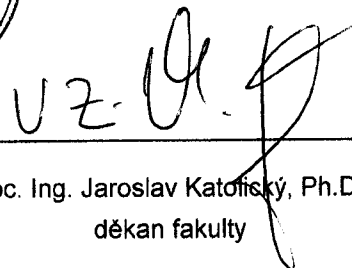
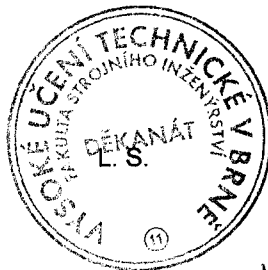
LI, X. et al, Graphene-on-silicon Schottky junction solar cells. Advanced materials, vol: 22 (25) pp: 2743-8, 2010.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 3. 11. 2017



prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katonický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá přípravou a charakterizací Schottkyho solárních článků s přechodem grafen/křemík. Pro tuto studii byla navržena a vyrobená aparatura pro měření I-V charakteristik solárního článku. Byla měřena závislost účinnosti solárních článků na teplotě žíhání a rozhraní grafen/křemík bylo dále modifikováno nanokrystaly galium nitridu a byl studován vliv těchto krystalů na vlastnosti solárního článku.

Abstract

This bachelor thesis deals with fabrication and characterization of Schottky solar cells with graphene/silicon junction. For this study, the I-V characteristic measuring device was designed and assembled. Dependence of annealing on solar cell efficiency was measured and also the graphene/silicon junction was modified with GaN nanocrystals and properties of such a solar cell was studied.

Klíčová slova

solární článek, Schottkyho přechod, grafen, CVD, GaN nanokrystaly, I-V charakteristika

Keywords

solar cell, Schottky junction, graphene, CVD, GaN nanocrystals, I-V characteristics

MOHELSKÝ, I. *GaN modifikované Schottkyho solární články s rozhraním Grafen/Si*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2018. 31 s.
Vedoucí Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze pod vedením Ing. Jindřicha Macha, Ph.D., a že veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Ivan Mohelský

V první řadě děkuji Ing. Jindřichu Machovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za jeho čas, rady a pomoc vždy, když bylo potřeba. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jakubovi Piastkovi za pomoc s litografií a svým spolužákům z Fyzikálního inženýrství za jejich pomoc a rozveselení, když se věci zdály nejčernější.

Největší dík ovšem patří mé rodině, za jejich trpělivost a oporu, které za celé dosavadní studium nikdy nebylo málo.

Ivan Mohelský

Obsah

Úvod	3
1 Teoretická část	5
1.1 Grafen	5
1.1.1 Vlastnosti grafenu	5
1.1.2 Příprava grafenu	7
Chemická depozice z plynné fáze (CVD)	7
Přenos grafenu	7
1.2 Schottkyho solární články	9
1.2.1 Schottkyho přechod	9
1.2.2 Generování fotonáboje	10
1.2.3 Vlastnosti solárních článků	11
1.2.4 Modifikace rozhraní	12
1.3 Gallium nitrid	14
1.3.1 Fotoluminiscenční spektrum	14
1.3.2 XPS analýza povrchu	15
2 Experimentální část	17
2.1 Návrh měřicí aparatury	17
Osvětlení	17
Zapojení měřícího zařízení	17
2.2 Příprava Schottkyho solárních článků	20
2.2.1 Charakterizace Schottkyho solárních článků	21
2.3 Příprava Schottkyho solárních článků s nanokrystaly GaN	23
2.3.1 Charakterizace solárního článku s GaN nanokrystaly	25
Závěr	27
Literatura	29
Seznam zkratek	31

Úvod

V posledních letech je stále zvyšující se poptávka po elektrické energii řešena převážně spalovacími a atomovými elektrárnami [1]. Zároveň se objevuje požadavek na ekologickou šetrnost zdrojů této energie. Jednou z takových možností je přeměna sluneční energie v solárních elektrárnách.

Komerčně užívané křemíkové solární články jsou založené na PN přechodu, realizovaném dvojicí P a N dotovaných Si vrstev [2]. Alternativou k takovýmto článkům by mohly být Schottkyho solární články, založené na Schottkyho přechodu, pro jehož vytvoření stačí pouze jedna vrstva N dotovaného křemíku a vrstva grafenu. Proto by takto vytvořené solární články mohly být levnější, odolnější a účinnější než ty křemíkové. Vlastnosti Schottkyho solárních článků jsou podmíněné kvalitou grafenové vrstvy a příprava velkých ploch grafenu o vysoké kvalitě je v dnešní době ještě stále technickou výzvou. V této práci se budeme zabývat přípravou a charakterizací těchto Schottkyho solárních článků s rozhraním grafen/křemík. Následně je budeme modifikovat nanokrystaly gallium nitridu a budeme studovat vliv takovýchto nanostruktur na vlastnosti solárního článku.

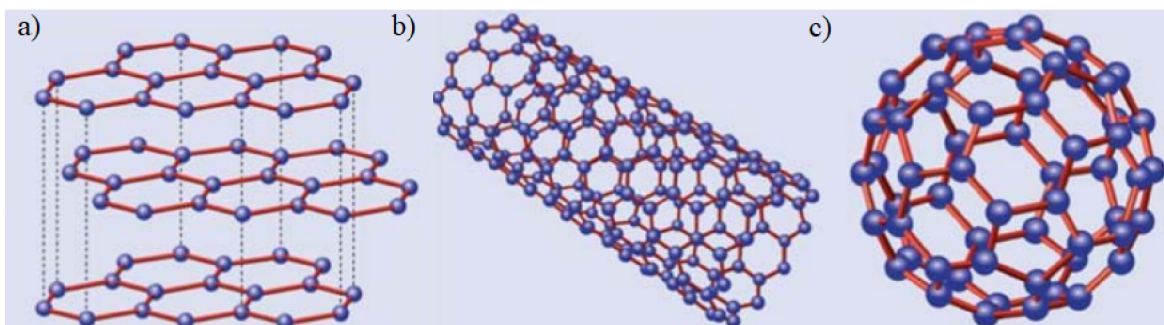
Gallium nitrid má fotoluminiscenční maximum na hranici viditelného spektra a ultrafialového záření (modré světlo). Pokud dostatečně omezíme rozměry takovýchto krystalů, začne se projevovat další záření v oblasti žlutého světla [3]. Nanokrystaly GaN umístěné v rozhraní grafen/křemík by mohli zvýšit absorpci světla na rozhraní a optimalizovat tak kvantovou účinnost solárních článků.

V první kapitole teoretické části této práce se zaměříme na vlastnosti grafenu a možnosti jeho přípravy. Zejména rozebereme metodu depozice z plynné fáze na měděnou folii. Ve druhé kapitole bude provedena rešerše problematiky Schottkyho solárních článků s rozhraním grafen/křemík. Nejprve bude vysvětleno, jak tyto solární články fungují a poté jak jejich vlastnosti ovlivňuje výška grafenové vrstvy. Ve třetí kapitole jsou popsány vlastnosti materiálu gallium nitrid a vysvětlíme, jak by GaN nanokrystaly mohli zlepšit výkon Schottkyho solárních článků. V experimentální části práce bude ukázán návrh a konstrukce aparatury měřící I-V charakteristiky solárních článků. Bude popsána příprava Schottkyho solárních článků a budou změřeny jejich parametry. Nakonec bude charakterizován Schottkyho solární článek s nanokrystaly GaN na rozhraní grafen/křemík a bude stanoven vliv těchto nanostruktur na vlastnosti solárního článku.

1. Teoretická část

1.1 Grafen

Grafen je relativně nový tzv. 2D materiál složený z atomů uhlíku uspořádaných do rovinné pravidelné šestiúhelníkové mřížky, kde jsou atomy navzájem spojené sp^2 vazbami [4]. Poprvé byl tento materiál izolován a charakterizován v roce 2004 fyziky Konstantinem Novoselovem a Andrém Geimem, za což byla následně v roce 2010 udělena Nobelova cena za fyziku [5]. Jiné uspořádání atomů uhlíku byly známy už mnohem dříve, např. grafit 3D, uhlíkové nanotrubičky 1D nebo fullereny 0D. Tyto formy uhlíku jsou zobrazeny na Obrázku 1.1. V minulosti se ale existence jednoatomární vrstvy uhlíku jevila být nestabilní z důvody tepelných kmitů mřížky za pokojové teploty [4]. Nicméně vlivem zvlnění výsledné grafenové vrstvy a pevnosti vazeb mezi atomy uhlíku je tato monovrstva stabilní. Každý atom uhlíku je v krystalické mřížce grafenu spojený chemickou vazbou σ s dalšími třemi atomy. Jelikož má uhlík čtyři valenční elektrony, zůstává zde jeden volný π elektron. Tyto π elektrony způsobují jeho elektrickou vodivost a díky uspořádání krystalové mřížky dosahují velmi vysoké pohyblivosti μ . Následně po objevu grafenu začal být zájem i další 2D materiály jako např. BN, AlN, WS_2 , MoS_2 .

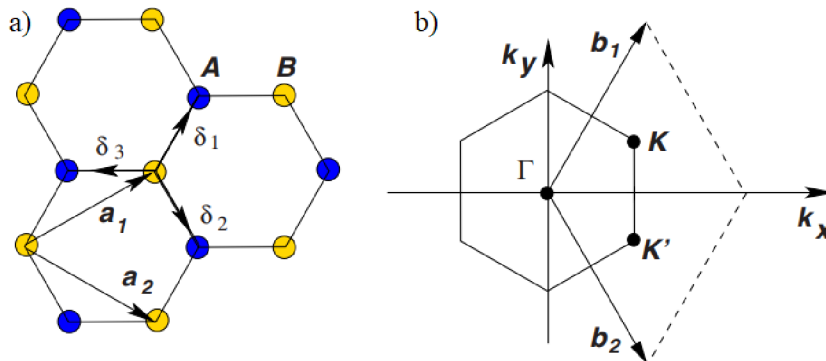


Obrázek 1.1: Různé formy uhlíku: a) grafit, b) nanotrubička, c) fulleren C_{60} .

1.1.1 Vlastnosti grafenu

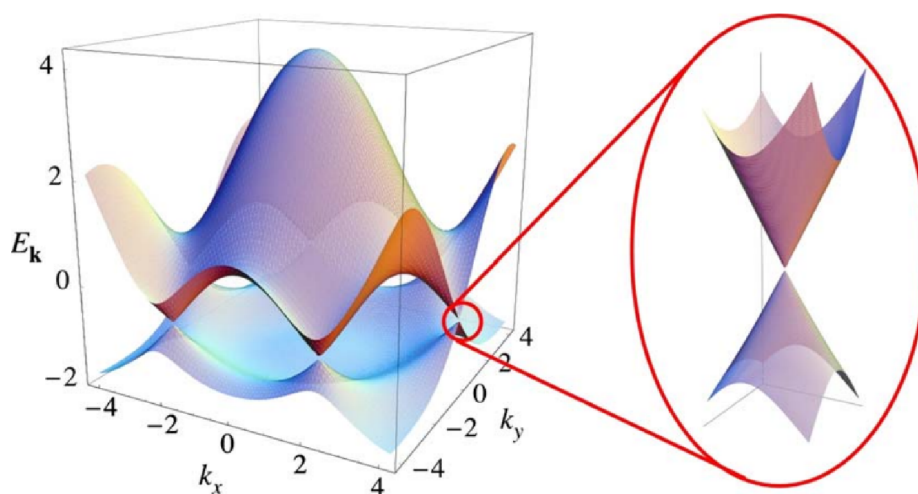
Vlastností, která zapříčinila velký zájem o grafen hned po jeho objevení, je velmi vysoká pohyblivost elektronů v tomto materiálu. Ta při první charakterizaci dosahovala hodnoty $\mu \approx 10\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, což bylo mnohokrát více než u používaných materiálů (např. grafit oxid $\mu_{go} \approx 1\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) [5].

Jak již bylo řečeno, grafen je složený z atomů uhlíku, které jsou uspořádány do rovinné hexagonální mřížky, viz Obrázek 1.2, s nejmenší vzdáleností dvou atomů $a = 0,142 \text{ nm}$ [6]:



Obrázek 1.2: a) Šestiúhelníková mřížka grafenu složená ze dvou trojúhelníkových mřížek (A a B), \mathbf{a}_1 a \mathbf{a}_2 jsou mřížkové vektory. δ_1, δ_2 a δ_3 jsou směry nejbližších atomů. b) Odpovídající 1. Brillouinova zóna, převzato z [6].

Obzvláště zajímavé jsou body K a K' na krajích Brillounovy zóny. Tyto body se nazývají Diracovy body a zde se dotýká valenční a vodivostní pás, viz Obrázek 1.3. Tudiž se zde nenalézá zakázaný pás energií ($E_g = 0 \text{ eV}$) a krystaly s úzkým pásem zakázaných hodnot vykazují velkou elektronovou pohyblivost μ [7]. Grafen se tedy převážně chová jako kov, ale po úpravě u něj lze pozorovat i vlastnosti typické u polovodičů. Dotování nebo omezení rozměrů grafenu vede k vytvoření zakázaného pásu nenulové šířky ($E_g > 0 \text{ eV}$) [8]. Dále bylo zjištěno, že se v blízkosti Diracových bodů elektrony chovají jako nehmotné částice (tedy efektivní hmotnost takových elektronů m_e^* se blíží 0).



Obrázek 1.3: Pásová struktura grafenu se zvětšením v oblasti Diracova bodu, převzato z [6].

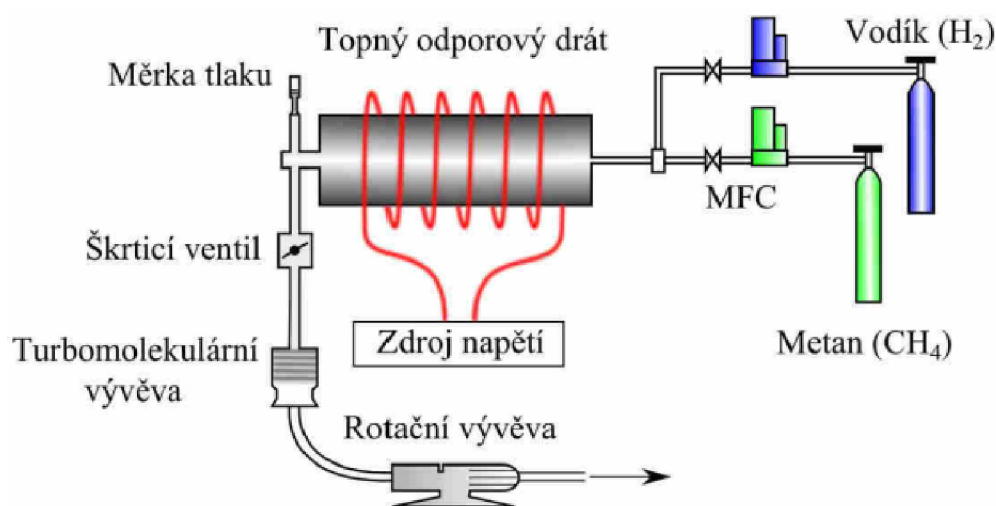
1.1.2 Příprava grafenu

Grafen lze v současnosti připravovat mnoha způsoby. Historicky první metoda přípravy grafenu byla mechanická exfoliace, dosud se jedná o metodu přípravy nejkvalitnějších vrstev. Další metody užívané k přípravě vrstev je chemická exfoliace nebo depozice z plynné fáze (CVD - *chemical vapor deposition*). Metoda, kterou by bylo možné připravovat grafen ve velkých plochách pro průmyslové užití, ale stále není známá.

Chemická depozice z plynné fáze (CVD)

Chemická depozice z plynné fáze je metoda, při které za kontrolovaných fyzikálních podmínek (teplota, tlak, tok plynů) dochází k rozpadu prekursoru (metanu) a depozici jeho fragmentů (atomů uhlíku) na substrát (Cu).

CVD proces depozice grafenu se skládá z několika kroků. Tenká měděná folie se očistí pomocí acetonu (C_3H_6O) a izopropylalkoholu (C_3H_8O) a poté je vložena do CVD pece, viz Obrázek 1.4. Pec a folie se ohřeje na $T_a = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ a 60 minut se žihá, za stálého toku vodíku ($f_{H_2} = 4\text{ sccm}^1$) a sníženého tlaku ($P_a = 5\text{ Pa}$). Tímto dochází k vyhlazení povrchu, formování Cu krystalů a odstranění nečistot z folie [9]. Následně je proveden proces růstu grafenu, kdy se za stálé teploty ($T_g = 1000\text{ }^\circ\text{C}$) a tlaku ($P_g = 100\text{ Pa}$) k toku H_2 přidá tok metanu ($f_{CH_4} = 100\text{ sccm}$). Vlivem katalytických procesů na povrchu substrátu se metan rozpadá [10] a podle principu nejmenší energie se atomy uhlíku za těchto podmínek deponují právě do struktury grafenu.



Obrázek 1.4: Schéma uspořádání CVD aparatury, převzato z [10].

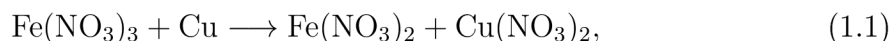
Přenos grafenu

Po zchlazení a vyjmutí folie z CVD pece dostaneme grafen narostlý na obou stranách tenké měděné folie, což pro následující aplikace v polovodičovém průmyslu není

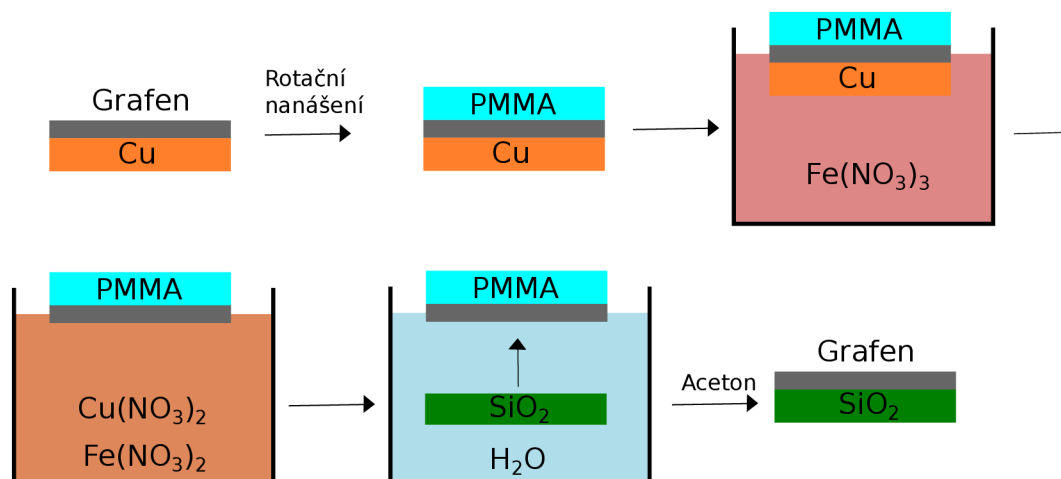
¹sccm — *Standard Cubic Centimeters per Minute*

vhodné. Proto se grafen na jedné straně folie nechává odleptat. Většinou se používá leptání kyslíkovou plazmou.

Dále je zapotřebí odstranit měděnou vrstvu a grafen přemístit na požadovaný povrch. V této práci byla užitá metoda tzv. mokrého přenosu, kdy se měděná folie s grafenem položí na hladinu nasyceného roztoku dusičnanu železitého a za reakce



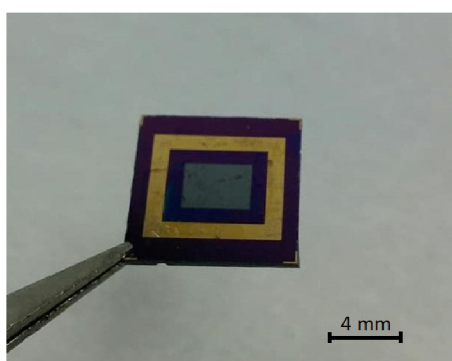
se měď rozpustí. Aby nedocházelo k mechanickému poškození grafenu, tak se před přenosem nanáší rotačním nanášením tenká vrstva polymetylmakrylátu (PMMA), která zamezí jeho potrhání. Během rozpouštění se vytvoří sloučenina dusičnanu mědnatého a na hladině zůstane plavat samotná grafenová vrstva. Ta se opatrně podebere a přeneše do deionizované vody pro očištění od dusičnanu železitého. Pro odstranění zbytku vody zachycené mezi grafenovou vrstvou a substrátem je vhodné poté vzorek krátce zahřát na $T = 200^\circ\text{C}$. Následně je jako poslední odstraněno PMMA. To je nejčastěji prováděno lázní v acetonu. Schéma přenosu grafenu z Cu folie na požadovaný substrát je zobrazeno na Obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Přenos grafenu z měděné folie na požadovaný substrát.

1.2 Schottkyho solární články

Grafen pro své fyzikální vlastnosti (vysoká elektrická vodivost, tepelná odolnost a velká propustnost světla) nachází uplatnění v mnoha vědních oborech, zejména pak v optoelektronice [11]. Doposud ovšem neexistuje žádná metoda přípravy velkých ploch grafenových vrstev a průmyslová aplikace tohoto materiálu je velmi obtížná.

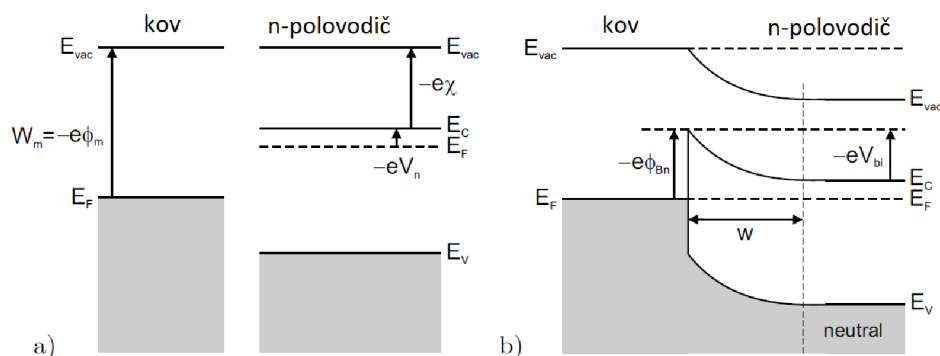


Obrázek 1.6: Schottkyho solární článek s rozhraním grafen/křemík.

Jedním z možných uplatnění jsou Schottkyho solární články s rozhraním grafen/křemík, viz Obrázek 1.6. Zde grafen zastává úlohu kovu v Schottkyho přechodu a kvůli vysoké propustnosti světla (až 98 % [12]) jsou fotony absorbovány až v samotném rozhraní místo na povrchu. Takovéto články by mohly být účinnější, odolnější a levnější.

1.2.1 Schottkyho přechod

Spojením polovodiče a kovu vzniká Schottkyho přechod a z důvodu obecně různých hodnot Fermiho energie začne náboj téct tak, aby se tento rozdíl vyrovnal. Dojde tedy k „ohybu“ pásové struktury polovodiče v oblasti rozhraní, viz Obrázek 1.7 a vytvoření Schottkyho bariéry [13].



Obrázek 1.7: Schéma pásové struktury kovu a n-polovodiče, a) odděleně, b) v kontaktu, převzato a upraveno z [13].

Poloha Fermiho energie E_F v kovu je dána výstupní prací W_m , tedy energií, kterou je nutno dodat elektronu, aby mohl kov opustit

$$W_m = E_{\text{vac}} - E_F = -e\phi_m, \quad (1.2)$$

kde e je elementární náboj, E_{vac} je energie vakua a ϕ_m je potenciál, který musí elektron překonat pro opuštění mřížky kovu.

Protože u polovodičů leží Fermiho energie v pásu zakázaných energií, definujeme elektronovou afinitu χ , tedy energii elektronu potřebnou k opuštění polovodiče ze dna vodivostního pásu

$$-e\chi = E_{\text{vac}} - E_C. \quad (1.3)$$

Pokud dojde k vodivému propojení kovu a polovodiče, nastává přeskupení elektronů a vyrovnání hladin Fermiho energií na hranici tohoto rozhraní. Tímto způsobem se vytvoří Schottkyho (potenciálová) bariéra o výšce ϕ_B , ochuzená zóna o šířce w a vestavěné napětí V_{bi} . Pro n-dotovaný polovodič platí:

$$\phi_{B_n} = \phi_m - \chi, \quad (1.4)$$

a pro p-dotovaný polovodič:

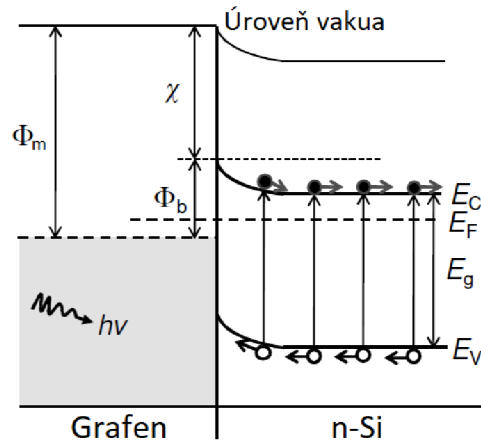
$$\phi_{B_p} = -\frac{E_G}{e} + \phi_m - \chi, \quad (1.5)$$

kde E_G je šířka zakázaného pásu.

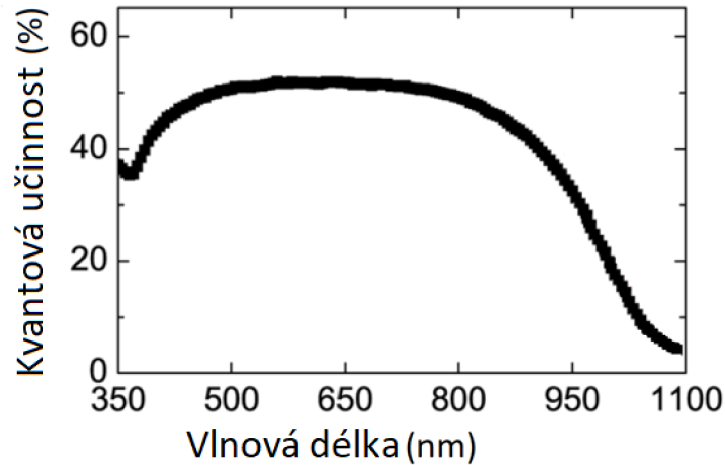
1.2.2 Generování fotonáboje

Pokud dopadne foton na rozhraní grafenu a n-dotovaného křemíku, mohou nastat následující případy: 1. foton projde rozhraním bez pohlcení, 2. foton je emitován zpět, 3. foton je absorbován vrstvou grafenu nebo 4. foton je absorbován v ochuzené části přechodu [14]. Pro generování fotonáboje je nutné aby nastala poslední ze zmiňovaných možností, tedy absorpce fotonu v oblasti Schottkyho přechodu. Pokud se zde absorbuje foton o vhodné vlnové délce, dojde k excitaci elektronu do vodivostního pásu a vytvoření páru elektron – díra. Vestavěný potenciál V_{bi} poté odvádí elektron do polovodiče a díru do grafenu, viz Obrázek 1.8. Následkem toho se začne grafen nabíjet kladně a křemík záporně [15].

Pokud nás zajímá, jaké energie fotonů jsou vhodné pro generaci fotonáboje, studujeme tzv. kvantovou účinnost solárního článku. Kvantová účinnost solárních článků založených na přechodu grafen/křemík je v podstatě totožná se solárními články založenými na křemíkovém PN přechodu, protože většina fotonů grafenem projde a absorpce za vzniku páru elektron – díra se děje až v křemíku. Na obrázku 1.9 je zobrazena měřená kvantová účinnost solárního článku s rozhraním grafen/křemík. Pro dopadající



Obrázek 1.8: Generování fotonáboje na přechodu grafen/křemík, převzato a upraveno z [15].



Obrázek 1.9: Kvantová účinnost grafenových solárních článků, převzato a upraveno z [14].

záření o vlnové délce $\lambda = 500 - 800$ nm dosahuje kvantová účinnost skoro 50 % a mimo viditelné spektrum rychle klesá [14].

1.2.3 Vlastnosti solárních článků

Snažíme-li se solární články charakterizovat, popisujeme jejich schopnost přeměny energie záření na energii elektrickou. Studujeme tedy schopnost generovat elektrickou energii v závislosti na množství energie, kterou ze článku odebíráme. To lze odečíst z Volt-Amperové (I-V) charakteristiky solárního článku, závislosti proudu na napětí generovaném solárním článkem pro různá zatížení obvodu. Takovou charakteristiku lze naměřit pomocí elektrického obvodu, který je s příkladem I-V charakteristiky zobrazený na Obrázku 1.10. Mezi základní hodnoty získané tímto měřením patří proud ve zkratu I_S , napětí rozpojeného obvodu U_{OC} , maximální výkon P_{max} (podílem maximálního výkonu generovaného solárním článkem a výkonu dopadajícího světelného záření dostáváme maximální účinnost solárního článku η). Dále můžeme dopočítat fill faktor FF [16], poměr mezi maximálním výkonem a teoretickým maximálním výkonem článku

P_t , jako

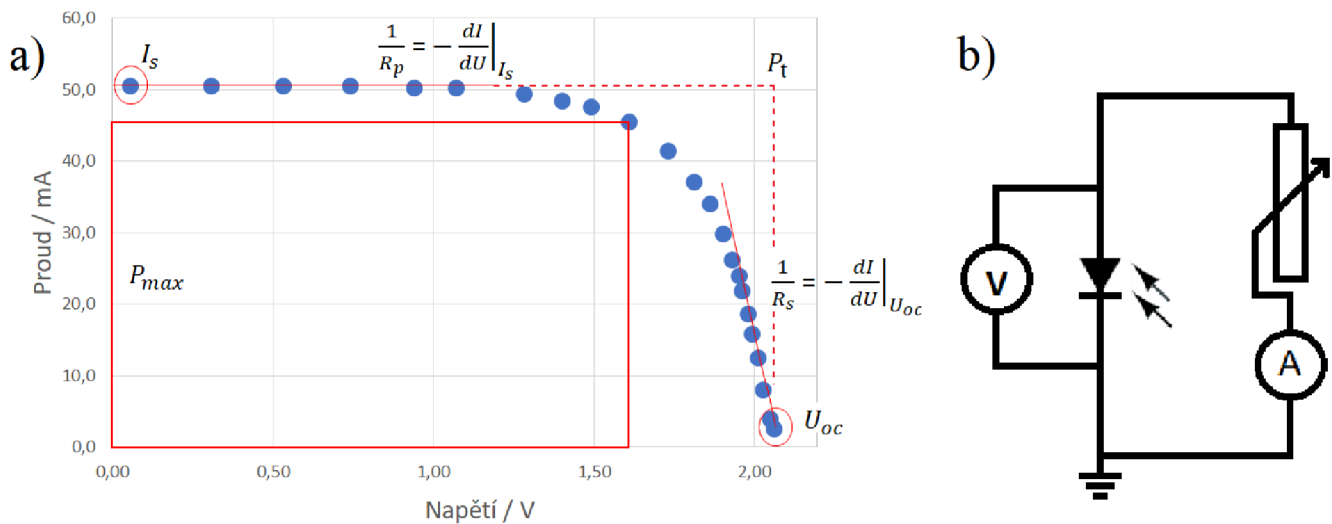
$$FF = \frac{P_{\max}}{P_t} = \frac{P_{\max}}{I_s \cdot U_{OC}}. \quad (1.6)$$

Dále stanovujeme paralelní odpor R_P solárního článku

$$\frac{1}{R_P} = -\left. \frac{\partial I}{\partial U} \right|_{I_s}, \quad (1.7)$$

a sériový odpor R_S

$$\frac{1}{R_S} = -\left. \frac{\partial I}{\partial U} \right|_{U_{OC}}. \quad (1.8)$$

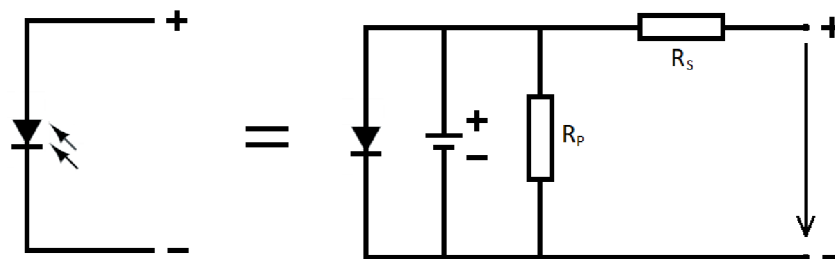


Obrázek 1.10: a) Příklad I-V charakteristiky (křemíkového) solárního článku s vyznačenými parametry solárního článku, b) schéma elektrického obvodu pro měření I-V charakteristiky solárního článku.

Význam těchto odporů je ukázán na Obrázku 1.11. Paralelní odpor R_P je způsoben poruchami mřížky krystalu a popisuje vnitřní odpor mezi elektrodami. Čím je jeho hodnota vyšší, tím je účinnost solárního článku lepší. Sériový odpor R_S je způsoben odporem materiálu, kontaktů a celé měřicí aparatury. Účinnost článku s rostoucím sériovým odporem klesá [17]. Pro ideální solární článek platí, že $R_P = \infty$ a $R_R = 0$.

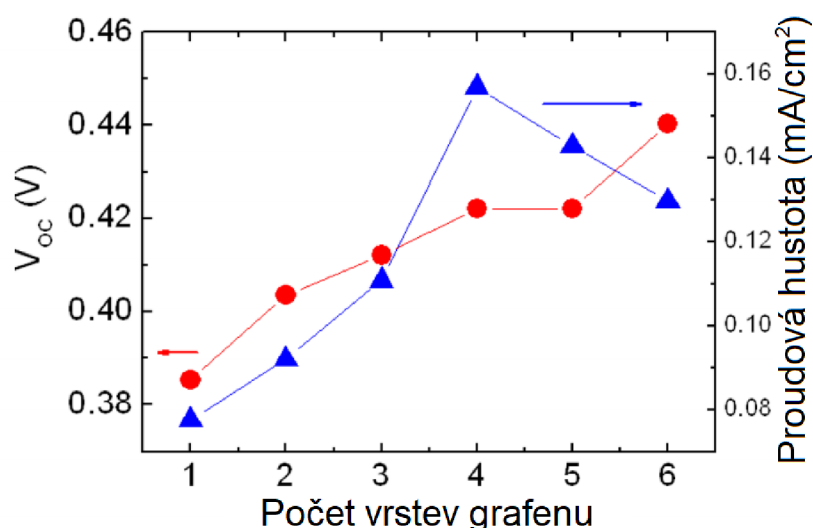
1.2.4 Modifikace rozhraní

Vlastnosti solárního článku můžeme ovlivňovat modifikací přechodu grafen/křemík. Nejčastější užívané modifikace jsou chemické dotování [14], nebo vkládání tenkých nevodivých vrstev mezi materiály rozhraní [18]. Méně obvyklou možností je snižování rezistivity grafenu užitím více grafenových vrstev. To se může provést nanesením více grafenových vrstev na sebe, nebo častěji přímo růstem víceatomárních vrstev. Pro malý počet vrstev platí, že s každou další vrstvou klesá rezistivita ale zároveň i propustnost světla.



Obrázek 1.11: Model solárního článku složený z diody, zdroje stejnosměrného napětí a dvou odporů zapojených paralelně a sériově.

Vědecká skupina pod vedením Y. F. Li [19] studovala vliv více vrstev grafenu (1 až 6 ML²) na parametry solárního článku. Tyto vrstvy byly připraveny pomocí CVD růstu na měděných foliích a růstu více vrstev bylo dosaženo optimalizací růstových parametrů (teplota, tlak, tok plynů a doba depozice). Bylo zjištěno, že napětí rozpojeného obvodu U_{OC} s počtem vrstev v tomto rozmezí roste skoro lineárně a proud ve zkratu I_S nejdříve roste, ale u páté vrstvy začne klesat, viz Obrázek 1.12.

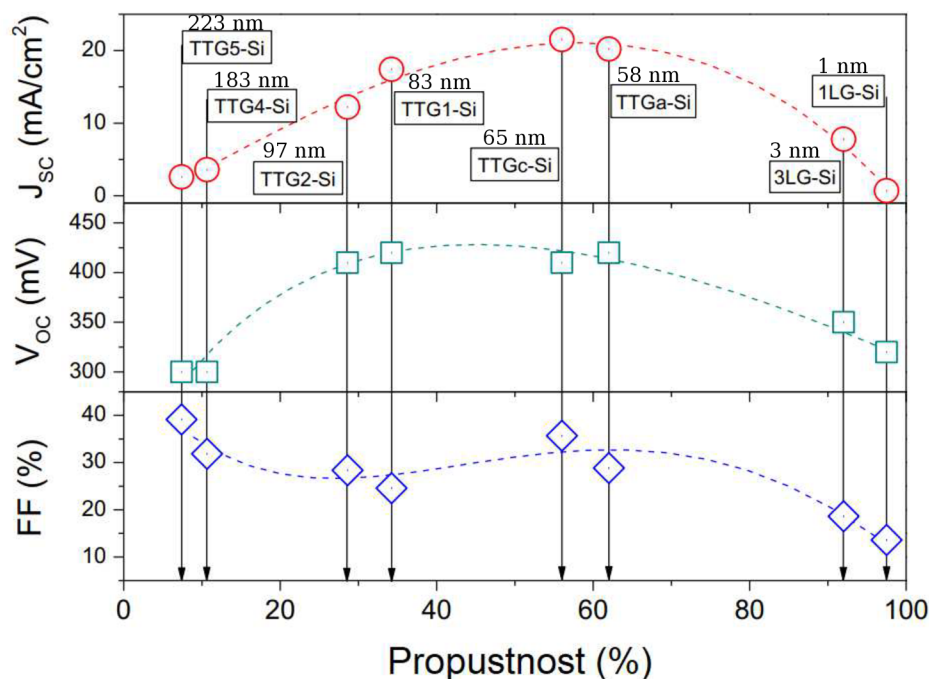


Obrázek 1.12: Měření parametrů Schottkyho solárních článků s rozhraním grafen/křemík s různým počtem grafenových vrstev, převzato a upraveno z [19].

Podobnou studii provedla vědecká skupina, kterou vedl X. An [20]. Byla hledána ideální tloušťka tenké grafitové vrstvy s ideálním poměrem rezistivity a světelné propustnosti, viz Obrázek 1.13. Tyto vrstvy byly připravovány pomocí CVD růstu na palladiu. Jako ideální byla označena vrstva o výšce přibližně $d = 65$ nm, s propustností 56 %. Takto modifikovaný solární článek dosahoval účinnosti 3,12 % a dalším chemickým dotováním (PCA³ + AuCl₃) se účinnost zvýšila až na 8,6 %.

²mono layer, jeden atom tlusté vrstvy.

³1-pyrenecarboxylic acid



Obrázek 1.13: Měření parametrů solárních článků s různě tlustou uhlíkovou vrstvou o různé propustnosti světla a rezistivitě, převzato a upraveno z [20].

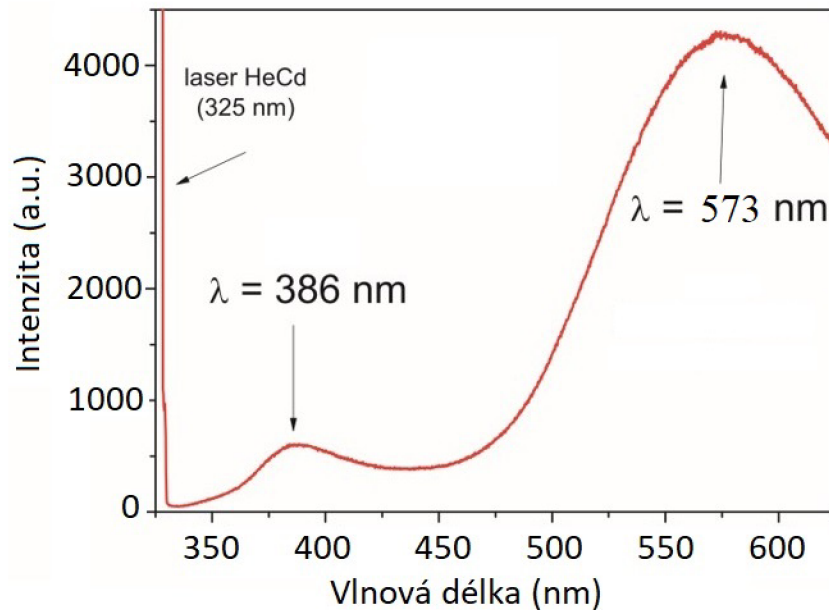
1.3 Gallium nitrid

Nitrid gallitý, běžně označován pojmem gallium nitrid (z anglického názvu *Gallium Nitride*) je polovodičový materiál s přímým přechodem a zakázaným pásem o šířce $E_g = 3,4 \text{ eV}$. Je to jeden z nejužívanějších polovodičových materiálů, zejména právě kvůli šířce jeho zakázaného pásu, jehož energie odpovídá záření o vlnové délce přibližně $\lambda = 360 \text{ nm}$, tedy fotonu modrého světla. Pro jeho fyzikální vlastnosti je gallium nitrid využíván například v LED diodách nebo vysokofrekvenčních a vysokovýkonových přístrojích [21]. Gallium nitrid se vyskytuje ve dvou krystalických strukturách, kdy více obvyklá je wurtzitová forma složená ze dvou překrývajících se hexagonálních mřížek. Méně častá je forma sfaleritová skládající se ze dvou FCC mřížek [22].

1.3.1 Fotoluminiscenční spektrum

Fotoluminiscenční spektroskopie je nedestruktivní metoda studující strukturu elektronového obalu materiálu. Světlo interaguje s povrchem materiálu, kde je absorbováno a procesem zvaným foto-excitace mu předává energii. Této energii se dále materiál zbavuje ve formě vyzářených fotonů. Energie takto vyzářeného fotonu odpovídá rozdílu dvou energiových hladin materiálu. Četnost takto vyzářených fotonů zase odpovídá pravděpodobnosti takového přechodu [23].

Fotoluminiscenční spektrum nanokrystalů GaN má dvě maxima, viz Obrázek 1.14. Jedno je v oblasti $\lambda_1 = 360 \text{ nm}$, což odpovídá přechodu elektronu z vodivostního pásu do pásu valenčního (šířka zakázaného pásu je 3.4 eV). Druhé maximum je v oblasti



Obrázek 1.14: Fotoluminiscenční spektrum nanokrystalů gallium nitridu.

$\lambda_2 = 570 \text{ nm}$. Toto maximum neodpovídá šířce zakázaného pásu a o jeho opodstatnění se stále vede vědecká diskuze.

Při snaze vysvětlit toto fotoluminiscenční maximum byly mikrokrystaly GaN dotovány různými látkami a byla studována jejich fotoluminiscenční spektra. Výsledky ukazují, že intenzita druhého maxima velmi rychle roste, pokud je GaN dotován uhlíkem. Toto maximum by tedy mohla způsobovat příměs uhlíku, která je způsobena kontaminací GaN při depozici. Tento substituční atom uhlíku pravděpodobně způsobí vakanci atomu gallia a ta vede k povoleným stavům v zakázaném pásu, které odpovídají těmto energiím [3].

Jelikož kvantová účinnost grafenových solárních článků (viz Obrázek 1.9) je pro tuto vlnovou délku maximální (skoro 50 %). Fotoluminiscence na vlnové délce λ_2 bychom mohli využít a zvýšit tak celkovou účinnost těchto solárních článků.

1.3.2 XPS analýza povrchu

Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (*X-ray photoelectron spectroscopy* – XPS) je metoda analýzy povrchu, pomocí které dostaneme informace o chemickém složení povrchu. Povrch je ozařován charakteristickým rentgenovým zářením a tím dochází k fotoelektrickému jevu, kdy některé elektrony získají dostatek energie pro opuštění vzorku. Tyto elektrony jsou zachycovány a je měřena jejich kinetická energie. Pomocí vztahu popisující fotoelektrický jev,

$$E_K = hf - \phi - E_B, \quad (1.9)$$

kde E_K je kinetická energie, h je Planckova konstanta, f je frekvence dopadajícího

rentgenového záření, ϕ je výstupní práce materiálu, můžeme dopočítat vazebnou energii E_B . Jelikož vazebná energie je charakteristická pro každý prvek, lze zjistit jaký atom elektron opustil [22].

2. Experimentální část

2.1 Návrh měřící aparatury

Jeden z možných způsobů charakteristiky solárních článků je měření jejich Volt-Ampérové charakteristiky, tedy závislosti proudu na napětí pro různé zatížení článku. Na solární článek zapojíme paralelně voltmetr, sériově ampérmetr a potenciometr (zátěžový odpor), který má dostatečně velký maximální odpor (v našem případě $R_{\max} = 4,22 \text{ M}\Omega$). Během měření měníme zátěžový odpor R a odečítáme proud a napětí na solárním článku.

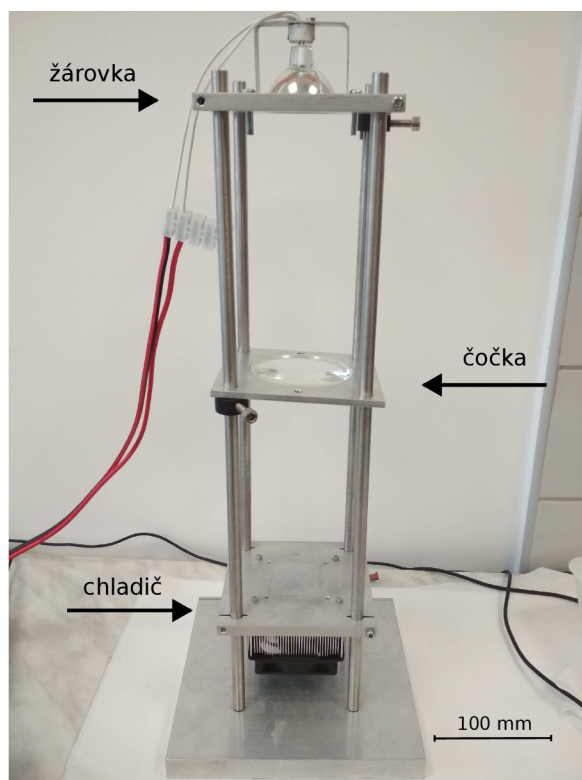
Osvětlení

Pro měření I-V charakteristiky potřebujeme zdroj světelného záření s dostatečným výkonem. Jelikož chceme co nejpřesněji simulovat reálné podmínky, byl článek osvětlován intenzitou záření o hodnotě $I = 1 \text{ kWm}^{-2}$, což odpovídá slunečnímu záření za slunného dne.

Jako zdroj světelného záření byla použita halogenová žárovka o výkonu $P = 200 \text{ W}$, připojená k elektrickému laboratornímu zdroji o maximálním výkonu $P = 320 \text{ W}$. Pro dosažení intenzity záření $I = 1 \text{ kWm}^{-2}$ bylo potřeba žárovku přiblížit na vzdálenost desítek milimetrů od solárního článku. Blízkost světelného zdroje vedla k přehřívání měřeného článku a tedy změnám jeho vlastností, což vedlo k znehodnocení měření. Tento problém byl nejdříve řešen vložením infračerveného filtru (tzv. studeného skla), který pohlcoval část infračerveného spektra a propouštěl méně tepla. Problém byl, že se začal přehřívát i tento filtr. Po pokusech uchlazení filtru pomocí vodního chlazení sklo popraskalo a bylo vyhodnoceno jako nevhodné řešení. Navrženým řešením bylo užití skleněné čočky, kdy dochází k fokusování pouze viditelné oblasti světla. Infračervená složka záření není touto čočkou fokusována a její intenzita klesá s kvadrátem vzdálenosti. Žárovka byla posunuta dále od článku a pomocí vhodné čočky ($f_s = 150 \text{ mm}$) bylo dosaženo požadované intenzity. Konečné uspořádání měřící aparatury je na Obrázku 2.1.

Zapojení měřícího zařízení

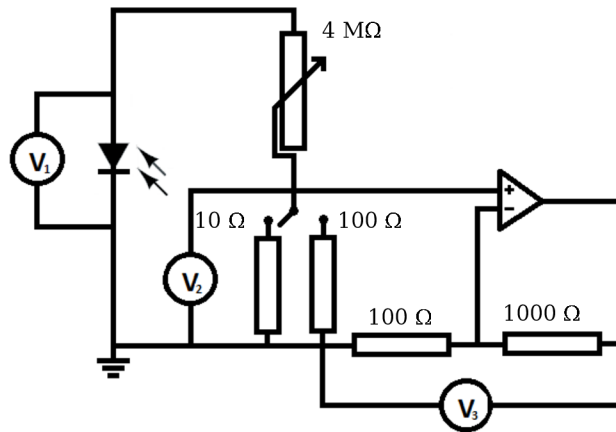
Měření napětí a proudu bylo realizováno pomocí mikrokontroleru *Arduino Uno*. Tato deska umí měřit pouze kladné napětí, bylo tedy zapotřebí do obvodu zapojit ještě jeden rezistor (tzv. „shunt“ rezistor) s malým odporem ($R_{\text{sh}} = 100 \Omega$). Na tomto rezistoru



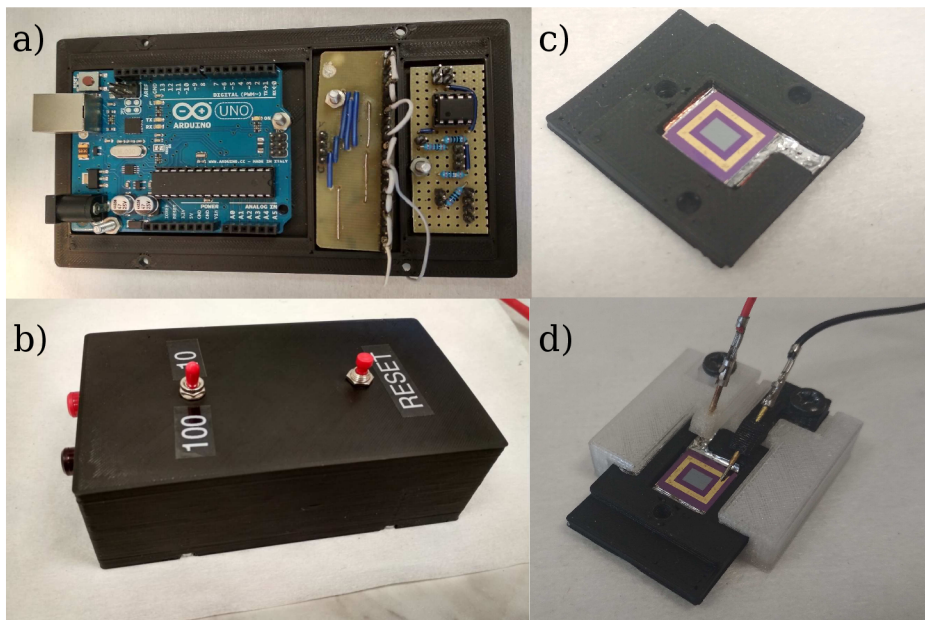
Obrázek 2.1: Sestava aparatury pro měření I-V charakteristiky.

byl měřen úbytek napětí, který byl přepočítán na elektrický proud. Jako zatěžující odpor byl použit potenciometr obsahující čtyři dvojitě digitální potenciometry s celkovým maximálním odporem $R_{\max} = 4,22 \text{ M}\Omega$, které byly také ovládány Arduinem, což značně usnadnilo celý proces měření. Při měření bylo zjištěno, že proud poskytovaný prvními experimentálními solárními články je tak malý, že ho Arduinem nešlo měřit. Minimální rozlišení Arduina je $1,07 \text{ mV}$, což při námi použitým rezistoru $R_{\text{sh}} = 100 \Omega$ pro měření proudu znamená nejnižší detekovatelný proud $10,73 \mu\text{A}$). Do obvodu tedy musel být zapojen ještě operační zesilovač TLC272CP v neinvertujícím zapojení pro jedenáctinásobné zesílení. Užití tohoto zesilovače zvýšilo rozlišení Arduina na jednotky μA . Výsledné schéma zapojení je na Obrázku 2.2.

Námi navržená elektronika obsahuje mikrokontroler *Arduino Uno*, plošný spoj s digitálním potenciometrem a plošný spoj s operačním zesilovačem, viz Obrázek 2.3. Krabice má rozměry $140 \times 78 \times 46 \text{ mm}^3$ a byla navrhnutá pro toto zařízení a vytisknutá na 3D tiskárně. Obsahuje tři výstupy, propojení s počítačem (pro napájení Arduina a načítání dat) a dále dvě zdířky na kladnou a zápornou elektrodu solárního článku. Po připojení solárního článku a otevření okna seriového monitoru Arduino IDE začne automaticky měření I-V charakteristiky. Měření můžeme opakovat pomocí tlačítka RESET, které započne nové měření. Dále jsou v obvodu dva měřicí rezistory ($R_1 = 10 \Omega$ a $R_2 = 100 \Omega$), pomocí kterých můžeme měnit rozlišení měření proudu, který teče obvodem, viz Tabulka 2.1.



Obrázek 2.2: Navržené schéma zapojení obvodu měřícího I-V charakteristiku, kde V_1 je napětí na článku, V_2 je nezesílené napětí na měřícím odporu a V_3 je zesílené napětí na měřícím odporu.



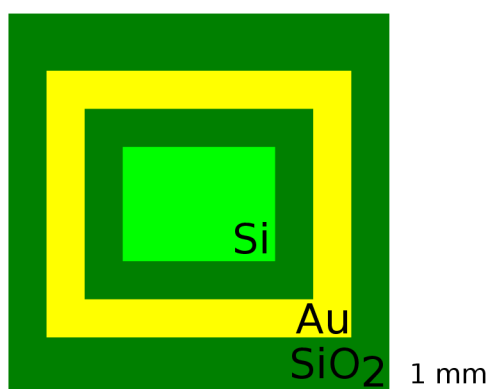
Obrázek 2.3: a) Vyhotovené zapojení desky *Arduino Uno*, digitálních potenciometrů a zesilovače, b) výsledné elektrické krabice ovládající měření I-V charakteristiky. c) držák solárního článku s hliníkovou elektrodou d) kontaktování solárního článku pro měření I-V charakteristiky

Tabulka 2.1: Rozlišení odečítání proudu pro různé měřící odpory.

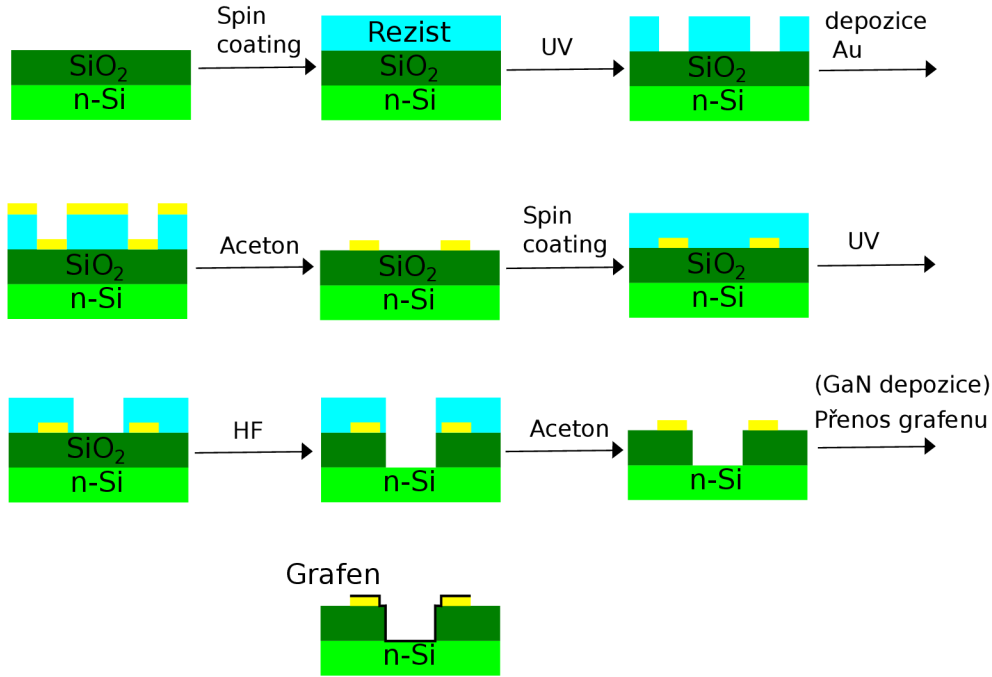
	R	(Ω)	10	100
Nezesílené	I_{\min}	(μA)	107.32	10.73
	I_{\max}	(mA)	110	11
Zesílené	I_{\min}	(μA)	9.76	0.98
	I_{\max}	(mA)	10	1

2.2 Příprava Schottkyho solárních článků

Pro přípravu Schottkyho solárních článků s přechodem grafen/křemík byl použit N-dotovaný křemík s 295 nm tlustou vrstvou SiO_2 . Nejdříve byla na tento substrát pomocí rotačního nanášení (tzv. *spin coating*) nanášena vrstva pozitivního litografického resistu. Poté pomocí optického litografu (DWL - *direct writing laser*) byla ozářena ta část resistu, kde měla být zlatá sběrná elektroda. Po vyvolání se odkrylo místo na vzorku, na které byla nanášena vrstva Au. Jednalo se o rámeček obdélníkového tvaru o rozměrech $6 \times 5 \text{ mm}^2$, viz Obrázek 2.4. Zlatá elektroda o tloušťce $d = 150 \text{ nm}$ se nanášela v naprašovací zdroj typu Kaufman a lázně v acetonu byl odstraněn zbytek resistu a přebytečné zlato. Mezi substrát a zlato byla nanášena adhezní vrstva Ti ($t = 3 \text{ nm}$). Ve druhém litografickém kroku byla znovu nanášena vrstva resistu a pomocí DWL ozářen a následně vyvolán obdélník $3 \times 4 \text{ mm}^2$ uvnitř zlaté elektrody. Takto připravený polotovar solárního článku byl dále ponořen do roztoku $\text{HF} + \text{NH}_4\text{F}$ v poměru 7:1 po dobu 4 minut. Tímto selektivním leptáním vrstvy SiO_2 byla vytvořena funkční plocha solárního článku. Bylo zjištěno, že je výhodné na křemíku znovu nechat narůst nativní vrstvu SiO_2 (2 nm) jako tenké vrstvy izolantu v přechodu grafen/Si, která vede ke zvýšení účinnosti solárního článku [18]. Nakonec se na substrát nanášel CVD grafen tak, že pokrýval zlatou elektrodu a funkční plochu mezi ní. Celý proces je znázorněn na Obrázku 2.5.



Obrázek 2.4: Schéma polotovaru pro přípravu Schottkyho solárního článku.



Obrázek 2.5: Schéma procesu přípravy Schottkyho solárních článků.

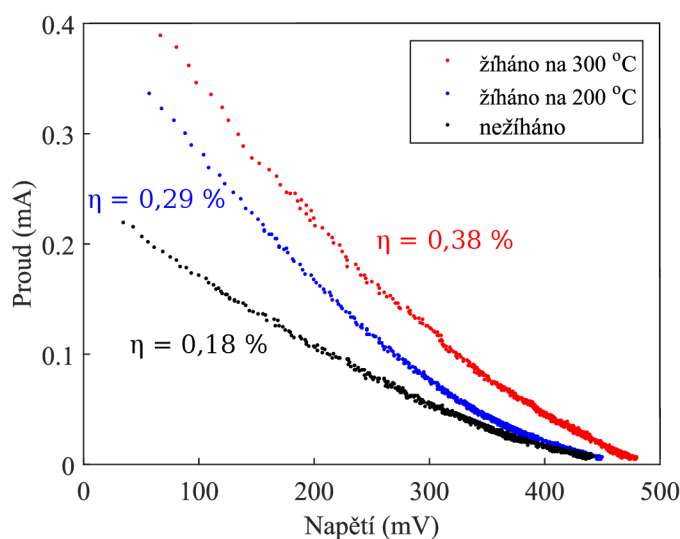
2.2.1 Charakterizace Schottkyho solárních článků

V rámci práce byli vyhotoveny 3 solární články s rozhraním grafen/křemík. Tyto články byly následně žíhány za teplot $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ v podmínkách UHV¹ po dobu 30 minut. Naměřené I-V charakteristiky jsou zobrazeny na Obrázku 2.6, kde pozorujeme postupné zvyšování účinnosti vlivem žíhání z $\eta = 0,18\text{ }%$ na $\eta = 0,38\text{ }%$. Další vypočítané parametry solárního článku jsou v Tabulce 2.2. Při procesu žíhání se solární článek nejspíše zbavil vlhkosti zachycené mezi grafenem a křemíkovou vrstvou, zbytků PMMA a acetonu. Tato kontaminace nastává při procesu přenosu grafenu. Kontaminace uhlíkových sloučenin na povrchu článku byla pozorována pomocí metody XPS. Na Obrázku 2.7 a) můžeme vidět přehledové spektrum povrchu článku a na Obrázku 2.7 b) změnu tvaru maxima C_{1s} před a po žíhání. Při žíhání se tedy článek zbavil nečistot a došlo k vytvoření lepšího kontaktu mezi grafenem a křemíkem. O této skutečnosti vypovídá i snižující se sériový odpor solárního článku.

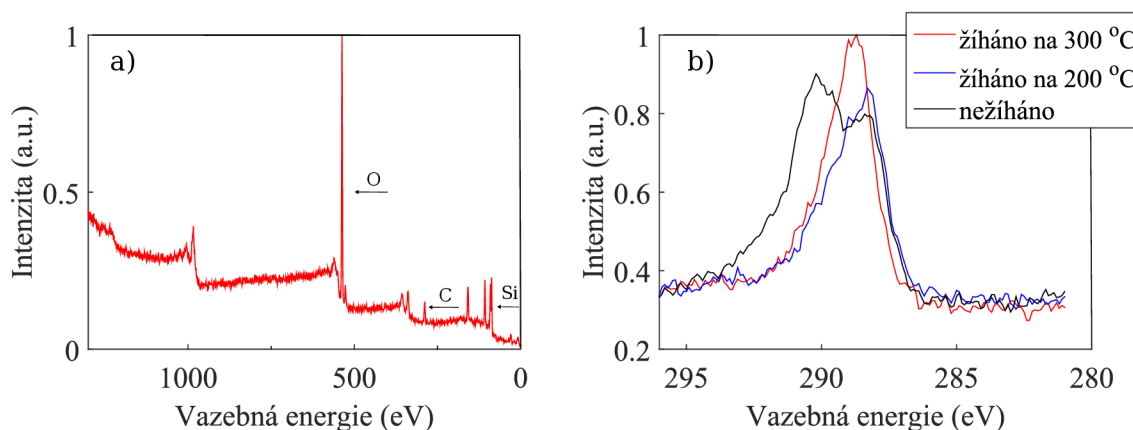
Tabulka 2.2: Výsledné parametry charakterizující solární článek před a po žíhání na teplotu $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

	Nežíháno	200 °C	300 °C
I_{SC} (mA)	0,22	0,34	0,39
U_{OC} (mV)	442	499	473
R_S (Ω)	4941	3421	2617
R_P (Ω)	1282	879	703
FF (-)	0,37	0,23	0,24
η (-)	0,18	0,29	0,38

¹ Ultra high vacuum, tlak nižší než $P = 10^{-7}\text{ Pa}$.

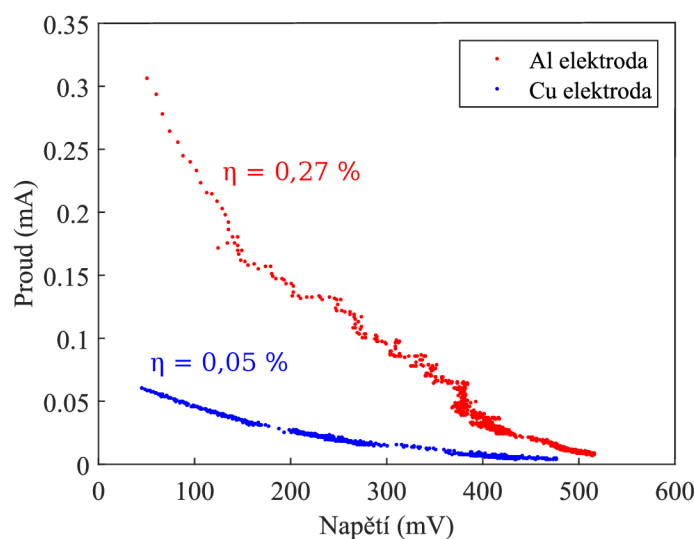


Obrázek 2.6: Naměřené I-V charakteristiky solárního článku před a po žihání na teplotě $T = 200\text{ °C}$ a $T = 300\text{ °C}$.



Obrázek 2.7: a) Přehledové XPS spektrum Schottkyho solárního článku, b) měřené XPS spektrum před a po žihání na teplotě $T = 200\text{ °C}$ a $T = 300\text{ °C}$.

Dále byl studován vliv zadní elektrody na solárním článku. V konstrukci držáku byla užita pro sběr elektronů Cu a následně Al folie. Obrázek 2.8 ukazuje rozdíl I-V charakteristik pro oba použité materiály. Pozorujeme zlepšení z účinnosti $\eta = 0,05\%$ pro měděnou elektrodu na $\eta = 0,27\%$ pro elektrodu hliníkovou. V Tabulce 2.3 jsou vypočítány parametry článků s takovými elektrodami. Výsledek ukazuje, že použití hliníkové folie v porovnání s měděnou silně zesiluje výsledný proud I_S a přibližně 5 krát zvyšuje maximální účinnost solárního článku, její užití je tedy pro praktické aplikace zásadní.



Obrázek 2.8: I-V charakteristika solárního článku s hliníkovou a měděnou elektrodou.

Tabulka 2.3: Výpočet základních parametrů solárního článku hliníkovou a měděnou zadní elektrodou. Článek byl žihán na $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$.

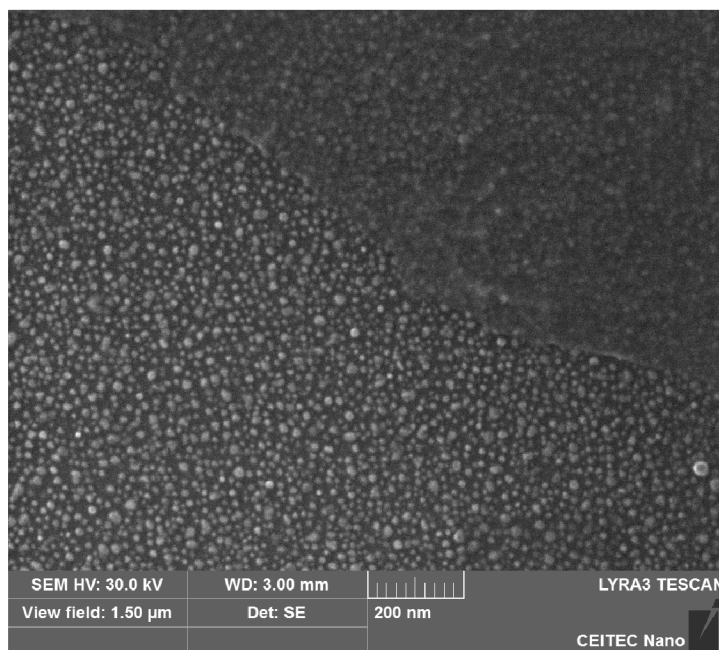
	Al elektroda	Cu elektroda
I_{SC} (mA)	0,31	0,06
U_{OC} (mV)	516	476
R_S (Ω)	7034	49334
R_P (Ω)	580	3299
FF (-)	0,21	0,19
η (-)	0,27	0,05

2.3 Příprava Schottkyho solárních článků s nanokrystaly GaN

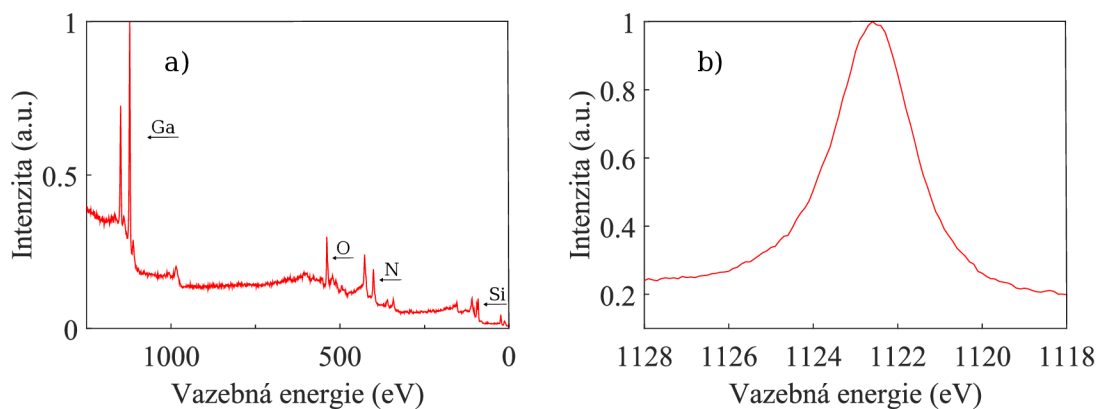
Příprava nanokrystalů GaN byla provedena užitím fyzikální metody depozice v podmínkách UHV, která kombinuje atomární svazek Ga a ionty dusíku o nízké energii ($E = 50\text{ eV}$). Takto se na substrát Si/SiO₂ (2 nm) napařováním nanosložilo gallium (10 ML). Depozice byla provedena pomocí efuzní cely, kdy deponovaný materiál je umístěn v molybdenovém kalíšku s PBN vložkou. Kalíšek je ohříván na teplotu vypařování depozitu dopadem urychlených termoemisních elektronů, které jsou extrahovány z wolframového vlákna. Napětí na kalíšku bylo $U = 800\text{ V}$. Po prohřátí materiálu se začínou z kalíšku odpařovat atomy. Ty prochází kolimátorem a jsou deponovány na substrát.

Po depozici vzniknou na povrchu ostrůvky Ga, které jsou následně pos-nitridovány užitím dusíkových iontů. Jako zdroj těchto iontů byl použit iontový elektron srážkový zdroj, kde se plyn N_2 ionizuje vlivem srážek s elektrony. Tímto způsobem vzniklé ionty jsou extrahovány a fokusovány pomocí elektrod směrem na substrát, kde ionty N_2^+ a N^+ reagují s gallií za vzniku gallium nitridových nanokrystalů.

Při přípravě solárních článků s nanokrystaly GaN na rozhraní grafen/křemík se gallium nitrid deponuje na funkční plochu solárního článku před přenosem grafenu. Depované nanokrystaly byly zobrazeny rastrovacím elektronovým mikroskopem LYRA3 od společnosti TESCAN a jsou zobrazeny na Obrázku 2.9. Na tomto obrázku jsou zobrazeny krystaly GaN na SiO₂ a krystaly GaN na SiO₂ překryté grafenem. Pro potvrzení nitrizace Ga ostrůvků proběhlo měření XPS. Sřehledové spektrum je zobrazené na Obrázku 2.10 a) a detail maxima Ga 2p_{3/2} je na Obrázku 2.10 b). Posun maxima je o 1,4 eV od pozice číseho Ga, což vypovídá o přítomnosti GaN.



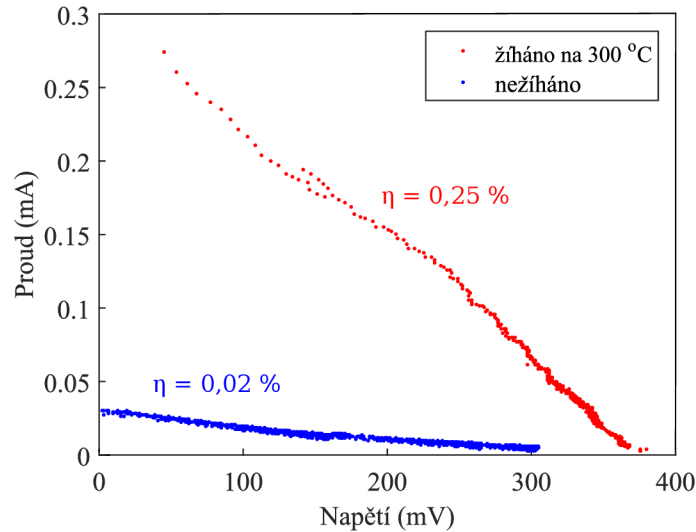
Obrázek 2.9: GaN krystaly na křemíkovém substrátu (vlevo dole) a na nich nanosená grafenová vrstva (vpravo nahoře), snímky byly pořízené na rastrovacím elektronovém mikroskopu LYRA3 TESCAN v laboratořích CEITEC VUT.



Obrázek 2.10: a) Přehledové spektrum XPS solárního článku s GaN nanokrystaly, b) Detail maxima Ga 2p_{3/2}

2.3.1 Charakterizace solárního článku s GaN nanokrystaly

Solární článek s nanokrystaly GaN na rozhraní grafen/křemík byl proměřen a výsledek tohoto měření je na Obrázku 2.11. Účinnost tohoto článku po vyžihání byla vypočítána jako $\eta = 0,25 \%$ a další parametry jsou uvedeny v Tabulce 2.4. Měření probíhalo na hliníkové elektrodě a po vyžihání na teplotu $T = 300^\circ\text{C}$. Z uvedených výsledků vyplývá, že nanokrystaly GaN o této velikosti ($d = 20 \text{ nm}$) na rozhraní Schottkyho solárního článku nijak zásadně nemění vlastnosti Schottkyho solárních článků.



Obrázek 2.11: Naměřené I-V charakteristiky GaN modifikovaného solárního článku před a po žihání na teplotě $T = 300^\circ\text{C}$.

Tabulka 2.4: Výsledné parametry GaN modifikovaného solárního článku před a po vyžihání na teplotu $T = 300^\circ\text{C}$.

	Nežiháno	300 °C
I_{SC} (mA)	0,03	0,27
U_{OC} (mV)	304	380
R_S (Ω)	17513	1391
R_P (Ω)	9140	1362
FF (-)	0,27	0,30
η (-)	0,02	0,26

Závěr

Cílem této práce byla příprava a charakterizace Schottkyho solárních článků s rozhraním grafen/křemík. Teoretická část se zabývá vlastnostmi grafenu, jeho přípravou a aplikací tohoto materiálu pro Schottkyho solární články. V této části práce je popsána funkce Schottkyho solárních článků a parametry popisující jejich vlastnosti. Navíc je zde nastíněn dosavadní směr výzkumu těchto článků.

V praktické části práce je popsán návrh a realizace aparatury pro měření I-V charakteristik solárních článků. Tato aparatura je ovládána mikrokontrolerem *Arduino Uno*, kdy měření je založeno na principu proměnné zátěže solárního článku pomocí digitálního potenciometru. Osvětlení je realizováno pomocí halogenové žárovky, kdy intenzity odpovídající záření slunce je dosaženo fokusací skleněnou čočkou.

V rámci práce byly vyrobeny 4 solární články, z toho u jednoho byla funkční plocha pokryta GaN nanokrystaly o velikosti $d = 20$ nm. Solární články byly postupně žíhány na $T = 200$ °C a $T = 300$ °C. U solárních článků bylo před žíháním dosaženo účinnosti $\eta = 0,18$ % a po vyžíhání vzrostla až na $\eta = 0,38$ %. Dále byl měřen rozdíl účinností solárních článků s měděnou a hliníkovou zadní elektrodou. Byl zjištěn zásadní význam zadní hliníkové elektrody, jejíž vlivem je nejspíše křemík ze zadní strany P-dotován hliníkem a tím dochází ke snížení četnosti rekombinaci párů elektron – díra na zadní straně článku, kde se tento jev projevuje nejvýrazněji. Nakonec byl měřen solární článek modifikovaný nanokrystaly GaN. Jeho účinnost po vyžíhání na teplotu $T = 200$ °C dosahovala hodnoty $\eta = 0,25$ % a ani další parametry se nijak zásadně neliší od solárních článků bez těchto nanostruktur. Z toho uvozují, že nanokrystaly GaN o této velikosti nijak zásadně neovlivňují funkci Schottkyho solárních článků s rozhraním grafen/křemík.

Literatura

- [1] CHATZIMOURATIDIS, A. I., PILAVACHI P. A.: Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process, In *Energy Policy*, 2009 vol. 37, (778-787).
- [2] DAS, M. K., CHICKERUR N. S.: Fabrication of polycrystalline silicon solar cells showing high efficiency, In *Bulletin of Materials Science*, 1998 vol. 21, (475-478).
- [3] OGINO T., AOKI M.: Mechanism of Yellow Luminescence in GaN, In *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, vol. 19, 2395.
- [4] GEIM A. K., NOVOSELOV K.S.: The Rise of Graphene, In *Nature Materials*, 2007 vol. 6, (183-191).
- [5] GEIM A. K., Graphene prehistory, In *Physica Scripta*, 2012.
- [6] CASTRO NETO A. H. *at al.*: The electronic properties of graphene, In *Reviews of Modern Physics*, January 2009, Vol. 81(109-162).
- [7] KITTEL, Charles. *Úvod do fyziky pevných látek*. Praha: Academia, 1985.(235)
- [8] WALLACE, P. R.: The Band Theory of Graphite, In *Physical Review*, 1947, vol. 71 (622-634).
- [9] MATTEVI C., KIM H. and CHHOWALLA M.: A review of chemical vapour deposition of graphene on copper, In *Journal of Materials Chemistry*, 2010 Issue 10.
- [10] PROCHÁZKA, P. *Příprava grafenu metodou CVD*, [Diplomová práce.] Brno: VUT, FSI, 2012. 65 s.
- [11] CHANG, H. *at al.*: A highly sensitive ultraviolet sensor based on a facile in situ solution-grown ZnO nanorod/graphene heterostructure, In *Nanoscale*, 2011, issue 1.
- [12] NAIR, R., *et al.* Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene, In: *Science*, 2008, vol. 320, issue 5881, (1308-1308).
- [13] GRUNDMANN, M. *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-13883-6.

- [14] MIAO X., *at al.*: High Efficiency Graphene Solar Cells by Chemical Doping, In *Nano Letters*, 2012 12 (6), (2745-2750).
- [15] Li, X. *at al.*: Graphene-On-Silicon Schottky Junction Solar Cells, In *Advanced Materials*, 2010., 22: (2743-2748).
- [16] HAMADANI, B. H., DOUGHERTY, B.: Solar cell characterization, In *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells Springer Series in Materials Science*, 2015, (229-245)
- [17] ZAHRADNÍČEK, R.: *Schottkyho solární články na rozhraní grafen/křemík*, [Diplomová práce.] Brno: VUT, FSI, 2014.
- [18] YANG, L. *at al.*: Interface engineering for efficient and stable chemical-doping-free graphene-on-silicon solar cells by introducing a graphene oxide interlayer, In *Journal of Material Chemistry C*, 2014., Issue 40.
- [19] Li, F. Y. *at al.*: Schottky junction solar cells based on graphene with different numbers of layers, In *Applied Physics Letters*, 2014., 104: (2743-2748).
- [20] AN, X, LIU A a KAR S: Optimizing performance parameters of graphene–silicon and thin transparent graphite–silicon heterojunction solar cells, In *Carbon*, June 2013, Volume 57, (329-337).
- [21] RAIS-ZADEH, *at al.*: Gallium Nitride as an Electromechanical Material, In *Journal of Microelectromechanical Systems*, December 2014, 23(6):(1252-1271).
- [22] HULVA, J.: *Selektivní růst GAN na SIN.*, [Bakalářská práce.] Brno: VUT, FSI, 2012.
- [23] YE R., BARRON A.: Photoluminescence spectroscopy and its applications <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1143/JJAP.19.2395>

Seznam zkratk

- CVD** Chemická depozice z plynné fáze (z ang. *Chemical Vapor Deposition*)
- DWL** Optický litograf (z ang. *Direct Writing Laser*)
- I-V** Volt-Ampérová
- LED** Elektroluminiscenční dioda (z ang. *Light Emitting Diode*)
- ML** Jednoatomární vrstva (z ang. *MonoLayer*)
- PMMA** Polymethylmetakrylát
- UHV** Ultra vysoké vakuum (z ang. *Ultra High Vacuum*)
- XPS** Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (z ang. *X-ray Photoelectron Spectroscopy*)