

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 773*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Ondřej Frantík*

**Vysokoteplotní procesy  
ve výrobě křemíkových  
fotovoltaických článků**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

**Ing. Ondřej Frantík**

**VYSOKOTEPLTNÍ PROCESY VE VÝROBĚ  
KŘEMÍKOVÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ**

HIGH TEMPERATURE PROCESSES  
IN SILICON SOLAR CELLS PRODUCTION

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Mikroelektronika a technologie  
Školitel: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.  
Oponenti: prof. Ing. Juraj Banský, CSc.  
prof. Ing. Lubomír Hudec, DrSc.  
Datum obhajoby: 16. prosince 2014

**Klíčová slova:**

solární články, difúze, fosfor, bor, příměs, emitor, pasivační vrstvy, vrstvový odpor, doba života minoritních nosičů, MWPCD, Elipsometrie, ECV.

**Keywords:**

solar cells, diffusion, phosphorus, boron, dopant, emitter, passivation layers, sheet resistance, minority carrier lifetime, MWPCD, Ellipsometry, ECV.

**Místo uložení rukopisu:**

Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně,  
Technická 10, 61600 Brno

© Ondřej Frantík, 2014

ISBN 978-80-214-5137-7

ISSN 1213-4198

# OBSAH

1 Úvod .....	5
2 Současný stav problematiky .....	6
2.1 Difúze .....	6
2.2 Vybrané charakterizační nástroje pro vytvářené polovodičové struktury ....	8
3 Cíle disertační práce .....	11
4 Výsledky disertační práce.....	12
4.1 Modelování a simulace v prostředí SILVACO .....	12
4.2 Experimentální výroba solárních článků.....	19
5 Závěr .....	26
6 Seznam použité literatury .....	28



# 1 ÚVOD

Disertační práce je zaměřena na technologii výroby krystalických křemíkových solárních článků, které spadají do rodiny obnovitelných zdrojů. Jak uvedla předsedkyně Státního úřadu pro jadernou bezpečnost Dana Drábová v [1], po krátké éře, ve které využíváme fosilní paliva, se dostaneme do éry pofosilní. A tehdy budou obnovitelné zdroje a jejich využívání nezbytností. Proto je nutné pracovat na vývoji těchto zdrojů již teď, kdy máme dostatek fosilních paliv. Dále z komentáře paní předsedkyně vyplývá, že jaderná energie je v éře pofosilní možností, ovšem obnovitelné zdroje jsou nutností.

V současnosti existuje celá řada technologických postupů, které vedou k vytvoření solárního článku[2], přičemž majoritní část výroby je založena na zpracování krystalického křemíku. Komerčního úspěchu při výrobě krystalických křemíkových solárních článků je možné dosáhnout třemi cestami. První cestou je vyrábět solární články, jež mají příznivý poměr účinnost/cena. Druhou cestou jsou články, které mají nějakou přidanou hodnotu, například netradiční barva solárního článku, oboustrannou osvětlitelnost, flexibilita. Poslední cestou jsou články, které mají abnormálně vysokou účinnost bez ohledu na konečnou cenu.

Prvními dvěma případy se bude zabývat tato práce. Samotná disertace je zaměřena na tato témata z toho důvodu, že její zadání vyplývá přímo z průmyslu, konkrétně ze společnosti Solartec s.r.o. Proto byla i tato práce řešena na pilotní lince a v laboratořích této společnosti, což vede k uplatnění výsledků disertace přímo v praxi. Výsledkem je solární článek realizovaný na krystalickém křemíkovém substrátu. V současnosti je krystalický křemík nejvhodnější materiál, protože je možné na něm dosáhnout vysoké konverzní účinnosti za vhodnou cenu. Podle Shockley–Queisserova limitu mohou články s jedním pn přechodem dosáhnout účinnosti nad limit 30 % při standardních podmínkách, přičemž již bylo dosaženo hranice 24 %.

## 2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

### 2.1 DIFÚZE

Tato práce se zabývá především difúzí z kapalného zdroje ( $\text{POCl}_3$  či  $\text{BBr}_3$ ) v nevakuové dávkové vysokoteplotní peci, přičemž byly zvoleny dvě základní příměsi, fosfor a bor. Fosforem se realizují  $n^+$  vrstvy, a naopak borem  $p^+$  vrstvy.

Difúze je pohyb částic hmoty způsobený chemickým gradientem, který závisí na řadě fyzikálních veličin. Tedy částice se pohybují většinou z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací. Tento proces se ve výrobě solárních článků využívá pro vytváření  $pn$ ,  $n^+n$ ,  $p^+p$  přechodů. Tyto vrstvy pak plní většinou funkce emitorů, BSF (Back Side Field) a FSF (Front Side Field). Důležitý je pak jejich koncentrační profil, například emitoru jdou proti sobě dvě možnosti:

- Emitor je hluboký a silně dopovaný = emitor je možné dobře kontaktovat, ovšem špatně pasivuje povrch.
- Emitor je mělký a slabě dopovaný = emitor dobře pasivuje povrch, ovšem špatně se kontaktuje.

Pokud se ovšem vrátíme k samotné teorii, tak v pevných látkách dochází k difúzi ve větší míře za standardních podmínek jen velmi obtížně. Proto je nutné pohyb částic vynutit, k tomu je možné pak použít například vysokých teplot.

K základnímu popisu se pak používá druhý Fickův zákon, který má podobu [4]:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

kde  $C(x, t)$  je koncentrace v daném čase  $t$  a místě  $x$ ,  $D$  je difúzní koeficient, který je závislý na teplotě [4]:

$$D = D_0 e^{\frac{-E_A}{kT}} \quad (2)$$

kde  $D_0$  je frekvenční faktor, jenž je dán strukturou a povahou látky a nezávisí na teplotě.  $E_A$  je aktivační energie a také nezávisí na teplotě, je dána energií nutnou pro přeskok atomů.  $T$  je absolutní teplota a  $k$  je Boltzmannova konstanta. Tento vztah je známý pod označením jako Arrheniův. Tabulka 1 ukazuje jednotlivé koeficienty pro bor a fosfor, tyto prvky byly vybrány záměrně, protože jsou nejpoužívanější pro dopování při výrobě solárních článků.

Tabulka 1: Koeficienty pro jednotlivé pro vybrané prvky podle [5]

Veličina	Jednotka	Bor	Fosfor
$D_0$	$\text{cm}^2/\text{s}$	0,76	3,85
$E_A$	eV	3,46	3,66

Prakticky je možné difúzi rozdělit na dvě části a to předdifúzi (predeposition/deposition) a rozdifúndování (redistribution či drive-in).

Princip difúze je dále popsán na difúzi z plynného zdroje příměsi. Při předdifúzi dochází k sycení zdrojového plynu příměsi v reaktoru a jeho reakcí s kyslíkem a křemíkem se nanáší dopovaný oxid na křemíkové desky. A zároveň částečně proniká příměs do křemíkové desky.

Při rozdifúndování již sycení neprobíhá a dochází k intenzivnějšímu pronikání příměsi z dopovaného oxidu do objemu křemíkových desek.

Pokud řešíme druhý Fickův zákon pro okrajové a počáteční podmínky určující nekonečný zdroj příměsi dostáváme řešení podle [4],[5]:

$$C(x, t) = C_S \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (3)$$

kde  $C_S$  je povrchová koncentrace,  $x$  je vzdálenost od povrchu,  $\sqrt{Dt}$  je difúzní délka a  $\operatorname{erfc}$  je error funkce. Tato rovnice pak popisuje výše zmíněnou předdifúzi. Při tomto typu difúze se změnou času mění hloubka průniku příměsi a povrchová koncentrace se nemění.

Pokud ovšem dosadíme jiné okrajové a počáteční podmínky do druhého Fickova zákona, a to jako pro konečný zdroj příměsi, dostáváme vztah podle [4],[5]:

$$C(x, t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (4)$$

kde  $Q_0$  je celkový počet příměsí. Toto řešení má Gaussovo rozdělení. Je nutné podotknout, že tyto základní modely ne zcela odpovídají praxi ve výrobě solárních článků. Běžně jsou tyto modely uváděny pod označení jako Irvinovy.



## 2.2 VYBRANÉ CHARAKTERIZAČNÍ NÁSTROJE PRO VYTVÁŘENÉ POLOVODIČOVÉ STRUKTURY

V následujících kapitolách budou popsány vybrané měřicí metody a veličiny, které byly použity v praktické části této práce. A to z důvodu, aby vznikl ucelený pohled na řešenou problematiku disertační práce.

### Měření doby života minoritních nosičů - MWPCD

Jedna z používaných metod pro stanovení doby života minoritních nosičů se označuje zkratkou MWPCD (MicrowavePhotoconductiveDecay). Je založena na generaci volných nosičů (pár elektron-díra) pomocí pulsu infračerveným laserem (v našem případě: 904 nm, absorpční hloubka v křemíku cca 30  $\mu\text{m}$ ).

Po vygenerování volných nosičů je měřený vzorek bodově mikrovlnně ozařován. Ve vzorku dochází ke změně koncentrace volných nosičů, tedy ke změně vodivosti, což je detekováno odraženým mikrovlnným zářením. Úbytek mikrovlnné energie po odrazu od vzorku je zaznamenán. Následuje jeho proložení exponenciální funkcí, kde časová konstanta představuje měřenou dobu života minoritních nosičů [9].

Změna koncentrace volných nosičů je dána rekombinačními centry, kde volné nosiče rekombinují a přestávají být volnými. Tedy s počtem rekombinačních center bude klesat doba života minoritních nosičů, ovšem výrazněji tento jev závisí na typu rekombinačního centra. Rekombinace probíhá účinněji u rekombinačních center, jež mají energetické hladiny bezprostředně u Fermiho hladiny vlastního polovodiče [10]. Tedy přibližně uprostřed zakázaného pásu. Z toho vyplývá, že velmi účinnými centry jsou měď, zlato a železo.

Výsledkem měření pak může být mapa měřené doby života minoritních nosičů, jako například u zařízení od společnosti Semilab, obrázek 1. Zde každý barevný bod určuje konkrétní dobu života, škála (38  $\mu\text{s}$  až 62  $\mu\text{s}$ ) je pod obrázkem.

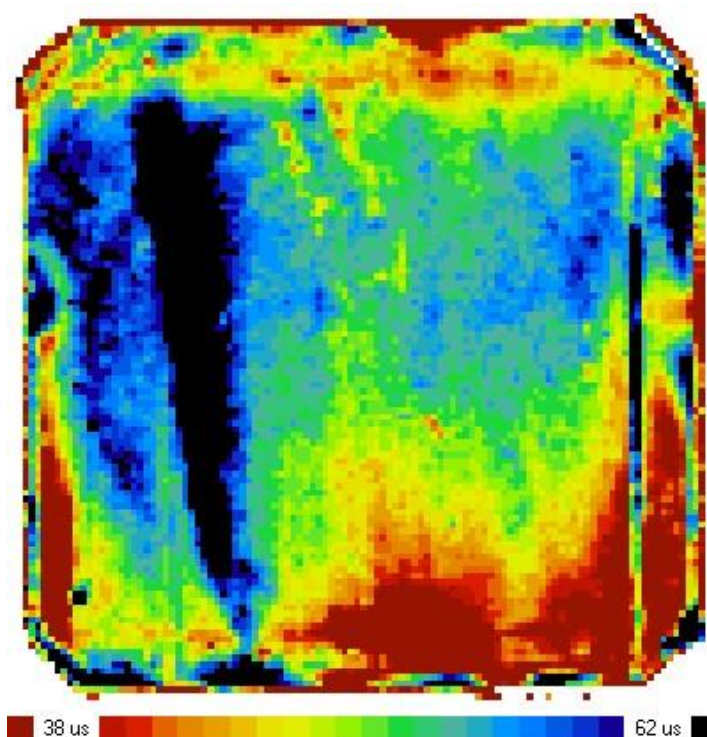
Doba života nám tedy charakterizuje kvalitu zvoleného substrátu, protože má přímý vliv na výsledné parametry solárního článku. Difúzní délka  $L_n$  má pak spojitost s dobou života podle rovnice:

$$L_n = \sqrt{D\tau} \quad (5)$$

kde  $D$  je difúzní koeficient a  $\tau$  je doba života nosičů.

Podle [6] je možné vyvodit následující závěry, pokud uvažujeme o ideálním emitoru a nepřítomnosti stínění a reflexe:

- Když je difúzní délka nosičů náboje  $L_n$  větší než dvojnásobek tloušťky krystalu, pak se proud nakrátko  $I_{sc}$  dostává do saturačních hodnot.
- Pro vysoký fotoproud musí být povrchová rekombinační rychlost  $S_n$  nižší než 100 cm/s.
- Pokud difúzní délka  $L_n$  klesne pod hodnotu tloušťky krystalu, pak fotoproud rapidně poklesne.
- Avšak, je-li difúzní délka  $L_n$  menší než polovina tloušťky krystalu, tak proud na krátko  $I_{sc}$  je také redukován, ovšem už nezávisí na povrchové rekombinační rychlosti  $S_n$ .



Obrázek 1: Mapa doby života minoritních nosičů proudu

Ze samotné doby života minoritních nosičů, lze určit řadu veličin a opačně, což naznačuje i níže uvedený vztah za předpokladu některých zjednodušení [8]:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2S_{eff}}{W} \quad (6)$$

kde  $\tau_{\text{eff}}$  je efektivní doba života,  $\tau_b$  je objemová doba života,  $S_{\text{eff}}$  je efektivní povrchová rekombinace a konečně  $W$  značí tloušťku substrátu

### **Měření vrstvého odporu – bezkontaktní měření**

Pokud je nutné sledovat homogenitu vrstvého odporu vytvořené vrstvy, je čtyřbodová metoda nedostačující. Proto byla při realizaci této práce použita bezkontaktní metoda měření vrstvého odporu od společnosti Semilab.

Princip je podobný metodě MWPCD, zde je LED zdroj o vlnové délce 475 nm, který slouží pro generování nosičů elektron díra. Kolem LED zdroje jsou dva kapacitní detektory kruhového tvaru, které měří potenciál. Potenciál se mění právě při vygenerování nosičů, a pak je vrstvý odpor dán měřeným poměrem potenciálů mezi detektory [9]. Výsledek měření se zobrazuje ve formě mapy vrstvého odporu, obrázek má podobnou formu jako v případě měření doby života minoritních nosičů.

### **Měření koncentračního profilu - ECV**

Pod zkratkou ECV (Electrochemical Capacitance Voltage) se skrývá metoda prostanovení koncentračního profilu příměsí, ovšem jen těch atomů, jenž jsou zabudovány do mřížky, tzv. aktivních příměsí. Princip metody je založen na postupném odleptávání dopovaného povrchu a měření CV charakteristiky na záporně polarizovaném přechodu.

Měřená kapacita je pak závislá na koncentraci příměsí, jak je patrné ze vztahu z [3]:

$$C(V) = \sqrt{\frac{q\epsilon_s C_B}{2} \left( V_{\text{bi}} \pm V_R - \frac{2kT}{q} \right)} \quad (7)$$

kde  $\epsilon_s$  je permitivita křemíku,  $C_B$  je objemová koncentrace příměsí,  $V_{\text{bi}}$  je kontaktní napětí (built-in) přechodu,  $V_R$  je záporně polarizované napětí (Reverse),  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $T$  je teplota a  $q$  je náboj.

### **Měření kvantové účinnosti solárního článku**

Pomocí měření kvantové účinnosti se stanovuje reakce solárního článku na jednotlivé vlnové délky. I při tomto typu diagnostiky hraje vysokou roli povrchová rekombinační rychlost. Právě solární články s mělkým emitorem (povrchová koncentrace příměsí nižší než  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  a hloubka emitoru do  $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ ) a s nižší

povrchovou rekombinační rychlostí mají poměrně velké zisky u vlnových délek pod 400 nm.

Kvantovou účinnost lze chápat buď jako externí nebo naopak interní. Přičemž externí je dána jako podíl počtu páru elektron-díra k počtu fotonů dopadajících na fotovoltaický článek. Interní je určena pouze fotony, které proniknou do fotovoltaického materiálu. Může se blížit až k hodnotě 100 %, protože běžně jeden foton vygeneruje nejvýše jeden pár elektron-díra.

### 3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z dosavadního popisu je zřejmé, že vysokoteplotní procesy hrají nezastupitelnou roli ve výrobě solárních článků. Především pak jde o difúzi pro vytváření pn a pp<sup>+</sup>přechodu, nanesení pasivačních a antireflexních vrstev, výpal metalizace. Většina těchto výrobních kroků probíhá ve velmi čistých prostorech, což jen zvyšuje náročnost celého výzkumu.

Již v úvodu bylo poukázáno na to, že úspěšné solární články jsou založeny nejen na vysokém poměru účinnost/výrobní náklady, ale také na přidané hodnotě jako je například speciální barva solárního článku či oboustranná osvětlitelnost.

Na základě těchto skutečností jsou stanoveny hlavní cílem disertační práce: návrh, realizace, optimalizace za pomoci modelování a simulací, diagnostika, analýza struktur krystalických křemíkových solárních článků, jednostranných i oboustranných. V rámci realizace, charakterizace a simulace vytvářených struktur byla navázána spolupráce jak s tuzemskými, tak zahraničními výzkumnými organizacemi, soukromými i akademickými.

S ohledem na široký rozsah zkoumané problematiky byly stanoveny následující dílčí cíle, které tvoří jádro disertační práce:

- Vytvoření modelů difúzí fosforu a boru pro výrobu solárního článku (mělká difúze při nižší teplotě) a jejich ověření.
- Vývoj technologie pro bifaciální solární články.
- Optimalizace difúze fosforu s následným vývojem nové struktury emitoru.
- Diagnostika solárních článků s novými strukturami a jejich porovnání se standardními solárními články.

## 4 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

Výsledky disertační práce jsou rozděleny do tří základních kapitol tak, jak chronologicky vznikaly:

- a) *Analýza vybraných vysokoteplotních procesů* – před experimentálními aktivitami bylo nezbytné některé vybrané procesy zmapovat a popsat jejich fyzikální podstatu.
- b) *Modelování a simulace* – pro vybrané vysokoteplotní procesy difúze jsou sestaveny modely, jež slouží k simulování procesů.
- c) *Experimentální výroba solárních článků* – zde jsou popsány experimentální postupy a pokusy pro získání neobvyklých struktur solárních článků či článků s vysokým poměrem účinnost/cena.

V daných bodech je kladen důraz především na samotné difúzní procesy, objevují se zde i další optimalizační kroky pro ostatní vysokoteplotní procesy, ovšem těžiště je v difúzi fosforu a boru. V této zkrácené verzi se zaměříme pouze na poslední dva body - *Modelování a simulace* a *Experimentální výroba solárních článků*.

Níže je popsán jen podstatný výběr z celé experimentální činnosti, v některých případech jsou dokonce popsány určité části experimentů či jen výsledky a závěry. A to vše z důvodu ucelenosti a přehlednosti celé zkrácené verze disertační práce. Přičemž řada optimalizačních experimentů není ani popsána a jsou vybrány jen ty nezajímavější, co do výsledků. Často ani nejsou plně popsány teplotní profily a další nastavení procesů, a to nejen z důvodu ucelenosti práce, ale především z důvodu neodhalení „know-how“. Pro bližší informace o procesech a nastavení jednotlivých zařízení je možné kontaktovat autora.

Měřené hodnoty uvedené v tabulkách a grafech jsou obvykle průměry hodnot z jednoho až pěti vzorků. Na jednom vzorku se většinou provádí měření v pěti bodech, výjimkou je například měření map (vrstvého odporu, doby života minoritních nosičů atd.), kdy měření probíhá ve stovkách bodů v závislosti na zvoleném rastru.

### 4.1 MODELOVÁNÍ A SIMULACE V PROSTŘEDÍ SILVACO

Hlavním cílem kapitoly je popis vytváření modelů difúzí fosforu a boru vhodných pro případ časově krátkých difúzí za nízkých teplot s výsledným emitorem, který má vysokou povrchovou koncentraci nad  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Toto je pak typické pro emitory používané v krystalických křemíkových solárních člancích. Vytvořené modely byly pak používány při vývoji technologie pro bifaciální solární články a při vývoji nového fosforového emitoru, sloužily k predikci výsledku difúzních procesů. Cílem je

nahradit klasický model difúze, který nedává přesné výsledky právě pro emitory s vysokou povrchovou koncentrací a malou hloubkou do 2  $\mu\text{m}$ .

Modely byly vytvářeny v prostředí programu SILVACO, potažmo jeho výpočetní části ATHENA. Díky určité predikci pomocí modelů je pak možné experimenty realizovat pouze virtuálně pomocí simulace a není třeba provádět řadu experimentů ve vysokoteplotních pecích a realizovat jen vybrané experimenty ze simulací.

Klasické modely popsané v teoretickém úvodu, nazývané také jako Irvinovy, jsou zcela nevhodné pro popis velmi silně dopovaných oblastí s malou hloubkou přechodu vytvářených při relativně nízkých teplotách a krátkých časech. Toto byla hlavní motivace pro vytvoření nových modelů, které jsou popsány v této kapitole a jsou vhodné pro simulace difúzních procesů používaných ve výrobě solárních článků.

Zde popsané modely jsou již výsledky vývoje modelů. Při tomto vývoji byla snaha modely co nejvíce zjednodušit, aby byly výpočty rychlé a relativně přesné. Po vyvinutí vhodných modelů byly tyto používány při řešení cílů této disertační práce.

## Modely difúze boru

Difúze boru hrála klíčovou roli především při vyvíjení technologie pro bifaciální články. Na vytváření  $\text{P}^+$  vrstev u krystalických křemíkových solárních článků se historicky používalo dopování hliníkem, které má určité limity (vysoký difúzní koeficient, velikost atomu atd.). Použití boru na vytváření  $\text{P}^+$  vrstev bylo spíše novinkou, a proto bylo nutné vytvořit níže popsané modely. Jak se následně ukázalo, modelovat difúzi boru není tak náročné, oproti vytváření modelu pro difúzi fosforu, což je dáno chováním boru a fosforu během difúze.

Základní vstupní parametry modelů na difúzi boru byla koncentrace boru ve zdroji příměsi  $C_{\text{BSG}}$  (BSG - Boron Silicate Glass), frekvenční faktor  $D_0$  a aktivační energie  $E_A$ , viz Arrheniův vztah. Po určité iteraci byly vytvořeny dva modely, první byl pojmenován Sil4 a druhý Sil7. Přičemž u obou modelů byly stanoveny jednotlivé vstupní parametry modelů podle literatury [5], [7], [11], viz tabulka 2.

*Tabulka 2: Vstupní parametry modelů difúze boru podle literatury [5], [7],[11]*

Model	$C_{\text{BSG}}(\text{cm}^{-3})$	$D_0(\text{cm}^2/\text{s})$	$E_A$ (eV)
Sil4	1e20	16	3,69
Sil7	1e20	0,76	3,46

Odkoušení jednotlivých modelů proběhlo na výsledcích ze tří difúzí boru, jejichž výsledkem byly borové emitory s hodnotou vrstevného odporu  $R_{SH}$  100  $\Omega/\square$  (označení DIB100), 45  $\Omega/\square$  (označení DIB45) a 30  $\Omega/\square$  (označení DIB30). Měřené veličiny na experimentálně vyrobených emitorech byly vrstevný odpor  $R_{SH}$  a hloubka  $x_j$ . Vrstevný odpor byl stanoven třemi metodami bezkontaktním mapovým měřením od společnosti Semilab, čtyř bodovou metodou 4PP a výpočtem z měřeného koncentračního profilu – měření profilu proběhlo metodou ECV. Hloubka přechodu byla stanovena pouze z koncentračního profilu. Níže je kurzivou výpis kódu modelu a simulace pro model Sil4.

```
#Model Sil4
go athena
line x loc=0.0 spac=0.03
line x loc=2.0 spac=0.03
line y loc=0.0 spac=0.03
line y loc=2.0 spac=0.03

#definice materialu
Initsiliconphosphorusresistivity=1.5 orientation=111
extractname="Rs" sheet.resmaterial="silicon" mat.occno=1 x.val=0 region.occno=1
structuretwo.dim
impurityI.boronsiliconDix.0=16Dix.E=3.69
#ramp up
diffusetime=20 temperature=750 t.final=900 nitro
#preddifuze
diffusetime=30 temperature=900 c.boron=1e20 nitro
#ramp up
diffusetime=18 temperature=900 c.boron=1e20t.final=1030 nitro
#rozdifundovani1
diffusetime=30 temperature=1030 c.boron=1e20 nitro
#oxidace
diffusetime=10 temperature=1030 c.boron=1e20dryO2
#rozdifundovani2
diffusetime=20 temperature=1030 c.boron=1e20 nitro
#ramp down
diffusetime=110 temperature=1030 t.final=750 c.boron=1e20 nitro
etch oxide all

extractname="rho" sheet.resmaterial="Silicon" mat.occno=1 x.val=0 region.occno=1
extractname="xj" xjmaterial="Silicon" mat.occno=1 x.val=0 junc.occno=1
extractname="srp_profile" curve(depth, srp material="Silicon" mat.occno=1 x.val=0)
outfile="dif_B_srp_11.dat"
structureoutfile=TVNT16P.str
tonyplotTVNT16P.str
```

Výsledky z měření a simulací jsou v tabulce 3, přiloženy jsou i výsledky z klasického Irvinova modelu [12]. Z tabulky 3 vyplývá, že je mezi metodami měření

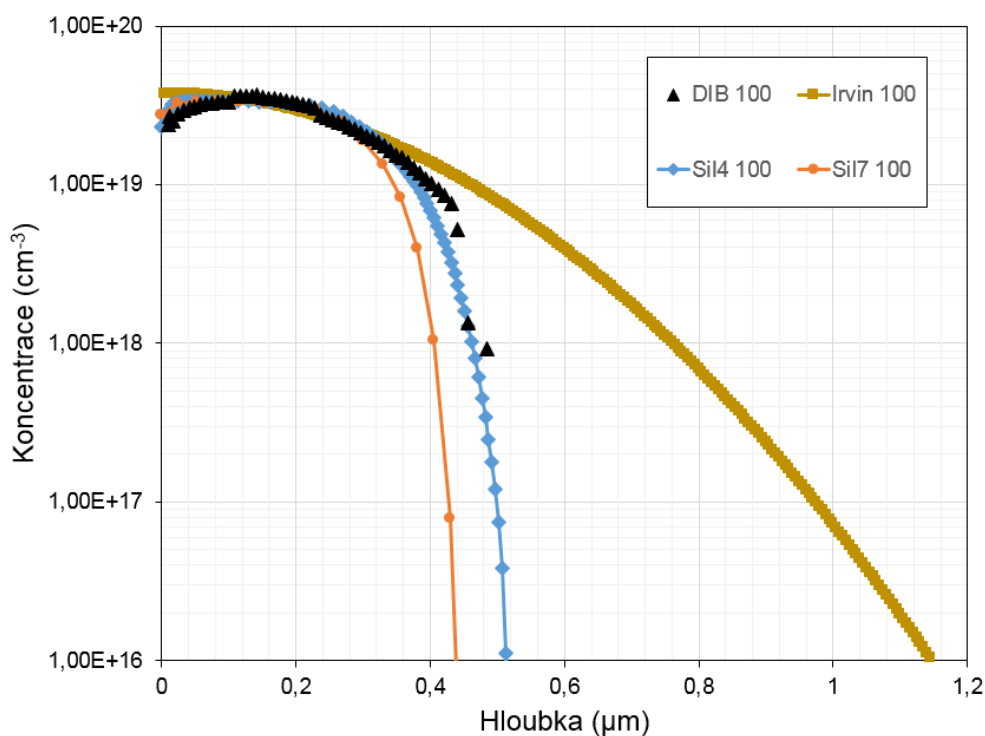
vrstvého odporu  $R_{SH}$  rozdíl až  $6 \Omega/\square$ . Také je patrné, že klasický Irvinův model je nevyhovující jak do výpočtu vrstvého odporu  $R_{SH}$ , tak do výpočtu hloubky emitoru  $x_j$ . U modelů Sil4 a Sil7 bylo dosaženo výstupních hodnot v přijatelných mezích, jak u vrstvého odporu emitoru, tak i u vypočtené hloubky emitoru. Nejpřesnější jsou oba vyvinuté modely u difúze DIB100.

Srovnání jednotlivých modelů s naměřenými daty je také vidět na obrázku 2. Měřený průběh koncentračního profilu metodou ECV je označen jako DIB 100. I z obrázků je pěkně vidět, jak je klasický model nevhodný (označený Irvin) a také, že modely Sil4 a Sil7 dávají přijatelné výsledky.

*Tabulka 3: Měřené výsledky na reálném emitoru a výsledky simulací*

Model/Měření	DIB100		DIB45		DIB30	
	$R_{SH}$ ( $\Omega/\square$ )	$x_j$ ( $\mu m$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega/\square$ )	$x_j$ ( $\mu m$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega/\square$ )	$x_j$ ( $\mu m$ )
ECV	94,4	0,54	40,1	0,78	29,5	1,24
4PP	97,0	-	46,0	-	29,0	-
Semilab	100,0	-	43,0	-	25,0	-
Irvin	75,5	1,15	70,0	1,63	68,1	1,84
Sil4	96,54	0,58	51,6	1,22	36,1	1,75
Sil7	104,8	0,49	56,8	1,00	39,9	1,4





Obrázek 2: Měřený koncentrační profil borového emitoru s vrstevným odporem  $100 \Omega/\square$  (DIB 100) a výsledky simulací pro jednotlivé modely (Irvin 100, Sil4 100, Sil7 100)

## Modely difúze fosforu

Difúze fosforu hraje významnou roli při vytváření  $N^+$  vrstev a je základem klasického konceptu výroby solárních článků označovaného jako Al-BSF. Jako u difúze boru, tak i u difúze fosforu při realizaci solárních článků, je hloubka vytvořeného emitoru poměrně malá ( $<1 \mu\text{m}$ ) a povrchová koncentrace poměrně vysoká ( $>10^{19} \text{cm}^{-3}$ ), přičemž teplota i čas difúze fosforu jsou často ještě nižší (teploty mezi  $800$  až  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  při časech kolem 1 hodiny) než u boru. I samotný koncentrační profil fosforu je poměrně odlišný a značně členitý, což je dáno vysokou závislostí difúzního koeficientu fosforu na koncentraci fosforu. Z těchto důvodů je zde patrná vyšší náročnost na vytvoření modelu oproti modelu difúze boru. I v tomto případě je klasický Irvinův model nevyhovující a je třeba tento model modifikovat.

Při konečné realizaci modelu difúze fosforu byly uplatňovány dva přístupy. První byl založen na modifikaci klasického Irvinova modelu (modely S17, S18, S19), tak jako v případě modelu difúze boru. Druhým přístupem bylo nastavení modelu tak, že difúzní koeficient lze rozložit na jednotlivé stavy, přičemž v našem případě se u difúze fosforu uplatňují především základní tři [5], [13] a [14]:

$$D_P = D^0 + D^- \left(\frac{n}{n_i}\right) + D^= \left(\frac{n}{n_i}\right)^2 \quad (8)$$

kde  $D_P$  je difúzní koeficient fosforu,  $D^0$  je neutrální vakanční–příměsová difúze,  $D^-$  je negativně vakanční–příměsová difúze,  $D^=$  je dvojnásobná negativně vakanční–příměsová difúze,  $n_i$  je intrinsická koncentrace nosičů a  $n$  je počet děr. Tento přístup byl použit u modelu S8.

U obou přístupů bylo nejprve nutné určit vstupní parametry modelů, s tím že společným parametrem byla koncentrace fosforu ve fosforové sklovině (PSG – Phosphorus Silicate Glass)  $C_{PSG}$ , která byla určena podle závěrů prací [15] a [75](použito u modelu S8, S17 a S19). Nastavení frekvenčního faktoru  $D_0$  a aktivační energie  $E_A$  u modelů vycházelo z literatury [5] a [11], přičemž ke konečným hodnotám se dospělo postupnou iterací. Vstupní parametry pro model jsou v tabulce 4. V tabulce 5 jsou zobrazeny koeficienty pro model S8. Model S1, který je také uveden v tabulce 5 je jen pro srovnání, je to základní model programu SILVACO pro difúzi fosforu, u kterého se definuje pouze koncentrace fosforu ve zdroji difúze.

V našem případě byly modely aplikovány na difúzi při teplotě 850 °C po dobu 60 minut – optimalizovaná difúze pro realizaci vyvíjeného fosforového emitoru popsaného v této práci (označení difúze DIF607), což jsou vstupní parametry simulace. Výstupními parametry simulace byl vrstvý odpor a hloubka emitoru.

*Tabulka 4: Vstupní parametry modelů difúze fosforu*

Model	$C_{PSG}(\text{cm}^{-3})$	$D_0(\text{cm}^2/\text{s})$	$E_A$ (eV)
S1	1e22	-	-
S17	5e22	7	3,35
S18	1e20	15	3,35
S19	1e21	3,85	3,69

*Tabulka 5: Vstupní parametry modelu S8*

Model	$D^0$			$D^-$		$D^=$	
	$C_{PSG}$	$D_0$	$E_A$	$D_0$	$E_A$	$D_0$	$E_A$
	( $\text{cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	(eV)	( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	(eV)	( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	(eV)
S8	1e22	3,85	-3,66	4,44	-4,0	44,2	-4,37

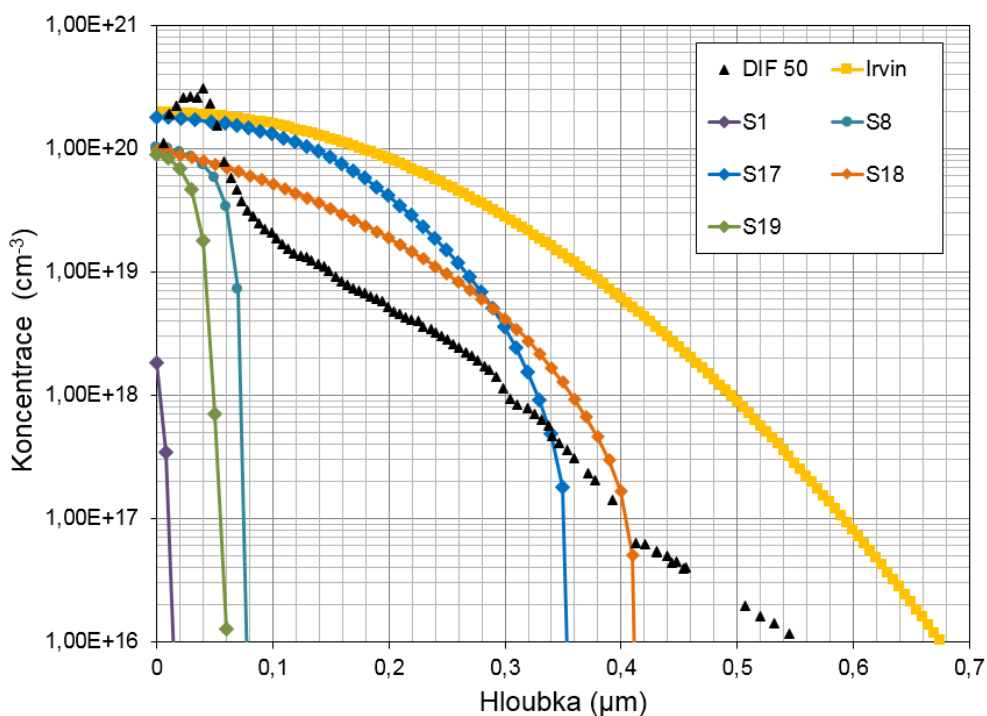
Celý zápis simulace a modelu S18 je níže uveden kurzivou, tučně jsou zvýrazněny hodnoty teploty a času, které lze měnit spolu s použitým materiálem.

```
#Model S18
go athena
line x loc=0.0 spac=0.01
line x loc=1.0 spac=0.01
line y loc=0.0 spac=0.01
line y loc=1.0 spac=0.01
#definice materialu
Initsiliconboronresistivity=1 orientation=111
Structuretwo.dim
impurityI.phosphorussiliconDix.0=15 Dix.E=3.35
#ramp up
diffusetime=10temperature=790t.final=850 nitro
#preddif+rozdifundovani
diffusetime=60temperature=850 nitro c.phosphorus=1e20
#ramp down
diffusetime=15temperature=850t.final=790 nitro c.phosphorus=1e20
#etch oxide all
extractname="rho" sheet.resmaterial="Silicon" mat.occno=1 x.val=0 region.occno=1
extractname="xj" xjmaterial="Silicon" mat.occno=1 x.val=0 junc.occno=1
extractname="srp_profile" curve(depth, srp material="Silicon" mat.occno=1 x.val=0)
outfile="dif_P_srp01.dat"
structureoutfile=TVNT16P.str
#tonyplotTVNT16P.str
```

Výstupy simulací (Irvin, S8, S17, S18, S19) a výpočtu z koncentračního profilu (ECV) a měření (Semilab) jsou v tabulce 6. Je patrné, že modely S8 a S19 nedosahovaly dobrých výsledků a základní model S1 byl zcela nevhodný. Klasický model Irvinův a model S17 se blížily k naměřeným výsledkům. Jako velmi úspěšný se ukázal model S18, který byl svými výstupy nejbliže měřeným hodnotám.

*Tabulka 6: Naměřené hodnoty a výstupy simulací pro difúzi fosforu*

<b>Model/Měření</b>	<b>R<sub>SH</sub> (Ω/□)</b>	<b>x<sub>J</sub> (μm)</b>
ECV	61,5	0,53
Semilab	51,0	-
Irvin	23,7	0,66
S1	19518,1	0,03
S8	135,6	0,09
S17	26,4	0,40
S18	55,7	0,48
S19	252,1	0,06



Obrázek 3: Koncentrační profily - naměřené hodnoty reálného fosforového emitoru a výstupní hodnoty simulací

Na obrázku 3 je vyneseno měřený koncentrační profil metodou ECV (DIF 50) a následné výsledky ze simulací pro jednotlivé modely (S1, S8, S17, S18, S19). Jak již bylo předesláno a na obrázku je to velmi patrné, modely S1, S8 a S19 jsou pro popis difúze fosforu při výrobě krystalických křemíkových solárních článků zcela nevhodné. Nejblíže měřenému průběhu byl model S18, to samozřejmě odpovídalo i výstupním parametrům simulace (vrstvý odpor a hloubka emitoru).

## 4.2 EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

Tato kapitola se zabývá výrobou solárních článků s přidanou hodnotou a článků s vysokým poměrem účinnost/cena.

Stěžejními tématy u solárních článků s přidanou hodnotou jsou difúze boru pro vytváření p<sup>+</sup> vrstvy, pasivace této vrstvy a kontaktování vrstvy.

U článků s vysokým poměrem účinnost/cena je hlavním tématem difúze fosforu pro vytváření emitoru u p-typových solárních článků a její dominantní vliv na výsledné elektrické parametry solárního článku.

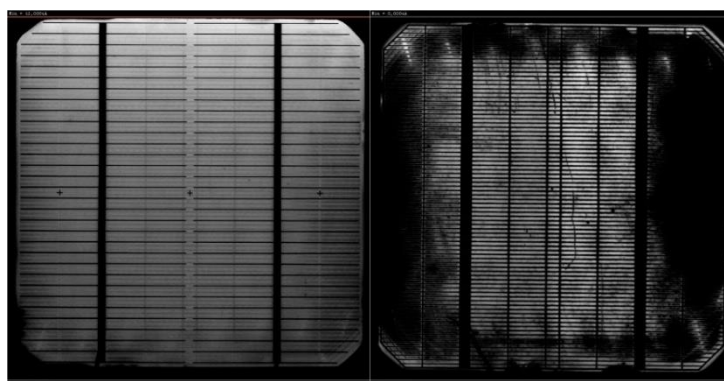
## Bifaciální solární články

Základní vlastností bifaciálních solárních článků je jejich oboustranná osvětlitelnost. Tento typ solárních článků přijímá záření nejen z přední strany, jako je tomu u klasických solárních článků, ale také ze zadní strany, což vede k celkovému přírůstku získané energie ze světla.

Prvotní experimenty s touto strukturou ukázaly řadu technologických nedostatků. Vycházelo se z procesního postupu publikovaného v [17], který je určen pro použití na n-tyrovém základním materiálu. Tento výrobní postup byl v našem případě aplikován na p-tyrovém základním substrátu. Po realizaci solárních článků byly tyto přeměřeny na solárním simulátoru, přičemž výsledky byly horší, než bylo očekáváno. Proto byly jednotlivé články podrobeny analýze metodou LBIC. Měření metodou LBIC potvrdilo výsledky měřené na solárním simulátoru a to že zadní strana značně snižuje účinnost celého solárního článku.

Možné příčiny neúspěchu lze rozdělit do tří bodů:

- *Vznik BRL na povrchu zadní strany* – poměrně tenká vrstva na povrchu a částečně pod ní, která zabraňuje metalizaci v kontaktu s křemíkem a značně snižuje dobu života minoritních nosičů.
- *Pasivace pro  $p^+$  vrstvu* – není jednoduché pasivovat tento typ vrstvy. Určitou cestou je složená vrstva z oxidu (do 30 nm) + nitrid křemíku  $\text{SiN}_x$ .
- *Sítotisková pasta pro kontaktování  $p^+$  vrstvy* – tento typ vrstvy je nutné kontaktovat při použití sítotiskové metody speciální pastou, která má upravené množství křemíku a hliníku.



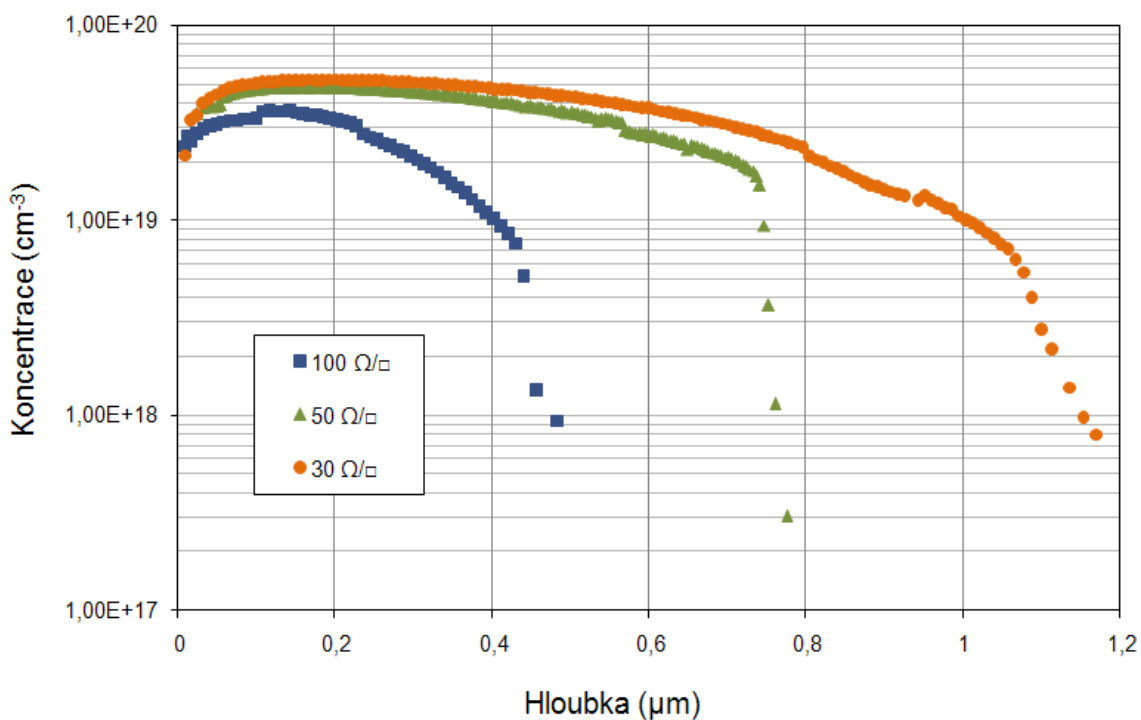
Obrázek 4: Proudová mapa vybraného solárního článku: vlevo přední strana, vpravo zadní strana bifaciálního solárního článku

Uvedené tři základní problémy této technologie bylo nezbytné řešit. Proto vznikla série experimentů, jejichž výsledky jsou popsány níže.

#### *Vznik BRL na povrchu zadní strany*

Při rozboru jednotlivých možností východisek, bylo přistoupeno na řešení pomocí přidání vyššího množství kyslíku během rozdifúndování, pro náš konkrétní případ to bylo až 10 slm (Standard Meter per Minute – litr za minutu).

Na obrázku 5 je měřený koncentrační profil  $p^+$  vrstvy vytvářené difúzí boru z bromidu boritého  $BBr_3$  pro různé vrstkové odpory, měřeno metodou ECV. Různé vrstkové odpory byly dosaženy výše zmíněnou teplotou rozdifúndování, se zvýšeným průtokem kyslíku během rozdifúndování. Při použití většího množství kyslíku se tedy odstraní BRL, ale také dochází k rapidnímu vydifúndování boru z křemíku do  $SiO_2$ . A to je patrné v prvních 100 nm od povrchu na koncentračním profilu, viz obrázek 5.



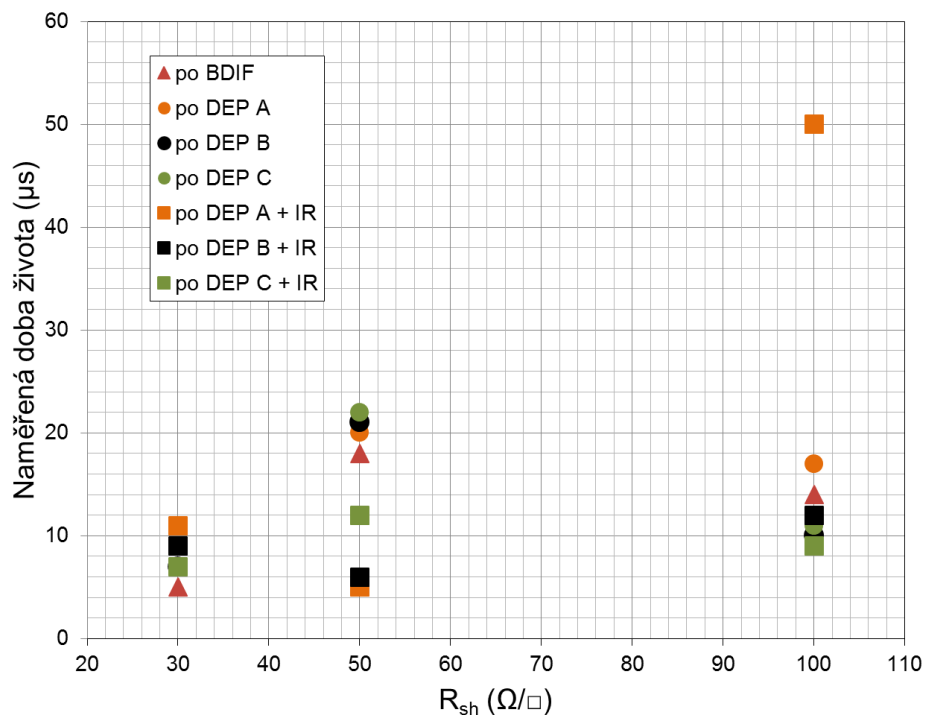
*Obrázek 5: Koncentrační profily pro  $p^+$  vrstvu vytvářenou difúzí z  $BBr_3$ , měřeno metodou ECV v ISC Konstanz*

## Pasivace pro $p^+$ vrstvu

Pro řešení této problematiky byl navrhnut experiment, kdy byla zkoušena pasivace  $p^+$  vrstvy pomocí tří typů pasivačních vrstev (A, B, C) – tabulka 7. V tomto případě může hrát vysokou roli i samotná  $p^+$  vrstva, proto byly použity teplotní profily s různou teplotou rozdifúndování, popsané v předešlé podkapitole.

Tabulka 7: Použité pasivační vrstvy při experimentu

Typ vrstvy	Vrstva I		Vrstva II	
	označení	Tloušťka	označení	tloušťka
A	BSG	cca 30 nm	SiN <sub>x</sub>	50 nm
B	SiO <sub>x</sub>	cca 10 nm	SiN <sub>x</sub>	60 nm
C	SiN <sub>x</sub>	70 nm	-	-



Obrázek 6: Naměřená doba života minoritních nosičů pro jednotlivé pasivační vrstvy a jednotlivé emitory

Pro stanovení pasivačních vlastností byla použita metoda měření doby života minoritních nosičů metodou MWPCD. Proto bylo i nezbytné, aby pasivační vrstva spolu s  $p^+$  emitorem byla oboustranná. Výsledky jsou již patrné na obrázku 6. Červené trojúhelníky pod označením *po BDIF* jsou hodnoty naměřené po difúzi boru, tedy

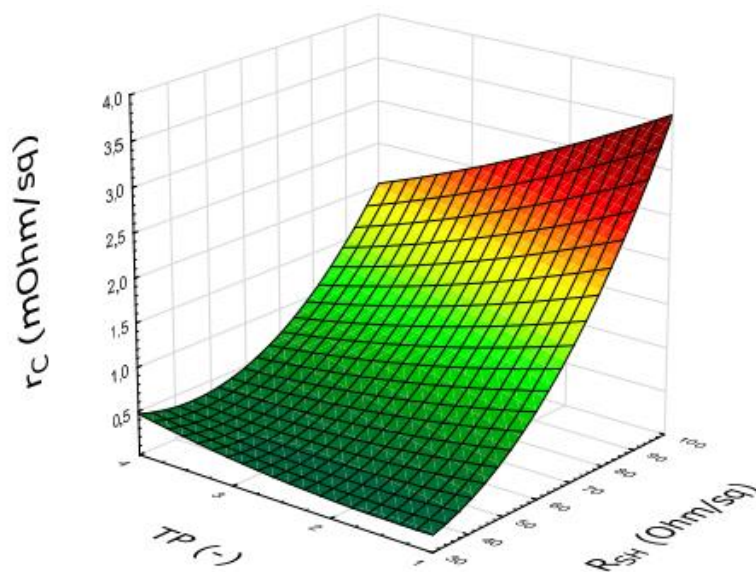
i s BSG. Kolečka pak znázorňují hodnoty měřené po depozicích a čtverečky pak po žíhání v IR peci. Je vidět, že varianta *po DEP A + IR* předčila výrazně očekávání.

### *Sítotisková pasta pro kontaktování $p^+$ vrstvy*

Pro vyšetření vhodného kontaktování  $p^+$  vrstvy byla vybrána Riemerova metoda, kdy se na krystalický křemíkový solární článek bez kontaktů natiskne zvolenou pastou speciální motiv a vypálí se. Po té je možné diagnostikovat za pomoci kontaktních jehel různé parametry, v našem případě především kontaktní odpor  $r_c$ . Což je veličina, která určuje, jak dobře daná pasta prošla skrz pasivační vrstvu a kontaktovala emitor či BSF.

Pro experiment byly vybrány tři pasty od různých komerčních dodavatelů: pasta A se prodává pod označením SOL9383 Series, pasta B pod označením PPAS-7-1 a konečně pasta C je vedena pod označením SOL9410S/9411. Pasty A a B jsou od dvou různých výrobců a jsou přímo určeny pro kontaktování borového emitoru, kdežto pasta C zde slouží jako reference a je standardně využívána pro kontaktování fosforového emitoru ve výrobě solárních článků.

Pasty byly tisknuty na výše zmíněné různé pasivační vrstvy s různými emitory (různá  $R_{SH}$ ). Po tisku a následném sušení pasty následovalo rozřezání vzorku pomocí IR laseru na čtvrtiny. To z důvodu, že byly pro experiment zvoleny čtyři teplotní profily TP na výpal past.



*Obrázek 7: Naměřené hodnoty kontaktního odporu v závislosti na teplotním profilu a vrstevném odporu borového emitoru pro pastu A a vrstvu A*



Výsledkem experimentu je, že pasta B a C se jeví jako nevhodná na kontaktování borového emitoru, i když je tu prostor pro určitou optimalizaci, není to nezbytné. A to proto, že pasta A je velmi vhodná, protože dokáže velmi kvalitně kontaktovat i emitor s vrstevným odporem okolo hodnoty 100  $\Omega/\text{čt}$  ( $\text{Ohm}/\text{sq}$ ). Vliv teplotních profilů je patrný u všech typů past. Pro ilustraci je přiložena závislost, která vyplynula z experimentu, obrázek 7. Tento graf platí pro pastu A a vrstvu A.

### Solární články s vysokým poměrem účinnost/cena

Tato kapitola se zabývá vývojem nového emitoru se zadání zvýšení účinnosti solárního článku, a pokud možno se zachováním nebo snížením stávajících nákladů na jeho výrobu.

Na začátku vývoje byla snaha o vytvoření fosforového emitoru, který by částečně getroval a zvyšoval účinnost u solárních článků, které jsou realizovány na méně kvalitním křemíkovém substrátu. Všeobecně je známo, že fosforové vrstvy většinou getrují. Otázkou pro řešení je jak efektivně getrují.

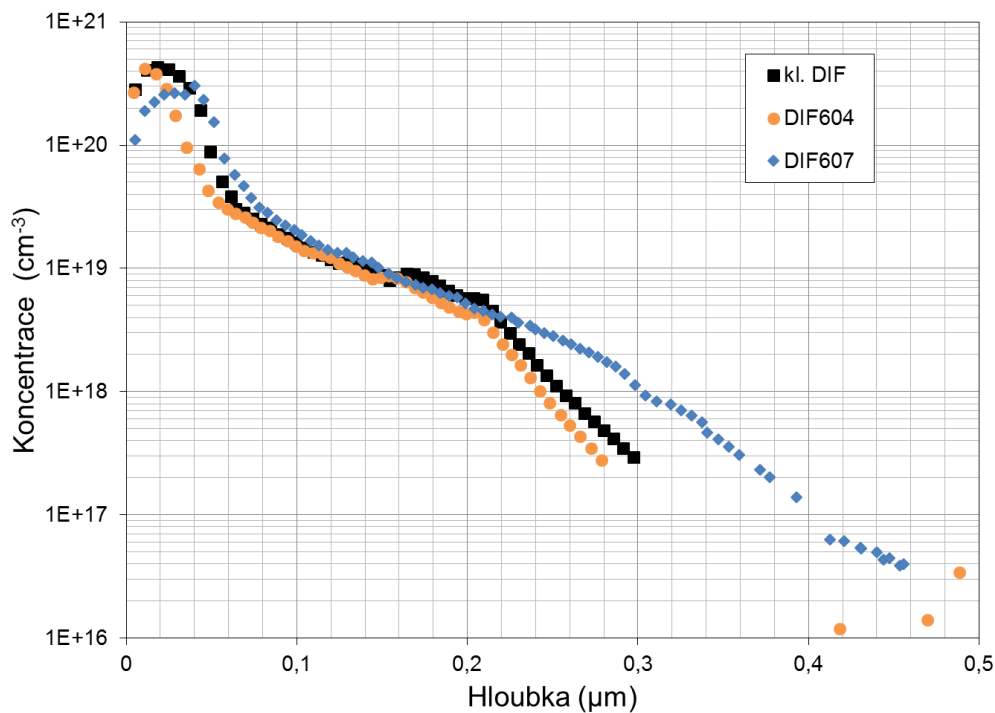
Při současné výrobní difúzi je dosahováno příliš vysoké povrchové koncentrace  $>10^{20} \text{ cm}^{-3}$  a dochází k tomu, že se fosfor nezabudovává do krystalové mřížky, tedy je elektricky neaktivní. To je dáno mezi rozpustnosti fosforu v křemíku. Elektricky neaktivní fosfor slouží jako rekombinační centrum, ale také výborně getruje. Experimentem mělo být dosaženo snížení koncentrace fosforu u povrchu křemíkové desky. Tedy omezení neaktivního fosforu, a tím zvýšení doby života nosičů, která má přímý vliv na elektrické parametry solárních článků.

Po určitém vývoji se ustálila jedna varianta difúze A (označení DIF607 – nový emitor), která byla srovnávána s klasickou difúzí (označení kl. DIF – původní emitor). Teplota difúze v obou případech byla 850 °C, rozdíl byl v jednotlivých časech, viz tabulka 8. K experimentálním difúzním dávkám bylo přiloženo několik kusů 3“ leštěných křemíkových desek. Ty sloužily pro charakterizaci procesu – měření koncentračního profilu. Toto měření proběhlo v ISC Konstanz v Německu pomocí metody ECV, obrázek 8, označení DIF604 je pro jinou variantu difúze, která byla při vývoji opuštěna.

*Tabulka 8: Jednotlivé skupiny pro experiment*

Skupina	Čas předdifúze	Čas rozdifúndování
A (kl. DIF)	22 min	29 min
B (DIF607)	10 min	50 min

Výsledné průměrné elektrické parametry hotových solárních článků pro obě srovnávané skupiny jsou v tabulce 9. Je vidět, že s použitím nového emitoru (DIF607) je možné dosáhnout přírůstku až 0,2 % absolutně. Zároveň zkrácením doby předdifúze na polovinu se zkrátilo sycení zdroje příměsí  $\text{POCl}_3$ , což snížilo náklady a zátěž na životní prostředí.

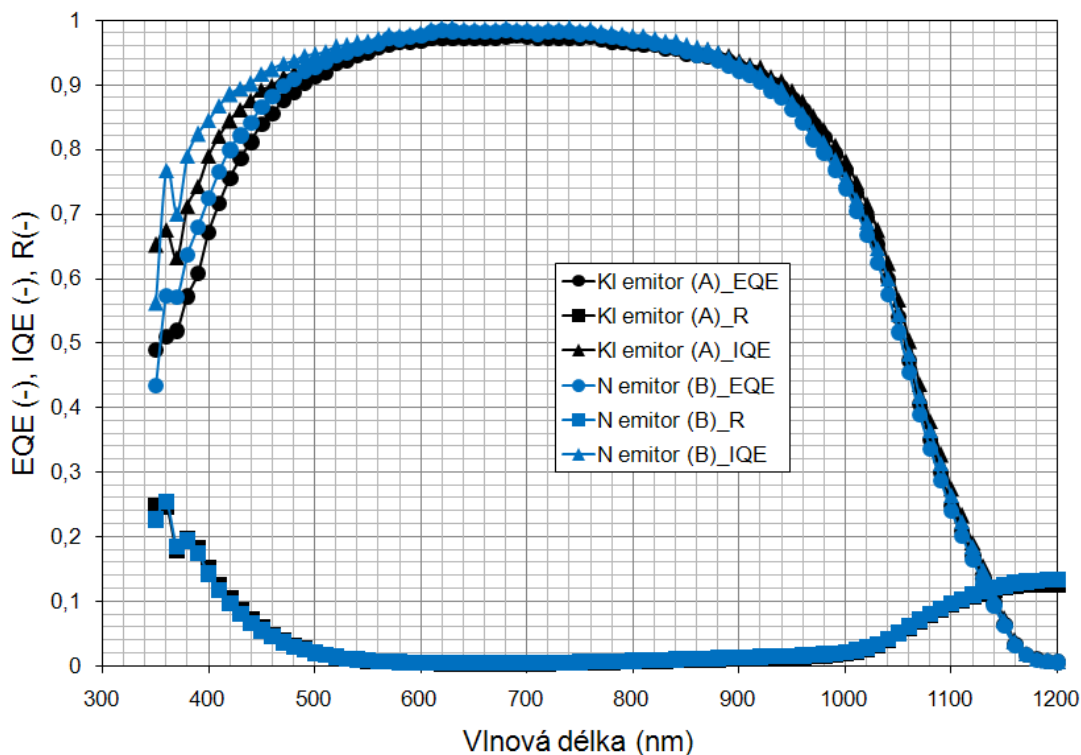


Obrázek 8: Koncentrační profil fosforových emitorů

Tabulka 9: Výsledné parametry solárních článků s klasickým a novým emitorem

Difúze		$I_{sc}$ (A)	$U_{oc}$ (V)	FF (%)	$E_f$ (%)
A (kl. DIF)	průměr	5,262	0,626	79,95	<b>17,72</b>
	nejlepší	5,310	0,626	80,50	18,00
B (DIF607)	průměr	5,250	0,629	80,50	<b>17,90</b>
	nejlepší	5,274	0,631	80,84	18,11

Pro ověření vlivu emitoru byla také měřena kvantová účinnost na zvolených vzorcích ze skupiny A a B, tedy s klasickým emitorem (černé značky na grafu) a novým emitorem (modré značky na grafu). Vliv emitoru se uplatňuje především na začátku charakteristiky při nižších vlnových délkách, což je patrné i v našem případě, viz obrázek 9. Zde je vidět, že vliv emitoru na výslednou kvantovou účinnost (externí i interní) je značný.



Obrázek 9: Externí a interní kvantová účinnost, reflexe pro vybrané vzorky s novým a klasickým emitorem

## 5 ZÁVĚR

Smyslem této zkrácené verze disertační práce (teze) je ilustrovat nejzásadnější výsledky z disertační práce a plnění cílů disertační práce, ale zároveň příliš nepřesáhnout rámec několika stran. Z tohoto důvodu se jedná pouze o určitý výtah celé experimentální činnosti.

Plnění cíle *Vytvoření modelů difúzí fosforu a boru pro výrobu solárního článku a jejich ověření* se zabývá kapitola *Modelování a simulace v prostředí SILVACO*. Cíl byl stanoven z toho důvodu, že klasický model difúze nazývaný Irvinův neodpovídá

potřebám modelování difúze při výrobě solárních článků. Při difúzích pro výrobu solárních článků jsou požadovány neobvyklé parametry – kratší doby a nižší teploty difúzí. A právě tuto problematiku řeší mnou vyvinuté modely, které při simulaci procesů difúzí pro výrobu solárních článků dostávají přesnější výsledky. Samotnou problematikou modelů difúze pro solární články se nezabývala žádná známá publikace, problém byl řešen až v této práci.

*Vývoj technologie pro bifaciální solární články* je v pořadí druhý dílčí cíl disertační práce. Tato část poukazuje na nedostatky při výrobě bifaciálních solárních článků a popisuje, jak byly řešeny v rámci této práce.

Poslední dva cíle disertační práce byly *Optimalizace difúze fosforu s následným vývojem nové struktury emitoru* a *Diagnostika solárních článků s novými strukturami a jejich porovnání se standardními solárními články*. Při řešení cíle *Optimalizace difúze fosforu s následným vývojem nové struktury emitoru* se vyvinul nový fosforový emitor, díky kterému měli výsledné solární články s tímto emitorem zvýšenou průměrnou konverzní účinností o 0,2 % absolutní hodnoty, oproti sadám s původním emitorem. Výborné vlastnosti nového emitoru také potvrzují závěry z měření kvantové účinnosti. Při vývoji difúze pro realizaci nového fosforového emitoru bylo dosaženo nejen zvýšení účinnosti, ale navíc snížení doby sycení  $\text{POCl}_3$  na polovinu, což má za následek snížení nákladů a snížení zátěže na životní prostředí. Oba cíle disertační práce byly splněny úspěšně.

Technologie optimalizované difúze boru a kontaktování borového emitoru, což byla témata řešená v této práci, byly použity při dalších experimentálních pracích v rámci oddělení R&D společnosti Solartec. Difúze fosforu použitá při vývoji nového emitoru, kterou jsem optimalizoval, byla přímo aplikována ve výrobě společnosti Solartec.

Návrhy experimentů, jejich realizace a následné vyhodnocení popsané v kapitole *Výsledky disertační práce* jsou majoritní mírou dílem autora.

Kvůli nárokům na řešení práce, a to nejen z pohledu diagnostických a výrobních zařízení, ale i z pohledu znalostí, byla nezbytná úzká spolupráce s výzkumnými pracovišti společnosti Solartec v Rožnově pod Radhoštěm, ISC Konstanz v Německu a blíže nespecifikovaným pracovištěm v Praze (na přání vedení pracoviště není v této práci uveden jejich název).

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DRÁBOVÁ, D. *Otázky Václava Moravce*. TV, ČT24, 18. 8. 2013, 13:05.
- [2] MASNÝ, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., MACHÁČEK, J., PTÁČEK, M., RADIL, L., BARTOŠÍK, T. PAVELKA, T. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. 2011. ISBN: 978-80-01-04937-2.
- [3] WOLF, S., TAUBER, R., N. Silicon Processing for the VLSI ERA. SunsetBeach, California: LatticePress, 1987. ISBN: 0-961672-3-7.
- [4] MEHRER, M. STOLWIJK, N. A. Heroes and Highlights in the History of Diffusion. *Diffusion Fundamentals*. 2009, svazek 1. ISSN: 1862-4138.
- [5] FAIR, R. B. Impurity Doping Processes in Silicon. New York: North-Holland Publishing, 1981. ISBN 10: 0444860959 / ISBN 13: 9780444860958.
- [6] GOETZBERGER, A., KNOBLOCH, J., VOSS, B. *Crystalline Silicon Solar Cells*. New York: John Wiley & Sons. 1998. ISBN 0-471-97144-8.
- [7] YANG, S.-W., KIM, Y. K. Boron diffusion into silicon crystal with SiN<sub>x</sub> layer as a reaction barrier. *SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS94*. 2010, vol. 12. ISSN: 0927- 0248.
- [8] ABERLE, A. G. *Crystalline Silicon Solar Cells Advanced Surface Passivation Analysis*. Sydney : Center of Photovoltaic Engineering, University of New South Wales, 1999. ISBN: 0-7334-0645-9.
- [9] SEMILAB. *WT-2000PVN User Manual - Measurement System for Solar Cell Manufacturing*. Budapešť: SEMILAB Semiconductor Physics Laboratory.
- [10] HOMOLA, J., JIRASEK, L., KALENDA, L., KLÁPŠTĚ, J., KUBÁT, M., MÜLLER, I., PELLANT, M., PINA, B., PLIVA, J. *Silnoproudá mikroelektronika*. Praha, 1989. Skripta. FE ČVUT Praha.
- [11] McGuire, G. E. *Semiconductor materials and process technology handbook for VLSI and ULSI*. Park Ridge, USA: Noyes Publication, 1988. ISBN: 0-8155-1150-7.
- [12] GISE, P., BLANCHARD, R. *Modern semiconductor fabrication technology*. EnglewoodCliffs, USA: A RestonBook, 1986. ISBN: 0-8359-4684-3.
- [13] VASILESKA, D. Introduction to Silvaco ATHENA Tool and Basic Concepts in Process Modeling. [cit. 2014-09-15]. Dostupné z [https://nanohub.org/resources/11817/download/silvaco\\_ATHENA\\_description\\_2.pdf](https://nanohub.org/resources/11817/download/silvaco_ATHENA_description_2.pdf) www:
- [14] CHRISTENSEN, J. S. *Dopantdiffusion in Si and SiGe*. Disertační práce. Stockholm:Royal Institute of Technology, 2004. 89 stran.
- [15] NOBILII, D. Properties of Silicon. In:*Proceedings of IEEE*. New York, 1987.
- [16] DASTGHEIB-SHIRAZIA, A., STEYERA, M., MICARDA, G., WAGNERB, H., ALTERMATTB, P. P., HAHNAG. Relationships between diffusion Parameters and Phosphorus Precipitation During the POC13 diffusion process. In:*Proceedings of SiliconPV Conference*. Hamelin: 2013.[cit. 2014-09-15]. Dostupné z WWW: [http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fcms.uni-konstanz.de%2Findex.php%3FeID%3Dtx\\_nawsecuredl%26u%3D0%26file%3Dfileadmin%2Fphysik%2Fag-hahn%2Fpics%2Fpublications%2Fsiliconpv2013%2F26029.pdf&ei=BJkaVLD2JMjPP7GgPgO&usq=AFQjCNFJRfxmJjZvexTrqqQAjZL6x\\_yC\\_Q&bvm=bv.75097201,d.ZW](http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fcms.uni-konstanz.de%2Findex.php%3FeID%3Dtx_nawsecuredl%26u%3D0%26file%3Dfileadmin%2Fphysik%2Fag-hahn%2Fpics%2Fpublications%2Fsiliconpv2013%2F26029.pdf&ei=BJkaVLD2JMjPP7GgPgO&usq=AFQjCNFJRfxmJjZvexTrqqQAjZL6x_yC_Q&bvm=bv.75097201,d.ZW)
- [17] DURAN, C., BUCK, T., KOPECEK, R., LIBAL, J., TRAVERSO, F. Bifacial Solar Cells with Back Surface Field. In:*Proceedings of 25<sup>th</sup> EU PVSEC*. Valencie: WIP – Renewable Energies, 2010. ISBN: 3-936338-26-4.

# Curriculum vitae

## OSOBNÍ INFORMACE

Jméno **ONDŘEJ FRANTÍK**  
Adresa **MACHOVÁ 177, 76301, Mysločovice, Česká republika**  
E-mail **ondrej.frantik@gmail.com**  
Datum narození **11. 04. 1985**

## VZDĚLÁNÍ A KURZY

- Období září 2010 až dosud
- Název organizace FEKT VUT Brno
- Název oboru Mikroelektronika a technologie
- Úroveň v národní klasifikaci doktorské studium
  
- Období září 2006 až listopad 2009
- Název organizace FEKT VUT Brno
- Zaměření pedagogika, didaktika, základy psychologie a biologické základy vývoje
- Úroveň v národní klasifikaci Učitel odborných předmětů na středních školách, prospěl s výborným prospěchem
  
- Období září 2005 až červen 2010
- Název organizace FEKT VUT Brno
- Název oboru Mikroelektronika a technologie
- Získaný titul Ing.
- Úroveň v národní klasifikaci magisterské studium, prospěl s výborným prospěchem
  
- Období září 2001 až květen 2005
- Název organizace SOŠ Otrokovice
- Název oboru Mechanik-elektronik
- Úroveň v národní klasifikaci maturita, prospěl s výborným prospěchem

## ZAHRANIČNÍ PRACOVNÍ

### POBYTY

- Období březen 2014
- Název a typ organizace ABB Semiconductor
- Zaměření vysokoteplotní procesy ve výrobě výkonových součástek
- Místo Lenzburg, Švýcarská konfederace
  
- Období březen 2012
- Název a typ organizace ISC Konstanz
- Zaměření difúze boru pro solární články
- Místo Kostnice, Spolková republika Německo
- Období červenec 2003
- Název a typ organizace ZPS - ELEKTROMONTÁŽE a.s.
- Zaměření elektroinstalace
- Místo Mnichov, Spolková republika Německo

## **PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI**

- Období leden 2014 až dosud
- Jméno zaměstnavatele ABB Polovodiče
  - Název odvětví výkonové polovodičové součástky – oddělení výzkumu a vývoje
  - Dosažená pozice Výzkumný a vývojový inženýr
- Hlavní pracovní náplň vysokoteplotní operace ve výrobě – difúze fosforu, boru, hliníku, galia a oxidace, příprava technických a výzkumných zpráv
  
- Období duben 2007 až prosinec 2013
- Jméno zaměstnavatele Solartec s.r.o.
  - Název odvětví fotovoltaické články a panely – oddělení výzkumu a vývoje
  - Dosažená pozice Výzkumný a vývojový technik – duben 2007 až prosinec 2013
- Hlavní pracovní náplň Asistent ředitele výzkumu a vývoje – duben 2012 až prosinec 2013  
vysokoteplotní operace ve výrobě – difúze fosforu a boru, RTA procesy, příprava technických a výzkumných zpráv
  
- Období leden 2004 až prosinec 2009
- Jméno zaměstnavatele Radim Holík
  - Název odvětví revize EPS (Elektronický Požární Systém)
  - Dosažená pozice revizní technik
- Hlavní pracovní náplň revize EPS
  
- Období červenec 2003 až srpen 2003
- Jméno zaměstnavatele ZPS - ELEKTROMONTÁŽE a.s.
  - Název odvětví elektromontáže
  - Dosažená pozice pomocný elektrikář
- Hlavní pracovní náplň elektroinstalace

## **OSOBNÍ SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI**

- Mateřský jazyk Český
- Ostatní jazyky Anglicky – dobrý  
Ruský – základní

## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na vysokoteplotní procesy ve výrobě krystalických solárních článků. Hlavním tématem výzkumu je difúze tradičních příměsí fosforu a boru. Difúzní procesy pro vytváření solárních článků jsou odlišné v porovnání s obdobnými difúzemi při výrobě integrovaných obvodů, a proto práce podrobně popisuje vzniklé vrstvy a jejich vlastnosti.

Znalost difúzních procesů je využita pro vytváření bifaciálních solárních článků a vývoj nového fosforového emitoru pro konvenční solární články. Bifaciální články jsou novými typy článků. Vyvinutý difundovaný emitor zvyšuje účinnost a snižuje náklady na výrobu solárního článku.

Další část práce se věnuje modelování difúzních procesů. Pomocí softwaru SILVACO jsou vytvořeny modely difúze fosforu a boru pro solární články. Modely korespondují s reálnými výsledky.

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on high temperature processes in crystalline solar cells production. Main topic is diffusion of traditional dopants phosphorus and boron. Diffusion processes for creating solar cells are different from classical diffusion in semiconductor industrial. It is reason why the thesis describes crated layers in detail.

Knowledge of diffusion processes is used for creating bifacial solar cells and development of a new phosphorus emitter for conventional solar cells. Bifacial cells are a new type of cells. Developed new emitter increases efficiency and decreases cost of solar cells production.

Another part the thesis is devoted to the prediction of diffusion processes. New models of phosphorus and boron diffusion for photovoltaic industrial are created in software SILVACO. Models correspond with real results.