



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**VLIV IONTOVÉ IMPLANTACE NA PARAMETRY
POLOVODIČOVÝCH DESEK Z KARBIDU KŘEMÍKU**

IMPACT OF ION IMPLANTATION ON PARAMETERS OF SILICON CARBIDE SEMICONDUCTOR
WAFERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Drozd

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Adam Klimsza, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Jiří Drozd**
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Adam Klimsza, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

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 diplomové práce:

Vliv iontové implantace na parametry polovodičových desek z karbidu křemíku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Iontová implantace je neodmyslitelně spojena s výrobou polovodičových mikročipů. V případě čipů na bázi karbidu křemíku se jedná o klíčový proces pro vytváření hloubkových profilů dopantů. Jedním z významných problémů je ovšem deformace polovodičových desek z karbidu křemíku způsobená iontovou implantací, která přináší komplikace s dalšími procesy a manipulací. Diplomová práce se zaměří na popis procesu iontové implantace a využití při výrobě polovodičových součástek, charakteristiku jejího vlivu na parametry polovodičových desek z karbidu křemíku a popíše možnosti řešení vznikajících problémů podpořené experimentálními měřeními.

Cíle diplomové práce:

Rešerše druhů implantovaných iontů pro výrobu mikročipů
Techniky iontové implantace
Defekty v krystalické mřížce spojené s implantací
Způsoby uvolnění napětí v desce SiC
Experimenty s implantací a vybranou metodou uvolnění napětí

Seznam doporučené literatury:

KIMOTO, Tsunenobu a James A. COOPER, 2014. Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications. Singapore: Wiley [u.a.]. ISBN 978-1-118-31352-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá iontovou implantací do polovodičových desek z karbidu křemíku (SiC), která je klíčová pro dosažení selektivního dopingu v tomto materiálu. Implantace však poškozuje krystalickou mřížku, což vede k prohnutí desek, které komplikuje další výrobní kroky. V práci byl uveden teoretický popis implantační techniky a byly specifikovány metody prevence deformace a uvolnění napětí v práci aplikované. Dále byly analyzovány parametry implantace a jejich vliv na deformaci, včetně dávky, energie a teploty implantace. Experimentálně byly provedeny celoplošné implantace hliníku do 4H-SiC desek při různých parametrech implantace a následně měřen jejich průhyb. Prokázána byla silná závislost deformace na obou parametrech implantace s nárůstem deformace až do oblasti amorfizace základního materiálu. Byla otestována možnost implantace za zvýšené teploty, která prokázala snížení míry defektů s neočekávaným vlivem na účinnost teplotního žíhání v difuzní peci. Dále byly experimentálně ověřeny metody prevence prohnutí, zejména depozice vrstev z různých materiálů a leptání struktur typu trench. Depozice polykrytalického křemíku vedla ke snížení průhybu o desítky procent v závislosti na tloušťce vrstvy. Leptané struktury měly menší účinek. Výsledky ukazují, že deformace je predikovatelná na základě parametrů implantace a lze ji výrazně snížit vhodnou volbou technologických podmínek nebo kombinací kompenzačních metod. Práce přináší ucelené experimentální vyhodnocení příčin a možností snižování mechanických deformací způsobených iontovou implantací do SiC, což doposud nebylo v literatuře komplexně zpracováno.

ABSTRACT

The presented thesis focuses on ion implantation into silicon carbide (SiC) semiconductor wafers, a key process for achieving selective doping in this material. However, implantation causes damage to the crystalline lattice, resulting in wafer warping that complicates subsequent manufacturing steps. The thesis includes a theoretical description of the implantation technique and specifies methods applied to prevent deformation and relieve stress. Implantation parameters and their influence on deformation, including dose, energy, and implantation temperature, were also analyzed. Full-area aluminum implantations into 4H-SiC wafers were experimentally performed under various implantation conditions, followed by measurements of wafer bow. A strong correlation between deformation and implantation parameters was demonstrated, with deformation increasing up to the point of substrate amorphization. The possibility of high temperature implantation was investigated, showing a reduction in wafer warping but also an unexpected effect on the efficiency of thermal annealing in a diffusion furnace. Experimental validation of deformation mitigation methods was also carried out, particularly through the deposition of layers from various materials and the plasma etching of trench-type structures. Deposition of polycrystalline silicon led to a reduction in wafer bow by several tens of percent depending on the layer thickness, while etched structures had a lesser effect. The results show that deformation is predictable based on implantation parameters and can be significantly reduced through proper selection of process conditions or a combination of compensatory techniques. This work presents a comprehensive experimental evaluation of the causes of and possibilities for reducing mechanical deformation caused by ion implantation into SiC, which has not yet been thoroughly addressed in the available literature.

KLÍČOVÁ SLOVA

iontová implantace, amorfizace, karbid křemíku, energie, dávka, průhyb, deformace

KEYWORDS

ion implantation, amorphization, silicon carbide, energy, dose, wafer bow, deformation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DROZD, Jiří. Vliv iontové implantace na parametry polovodičových desek z karbidu křemíku. Online, diplomová práce. Adam KLIMSZA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162476> .

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem. Zpracoval jsem ji pod vedením Ing. Adama Klimszy, Ph.D., s využitím informačních zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne: 20.5.2025

.....

Bc. Drozd Jiří

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu Ing. Adamu Klimszovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za jeho čas a přístup a možnost vypracovat práci pod jeho vedením. Dále všem zaměstnancům onsemi za veškerou pomoc s realizací experimentů na komplexních zařízeních. Díky také patří Ing. Pavlu Lošákovi, Ph.D. za pomoc při vyřizování systémových požadavků a zprostředkování tématu na ÚPI. V neposlední řadě chci poděkovat rodině a přítelkyni za veškerou podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

1	Rešerše druhů implantovaných iontů pro výrobu mikročipů.....	14
1.1	Druhy iontů pro implantaci vrstev typu p a n	14
1.2	Význam a integrace iontové implantace	16
1.3	Polovodičové součástky	18
2	Techniky iontové implantace	19
2.1	Ionizace zdrojové látky	20
2.2	Zdrojové látky	20
2.2.1	Freemanův iontový zdroj	20
2.2.2	Bernasův iontový zdroj	21
2.3	Extrakce iontů	22
2.4	Separace iontů	22
2.5	Post akcelerace (decelerace).....	23
2.6	Skenování svazku po ploše desky	24
2.7	Kanálování (channeling)	25
2.8	Řetězová (chain) implantace	27
2.9	Defekty v krystalické mřížce spojené s implantací	29
2.10	Implantace za zvýšené teploty.....	29
2.11	Amorfizace indukovaná implantací.....	30
3	Způsoby uvolnění napětí v desce SiC	32
3.1	Depozice ze zadní strany	33
3.2	Leptání trenchů.....	34
4	Experimentální část.....	36
4.1	Měřicí zařízení.....	36
4.2	Implantace Al do 4H-SiC	40
4.2.1	Implantace za zafixované energie	40
4.2.2	Implantace za zafixované dávky	42
4.2.3	Implantace dle stávajícího energetického předpisu.....	43
4.2.4	Implantace za zvýšené teploty.....	45
4.2.5	Vyhodnocení vlivu dávky a energie na průhyb desky	49
5	Experimenty s prevencí průhybu	50
5.1	Vliv depozice ze zadní strany na snížení průhybu	50
5.2	Vliv trenchů na prevenci průhybu	52
5.3	Vyhodnocení metod prevence vzniku průhybu.....	59
6	Metoda uvolnění napětí.....	59

ÚVOD

Ačkoliv je iontová implantace dlouhodobě využíváný a zavedený proces při výrobě polovodičových součástek, její aplikace na substráty z karbidu křemíku (SiC) přináší řadu komplikací a technických výzev a v posledních letech prochází intenzivním vývojem. Materiál SiC je díky svým výborným fyzikálním vlastnostem preferován pro výkonovou elektroniku, zejména v automobilovém a energetickém průmyslu, a v současnosti neexistuje materiál, který by mu mohl plně konkurovat. Iontová implantace do monokrystalu SiC však indukuje defekty krystalické mřížky a v důsledku toho vzniká napětí v substrátu, které může vést k mechanické deformaci. V praxi se tyto deformace projevují jako průhyb (bow), který komplikuje další výrobní kroky, zejména litografii a obecně manipulaci s deskou. Nastává problém s nakládáním desek do strojů a výrazným posunům při exponování vrstev fotolitografií. Problém je umocněn využíváním menší tloušťky desek, které jsou používány kvůli technologické náročnosti růstu monokrystalického SiC. Z tohoto důvodu se hledají způsoby, jak deformacím předcházet nebo je alespoň minimalizovat. Předjetí deformacím je klíčový bod výzkumu, kterému se tato práce také věnuje a jde o téma důležité i pro výzkum další. S problematikou implantace do SiC jsem se poprvé setkal při studentské odborné stáži ve firmě onsemi, pod jejímž oddělením vývoje a výzkumu tato práce vznikala. Téma deformací desek je zde aktuální a bylo mi nabídnuto s možností naplánovat a provést praktické experimenty přímo ve výrobním prostředí, což považuji za přínosné spojení teorie a praxe v technicky náročném a perspektivním oboru.

Cílem diplomové práce bylo provést rešerši na téma iontové implantace se zaměřením na materiál SiC a zmapovat vliv parametrů implantace na deformaci desek. Dále byly popsány technické principy skenování, separace a akcelerace iontů a jejich vliv na výsledný profil implantace. Popsány byly také vznikající defekty v krystalické mřížce, amorfizace, implantace za zvýšené teploty a implantace v režimu kanálování. V praktické části byly provedeny celoplošné implantace hliníku (Al) do desek 4H-SiC při různých dávkách a energiích, přičemž byl zaznamenáván a vyhodnocen průhyb. Tímto způsobem byl oddělen a kvantifikován vliv jednotlivých parametrů implantace.

Hlavním cílem práce bylo navrhnout a experimentálně otestovat metody prevence vzniku a případného snížení průhybu desek. Byly vyzkoušeny postupy depozice vrstev různého typu a tloušťky ze zadní strany desek. Dále byl proveden experiment implantace za zvýšené teploty při stejných parametrech jako při pokojové teplotě, ve spolupráci s pobočkou onsemi v Jižní Koreji. Součástí práce byly rovněž experimenty zaměřené na vliv 3D struktur typu trench na průhyb desek. Výsledky byly porovnány a zhodnoceny z hlediska účinnosti snížení průhybu i z pohledu reálné aplikovatelnosti ve výrobě. Dále byl proveden pokus s tepelnou úpravou (žiháním) desek ve spolupráci s pobočkou onsemi ve Švédsku.

Při rešerši nebyla nalezena srovnatelná práce komplexně zaměřená na problematiku vzniku průhybu u desek z materiálu SiC. Výstupy této práce by tak mohly sloužit jako podklad pro navazující výzkum, případně jako základ disertační práce, neboť potenciál tohoto směru není zdaleka vyčerpán.

1 Rešerše druhů implantovaných iontů pro výrobu mikročipů

1.1 Druhy iontů pro implantaci vrstev typu p a n

Iontová implantace je nutná k vytvoření polovodičových oblastí typu p , či n v základním materiálu (substrátu) SiC. Pro vytvoření těchto oblastí jsou nejčastěji využívány ionty fosforu (P) a dusíku (N) pro typ n a hliník (Al) a bor (B) pro typ p . Pro vytvoření polovodičového přechodu typu n jsou tedy využívány dopanty z páté skupiny periodické tabulky, jenž mají o jeden valenční elektron více, než dopovaný SiC obsahující 4 valenční elektrony [1, 2]. Takový dopant je označován jako donor a dodává (daruje) volný elektron, koncentrace volných elektronů je vyšší než koncentrace volných děr, jedná se tedy o elektronovou vodivost [3, 4]. Pro vytvoření oblasti typu p jsou využívány dopanty ze třetí skupiny periodické tabulky, které mají o jeden elektron méně než SiC a vznikají tedy volné díry díky neobsazenosti jedné pozice [1, 2]. Takový dopant je nazýván akceptor. Vytváří absencí elektronů díry, které převládají a tedy koncentrace děr je vyšší, než koncentrace volných elektronů, hovoří se tedy o děrové vodivosti [3, 4]. Dále je možno využít gallium (Ga) a arsen (As), nicméně se nevyužívají z důvodu vysoké ionizační energie. Podobnou nevýhodu má také zmíněný B, který se ale pro hloubkové profily využívá [4].

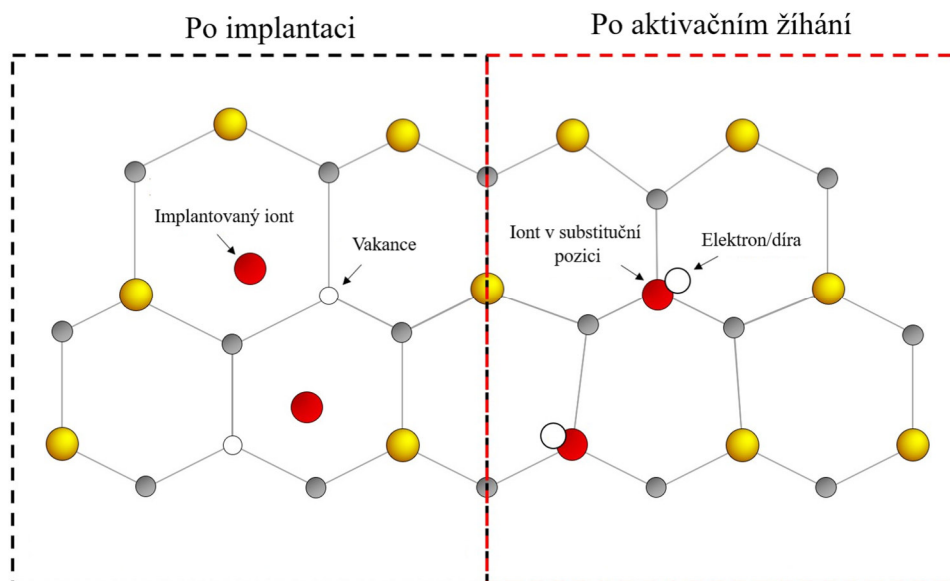
Tabulka 1: Přehled vybraných vlastností nejčastěji implantovaných prvků [3–5]

	AMU	Rádus ¹ [Å]	Ionizační energie ² [meV]	Počet valenčních elektronů	Typ dopantu
N	14,007	0,74	60	5	n
P	30,970	1,10	60	5	n
Al	26,980	1,26	198	3	p
B	10,81	0,82	280	3	p

Po iontové implantaci, která bude popsána v nadcházejících kapitolách, je nutné dopanty aktivovat. Aktivace proběhne ve chvíli, kdy dopanty nahradí buď pozice Si, či C v pozicích krystalické mřížky (KM). Dopanty N či P jsou substituční v pozicích C, zatímco Al a B zaujmají substituční pozici Si v KM SiC. Pro dosažení vysokého substitučního obsazení pozic v KM je nutné dodat dostatečnou excitační energii dopantům [1]. K vyššímu obsazení těchto substitučních pozic se po implantaci aplikuje aktivační žíhání na teplotách v rozsahu 1600–1800 °C, které umožní rekombinaci KM a dochází k uvolnění napětí vzniklého vlivem implantace, také dochází k výraznému snížení průhybu [8]. Schématické znázornění účinku aktivačního žíhání viz obrázek 1 a vliv teploty aktivačního žíhání na míru aktivace dopantů Al a B lze vidět na obrázku 2.

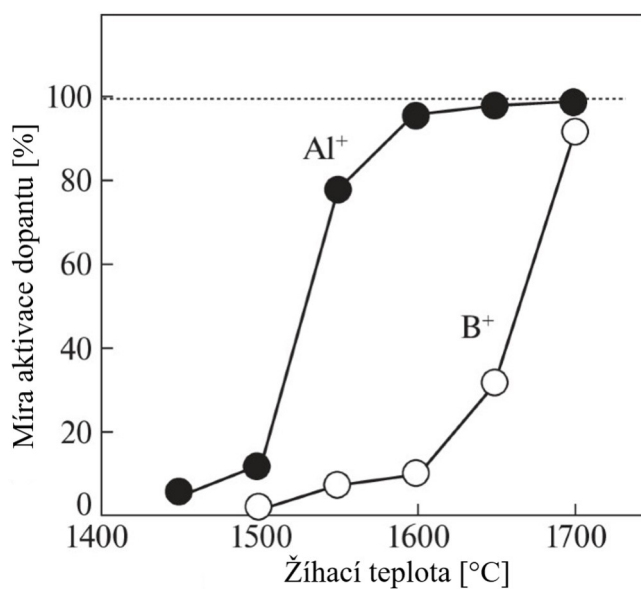
¹ Pojem rádus v tabulce má význam nepolárního kovalentního poloměru, který je odvozen z délky vazeb nepolárních molekul. [6]

² Energie potřebná k odejmutí elektronu z nejdostupnějších pozic. [7]



Obrázek 1: Schematické znázornění aktivčního žhání (upraveno) [9]

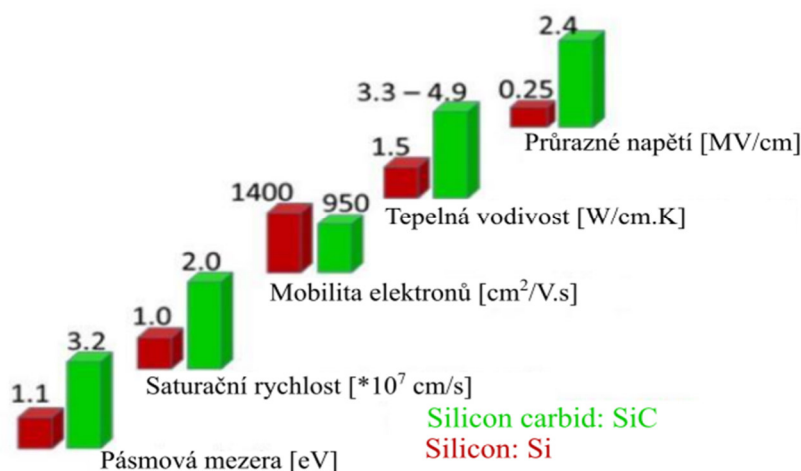
S iontovou implantací je spojena také amorfizace substrátu, která je škodlivá pro elektrické parametry výsledných zařízení [10]. Další jev, který iontová implantace vyvolává, je zvětšení objemu substrátu, které se může projevit zvětšením o 6-17 %. Spojení zvětšení objemu a rekystalizace amorfni vrstvy při žhání ke snížení napětí vede za určitých podmínek k tvorbě oblastí s dutinami, které jsou nežádoucí a je možné jim předcházet například implantací za zvýšené teploty, která byla mimo jiné i zkoumána v experimentální části diplomové práce [11, 12].



Obrázek 2: Míra elektrické aktivace v závislosti na žhací teplotě (Al, dávka $11E+10$ at./cm²) [4]

1.2 Význam a integrace iontové implantace

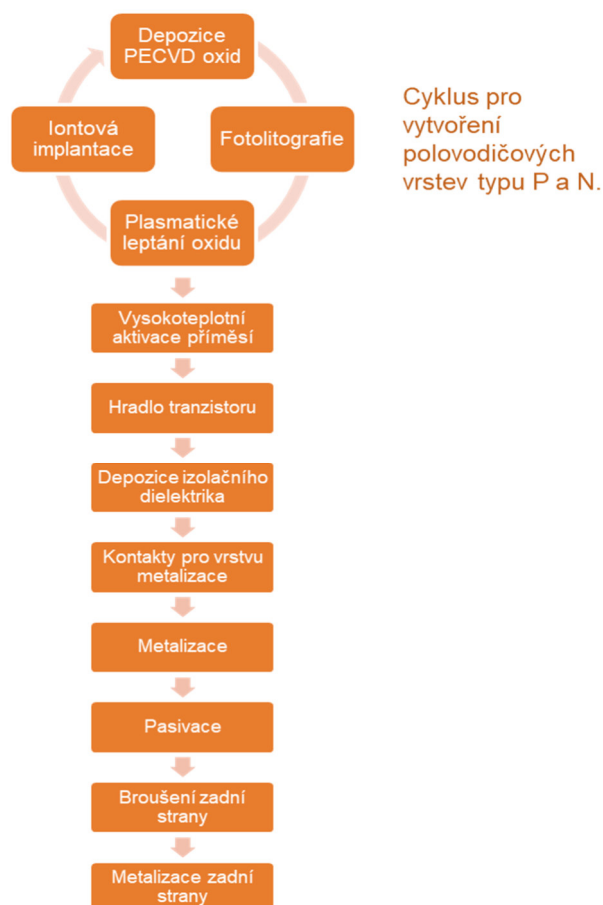
Iontová implantace je klíčovým procesem při výrobě polovodičových mikročipů z karbidu křemíku (SiC), který se vyznačuje výbornými vlastnostmi pro výrobu vysokovýkonných a teplotně odolných elektronických součástek [8]. Výroba polovodičových součástek je složena ze stovek po sobě následujících operací jako například růst epitaxní vrstvy, leptání, fotolitografie, depozice metalových vrstev a další. Iontová implantace je pouze jedním z těchto mnoha procesů, nicméně má zásadní důležitost [4]. SiC je využíván pro výrobu vysoko-výkonových součástek z důvodu lepších klíčových fyzikálních vlastností v porovnání s Si. Tyto vlastnosti jsou například široká pásmová mezera, vyšší teplotní odolnost a lepší energetická účinnost. Polytypů SiC je více než 250, z důvodu různých uspořádání a vrstvení atomů Si a C. Nejčastěji je využíván polytyp 4H-SiC pro nejvhodnější vlastnosti [13]. Porovnání vlastností SiC a Si viz obrázek 3.



Obrázek 3: Porovnání vybraných vlastností Si a SiC [14]

Kvůli velmi malému koeficientu difuze dopantů v SiC je vysokoenergetická iontová implantace prakticky jediným způsobem, jak dosáhnout požadovaných dopovaných oblastí typu n/p [1]. Při bombardování povrchu vysoce urychlenými ionty, dochází k deformaci KM v podobě nežádoucích vakancí, intersticiálních atomů, které se hromadí a utváří dislokační smyčky. Tento jev může vést až k amorfizaci materiálu, což je nežádoucí (vysvětleno v kapitole 2.11) [10].

Iontová implantace je součástí více než stovky kroků výrobního postupu součástek na SiC substrátu. Názorně je popsán postup na obrázku 4, pro součástku typu MOSFET (Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor). Materiál s sebou nepřináší pouze benefity vyjmenované výše, ale také výzvy spojené s extrémní tvrdostí, kdy na Mohsově stupnici je mezi korundem a diamantem, a také průhledností desek, jelikož většina strojů je navržena na fyzikální vlastnosti Si. Senzory tedy nedokáží detekovat průhlednou SiC desku a podavače nejsou dostatečně citlivé pro manipulaci s materiálem, který se snadněji prohne (z důvodu nižší tloušťky), což bez patřičných úprav vede k destrukci desek. Stejně tak je v případě mycích procesů potřeba volit např. jinou směs kyselin k odstranění nečistot z povrchu před operacemi, jež to vyžadují.



Obrázek 4: Schéma výrobního postupu SiC MOSFETu³

V praxi je využíván pojem SiC deska, či deska, anglicky wafer. Tímto je myšlena deska z karbidu křemíku o průměru 150 mm a tloušťce 350 μm , což je geometrie desky, která je zatím v praxi nejvyužívanější. Existují také SiC desky o průměru 200 mm, jež velmi pravděpodobně v budoucnu 150 mm desky nahradí.

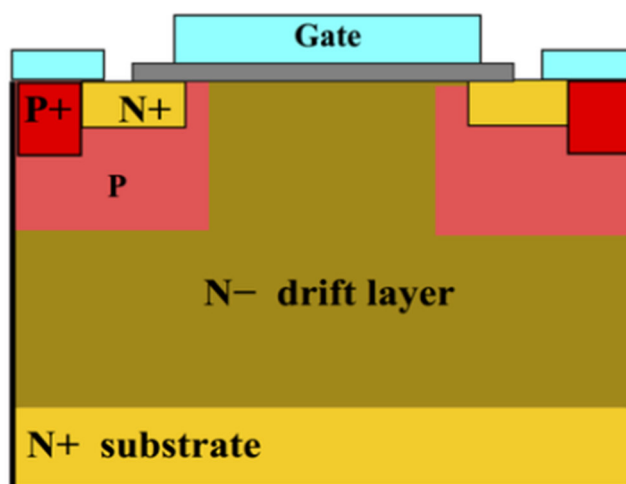


Obrázek 5: Deska SiC [16]

³ PECVD je zkratka plasma-enhanced chemical vapor deposition [15]

1.3 Polovodičové součástky

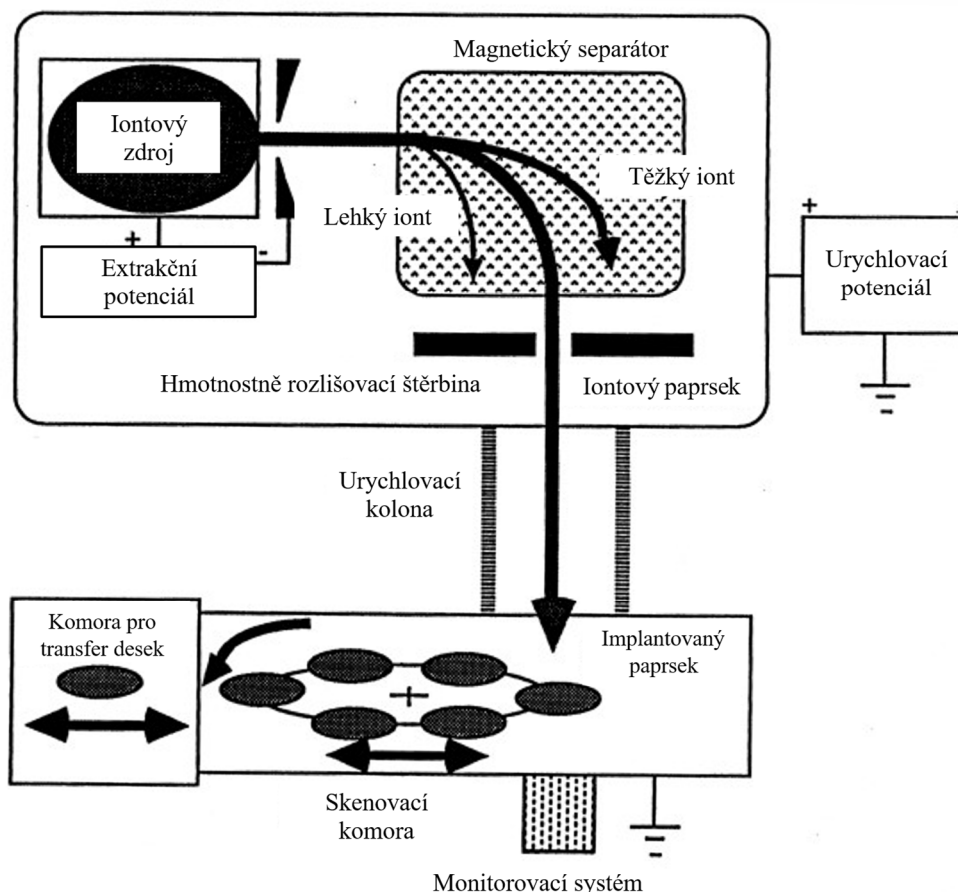
Pojem polovodičová součástka pokrývá široký rozsah zařízení, které využívají polovodičové vlastnosti substrátu k řízení elektrických signálů nebo výkonu. Mezi tyto součástky patří například diody, MOSFETy (obrázek 23), IGBT (tranzistory s izolovaným hradlem, angl. Insulate Gate Bipolar Transistor), CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) součástky a mnoho dalších, které nacházejí využití v různých oblastech elektroniky. Tyto součástky hrají klíčovou roli v oblasti výkonové elektroniky, včetně aplikací pro výrobu a distribuci elektřiny, řízení napájení motorů, výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů a vytápění [5]. Polovodičové součástky lze rozdělit podle principu jejich fungování na unipolární a bipolární. Unipolární výkonové diody, tranzistory, jako MOSFETy, jsou nejčastěji používány pro vysokofrekvenční aplikace, jako jsou invertory a spínané napájecí zdroje, zatímco bipolární součástky, například IGBT nebo bipolární tranzistory, nacházejí uplatnění v ochranných, usměrňovacích a řídicích aplikacích ve vysoko-výkonové elektronice. Další klasifikace zařízení může např. probíhat podle jejich funkce, například na usměrňovací a spínací součástky [5, 29].



Obrázek 6: Struktura planárního SiC MOSFETu [17]

2 Techniky iontové implantace

Z důvodu velmi nízkého koeficientu difuze v SiC je iontová implantace jedinou prakticky aplikovatelnou metodou selektivního dopingu. Tato metoda se vyznačuje vysokou přesností a možností kontrolovat proces [4]. Celosvětově existuje pouze 6 významných firem vyrábějících implantátory. Což jednak naznačuje užší trh, ale také komplexnost a vysokou složitost strojů. Jedním z nejvýznamnějších výrobců je firma Applied Materials Inc. (AMAT); následuje firma Entegris a Axcelis Technologies Inc.. Pro experimenty provedené v rámci závěrečné práce byly stroje AMAT a Axcelis.



Obrázek 7: Zjednodušené schéma implantátoru [18]

Na obrázku 7 jsou znázorněny základní části iontového implantátoru. Celé zařízení, mimo manipulátoru pro vkládání desek, pracuje pod vakuem. Implantátor se skládá z iontového zdroje, extrakčního mechanismu, kde jsou získány ionty ze zdrojové látky, a zároveň se jedná o první iontové urychlení, jelikož jsou ionty získávány (vytahovány) pomocí diferenčního napětí. Dále analytického magnetického separátoru, který dle hmotnosti iontu separuje požadované prvky. Funkci separace zastává také hmotnostně rozlišovací štěrba, která slouží k navýšení přesnosti a ostroty separovaných iontů. Takto vyseparované ionty putují dále do urychlovací kolony, kde dochází pomocí elektrického potenciálového pole k urychlení vyseparovaných iontů [19]. Vzniklý paprsek je optimalizovaný a nastavený na požadované parametry pomocí monitorovacích systémů jako Faradayova nádoba. Iontový paprsek mající správné parametry pokračuje do skenovací (implantační) komory, kde je implantován do desek. Implantátor může být jedno nebo více deskový, podle čehož se odvíjí konstrukce skenovacího

zařízení, které zajistí dostatečný pohyb pro pokrytí požadované plochy [19, 20]. Stěžejními parametry implantace jsou energie, dávka, sklon, pod kterým implantace probíhá, a teplota desek [21].

2.1 Ionizace zdrojové látky

Existuje mnoho iontových zdrojů; ke komerčním účelům jsou vhodné pouze některé z důvodu životnosti, účinnosti a spolehlivosti [22]. Firmy ve svých strojích využívají několik druhů iontových zdrojů dle cílené aplikace, podrobný popis není kvůli konkurenceschopnosti zveřejňován. Nejvyužívanějšími zdroji pro využití v polovodičovém průmyslu jsou Freemanův a Bernasův zdroj díky spolehlivosti a přesnosti [23]. Existují také zdroje se studenou katodou (Penningův zdroj), či mikrovlnné zdroje [22].

2.2 Zdrojové látky

Látky využívané pro získání iontů jsou zpravidla molekuly, které obsahují chtěný prvek. Bohužel jednotlivé zdrojové látky jsou know-how firem zabývajících se touto problematikou, je tedy náročné (nemožné) dohledat souhrnnou tabulku s výčtem všech implantovaných druhů s jejich moderními zdrojovými látkami. Nicméně existují tradiční zdrojové látky historicky využívané, které mají i zastoupení v moderních implantátorech viz tabulka 2.

Tabulka 2: Zdrojové látky pro vybrané prvky [20, 24, 25]

Implantovaný prvek	Tradiční zdrojová látka
N	N ₂ , NH ₃
P	PH ₃ , PF ₃
Al	Al ₂ O ₃ , AlN
B	BF ₃

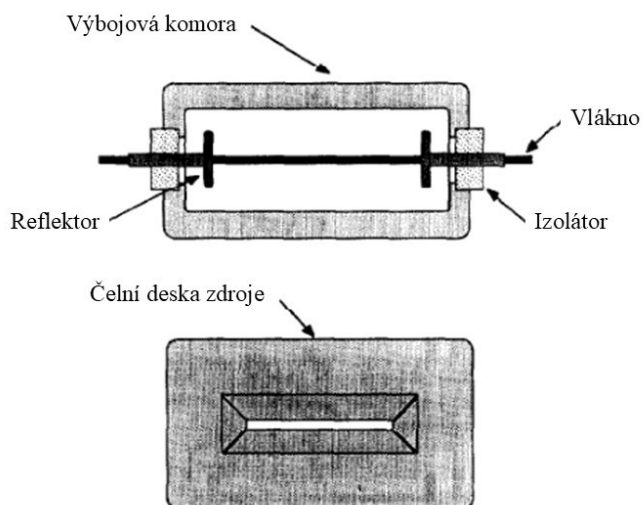
Zdrojová látka neovlivňuje jen jaký iont bude implantován, ale má také vliv na parametry implantace [20]. Tento fakt je důvodem nezveřejňování moderních zdrojových látek, jelikož zdrojová látka ovlivňuje proud svazku (beam current), který je možno dosáhnout, spektrální složení svazku (Beam spectrum, což vyjadřuje poměr chtěných iontů ku vedlejším) a v neposlední řadě stabilitu a životnost zdroje [24].

2.2.1 Freemanův iontový zdroj

Jedná se o velmi rozšířený iontový zdroj, který je schopen vytvářet ionty široké škály prvků [26]. Výbojová komora viz obrázek 8 je na anodovém potenciálu; rovné wolframové vlákno na katodovém potenciálu je umístěno blízko bočního otvoru pro extrakci svazku. Dopantní plyn nebo pára se přivádí otvorem v jedné ze stěn komory. Magnetické pole pohybující se okolo 100 G brání radiálnímu driftu⁴ elektronů a malé reflektorové elektrody na potenciálu vlákna snižují ztrátu elektronů na koncích výbojové komory. Zdroj produkuje svazek ve tvaru pásu a maximální hustota proudu poblíž extrakčního otvoru je 20 až 40 mA/cm². Tento typ zdroje pracuje stabilně a efektivně s různými plynnými a pevnými dopantními materiály. S příchodem vysokoprůchodových implantátorů, které běžně dodávají proudy svazku 10 až 30 mA, byl

⁴ Drift elektronů je uspořádaný pohyb způsoben působením elektrického či v tomto případě magnetického pole. [27]

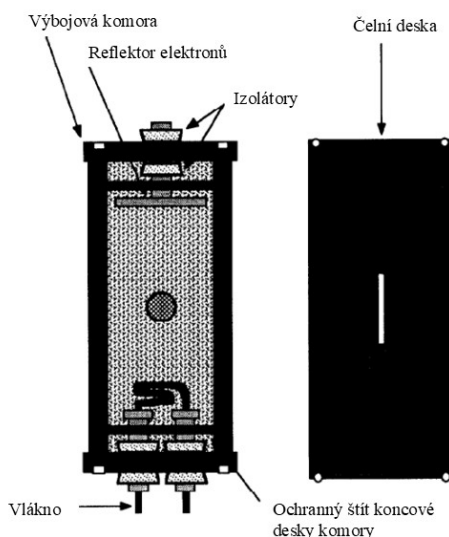
Freemanův zdroj zvětšen, aby splnil tyto zvýšené požadavky bez větších obtíží. Jediným významným nedostatkem tohoto zdroje zůstává relativně krátká životnost vlákna [22].



Obrázek 8: Freemanův zdroj [22]

2.2.2 Bernasův iontový zdroj

Velmi rozšířená varianta Freemanova zdroje, hojně využívaná komerční sférou, je konfigurace Bernas, na obrázku 9. Místo Freemanova rovného vlákna je spirálové vlákno umístěné na konci výbojové komory. Na druhém konci je elektroda, která udržuje elektrony uvnitř výbojové komory pomocí Penningova efektu⁵. Magnetické pole je u Bernasova zdroje silnější než u Freemanova, což způsobuje větší odchýlení svazku, které je potřeba kompenzovat v extrakčním systému. Tento zdroj je výrazně trvanlivější než Freemanův, přičemž výkon je téměř stejný. [22]

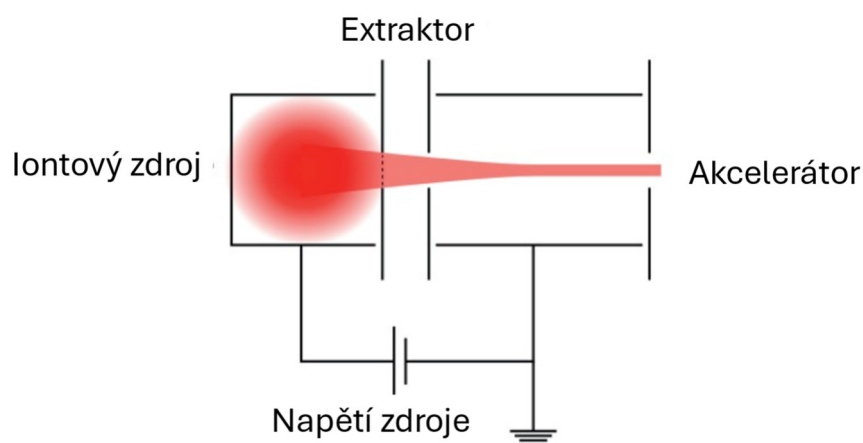


Obrázek 9: Bernasův zdroj [22]

⁵ Dochází k odrazu od reflektoru a ionizaci vstupujícího plynu odraženými elektrony. [28]

2.3 Extrakce iontů

Extrakce iontového svazku z iontového zdroje je zásadní krok pro iontovou implantaci, který je založen na rozdílu elektrického potenciálu. Pro extrakci svazku je teoreticky potřeba pouze deska iontového zdroje, zvaná plazmová elektroda a minimálně jedna další elektroda zvaná tažná, či extrakční. Rozdíl potenciálů na těchto elektrodách způsobí uvedení nabitých částic do pohybu a dojde k extrakci iontů z prostoru zdroje [29]. Nejednoduší elektrostatičtý extrakční systém dostatečný pro pochopení principu lze vidět na obrázku 10.



Obrázek 10: Jednoduchý extrakční systém [29]

Extrakce jako taková by neměla význam bez ostření svazku. To je nezbytný krok před separací a urychlením k tomu, aby se paprsek pouze nerozptýlil do stěn komory. V průběhu postupu zařízením paprsek prochází z pravidla dvěma druhy optických prvků, magnetickými nebo elektronickými. Pro vysokoenergetické svazky se využívají zpravidla magnetické. Základní elektronickou čočkou je imerzní čočka, což jsou dvě elektrody s rozdílným potenciálem. Mezi pokročilejší čočky se řadí u magnetických čoček solenoidy, kdy vzniklé magnetické pole centruje paprsek do středu solenoidu, u elektronických je ekvivalent einzelova čočka. Dále dipóly a kvadrupóly, jež mohou fungovat jak na principu elektřiny, tak magnetismu a často jsou za solenoidy, či einzelovou čočkou. [29] Svazek po extrakci a vycentrování putuje do separátoru a k urychlení.

2.4 Separace iontů

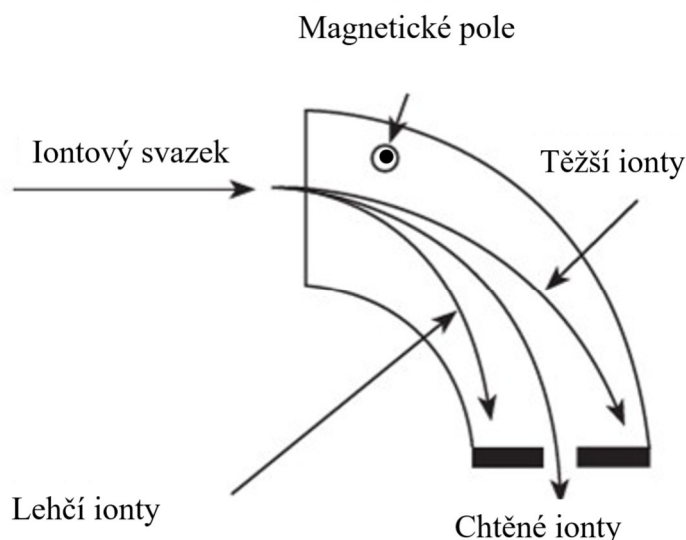
Iontový svazek z iontového zdroje je tvořen požadovaným iontem, ale také nezanedbatelným množstvím nežádoucích částic v podobě zbytkového plynu ve vakuovém systému, nečistot vzniklých erozním opotřebením komory iontového zdroje a také nedisociovanou zdrojovou látkou [30]. Typicky se může objevit například vodík, který je využíván jako nejnižší kalibrační hodnota spektrometru ze zbytkové vlhkosti iontového zdroje [31]. Jakékoli jiné prvky jsou nechtěné a je potřeba je eliminovat, jelikož tato kontaminace vede k nepředvídatelnosti a špatné funkci výsledné polovodičové součástky. Kontaminace může mimo jiné vzniknout také z vrstvy fotorezistu⁶ [30].

⁶ Ochranná maska, jež vymezuje, jaká část desky bude vystavena svazku iontů.

Ve všech moderních komerčních analyzérech je využíván magnetický analyzátor pro separaci prvku. Pokud nabitý svazek (částice) prochází magnetickým polem vyvolá to sílu dle rovnice (1), kde q [C] je elektrický náboj, $\vec{v}$ [m/s] rychlost náboje a $\vec{B}$ [T] je magnetická indukce [20].

$$F = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

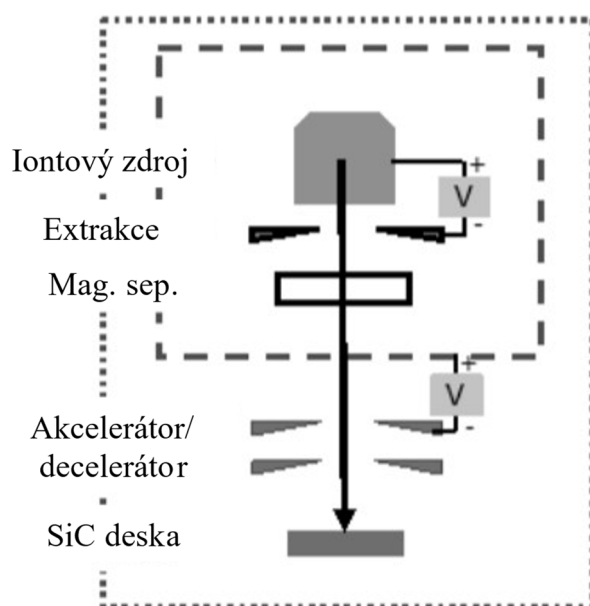
Díky této síle vyvolané na nabitou částici dojde k efektu znázorněnému na obrázku 11.



Obrázek 11: Zjednodušení schéma funkce magnetického analyzátoru (upraveno) [32]

2.5 Post akcelerační (decelerační)

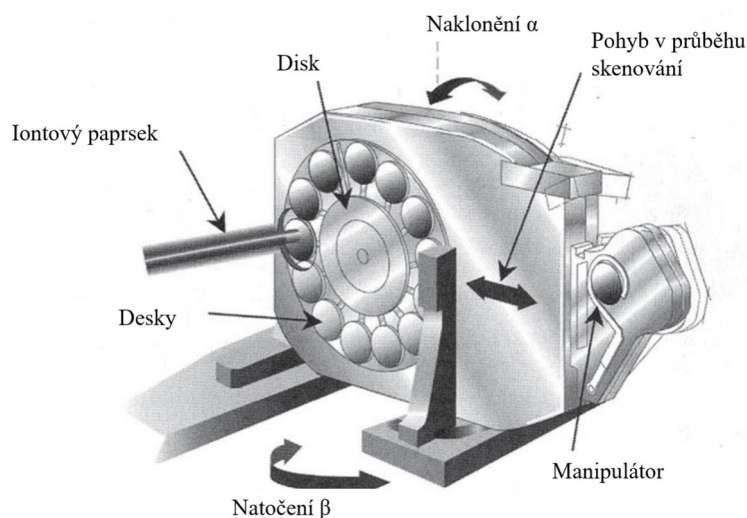
Po výběru správných iontů (magnetickým analyzátozem) ionty vstupují do akcelerační sekce, kde se nastavuje proud svazku a energie iontů, což jsou zásadní parametry pro implantaci. Proud je regulován pomocí dvojice nastavitelných lopatek, zatímco energie iontů se upravuje pomocí potenciálu post akcelerační elektrody. Ostrost a zaostření svazku jsou v této fázi řízeny vhodným nastavením apertur (čoček) a elektrod [20]. U vysokoenergetických implantací je zapotřebí několik vysokonapěťových urychlovacích elektrod zapojených sériově podél dráhy svazku [33]. Axcelis uvádí maximální energii 15 MeV pro zařízení, při využití urychlovačů LINAC (linear particle accelerator) [34]. Při mělké implantaci s nízkou energií iontů je post akcelerační elektroda zapojena opačně. Namísto urychlení tedy dochází ke zpomalení iontového svazku, čímž je snížena implantační energie viz obrázek 12, kde je zároveň znázorněna dvoustupňová akcelerace. Decelerace je nicméně v případě implantace do SiC nevyužívána z důvodu vyšších implantačních energií v porovnání s Si. Způsobů urychlení je více, například LINAC a liší se dle předpokládaných parametrů implantace [33].



Obrázek 12: Schéma iontového implantátoru [33]

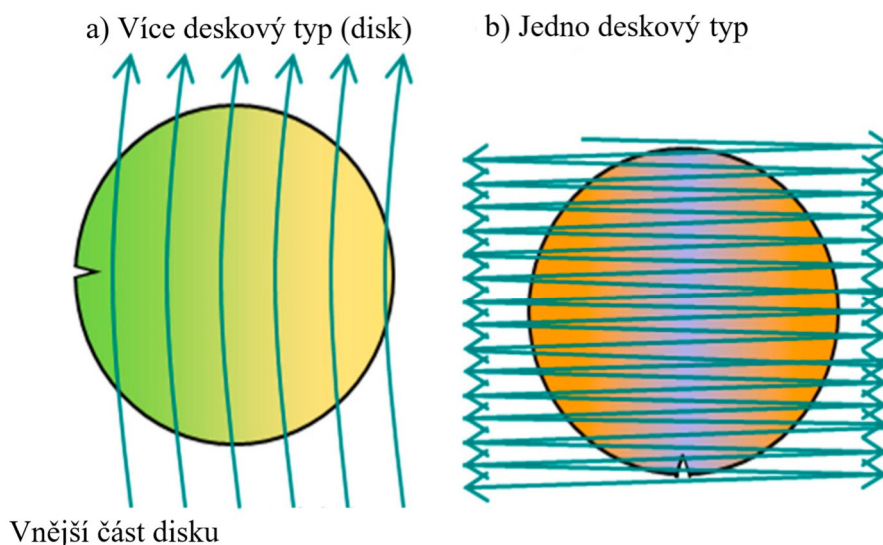
2.6 Skenování svazku po ploše desky

Plocha dopadu iontového svazku je výrazně menší než velikost desky, je nutné využít skenování svazku, nebo pohyb desky k rovnoměrnému rozložení iontové dávky na celý povrch a homogenizaci výsledných vlastností. Skenování je proces s vysokou přesností a stabilitou, často až na úrovni 0,1 stupně. Existuje mnoho různých metod skenování desek [33]. Současné implantátory kombinují různé dříve používané techniky, implantace může být jedno, či více desková, viz obrázek 13. Jednodeskové implantátory mají možnost dobře kontrolovat kanálování (vysvětleno v kapitole 2.7) na rozdíl od rotačních, na obrázku 13, kdy se úhel implantace mění.



Obrázek 13: Implantační disk [35]

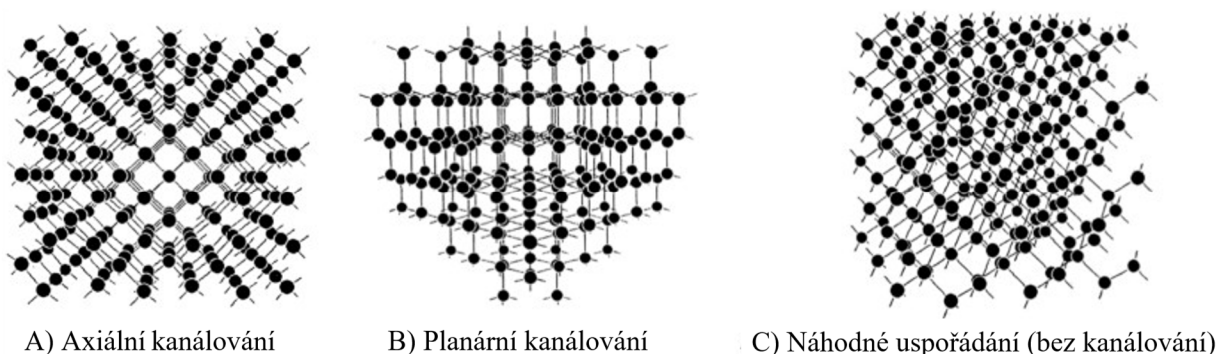
Porovnání principu jedno a více deskových (diskových) implantačních zařízení je na obrázku 14. Kvůli nedodržení konstantního úhlu vůči KM monokrystalu není možné tímto způsobem implantovat v kanálovacím módu. Toto je zřejmé z obrázku 14, kde je nutno zvažovat úhel naklonění a natočení v případě a) a navíc rotaci disku a pevnou pozici zdroje svazku.



Obrázek 14: Znáznornění směru pohybu svazku při implantaci [7]

2.7 Kanálování (channeling)

Kanálování je jev, kdy implantované ionty pronikají do substrátu monokrystalu podél krystalografických směrů viz obrázek 15, kde části A) a B) axiální a planární kanálování znázorňují kanálovací směry, kterými může proletět iont s nízkým množstvím kolizí a prostup do materiálu těmito kanály je s výrazně nižším odporem a je možno dosáhnout hlubší implantace [36]. Kanálování nicméně představuje při běžné implantaci spíše komplikace a to právě z důvodu sklouzávání iontů po těchto kanálech při určitých úhlech naklonění a natočení (viz obrázek 13), což porušuje homogenitu implantace [37].

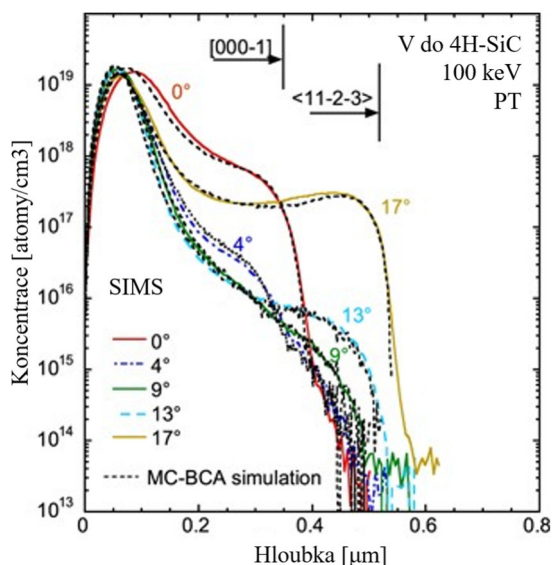


Obrázek 15: Znáznornění natočení KM a kanálování [37]

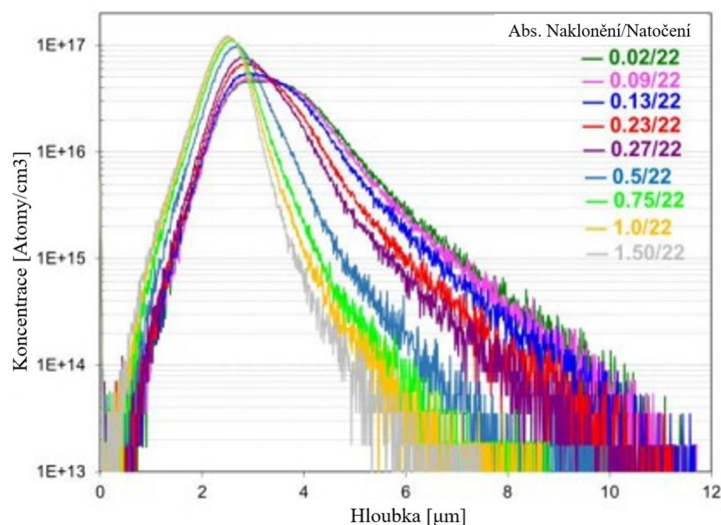
Na obrázku 17 lze vidět vliv parametrů natočení a naklonění na implantační profily (sice do Si, nicméně pro popis dostačující). Na vodorovné ose je hloubka v mikrometrech, na svislé koncentrace implantovaných iontů v materiálu [atomy/cm^3]. Je zřejmé, že nejmenší úhly $0,2^\circ$, či $0,9^\circ$ vykazují výraznější kanálování, což se projevuje hlubšími a méně ostrými profily dopantu. S rostoucím úhlem se kanálování vytrácí a koncentrační profily jsou plytčí a užší.

Z těchto profilů je patrné, že úhel implantace má silný vliv na výsledek a kanálování ovlivní výsledný profil. Na obrázku 16 je patrný jev, který připomíná dva koncentrační profily pro úhel 0° a 17° a je pro kanálování v 4H-SiC typický. Nicméně desky monokrystalu SiC vyráběné pro komerční použití jsou řezány pod úhlem 4° z důvodu růstu epitaxní vrstvy. Kanálovací úhly jsou posunuty o tuto hodnotu, tedy 4° a 21° [38].

Kanálování je vnímáno převážně jako jev, kterému je snaha se vyhnout. Nicméně z důvodu menších deformací a hlubších implantací může být právě kanálování jedno z budoucích řešení problému s iontovou implantací do SiC.



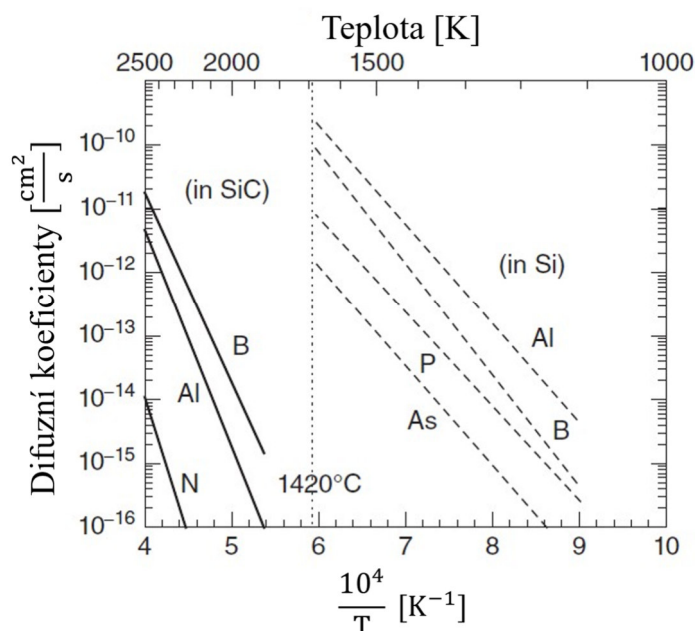
Obrázek 16: IMS měření a MC-BCA simulace vanadových implantací do 4H-SiC.



Obrázek 17: SIMS profily pro As do Si, 4.5MeV, 1×10^{13} at./cm² [36]

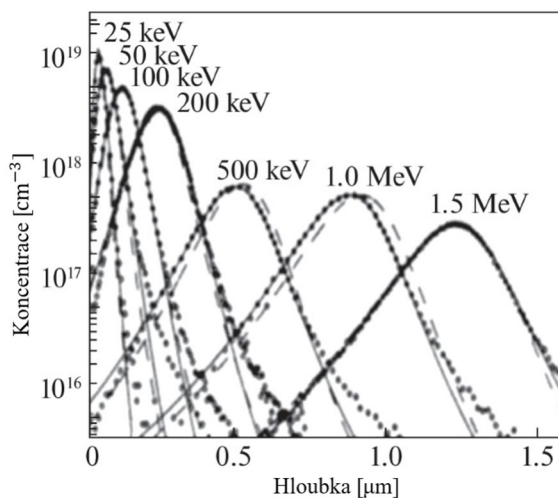
2.8 Řetězová (chain) implantace

Jak již bylo zmíněno, SiC má nízké difuzní koeficienty vůči ostatním prvkům, není tedy možné používat standardní implantace a rozdifundování dopantů jako u Si, jelikož pod 2000 °C jsou difuzní koeficienty SiC zanedbatelné. Pro vybrané dopanty lze vidět porovnání difuzních koeficientů v Si a SiC v závislosti na teplotě v Arrheniově grafu na obrázku 18 [4].



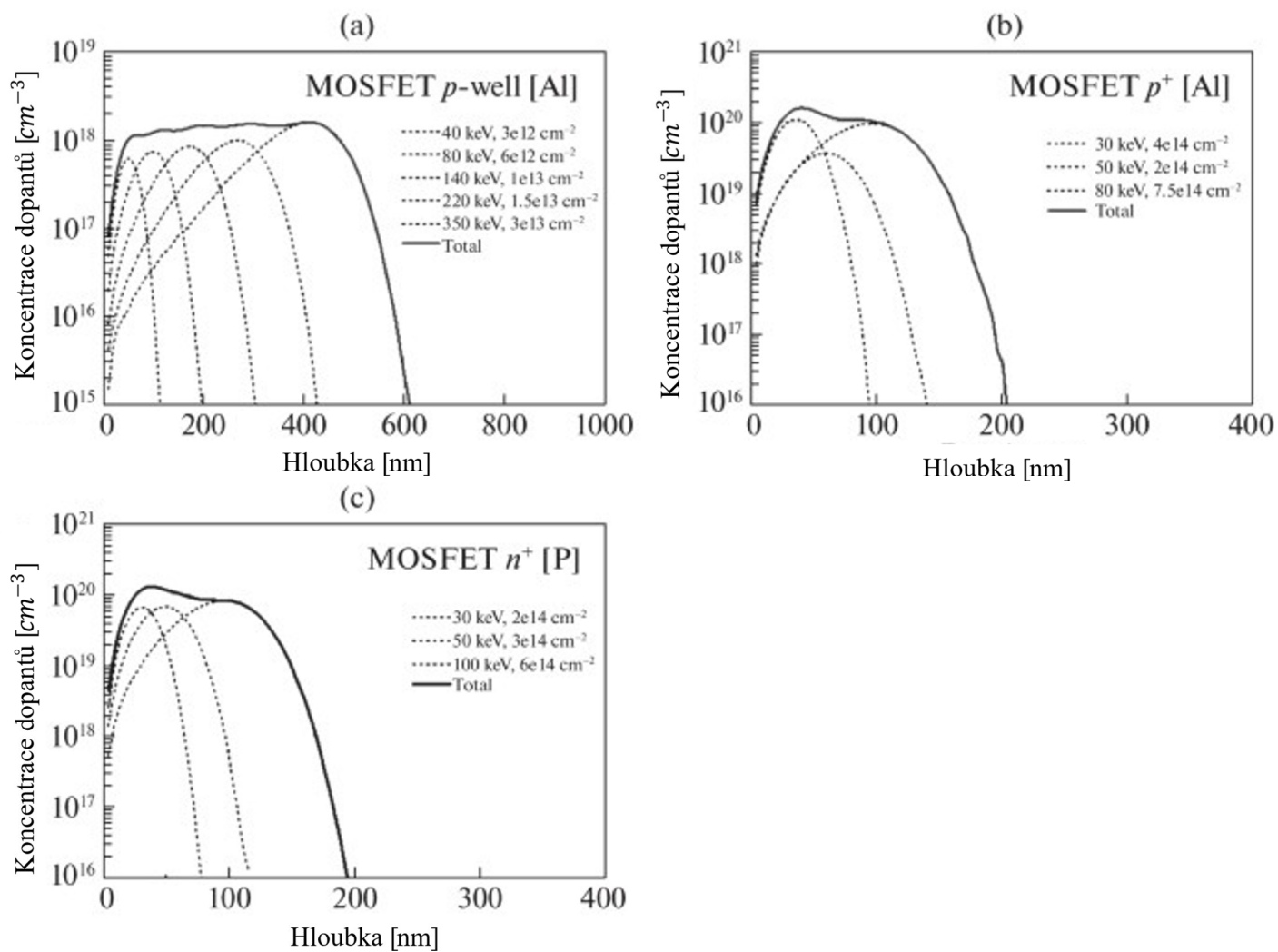
Obrázek 18: Arrheniov graf difuzních koeficientů pro hlavní dopanty SiC a Si [4]

Toto vedlo k zavedení způsobu řetězové (chain) implantace, kdy je vedena implantace různě velkých dávek se snižující se energií k vytvoření požadovaných hloubkových profilů. Vliv energie na hloubkový profil je patrný z obrázku 19. Při řetězové implantaci je možno pozorovat, že začíná nejvyšší energií, důvod je také zřejmý z obrázku 19. Jestliže implantace začne energií např. 1000 keV koncentrační maximum bude kolem hodnoty 1 μm a většina iontů s nižší energií již touto oblastí neprocházejí, dochází tedy k nižšímu počtu interakcí s ionty již implantovanými.



Obrázek 19: Vliv energie na hloubkový profil dopantu

Jelikož dochází k určitému překrytí koncentračních profilů jednotlivých energií je výsledný koncentrační profil po aktivaci vyhlazený o přechody mezi profily viz obrázek 20.



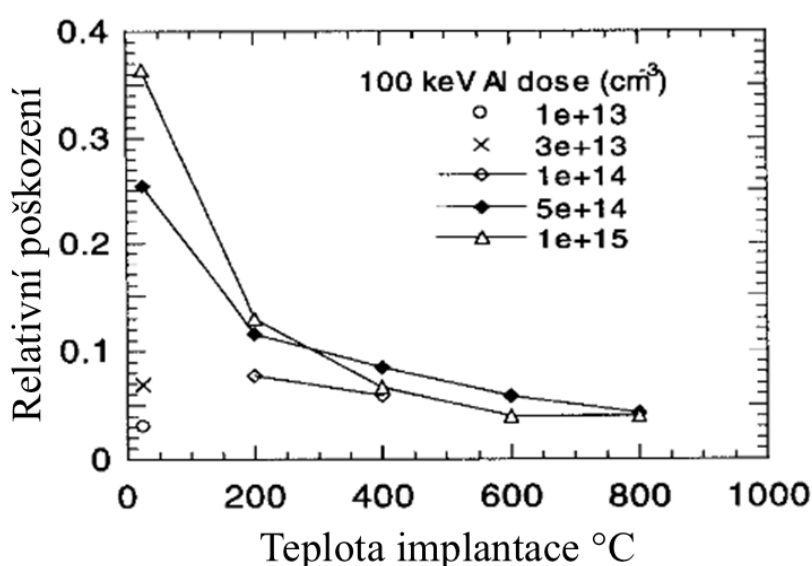
Obrázek 20: Profily dopantů v 4-H SiC a) hloubkový profil Al; b) mělká oblast Al, mělká oblast P [5]

2.9 Defekty v krystalické mřížce spojené s implantací

Energie iontů při implantaci je větší než vazebné energie v KM substrátu, to vytváří poškození struktury krystalické mřížky. Defekty krystalů bývají vakancemi, intersticiály a v krajním případě částečnou, či úplnou amorfizací mřížky [37]. Iontová implantace zanechává převážně bodové defekty. Jsou obtížně detekovatelné a rozlišování, jakým mechanismem defekt vznikl, je velmi náročné [40]. Takto vzniklé vady závažně ovlivňují navazující procesy a také elektrické parametry polovodičové součástky. Defekty jsou v SiC také teplotně stabilní a je potřeba vysokoteplotní žíhání (HTA) při 1400 °C až 1600 °C pro snížení hustoty defektů [41]. Nicméně jak je patrné z obrázku 2, pokud je při žíhání účel také aktivovat dopanty je potřeba se dostat alespoň nad 1600 °C. A také pokud je míra poškození nad určitou mez, není možné tepelnou operací KM opravit. Množství a rozsah poškození KM je závislé na dávce, energii, teplotě a úhlu implantace. Pokud je implantace za zvýšené teploty nebo pod úhlem, který je blízký kanálovacímu, je výsledné poškození nižší [42].

2.10 Implantace za zvýšené teploty

Zvýšená teplota vede k menšímu poškození KM, což popisuje například následující článek (Damage Evolution in Al-implanted 4H SiC [43]), kde byla zkoumána implantace Al do 4H SiC pomocí TEM (transmisní elektronové mikroskopie) a c-RBS (Rutherfordova spektroskopie v kanálovacím módu). Bylo zjištěno, že při teplotách implantace nad 200 °C dochází k nižšímu poškození KM substrátu [43]. Při teplotách 500-800 °C dochází k lepšímu rozptýlení dopantů a nižšímu množství defektů KM, nicméně komerčně běžně používané stroje pro iontovou implantaci Si desek (pro SiC využívané) nejsou navrženy pro implantaci při zvýšených teplotách, jelikož tato technologie nebyla pro dané aplikace potřeba a v Evropě není tato technologie zatím častá [41]. Graf na obrázku 21 popisuje závislost teploty implantace Al do SiC, kdy zvyšování teploty implantace snižuje rozdíly mezi relativním poškozením vlivem různě vysokých dávek, přičemž právě dávka má významný vliv pro stejný iont, na míru poškození, což jednoznačně určuje význam implantace za zvýšené teploty.



Obrázek 21: Závislost relativní deformace KM na teplotě implantace [43]

2.11 Amorfizace indukovaná implantací

Karbid křemíku (SiC) je materiál, který lze poměrně snadno amorfizovat iontovou implantací při pokojové teplotě. Kritická energie potřebná k dosažení amorfizace se pohybuje kolem 20 eV na atom [44]. Je zaveden pojem „kritická dávka“, která odpovídá $(3-4) \cdot 10^{15}$ at./cm², kdy je takřka naprostá amorfizace KM iontovou implantací [4]. Pokud je implantace prováděna při vyšších teplotách, typicky nad 500 °C, k amorfizaci už nedochází ani při mnohem vyšších úrovních poškození. Při implantaci pod kritickou dávkou amorfizace je možné téměř úplné zotavení krystalické struktury už při žíhání okolo 1000 °C. Pokud je dávka nadkritická ani žíhání při 1600 °C nesnižuje výrazně poškození [4, 44]. Při amorfizaci dochází k objemové expanzi až o 15 %, což je spojeno s tvorbou defektů a přeskupováním atomů v mřížce. Mechanické vlastnosti amorfního SiC se výrazně liší od krystalického, tvrdost klesá přibližně na 40 % a modul pružnosti na 70 % původních hodnot, které jsou v tabulce 3 [44]. Dle studie [45], která zkoumala vliv dávky a teploty na defekty vzniklé v substrátu, je právě substrát implantován při/nad kritickou dávkou oblastí, kde se hromadí maximum elastické energie a dále uvádí, že právě s implantovanou dávkou roste míra poškození krystalické mřížky takřka lineárně [45].

Tabulka 3: Vybrané fyzikální vlastnosti SiC a Si [4]

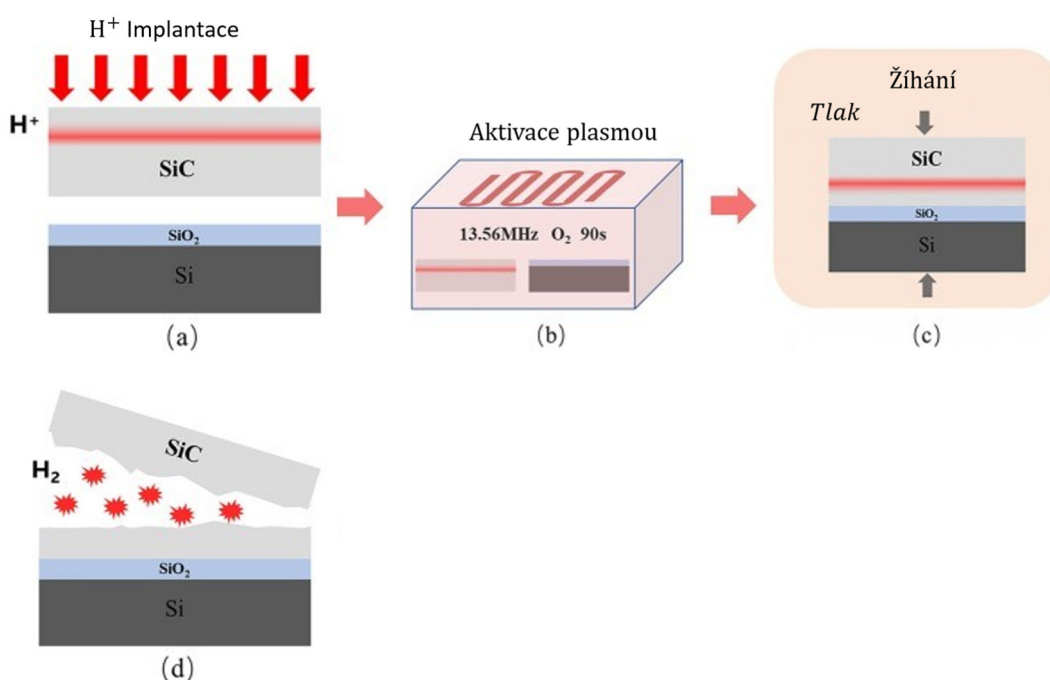
	4H-SiC	Si
Hustota [g·cm ⁻³]	3,21	2,33
Youngův modul [GPa]	360	160
Poissonův poměr	21	7
Tepelná vodivost [W·cm ⁻² ·K ⁻¹]	3,3	1,4

Rutherfordova zpětná spektrometrie a měření ukazují, že amorfní oblast se nejdříve tvoří v podpovrchové vrstvě, kde je koncentrace poškození nejvyšší, a postupně se šíří s rostoucím množstvím implantovaných iontů [44]. Existují dva hlavní modely popisující mechanismus amorfizace – model překrývajících se kaskád a model kritické akumulace defektů. Zatímco první předpokládá postupné nahrazování krystalické struktury amorfní při překrytí defektních oblastí, druhý model pracuje s konceptem dosažení prahové koncentrace bodových defektů, která vede k transformaci do amorfního stavu. Experimentální výsledky naznačují, že amorfizace se řídí spíše modelem kritické akumulace, jelikož poškození narůstá lineárně s dávkou, což by u modelu překrytí kaskád nebylo očekáváno [41, 44].

Nicméně právě tato obecně nechtěná amorfizace může být v určitých případech využívána k cílenému a chtěnému poškození SiC substrátu. Příkladem tohoto chtěného poškození je tzv. exfoliace SiC metodou CIS (Crystal-Ion-Slicing) [46]. Jelikož růst monokrystalu SiC je velmi výrazně obtížnější než u Si monokrystalu. Si je tažen z taveniny polykrystalického křemíku a pomocí zárodku monokrystalu dochází ke vzniku monokrystalu v ochranné atmosféře argonu a přibližně 1413 °C metodou Czochralski, kdy přibližná rychlost tažení pro monokrystal o průměru 300 mm je 1 mm/min [47]. Zatímco pokud je tvořen monokrystal SiC, není možné použít metodu Czochralského, ale využívá se sublimační růst při teplotě 2000 °C až 2250 °C s rychlostí 0,1-2 mm/h, což mimo jiné vedlo i k výše zmíněné nutnosti využívat menší tloušťku desek [48]. Komplikovaný a náročný růst monokrystalu SiC vede k hledání způsobu, jak využívat co nejméně materiálu. Jednou z metod minimalizace použitého materiálu, při

zachování předností SiC, je využívání tzv. SiC filmů, které jsou spojeny s levnějším substrátem (např. Si) viz obrázek 22.

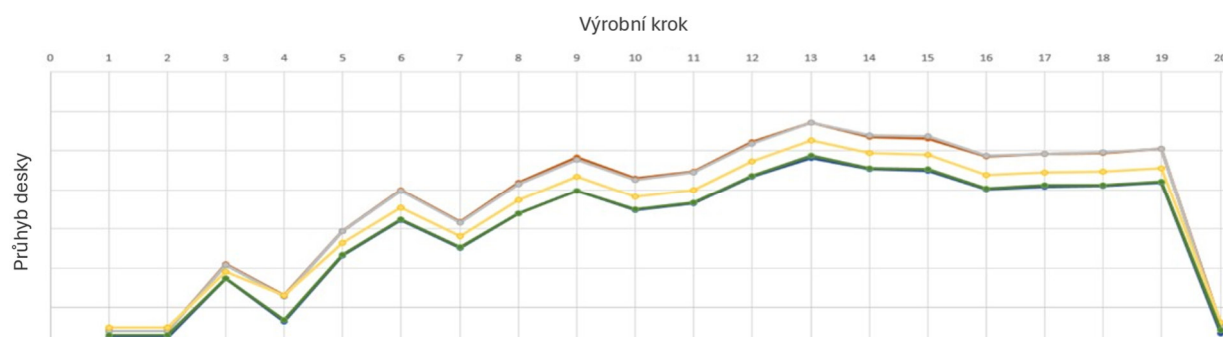
Princip metody spočívá v implantaci 4H-SiC desky ionty H^+ s 180 keV; $8E+16$ at./cm², tedy nadkritickou dávkou s cílenou indukcí amortizované vrstvy. Na levný substrát je deponován SiO₂ sloužící k zaručení spojení materiálů obr. 22 (a). Tyto dvě části jsou aktivovány v plazmě s atmosférou O₂ (b). Posledním krokem je žíhání (700 °C a 740 °C po dobu 20 h a 20 h) za působení tlaku 200 MPa. Jednak dojde k spojení částí, ale také se naimplantovaný H^+ odděluje od krystalické mřížky díky excitaci za zvýšené teploty a vytváří agregace molekul H₂, které způsobí exfoliaci (štěpení) krystalu, vzniklý povrch je nutné posléze upravit [49]. Tímto vznikne kompozitní deska s vyšší mechanickou pevností a pouze tenkou vrstvou monokrystalického SiC. Tato metoda má ale také své limitace, např. v použitelnosti vlivem nerovnoměrnosti tloušťky filmu a vzniklé amorfizaci [46].



Obrázek 22: Možnosti využití amorfizace metoda CIS (upraveno) [49]

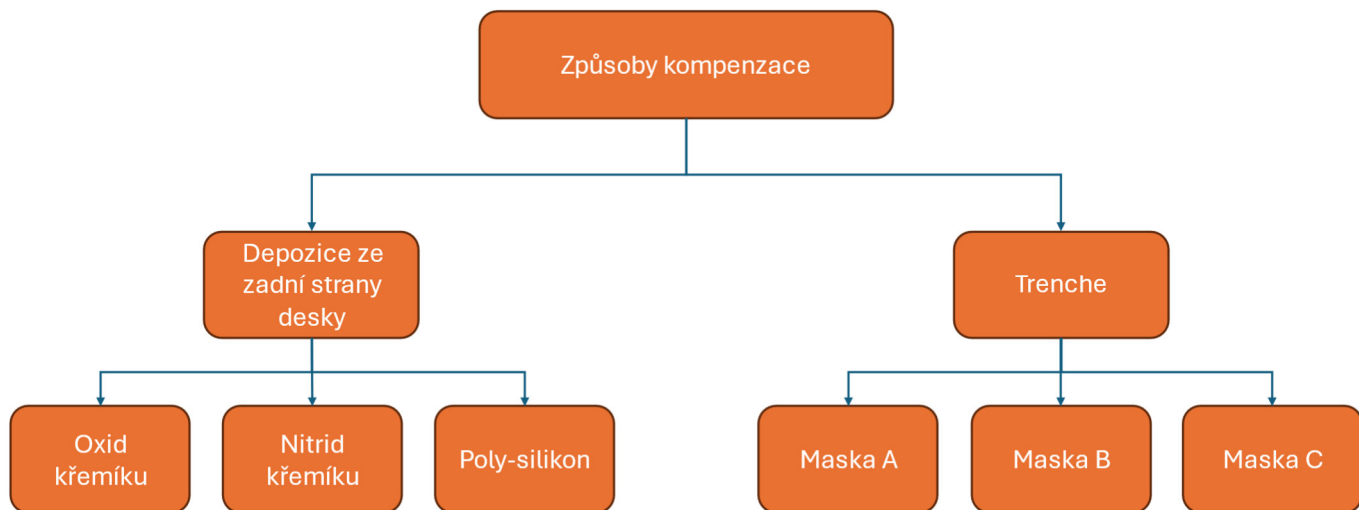
3 Způsoby uvolnění napětí v desce SiC

Nejúčinnější způsob uvolnění napětí v desce a snížení průhybu je aktivační žíhání (HTA) při teplotách nad 1600 °C (více popsáno v kapitole 1.1). Tuto vysokoteplotní operaci je možno použít pouze jedenkrát za proces výroby z důvodu možného poškození vznikajících struktur. Proto je důležité nalézt způsob, jak držet průhyb desek pod manipulačním limitem i mezi jednotlivými kroky výroby. Průběh průhybu pro více desek při výrobě polovodičové součástky na substrátu SiC je možno vidět na obrázku 23 (obrázek je bez hodnot a konkrétních kroků výrobního postupu z důvodu vnitřních předpisů firmy). Krok číslo 20 je právě aktivační žíhání, které způsobí snížení průhybu na hodnotu blízkou hodnotě průhybu nové desky v bodě 0 (v práci také experimentálně podloženo v kapitole 6). Kroky, kde průhyb desky roste, jsou depozice různých vrstev z přední strany desky, nebo iontová implantace. Nicméně u kroků nad krok 15 průhyb přes další implantace (v kroku 17,18,19) neroste, jelikož je průhyb již saturován (viz kapitola 4.2.2).



Obrázek 23: Průběh průhybu při výrobním procesu součástky ze SiC

Vzhledem k problému s manipulací a fotolitografií popsaných v úvodu, je jedním z cílů diplomové práce nalézt a otestovat možné způsoby uvolnění napětí, a hlavně prevence vzniku napětí a prohnutí desek. Jelikož potom, co prohnutí vznikne, je již problematické ve větším měřítku prohnutí kompenzovat, či desky žíhat z důvodu vysokého rizika poškození desek vlivem ztížených manipulačních podmínek, časové náročnosti (žíhání v difuzní peci trvá řádově hodiny), či logistických problémů. Proto bude mít nejvyšší hodnotu řešení, které bude schopno prohnutí kompenzovat do přijatelných mezí. Přijatelné hodnoty prohnutí (manipulační limit) jsou ze zkušenosti dle možností strojů v rozsahu 200÷250 μm. Nicméně pro fotolitografii mohou být i tyto hodnoty problematické, z čehož plyne, že čím více se podaří minimalizovat prohnutí, tím nižší bude pravděpodobnost souvisejících defektů ve výrobě. Pro možné způsoby kompenzace a prevence prohnutí byly navrženy způsoby (viz obrázek 24), které budou v následujících kapitolách vysvětleny.



Obrázek 24: Zkoumané způsoby kompenzace prohnutí desky

3.1 Depozice ze zadní strany

Tyto metody jsou založeny na principu vytvoření předepnutí, tedy cíleného prohnutí desky směrem opačným ke směru prohnutí od iontové implantace. Dle zkušeností z výroby se předpokládá, že depozice buď sníží počáteční prohnutí, nebo dojde ke konvexnímu prohnutí desky. Tyto metody s sebou mohou přinést různě vysoké riziko kontaminace přední strany desky v závislosti na použité metodě.

Oxid křemíku (SiO_2) byl deponován pomocí metody LPCVD TEOS, což je chemická depozice za nízkého tlaku pyrolýzou tetraerhylorthsilikátu. Vzhledem k podmínkám procesu musely být deponovány obě strany SiC desky, kdy vrstva byla z přední strany, na které jsou vytvářené jednotlivé struktury polovodičových součástek, následně odleptána. Tloušťka vrstvy byla volena 1 μm z důvodu stávajících výrobních procesů.

Polykrystalický křemík, jakožto také LPCVD proces, byl deponován z obou stran a vrstva byla z přední strany odleptána. Jelikož je depozice poly-křemíku ve výrobě nejčastější v rozsahu 300 nm až 850 nm, byly do experimentu zařazeny 2 tloušťky vrstvy k vyhodnocení vlivu tloušťky na průhyb desky.

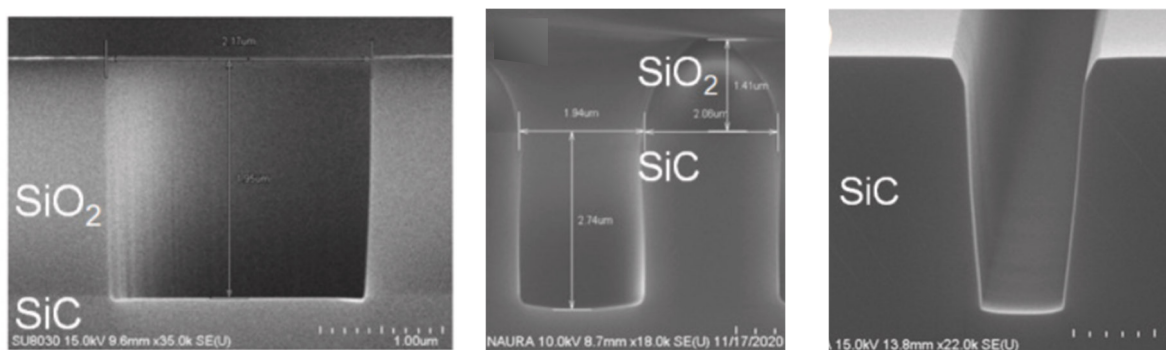
Nitrid křemíku (Si_3N_4) byl deponován pouze z jedné strany bez nutnosti leptání. Tloušťka vrstvy byla zvolena 1 μm z důvodu stávajících výrobních procesů.

Tabulka 4: Zvolené metody depozice vrstev s technickými parametry procesu

Proces	Tloušťka vrstvy [μm]	Typ pece	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Tlak [Torr]
Poly-křemík	0,85	LPCVD Vertikální	620	0.2
Poly-křemík	0,3	LPCVD Vertikální	620	0.2
Oxid křemíku	1	LPCVD-TEOS Horizontální	715	0.25
Nitrid křemíku	1	PECVD Novellus	400	2.6

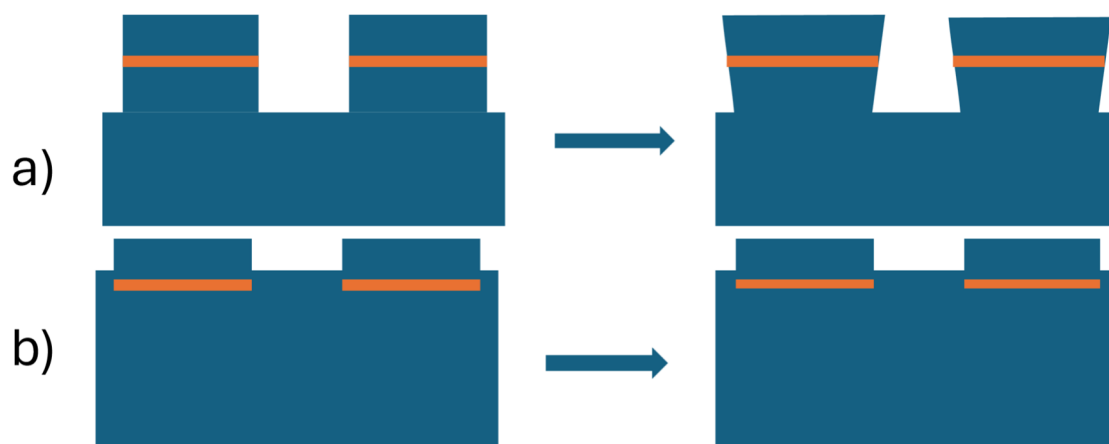
3.2 Leptání trenchů

Trenche (příkopy) jsou 3D struktury (často drážky), které se využívají pro vytváření lokálně dopovaných oblastí, či oblastí určených pro depozici vrstev, čímž je možno dosahovat zmenšování rozměrů zařízení. Pro výrobu jedné součástky na desce je využíváno desítky masek, podle nichž se leptají jednotlivé trenchy a vzory. SiC je mimo jiné pozitivní vlastnosti také chemický velmi stabilní, není tedy možné efektivně využívat konvenční metody mokrého leptání a je nutné používat leptání suché, tedy plazmatické. Leptání plazmou se ukázalo jako nejstabilnější technika s reprodukovatelnými výsledky [50]. Na substrát SiC je deponovaná vrstva SiO_2 (hardmaska), jejíž tloušťka se liší v závislosti na hloubce leptaných trenchů, v závislosti na tzv. selektivitě leptání. Na ni je nanesen fotoresist, na který se přeneseme vzor masky a následně je vyleptán vzor do hardmasky, přes kterou je plazmaticky leptán vzor do substrátu. Hardmaska je po vyleptání trenchy odleptána a zůstává pouze SiC desky s vyleptanou maskou viz obrázek 25 [51].



Obrázek 25: Ilustrativní znázornění procesu leptání trenchů [51]

Představa funkce trenchů pro zmírnění průhybu desek je patrná z obrázku 26. Pokud je koncentrační maximum (reprezentováno oranžovým pruhem) ve vzniklé struktuře nad dnem trenchu, dojde ke zvětšení objemu do vzniklého prostoru a nedochází tedy k tak významnému vzniku napětí v desce a dojde tedy k nižšímu průhybu (obrázek 26 a)). Za předpokladu, že je dno trenchu nad koncentračním maximum, není možné zvětšovat objem do vzniklého prostoru, dochází tedy k vyššímu průhybu (napětí) desky (obrázek 26 b)). Je třeba poznamenat, že obrázek je velmi schematický a implantace samozřejmě probíhá také do dna trenchu, pokud není nějakým způsobem stíněno a toto maximum bude v jiné hloubce.



Obrázek 26: Schematické znázornění vlivu hloubky trenchů

4 Experimentální část

V rámci praktické části závěrečné práce byl zkoumán vliv iontové implantace na průhyb desek. Byla provedena řada experimentů, které měly vést k pochopení vlivu proměnné energie a dávky na výslednou deformaci desek. Vliv byl zkoumán za fixace druhé proměnné, viz níže. Jedna deska byla použita k zjištění kumulace poškození a prohnutí pro část implantačního receptu využívaného ve výrobě. Veškeré implantace byly provedeny celoplošně do SiC substrátu prvkem Al. K experimentu byla využívána dvě implantační zařízení Axcelis GSD 200 a Axcelis GSD VHE z důvodu pokrytí maximálního dostupného rozsahu proměnných (energie a dávky), který byl v danou chvíli dostupný. Dále byl zkoumán vliv depozice vrstev ze zadní strany a chování desek s různými fotolitografickými maskami. Byl také proveden experiment ve spolupráci s onsemi v Jižní Korei, která disponuje implantátory uzpůsobenými pro implantaci za zvýšené teploty, kde byla mimo jiné potvrzena přesnost měřicího přístroje využívaného k evaluaci experimentu. Vzhledem k důležitosti dat bylo před začátkem experimentů provedeno zjištění přesnosti měřidla průhybu Flexus. V experimentální části byly pokusy uskutečněny pouze jednou, data tedy nebylo možné statisticky zpracovat vzhledem k nízkému počtu opakování. Pokusy nebylo možné opakovat z důvodu vysokých nákladů na pořízení desek a také na cenu procesů, kterých bylo k experimentům potřeba. Cena desky byla k 15.3.2025 cca 655 \$ a pro potřeby experimentů bylo použito 26 4H-SiC desek [52].

4.1 Měřicí zařízení

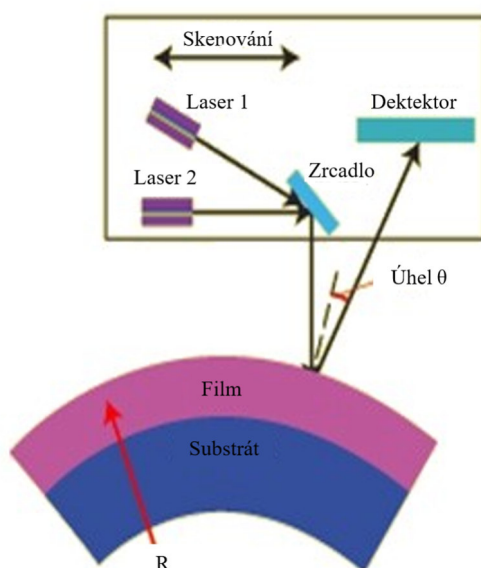
Vzhledem k ekonomické náročnosti nebylo možné pokusy opakovat a statisticky vyhodnotit, proto byla provedena zkouška přesnosti měřidla. Cílem bylo zjistit, zda se hodnoty průhybu pro stejnou desku liší a do jaké míry. Bylo provedeno 21 měření pro jednu desku, kdy deska byla před každým měřením znovu vložena do měřicího zařízení Tencor Flexus 2320, viz tabulka 5. Na obrázku 27 lze vidět zařízení, na kterém bylo měření prováděno, a mimo jiné také vakuová pinzeta sloužící k manipulaci s deskami pomocí přísátí ze zadní strany desky. Měřicí lože, které při měření nebylo vyhříváno, má v prostoru určeném k vložení hrany desky geometrii uzpůsobenou tak, že deska je vždy vložena stejně orientována, dochází tedy k měření pouze v jednom směru desky (princip měření vysvětlen níže).

Kontrolní měření bylo prováděno pouze mnou, bez dalších operátorů, jelikož jsem měření průhybu desek při experimentu prováděl pouze já a zjišťování nezávislosti na obsluze by nemělo význam.



Obrázek 27: Měřicí zařízení Tencor Flexus 2320 (cenzurováno)

Princip funkce měření zařízení Flexus spočívá ve skenování desky laserovým svazkem, přístroj má k dispozici dva lasery. Zařízení také slouží pro měření napětí v tenkých filmech na deskách. Deska je tedy měřena pouze v jedné rovině, dá se říci, že dochází k měření průhybu čáry, která kopíruje prohnutí desky. Výsledné hodnoty jsou bez zadání hodnoty tloušťky filmu, což znemožní pouze měření napětí, ale nijak to nezasahuje do měření průhybu. Na schématu na obrázku 28 je zakótován rádius R , nicméně ten nebyl vyhodnocován z důvodu korelace s hodnotou prohnutí a lepší názornosti prohnutí (bow).



Obrázek 28: Schematické znázornění principu měření Flexusu [53]

Výstup ze zařízení Flexus je přímkový a zobrazení průhybu desky je vykresleno, jak lze vidět na obrázku 29. Lze vidět hodnoty rádiusu a bow. Tyto hodnoty byly poté vždy exportovány do formátu TXT a převedeny do programu Microsoft Excel, kde byly následně zpracovány.

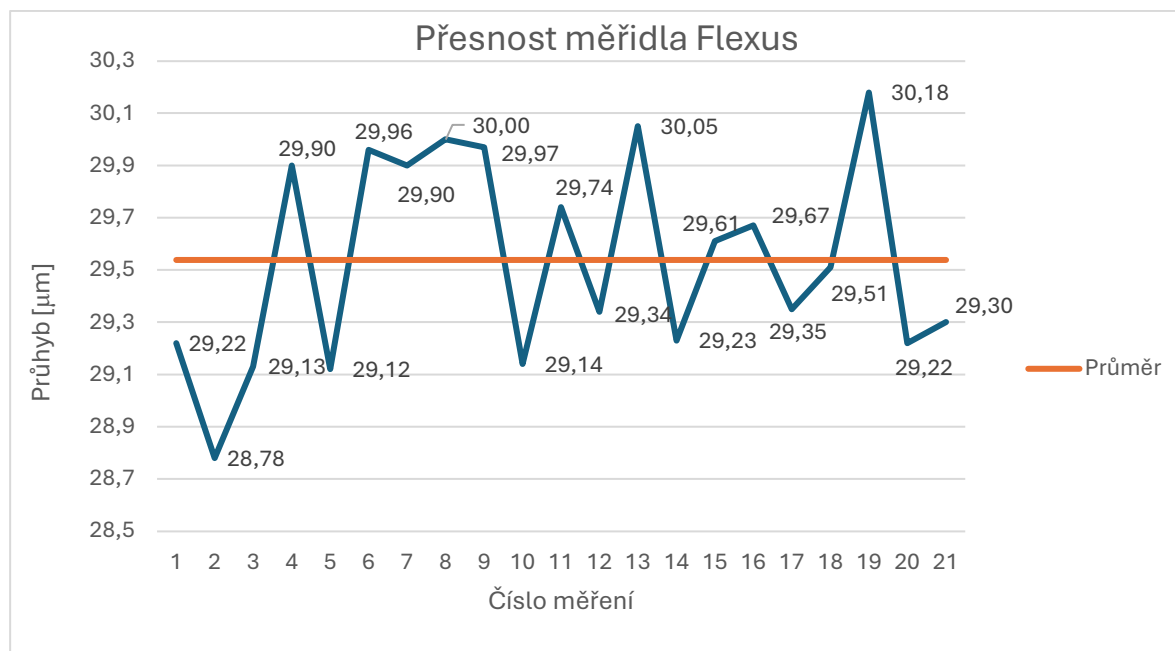


Obrázek 29: Výstup ze zařízení Flexus

I v českém polovodičovém názvosloví je běžně používáno pro popis prohnutí slovo “bow“, aby se proto předešlo záměně s pojmem “warp“ (zkroucení), je v tabulce uveden jak český, tak anglický název. V práci je pod pojmem prohnutí vždy myšleno bow.

Tabulka 5: Hodnoty průhybu pro kontrolu přesnosti přístroje Flexus

Měření číslo	Průhyb (bow) [μm]
1	29,22
2	28,78
3	29,13
4	29,9
5	29,12
6	29,96
7	29,90
8	30,00
9	29,97
10	29,14
11	29,74
12	29,34
13	30,05
14	29,23
15	29,61
16	29,67
17	29,35
18	29,51
19	30,18
20	29,22
21	29,30



Obrázek 30: Naměřené hodnoty průhybu při zkoušce přesnosti měřidla Flexus

Po zpracování dat znázorněných na obrázku 30 bylo zjištěno, že přesnost přístroje je dostatečná se směrodatnou odchylkou 0,383 μm , což je hodnota pro účely této práce dostatečná, jelikož cílem je zjišťovat souvislosti a trendy dat, viz tabulka 6. Je předpoklad, že rozdíly v jednotlivých experimentech budou spíše v desítkách, či stovkách mikrometrů, měřidlo má tedy uspokojující přesnost.

Tabulka 6: Výsledky dat měření přesnosti měřidla Flexus

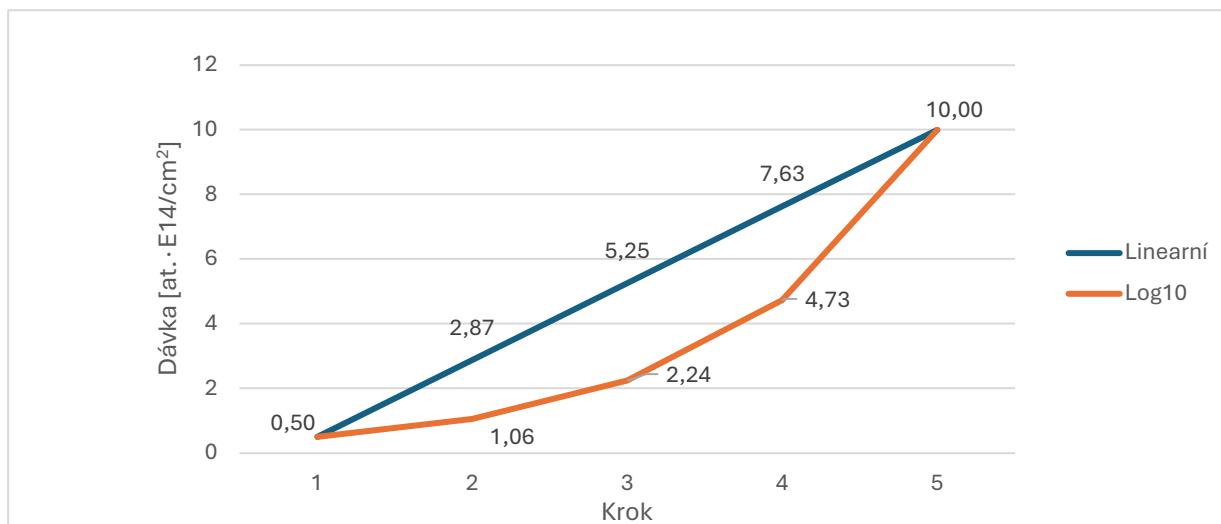
Průměr [μm]	29,539
Rozptyl [μm^2]	0,1467
Směrodatná odchylka [μm]	0,383

4.2 Implantace Al do 4H-SiC

V rámci diplomové práce byly provedeny pokusy, jejichž smyslem bylo odhalit vliv jednotlivých parametrů iontové implantace dávky, což jsou atomy vztažené na jednotku plochy, [at./cm^2], a energie [eV] na průhyb desek. Elektrické vlastnosti nebyly žádným způsobem zkoumány. Vždy byl implantován pouze hliník (Al) a to celoplošně z důvodu dostupnosti implantátorů. Z rešerše vyplývá, že výše zmíněné proměnné ovlivňují průhyb různými způsoby, dávka udává množství iontů, které budou naimplantovány, a energie udává, v jaké hloubce se ionty zastaví. V kapitolách 4.04.2.1 a 4.2.2 bylo využito vždy 5 desek. Experiment probíhal vždy pouze do nedotčeného substrátu. Jedna deska byla také využita na zkoumání přírůstku deformace v průběhu “chain” implantace. Cílem této části bylo také vyhodnotit jaké parametry bude mít implantace pro metody uvolnění napětí viz obrázek 24.

4.2.1 Implantace za zafixované energie

Pro rozlišení vlivu parametrů byla zvolena energie 160 keV, což je pro strojové podmínky hraniční hodnota, pod kterou se používají vyšší dávky. Obrázek 20: Profily dopantů v 4-H SiC a) hloubkový profil Al; b) mělká oblast Al, mělká oblast P [5]. Zařízení, které bylo využito pro tento experiment, bylo Axcelis GSD 200. Dávka byla volena dle využívaného rozsahu. Dávka $5 \times 10^{13} \text{ at/cm}^2$ je volena s ohledem na propojení experimentu s vysokoenergetickou částí (implantace za zafixované dávky). Velikost dávek se liší přes tři řády, což vedlo k rozložení dávek logaritmickým měřítkem, díky čemuž je lépe odstupňovaný krok a nedojde k posunu k vyšším hodnotám dávek. Dávky se přibližně zdvojnásobují, což by lineárním proložením rozsahu nebylo možno dosáhnout viz obrázek 31.



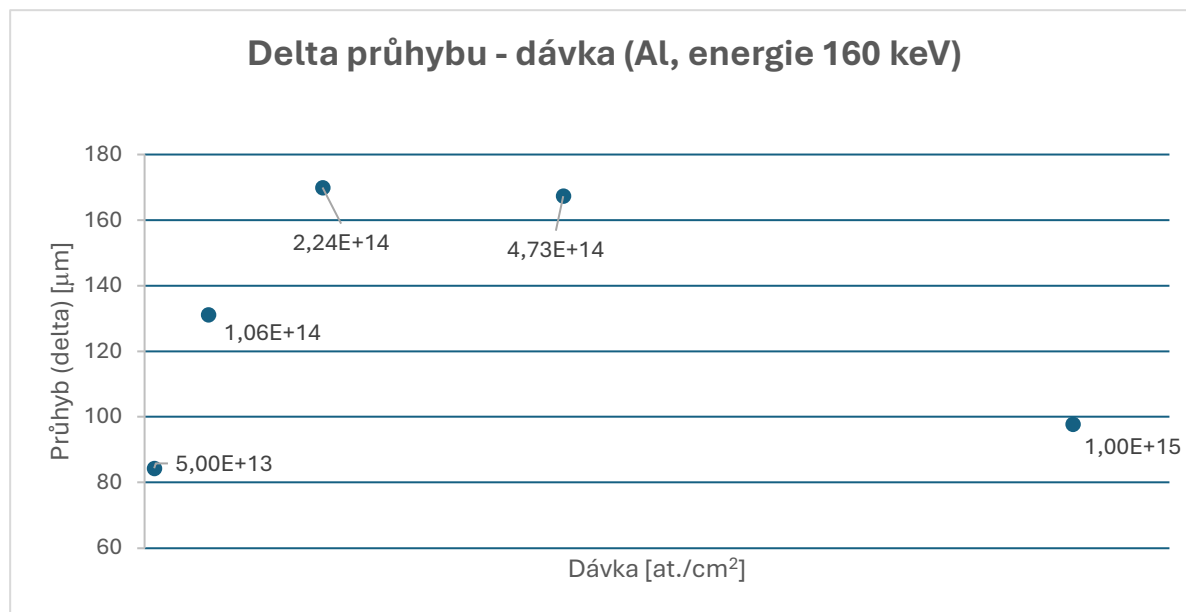
Obrázek 31: Rozložení dávek pro zafixovanou energii

Pro označení desek je využíváné zkrácené ID desek. Vyhodnocován bude rozdíl počátečního průhybu a průhybu po implantaci (delta).

Z výsledků v tabulce 7 lze vidět očekávaný růst prohnutí desky se zvyšující se dávkou. Po dávce $2,24\text{E}+14$ at./cm² dochází k nepředpokládanému poklesu prohnutí viz graf na obrázku 32, Velmi pravděpodobná příčina toho poklesu průhybu je výše popsána amorfizace, proto byly desky poslány na rentgenovou difrakci do laboratoří VŠB, která měla za cíl odhalit důvod změny trendu prohnutí, jelikož dle literatury by kritická dávka měla být až nad $3\text{E}+15$ at./cm² viz rešerše výše. Výsledky tohoto testu nebyly průkazné a z toho důvodu ani uvedeny v práci kvůli nízké informační hodnotě.

Tabulka 7: Výsledky experimentu se zafixovanou energií

ID	Poč. průhyb [μm]	Energie [keV]	Dávka [at./cm ²]	Průhyb po impl. [μm]	Delta [μm]
N453-03	23,07	160	5,00E+13	107,43	84,36
M513-05	26,26		1,06E+14	157,48	131,22
M513-06	25,05		2,24E+14	195,03	169,98
M513-02	27,08		4,73E+14	194,45	167,37
M513-03	23,31		1,00E+15	121,07	97,76



Obrázek 32: Graf vývoje delty prohnutí v závislosti na velikosti dávky Al

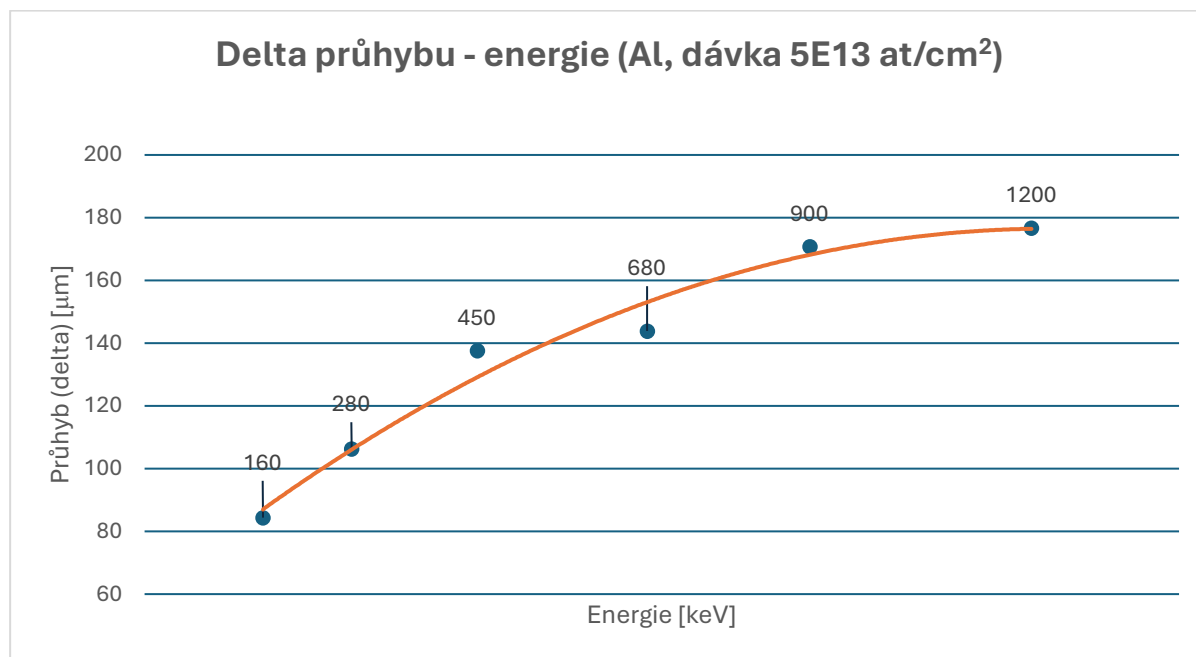
4.2.2 Implantace za zafixované dávky

Po předchozí zkušenosti s vlivem implantované dávky na průhyb desky byla zvolena nejmenší dávka $5\text{E}13 \text{ at./cm}^2$, která byla shodná pro veškeré implantace v tomto experimentu. Dle možností stroje Axcelis GSD VHE byl určen rozsah energie 160 keV až 1200 keV. Odstupňování energie, viz tabulka 8, není rovnoměrné a bylo zvoleno dle existujících výrobních postupů (k vytvoření požadovaného koncentračního profilu viz obrázek 20), což umožní porovnat výsledky této a následující kapitoly, ve které bude postupně doimplantovááno dle existujícího nastavení implantačních podmínek (předpisu) a bude zjišťován přírůstek prohnutí vlivem další implantace.

Tabulka 8: Výsledky experimentů se zafixovanou dávkou

ID	Poč. průhyb [μm]	Dávka [at./cm ²]	Energie [keV]	Průhyb po impl. [μm]	Delta [μm]
O294-20	29,7	5E+13	1200	206,39	176,69
O342-09	33,23		900	204,02	170,79
N914-14	23,45		680	167,3	143,85
O342-15	27,6		450	165,17	137,57
O342-18	25,72		280	132,02	106,3
N453-03	23,07		160	107,43	84,36

Z grafu na obrázku 33 lze vidět, že trend přírůstku prohnutí je očekávaný s viditelnou saturací. Bohužel již nebylo možné uskutečnit další pokusy s vyšší energií, aby bylo možné sledovat, zda při vyšších energiích dojde k poklesu prohnutí jako u předešlého experimentu v kapitole 4.2.1.



Obrázek 33: Graf vývoje delta prohnutí v závislosti na velikosti implantační energie Al

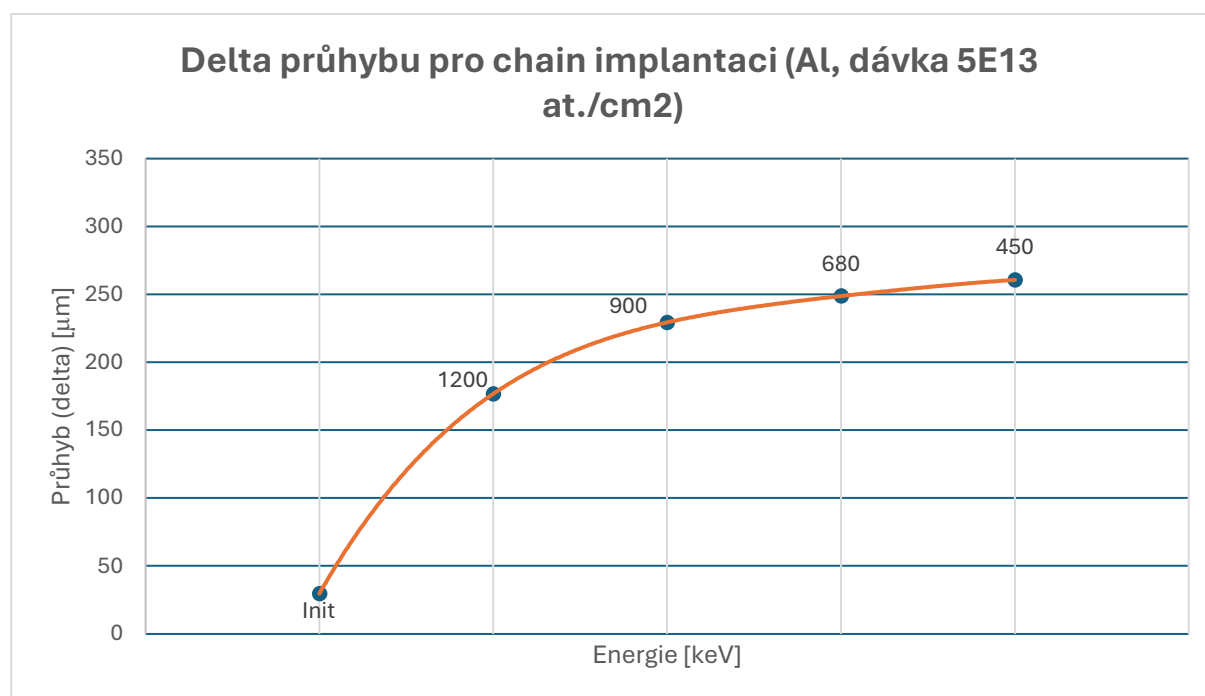
4.2.3 Implantace dle stávajícího energetického předpisu

V této části byl zjišťován přírůstek prohnutí v průběhu shodných energií používaných při výrobě polovodičových součástek. Do jedné 4H-SiC byl postupně implantován kompletní předpis energií prostřednictvím shodného zařízení jako v předešlé kapitole Axcelis GSD VHE. Před implantací a po každé implantaci byla deska znovu měřena. Aby bylo možné porovnávat výsledky s kapitolou 4.2.2, byla dávka zvolena také 5E13 at./cm² a byla pro veškeré implantace stejná. Při implantaci produkčních desek je z důvodu předcházení kolizí implantovaných iontů nejprve implantována nejvyšší energie, tím se ionty zastaví v největší hloubce a poté je energie postupně snižována. Viz popis řetězové implantace. Stejný postup byl využit zde. Další výzkum by byl možný, pokud by byl experiment proveden naopak, tedy nejprve implantovat od nejnižší energie. Pravděpodobně by bylo dosaženo vyššího průhybu dříve, právě vlivem střetu iontů s vyšší energií s těmi, které zůstaly v menší hloubce. Hodnota průhybu pro energii 1200 keV v tabulce 9 je shodná s hodnotou uvedenou v tabulce 8. Což je dáno tím, že se jedná o jedno měření. Energie 1200 keV byla implantována jako první a je tedy bez jakéhokoli ovlivnění. Z důvodu ekonomické náročnosti nebylo možné experiment opakovat.

Tabulka 9: Výsledky experimentu dle přepisu

ID	Poč. průhyb [μm]	Dávka [at./cm ²]	Energie [keV]	Průhyb po impl. [μm]	Delta [μm]
O294-20	29,7	5E+13	1200	206,39	176,69
			900	258,99	229,29
			680	278,36	248,66
			450	290,25	260,55
			280	-	-
			160	-	-

Ve výsledcích v tabulce 9 chybí hodnoty průhybu nad 450 keV. Jelikož byl průhyb desky vysoce nad obecně uznávaným manipulačním limitem, musel být experiment z důvodu vysokého rizika uvolnění desky z implantačního disku ukončen. Rozbití desky v implantátoru znamená odstavení stroje přibližně na týden. Stejně jako v předchozích experimentech je patrné snižování sklonu růstu průhybu (saturace), nicméně v tomto případě při výrazně vyšších hodnotách průhybu. Což je očekávatelné, jelikož pokud je zkoumána například energie 1200 keV, dávka 5E13 at./cm² na jedné desce a do shodné desky je doimplantováváno 900 keV atd., musí být v desce výrazně vyšší celková objemová koncentrace naimplantovaných iontů, a také vzniklých poruch KM, které způsobí výrazně větší prohnutí desky. Průběh průhybu lze vidět na obrázku 34, kde dochází k saturaci průhybu substrátu a snižování gradientů růstu průhybu hodnota “init” je pro počáteční průhyb desky před implantací. Toto bude pravděpodobně dáno zvyšující se mírou amorfizace.



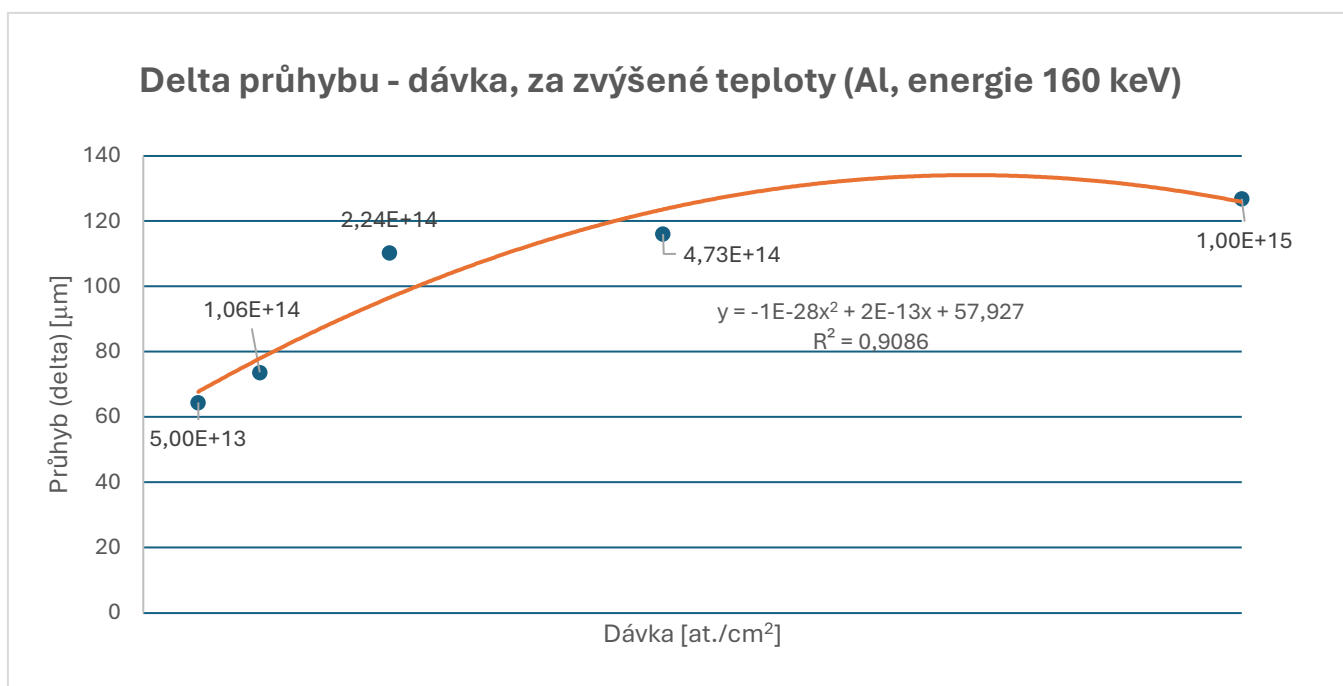
Obrázek 34: Graf vývoje delty prohnutí v závislosti na postupně implantovaných energiích dle předpisu

4.2.4 Implantace za zvýšené teploty

V rámci spolupráce s pobočkou onsemi v Jižní Koreji byla provedena celoplošná implantace pěti desek za zvýšené teploty. Implantován byl hliník při teplotě implantačního lože 500 °C. Pro implantaci bylo využito shodných implantačních podmínek jako v kapitole 4.2.1 z důvodu porovnatelnosti vlivu pouze teploty. Zároveň bylo měření před i po implantaci provedeno v J.K., a také na zařízení Flexus, čímž byla mimo jiné potvrzena důvěryhodnost dat viz tabulka 10. Průběh delty průhybu lze vidět na obrázku 35, zobrazená data jsou ze zařízení Flexus.

Tabulka 10: Výsledky implantace za zvýšené teploty z měřidla Flexus

ID	Poč. průhyb [μm]	Energie [keV]	Dávka [at./cm ²]	Teplota [°C]	Průhyb po impl. [μm]	Delta [μm]
H960-09	30,41	160	5,00E+13	500	94,87	64,46
J542-23	20,95		1,06E+14		94,63	73,68
J542-16	33,99		2,24E+14		144,37	110,38
J077-22	23,2		4,73E+14		139,31	116,11
K517-02	19,56		1,00E+15		146,45	126,89



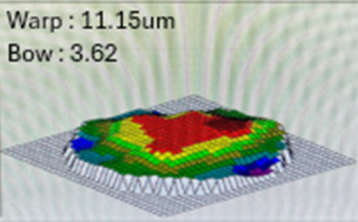
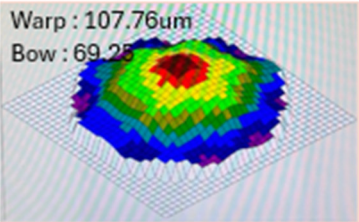
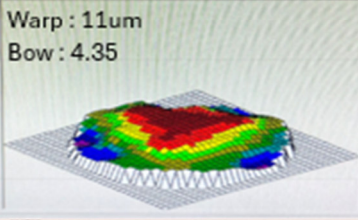
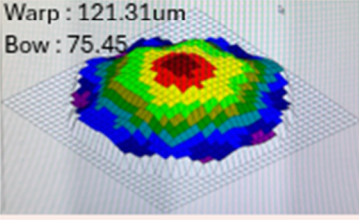
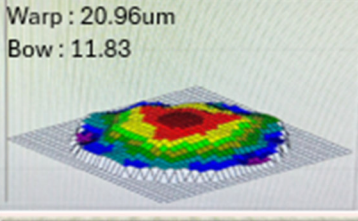
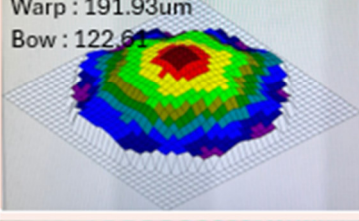
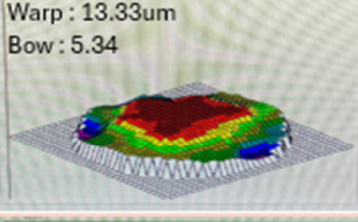
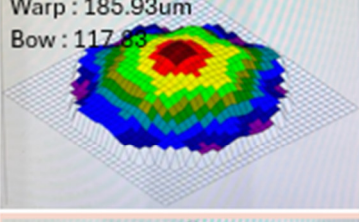
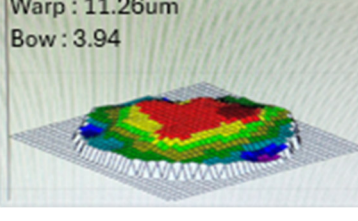
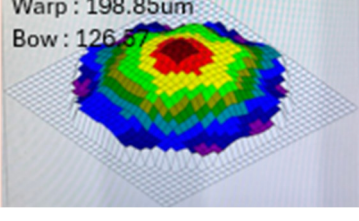
Obrázek 35: Graf vývoje delty prohnutí v závislosti na velikosti implantační energie Al při teplotě 500 °C

Tabulka 11: Porovnání delt naměřených hodnot (rozdíl před a po implantaci)

Dávka [at./cm ²]	Energie [keV]	Fexus [μm]	Externí měření [μm]	Rozdíl vůči Flexus [%]
5,00E+13	160	64,46	65,66	1,9
1,06E+14		73,68	71,1	3,5
2,24E+14		110,38	110,78	0,4
4,73E+14		116,11	112,49	3,1
1,00E+15		126,89	116,63	8,1

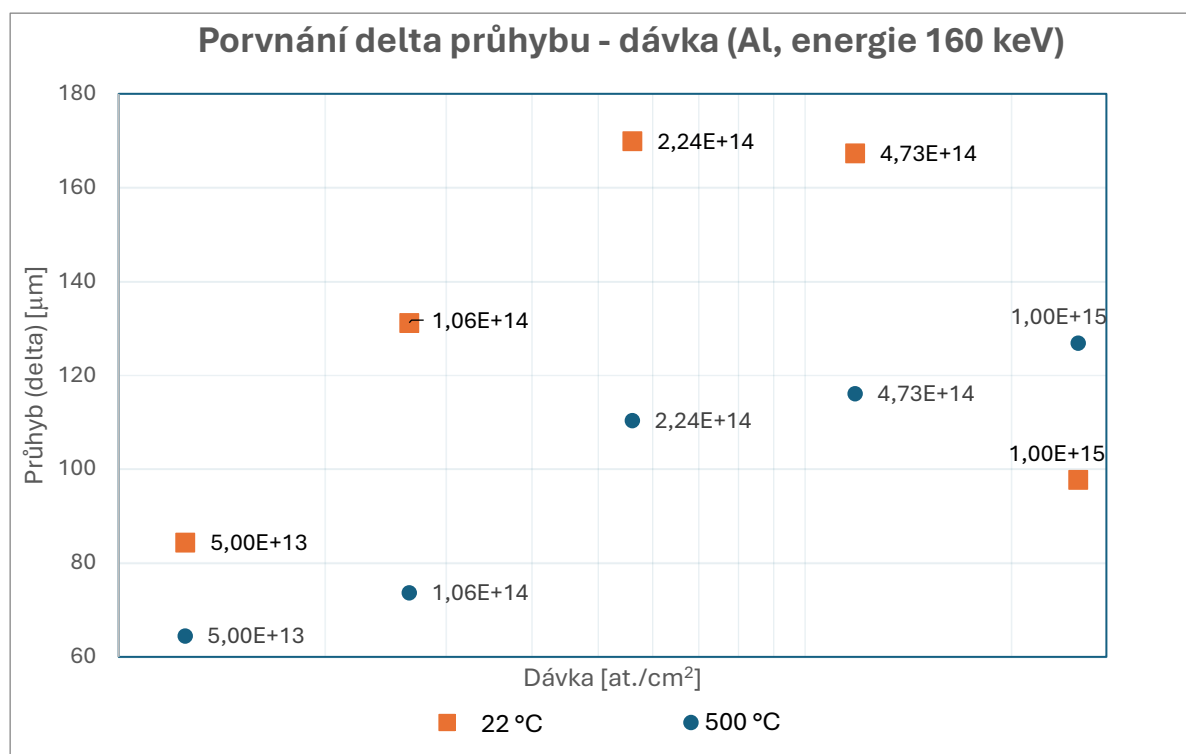
Externí měřící zařízení disponovalo také grafickým výstupem a bylo možné vizualizovat prohnutí desek, což využívaný model zařízení Flexus neumožňuje. Pozitivně je vnímán fakt, že na vizualizaci není zřejmá výrazná asymetrická deformace či příčné zkroucení desky, ale pouze relativně pravidelný konkávní průhyb. Hodnoty prohnutí (bow) se zdánlivě výrazně liší od dat z Flexusu, pravděpodobně z důvodu různě určené mediánové roviny měřidla, nicméně pokud je proveden rozdíl (delta) hodnot před a po implantaci, rozdíl mezi měřidly je malý, viz tabulka 11.

Na obrázku 36 je možno vidět výstup z měření provedeného v J.K s grafickým výstupem desek, kdy je prohnutí uspokojivě symetrické a nedochází k výraznému kroucení desek. Ve sloupci recipe je možné vyčíst, co bylo implantováno, s jakou energií a dávkou, s poznámkou, že se jedná “hot implant“ HT.

Wafer ID	Recipe	Before IMP	After IMP
CEMH960-09	AL160K5_0E13T-HT	Warp : 11.15um Bow : 3.62 	Warp : 107.76um Bow : 69.28 
CEMJ542-23	AL160K1_06E14T-HT	Warp : 11um Bow : 4.35 	Warp : 121.31um Bow : 75.45 
CEMJ542-16	AL160K2_24E14T-HT	Warp : 20.96um Bow : 11.83 	Warp : 191.93um Bow : 122.61 
CEMJ077-22	AL160K4_73E14T-HT	Warp : 13.33um Bow : 5.34 	Warp : 185.93um Bow : 117.83 
CEMK517-02	AL160K1_0E15T-HT	Warp : 11.26um Bow : 3.94 	Warp : 198.85um Bow : 126.57 

Obrázek 36: Vizualizace prohnutí desek po implantaci za zvýšené teploty

Při porovnání průhybu s výsledky implantace za pokojové teploty dochází k předpokládanému snížení průhybu ve srovnání se shodnými parametry implantace za pokojové teploty 22 °C (RT) viz graf na obrázku 37. Nicméně je možno pozorovat určité snižování přírůstku delty prohnutí i při implantaci za zvýšené teploty, to může být dáno amorfizací, nicméně pro potvrzení by musel být proveden další experiment s vyšší energií a následně zkoumat morfologickou strukturu desek. Relativní porovnání HT a RT implantace lze vidět v tabulce 12.



Obrázek 37: Porovnání delt průhybu při různých teplotách implantace

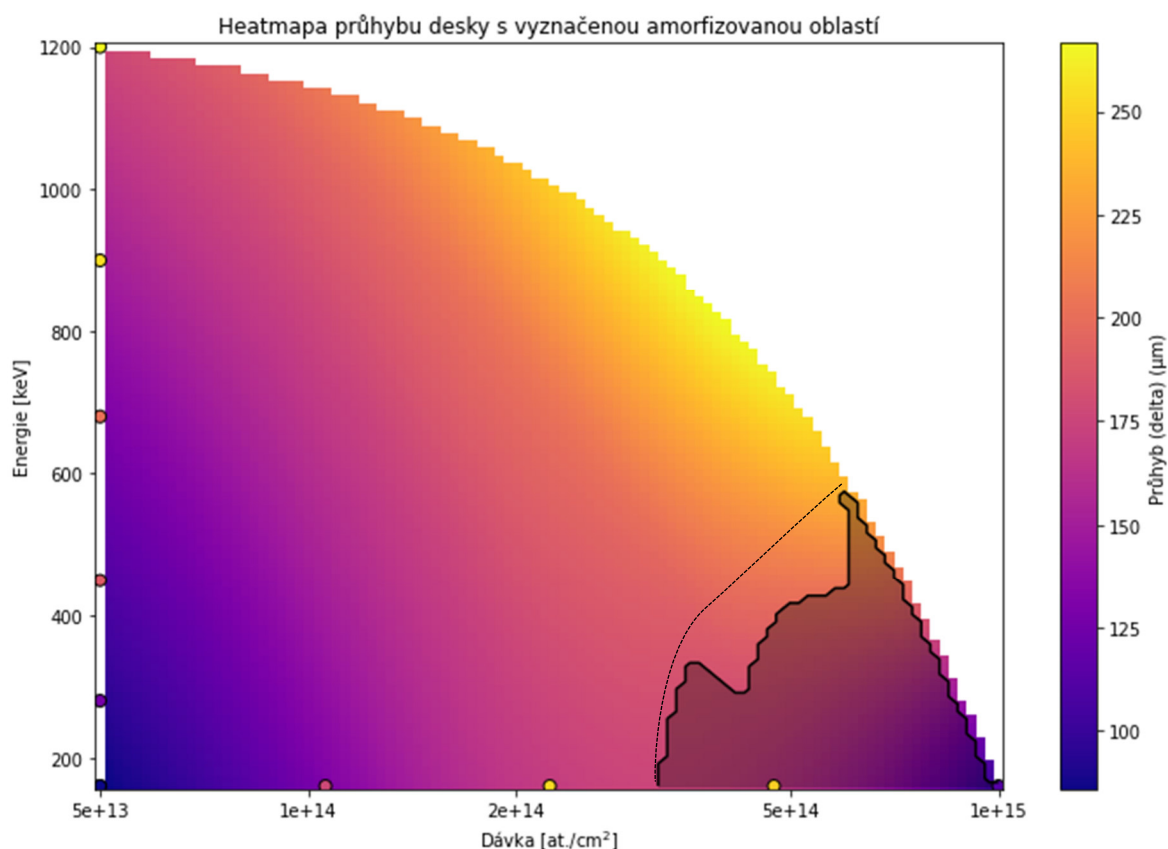
Hodnota průhybu pro implantaci za pokojové teploty dávky $1,00\text{E}+15 \text{ at./cm}^2$ již není nad hodnotou pro 500 °C , což je způsobeno tím, že v materiálu nenastala amorfizace, nebo nastala v menší míře, což je opět podpořeno závěry z teoretické rešerše. Nicméně tento jev se projeví v záporné hodnotě snížení deformace, tedy zvýšení oproti RT v tabulce 12. Průměrné snížení vlivem teploty je dle získaných dat 33,5 %, bez uvažování poslední záporné hodnoty (-30 %), jelikož jednak uhýbá z trendu, jednak je pravděpodobně za hranou amorfizace.

Tabulka 12: Relativní snížení prohnutí (vztaženo k RT)

Delta [μm]		
RT	500 °C	Rozdíl vůči RT [%]
84,36	64,46	24
131,22	73,68	44
169,98	110,38	35
167,37	116,11	31
97,76	126,89	-30

4.2.5 Vyhodnocení vlivu dávky a energie na průhyb desky

Aby bylo možné porovnat vliv dávky a energie na průhyb desky, byla vytvořena heatmapa, která dává do souvislosti vliv těchto proměnných viz obrázek 38. Je zřejmé, že vzhledem ke zkoumanému rozsahu proměnných má na průhyb vyšší vliv dávka, a to výrazně. Nicméně je nutné vzít na zřetel, že zkoumaný rozsah dávky je výrazně vyšší než energie. Jelikož při experimentech došlo k amorfizaci desek, je amortizovaná oblast zvýrazněna černou čarou a šedým odstínem tam, kde přes zvyšující se dávku, či energii, průhyb desky klesá. Je pravděpodobné, že by tvar této oblasti měl být pravidelný (viz tečkovaná čára). Jeho nepravidelný tvar je způsoben omezeným množstvím dat, nicméně pro potvrzení této domněnky by musely být provedeny další experimenty. Aby bylo možné data vizualizovat, byla dávka zobrazena v dekadickém logaritmu.



Obrázek 38: Heatmapa průhybu desek v závislosti na energii a dávce

5 Experimenty s prevencí průhybu

V kapitole 3 byly popsány navržené možnosti prevence průhybu, případně jeho kompenzace. Tyto metody budou v následujících kapitolách blíže zkoumány a vyhodnoceny. Implantace bude probíhat za podmínek (energie; dávka) 900 keV; $5,00\text{E}+13$ at./cm². Jak je možné vidět na obrázku 33, nejedná se o energii s nejvyšším průhybem, ani o vysokou dávku, jelikož implantační podmínky byly voleny s ohledem na vliv amorfizace. Pokud by byly zvoleny implantační podmínky s vyšším (nejvyšším) průhybem, bylo by možné, že by snížení průhybu bylo ovlivněno právě amorfizací, a ne zkoumanou metodou. Následující experimenty byly provedeny na zařízení Axcelis GSD VHE, implantace byla opět celoplošná.

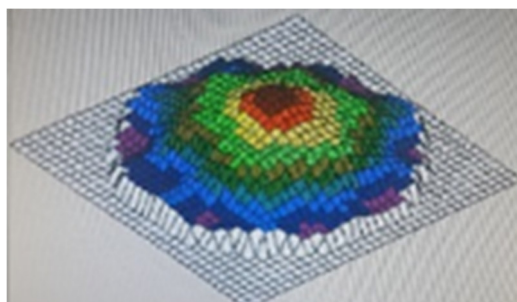
5.1 Vliv depozice ze zadní strany na snížení průhybu

Přiblížení zvolených metod, deponovaných vrstev a parametrů jednotlivých procesů je popsáno v kapitole 3.1. Po depozici a odleptání vrstvy z přední strany (u procesů, kde bylo potřeba) byla změřena změna průhybu desky vlivem depozice. Všechny procesy vykazují snížení průhybu, některé dokonce vyváří konvexní prohnutí, což může být žádoucí, jelikož potom vzniká napětí, které působí proti vlivu iontové implantace viz tabulka 13.

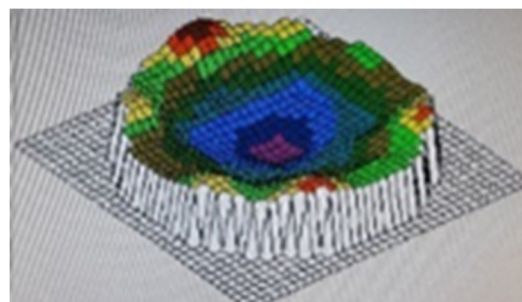
Tabulka 13: Výsledky vlivu depozice vrstvy na průhyb před implantací

Proces	Tloušťka [nm]	ID	Poč. průhyb [μm]	Průhyb po depo. [μm]	Delta [μm]
Poly-křemík	850	O342-05	33,75	-64,21	97,96
Poly-křemík	300	O342-07	33,67	-12,04	45,71
Oxid LPCVD TEOS	1000	O342-08	33,92	6,48	27,44
Nitrid PECVD	1000	O342-03	34,39	-54,93	89,32

Jak je možno vyčíst také z obrázku 40 nejvýraznější vliv na průhyb desky měla depozice poly-křemíku 850 nm a poté nitridu. Poly-křemík a nitrid dokázaly vytvořit v desce předepnutí a prohnout ji směrem opačným ke směru implantací vyvolaným. Oxid pouze snížil počáteční průhyb. Očekává se, že toto konvexní prohnutí bude kompenzovat snahu prohnout desku konkávně a povede tedy k výraznému snížení výsledného průhybu; to ovlivní i houževnatost deponované vrstvy viz obrázek 39.

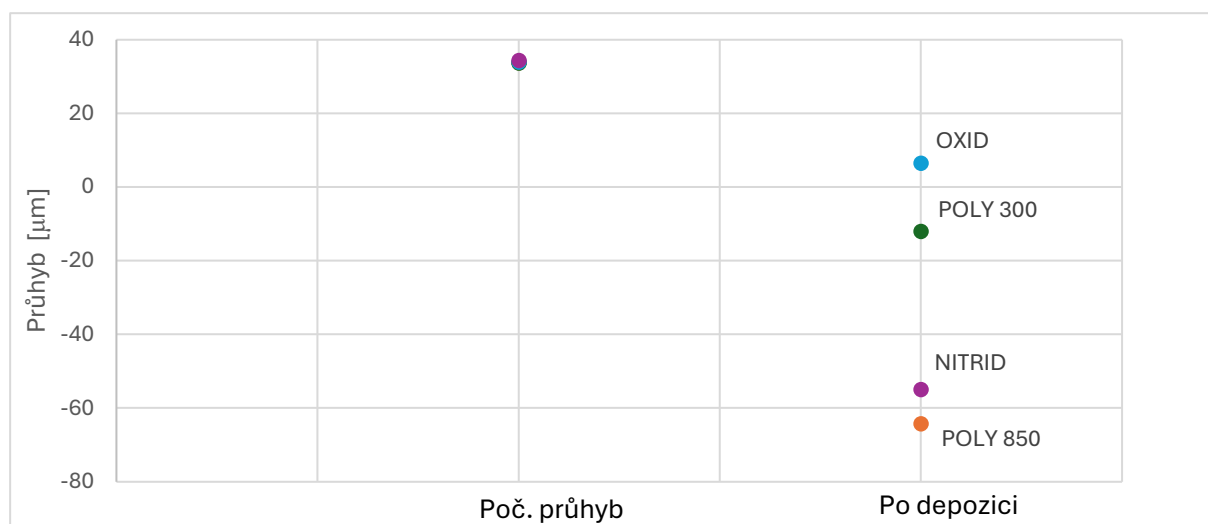


Průhyb desky vlivem implantace



Průhyb desky vlivem depozice ze zadní strany

Obrázek 39: Znázornění prohnutí desek



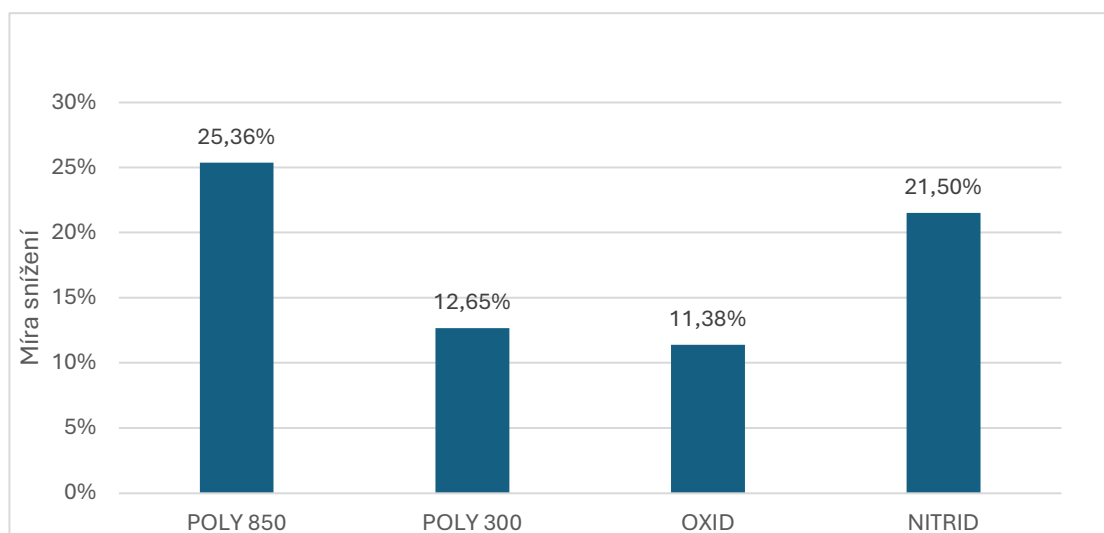
Obrázek 40: Znázornění vlivu jednotlivých deponovaných vrstev na průhyb desky

Po implantaci za podmínek uvedených v úvodní kapitole 5, byly získány hodnoty průhybu viz tabulka 14. Delta je počítána jako rozdíl počátečního průhybu (substrátu), nikoli průhybu po depozici, aby byly výsledky porovnatelné s dalšími metodami. V porovnání s referenční deltou průhybu z kapitoly 4.2.2, která byla pro shodné implantační podmínky 170,79 μm , došlo ve všech případech ke snížení prohnutí desky viz obrázek 41.

Tabulka 14: Výsledky vlivu depozice vrstev na průhyb po implantaci

Vrstva	Tloušťka [nm]	ID	Poč. průhyb [μm]	Průhyb po impl. [μm]	Delta [μm]
Poly-křemík	850	O342-05	33,75	161,23	127,48
Poly-křemík	300	O342-07	33,67	182,85	149,18
Oxid LPCVD TEOS	1000	O342-08	33,92	185,27	151,35
Nitrid PECVD	1000	O342-03	34,39	168,46	134,07

Nejvýznamnější vliv na prevenci průhybu má poly-křemík s tloušťkou vrstvy 850 nm, u kterého došlo ke snížení průhybu vůči referenci (170,79 μm) o 25,36 %, dále nitrid s 21,50 % snížením. Poly-křemík 300 nm a oxid přes rozdílnou tloušťku vrstvy vykazují velmi podobné snížení pohybující se okolo 12 %.

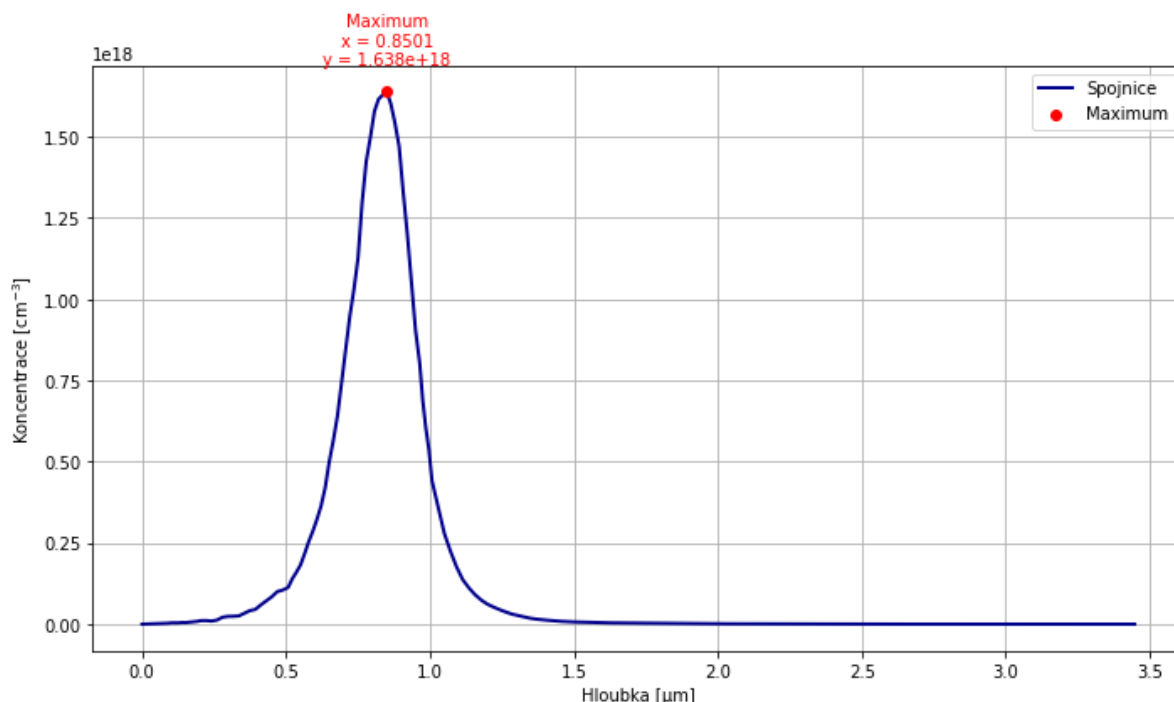


Obrázek 41: Míra snížení průhybu desky vůči referenci vlivem depozice

5.2 Vliv trenchů na prevenci průhybu

Další možností pro prevenci průhybu je vytvořit prostor, do kterého může materiál zvětšit objem a díky kterému bude sníženo napětí, viz obrázek 26. K tomuto experimentu byly využity masky, které slouží k vytvoření motivu (vzoru) při fotolitografii. Ideálním řešením by bylo vyrobít masku na míru, která bude po obvodu a v dostatečné vzdálenosti od aktivní oblasti vytvářené součástky vytvářet trenchy (příkopy). Nicméně toto, z důvodu vysoké pořizovací ceny masky, není možné, a proto byly využity masky existující. Masky budou v práci označeny jako A,B,C pro přehlednost.

Před samotným leptáním trenchů bylo nutné určit hloubku, do které se mají vyleptat. Pomocí simulačního programu TCAD byl simulantem namodelován hloubkový profil pro zvolenou dávku a energii. V 5. kapitole je využíváno nastavení implantačních podmínek pouze 900 keV; $5,00\text{E}+13 \text{ at./cm}^2$, jehož hloubkový koncentrační profil vypadá viz obrázek 42 (rozsah simulace byl pro vykreslení oříznut). Maximální koncentrace iontů hliníku je v hloubce $0,85 \mu\text{m}$, je tedy vhodné zvolit hloubku trenchů větší než tuto hodnotu, jelikož je předpoklad, že v hloubce maximální koncentrace bude nejvyšší potřeba kompenzace viz obrázek 26. Po implantaci do vyleptaných desek bude vybrána 1 maska, na které bude otestován vliv hloubky trenchů na průhyb po implantaci a případné potvrzení výše zmíněné hypotézy.



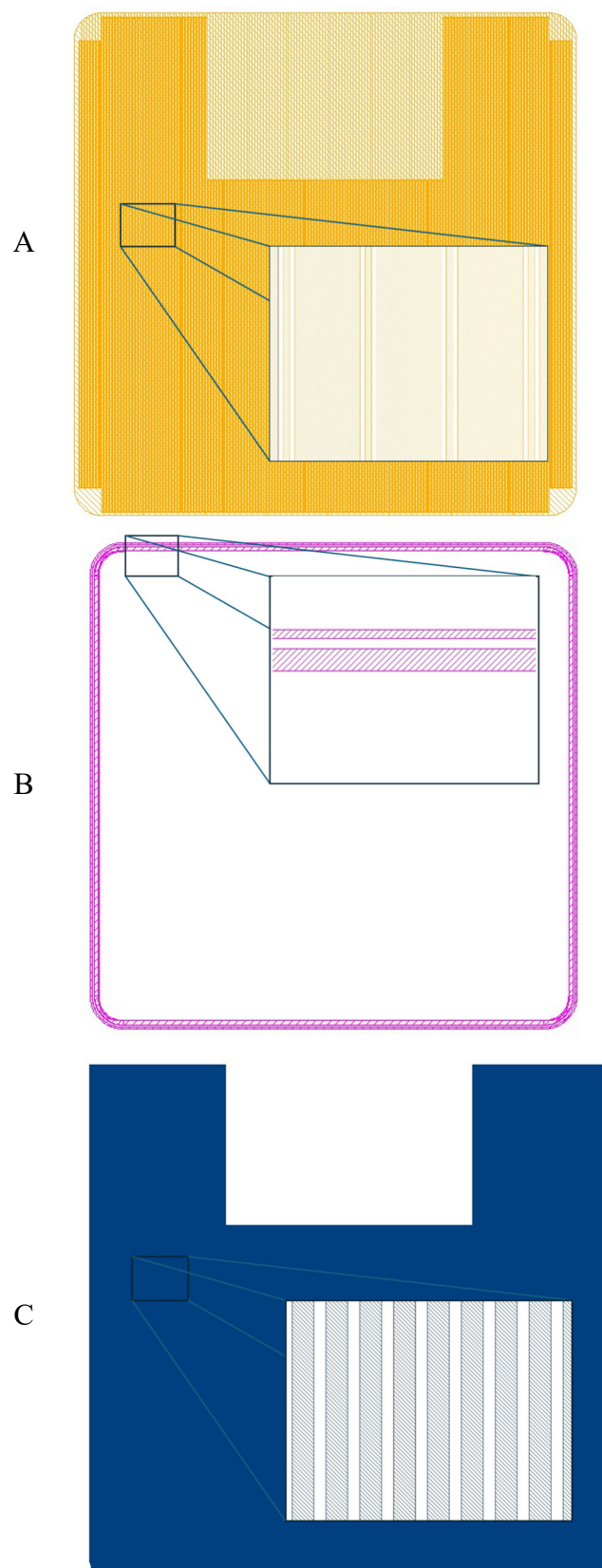
Obrázek 42: TCAD koncentrační profil implantace Al, 900keV, 5,00E+13 at./cm²

Zvolená hloubka trenchů byla vzhledem ke koncentračnímu maximu volena 1 μm aby byla vytvořená určitá rezerva mezi dnem trenchu a koncentračním maximem. Popis geometrických vlastností masek viz tabulka 15. Po fotolitografii a vyleptání hardmasky byly trenchy vyleptány. Rozměr jednoho čipu je 1500x1500 μm, kdy při výpočtu jeho plocha je tedy přibližně $2,250 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$ (maska čipu má drobné rádiusy, které byly zanedbány), celkem je na jedné masce 5184 čipů, v tabulce 15 je ale plocha trenchů vztažena pouze na plochu jednoho čipu. Pokud by se brala v potaz celková plocha desky a celková plocha trenchů, byl by jejich poměr velmi malý a závěr tedy je, že uvedené hodnoty jsou pro popis dostačující a mají vyšší vypovídající hodnotu.

Tabulka 15: Geometrické parametry masek

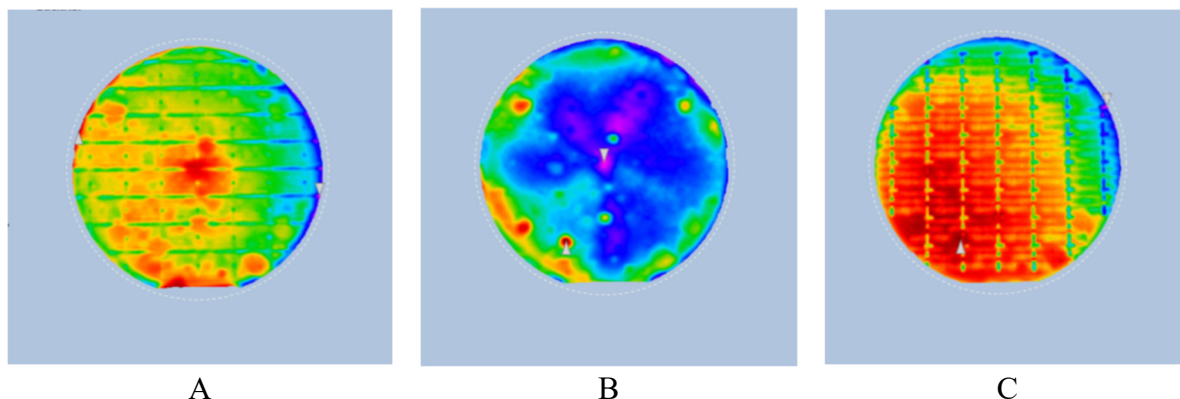
	A	B	C
Hloubka trenchu [μm]	1000	1000	1000
Celková plocha trenchů na čipu [μm ²]	316956,5	113795,2	5659228,6
Plocha trenchů ku ploše čipu [%]	14	5	25

Jednotlivé masky leptané do čipů jsou na obrázku 43; pro vyšší přiblížení leptaných struktur je na každém čipu udělán detail leptané struktury. Z důvodu vnitřních předpisů firmy není možné zveřejnit kompletní geometrické parametry masek, nicméně pro přiblížení geometrických poměrů je detail u masek dostačující.



Obrázek 43: Jednotlivé čipy s detailem leptaných struktur

Jednotlivé desky po vyleptání masky lze vidět na obrázku 44, jedná se výstup z měření zařízením Tropel Ultrasort. Pokus o využití přístroje pro 3D měření průhybu se nezdařil z důvodu specificky nastavených kompenzací různých vlivů, nicméně pro přiblížení leptaných vzorů postačuje. Vzor masky B byl natolik jemný, že ho interferenční měřidlo nezachytilo, nicméně v detailu je uveden výše.



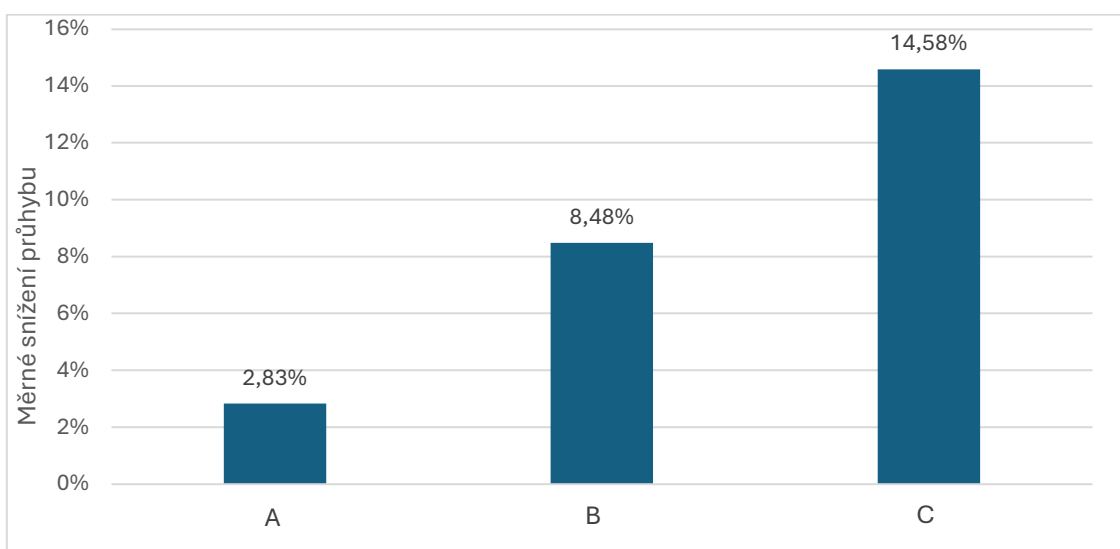
Obrázek 44: Vyleptané masky A, B, C na deskách

Po implantaci byly desky změřeny viz tabulka 16. Z hodnoty delta průhybu lze vidět, že trenche nemají tak výrazný vliv jako depozice vrstev, kdy nejslabší výsledky depozice vrstev jsou zde srovnatelné s nejlepšími výsledky (nejmenší delta).

Tabulka 16: Výsledky vlivu masek na průhyb po implantaci Al

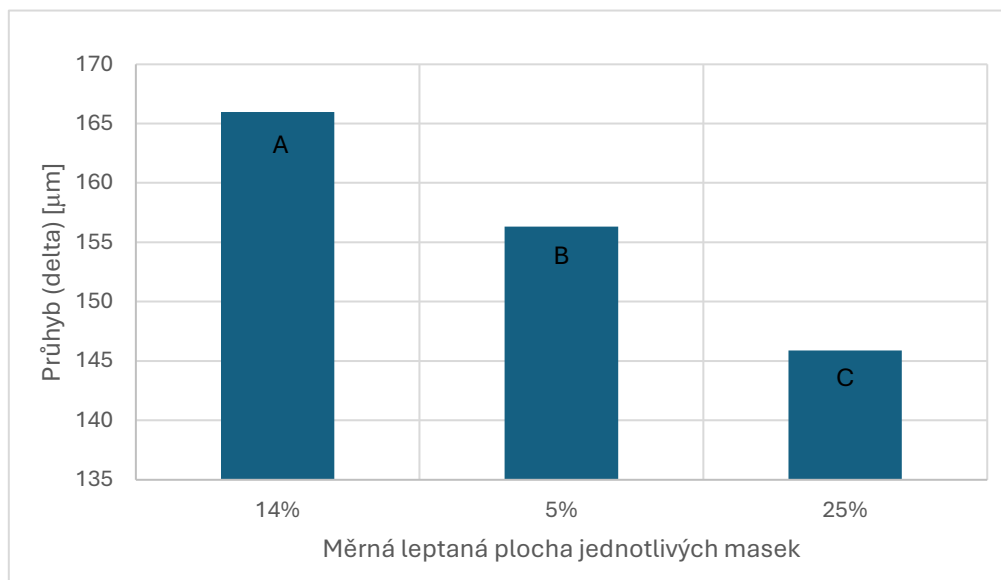
Maska	Tloušťka [nm]	Poč. průhyb [μm]	Průhyb po impl. [μm]	Delta [μm]
A	1000	38,42	204,38	165,96
B	1000	25,79	182,1	156,31
C	1000	21,23	167,12	145,89

Z grafu na obrázku 46 lze vidět, že k nejvýznamnějšímu snížení došlo u masky C a to 14,58 %, zatímco maska A přináší minimální měrné snížení pouhých 2,83 %. Toto nastalo z důvodu tvaru drážek a poměru vyleptané a implantované plochy. Experimenty s různou vyleptanou hloubkou budou tedy pouze pro masku C.



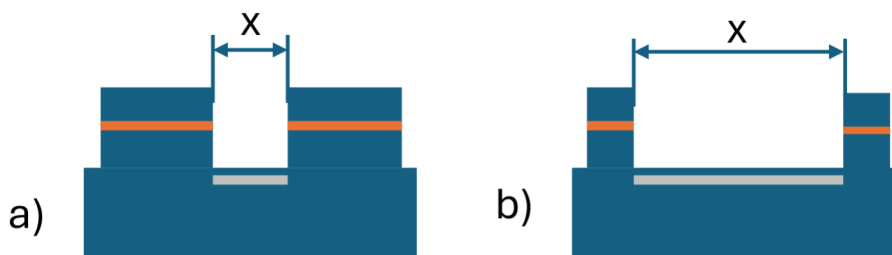
Obrázek 45: Míra snížení průhybu desky vůči referenci (trench 1 μm)

Pokud by byla vhodnost vyleptaných trenchů vyhodnocena podle vztahu měrné vyleptané plochy na průhyb po implantaci jsou výsledky viz obrázek 46. Tento obrázek je zdánlivě nedůležitý, nicméně je zásadní pro uvědomění, že na průhyb po implantaci nemá vliv pouze odleptaná plocha při shodné hloubce, ale spíše geometrické poměry (délka a šířka) trenchů. Toto je zřejmé z rozdílu mezi maskami A a B, kdy skoro přes trojnásobnou vyleptanou plochu maska A vykazuje vyšší deltu průhybu oproti masce B. Geometrické poměry mezi leptanými šířkami jsou patrné z obrázku 43.



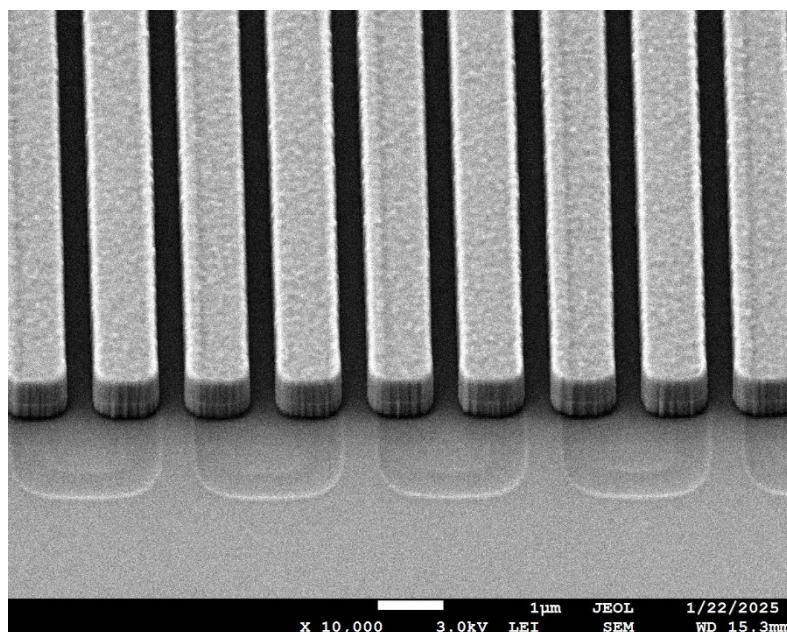
Obrázek 46: Delta průhybu desek v závislosti na poměru ploch trenchů a chipu

Problematika geometrických poměrů zákopů (trenchů) je zobrazena na obrázku 47. Z hlediska kompenzace průhybu se jako výhodnější (potvrzeno i experimentálně) jeví použití většího počtu úzkých zákopů než menšího počtu širokých. Rozhodující tedy není množství odleptaného materiálu, ale počet a rozměry jednotlivých zákopů. Se zvětšujícím se rozměrem X dochází k větší implantaci do dna zákopu, tedy do základního materiálu, kde již tímto způsobem nelze efektivně kompenzovat objemové změny. To může vést k vyššímu mechanickému napětí a deformaci.



Obrázek 47: Schematické znázornění vlivu šířky zákopů

Pro vizualizaci vytvořených vzorů byl pořízen snímek pomocí SEM masky C viz obrázek 48, kde lze vidět detail vyleptaných tvarů i s přiloženým měřítkem.



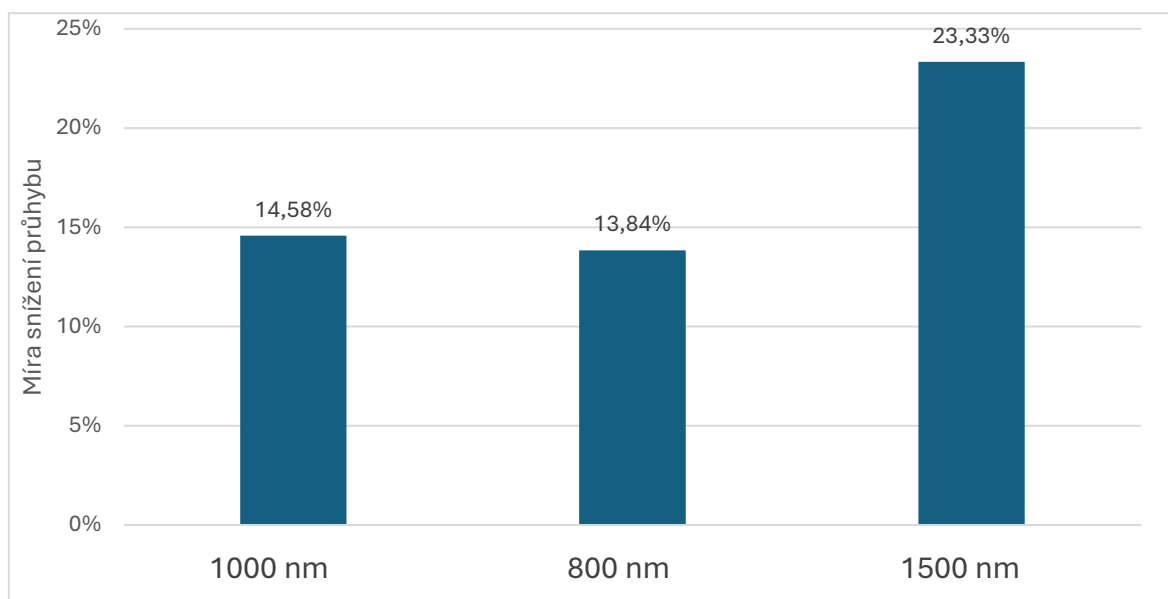
Obrázek 48: Detail leptaných trenchů masky C

Po vyhodnocení vhodnosti masky byly voleny další dvě hloubky trenchů a to 0,8 μm a 1,5 μm . Jedna hloubka bude zaručovat, že bude trench nad koncentračním maximem, zatímco druhá bude pod tímto maximem. Pokud budou dostupné 3 hodnoty průhybu v závislosti na hloubce trenchů, bude možné vytvořit funkci popisující tuto závislost. Hodnoty delta průhybu pro hloubku 800 nm a 1000 nm jsou si velmi podobné, byl očekáván větší rozdíl, pro další závěry by bylo vhodné zkusit další nižší hloubky.

Tabulka 17: Výsledky vlivu hloubky na průhyb po implantaci Al

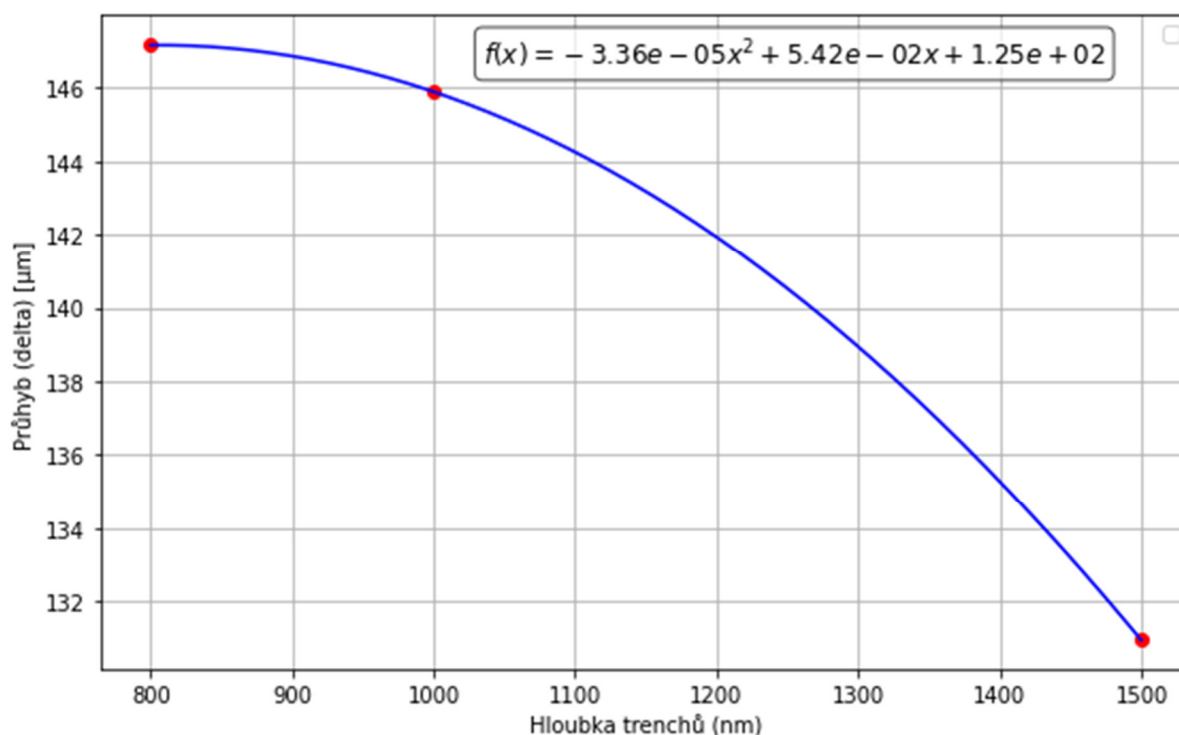
Maska	Tloušťka [nm]	Poč. průhyb [μm]	Průhyb po impl. [μm]	Delta [μm]
C	800	20,88	168,04	147,16
C	1000	21,23	167,12	145,89
C	1500	25,38	156,32	130,94

Pokud je vliv hloubky vyhodnocován jako v předešlých případech, je míra snížení (viz obrázek 49) pro 1500 nm 23,33 %. Pro hloubku trenchů 800 nm vychází měrné snížení průhybu 13,84 %, což je podobná hodnota snížení jako pro 1000 nm.



Obrázek 49: Míra snížení průhybu desky vůči referenci pro masku C

Možný průběh snížení delty průhybu v závislosti na hloubce leptaných trenchů masky C, který je možný z naměřených dat odhadnout, má průběh viz obrázek 50. Pro předpis funkce průběhu s vyšší validitou by bylo potřeba více experimentů s různými hloubkami pro shodnou masku. Hypotéza, že vyšší hloubka trenchů povede ke snížení průhybu po implantaci je potvrzena, nicméně je potřeba uvažovat také snížení tuhosti desek.

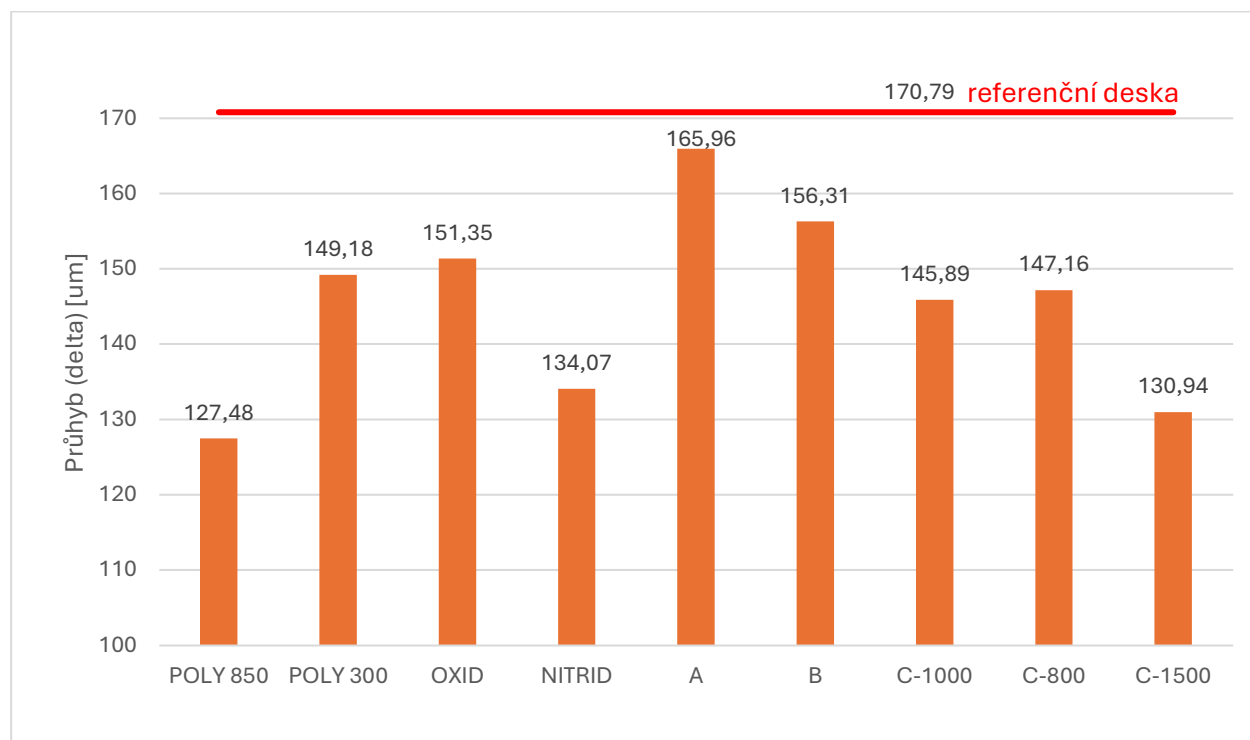


Obrázek 50: Předpokládaný vliv hloubky na hodnotu průhybu pro masku C

5.3 Vyhodnocení metod prevence vzniku průhybu

V podkapitolách 5. kapitoly byly zkoumány metody prevence vzniku napětí. Přestože v cílech diplomové práce je uveden pojem “uvolnění napětí“, nicméně prevence vzniku prohnutí, či jeho snížení je důležitější, jelikož metody uvolnění jsou pouze termální za vysokých teplot (viz teoretická část), což může vést k poškození již vytvořených struktur. Proto byl této kapitole věnován náležitý prostor.

Při porovnání jednotlivých metod na obrázku 51 je zřejmé, že vliv masky A a B na výslednou deltu průhybu po Al implantaci 900keV, $5E+15$ at./cm², není významný.



Obrázek 51: Výsledné porovnání jednotlivých metod prevence prohnutí desek

6 Metody uvolnění napětí

Jelikož nemusí být vždy možné deponovat vrstvy na zadní stranu, či leptat trenchy, je nutné využívat efektivní způsoby pro snižování vzniklého průhybu desky. Tyto způsoby jsou RTA, což je metoda, která je rychlá, nicméně stroje jsou zpravidla jednodeskové, mají tedy omezenou rychlost zpracování. Dalším způsobem jsou například difuzní pece (DFF), které byly vybrány pro tento experiment z důvodu vysoké kapacity, což je předurčuje jako vhodnější pro větší množství desek a výrobní podmínky. Pro experiment byla zvolena jedna teplotní úroveň 1100 °C a dvě úrovně časové, 0,5 h a 1 h. Použité desky pro tento pokus neměly shodné počáteční podmínky, z ekonomických důvodů byly využity desky z předešlých pokusů (pouze implantované bez depozice či trenchů). Tento fakt může být určitým způsobem zavádějící při zpracování výsledků, jelikož jak jsem popsal výše, míra poškození krystalické mřížky ovlivňuje její schopnost opravy. Pokud je tedy deska s vyšší dávkou/energií, mělo by dojít při stejných podmínkách v DFF k nižšímu snížení průhybu než u desky méně poničené.

V tabulce 18 lze vidět počáteční průhyb (jedná se o deltu, tedy rozdíl průhybu substrátu a průhybu po implantaci) před DFF, po ní, a jejich rozdíl pro 1100 °C a čas 1 h. Lze také vidět,

že předpoklad vyššího snížení průhybu pro méně poškozené desky je zde naplněn až na poslední desku N914-14. Průměrné snížení průhybu je 59,33 %.

Tabulka 18: Výsledky pokusu DFF; 1100 °C, 1 h

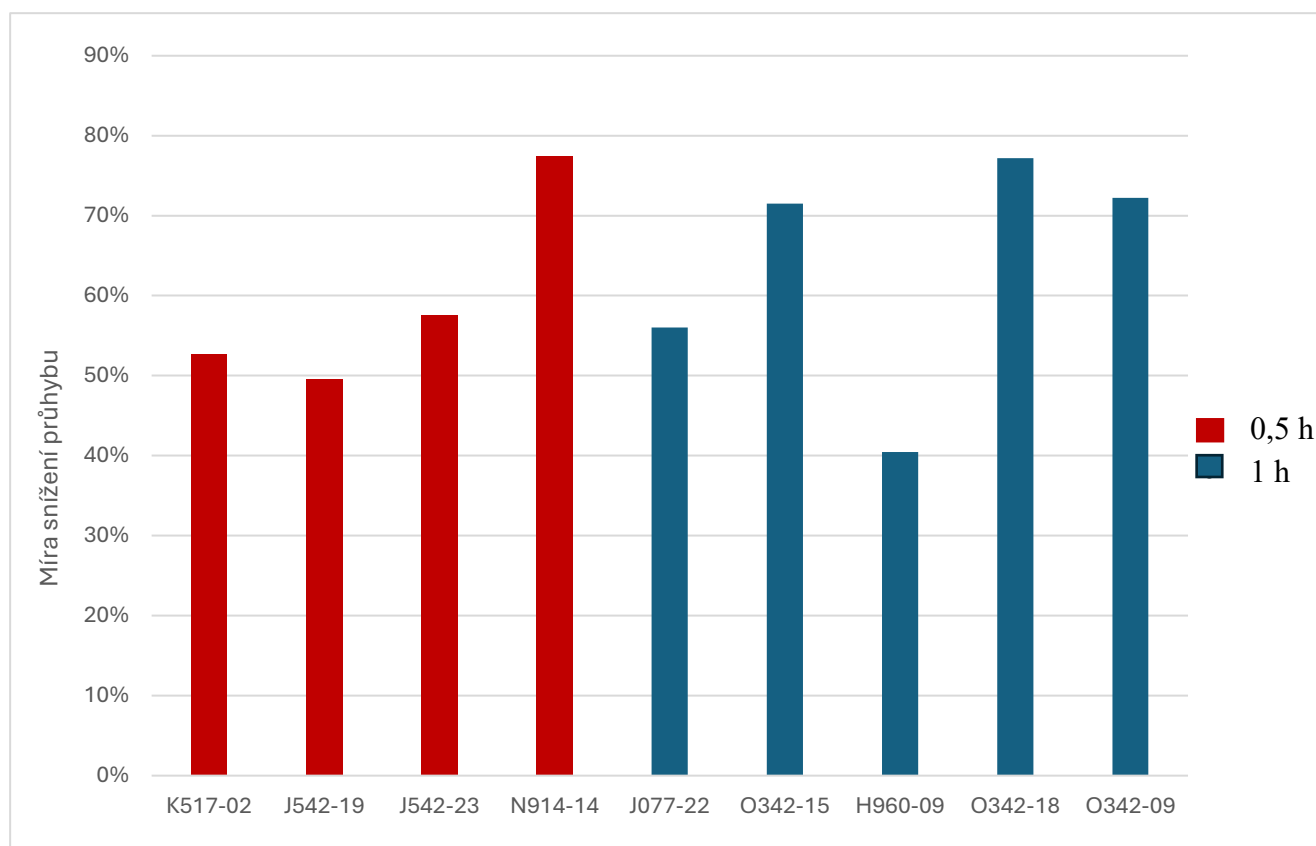
ID	Delta průhybu před DFF [μm]	Průhyb po DFF [μm]	Delta [μm]	Relativní snížení průhybu [%]
K517-02	126,89	60,01	66,88	52,7
J542-19	110,38	55,58	54,8	49,6
J542-23	73,68	31,25	42,43	57,6
N914-14	143,85	32,49	111,36	77,4

V tabulce 19 je možno vidět, že přestože byly desky v difuzní peci pro podmínky 1100 °C a 0,5 h, tedy polovinu času, došlo k vyššímu snížení průhybu. Konkrétně průměrnému snížení průhybu o 63,5 %.

Tabulka 19: Výsledky pokusu DFF; 1100 °C 0,5 h

ID	Delta průhybu před DFF [μm]	Průhyb po DFF [μm]	Delta [μm]	Relativní snížení průhybu [%]
J077-22	116,11	51,05	65,06	56,0
O342-15	137,57	39,18	98,39	71,5
H960-09	64,46	38,38	26,08	40,5
O342-18	106,3	24,24	82,06	77,2
O342-09	170,79	47,44	123,35	72,2

Rozdíl před DFF a po DFF se pohybuje v rozmezí 49,6 % až 77,4 %, což jsou relativně vysoké hodnoty ve srovnání s metodami prevence průhybu. Předpoklad vlivu počátečního poničení a míře snížení již není potvrzen ani u menší části vzorků. Je tomu pravděpodobně kvůli tomu, že ve zdroji Kimoto [4] se tato souvislost uvádí pro amorfizovanou krystalickou mřížku, či mřížku blízko amorfizace, a u zde provedených experimentů nebyly desky blízko právě této hranici amorfizace.



Obrázek 52: Míra snížení desek zpracovaných v DFF; 1100 °C

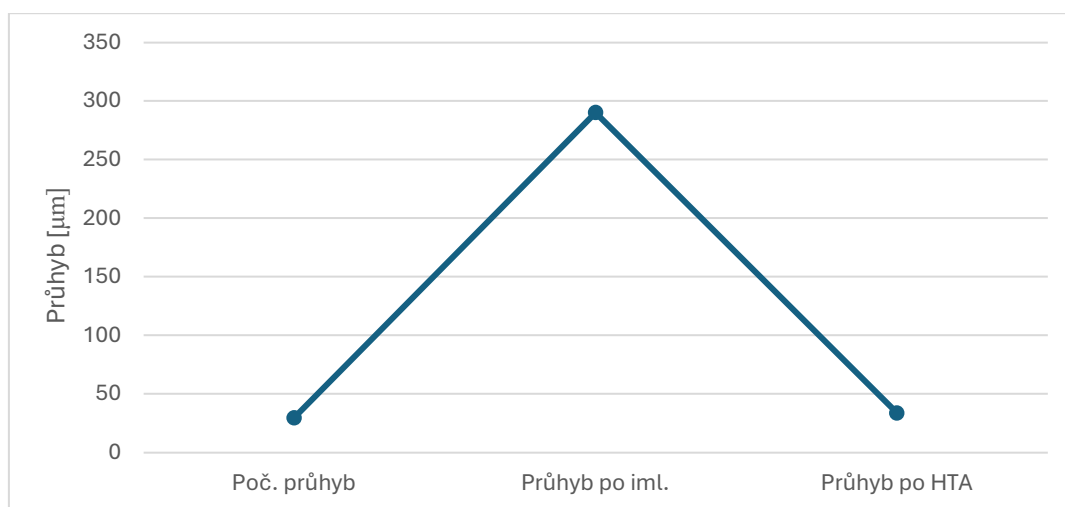
Na obrázku 52 lze pozorovat u desek začínající písmeny K, J a H podobné relativní snížení průhybu pohybující se okolo 50 %. U desek začínající písmeny O a N je možné vidět, že hodnoty relativního snížení jsou nad 70 %. Toto je dáno teplotou implantace, nikoli počátečním písmenem. Desky K, J a O byly implantovány za zvýšené teploty (500 °C) a tepelné zpracování v DFF na ně zřejmě má výraznější vliv. U desek implantovaných za RT (O a N) je možno pozorovat velmi podobné relativní snížení průhybu přes rozdílné (u některých velmi rozdílné) počáteční delty průhybu a implantační podmínky. Pro hlubší závěry by bylo nutné provést více experimentů s kontrolovanými počátečními podmínkami. Z výsledků vyplývá, že čas nehraje tak zásadní roli při tepelném zpracování v DFF. Významnější vliv má v tomto experimentu teplota implantace, pravděpodobně z důvodu nižšího poničení KM a lepší schopnosti mřížku obnovit a rekombinovat.

Nejúčinnější metoda pro uvolnění napětí a snížení průhybu desky je vysoko teplotní (aktivační) žíhání (HTA) pohybující se nad 1600 °C. Tato metoda byla také v práci otestována, a to s parametry 1650 °C, 1 h. K experimentu byla využita deska z kapitoly 4.2.3 s velmi vysokým průhybem 290,25 µm. Tato hodnota průhybu je nejvyšší ze všech provedených experimentů. Cílem bylo zjistit, zda metoda HTA dokáže snížit i tak vysoký průhyb na hodnotu průhybu nové desky.

Tabulka 20: Výsledky pokusu HTA;

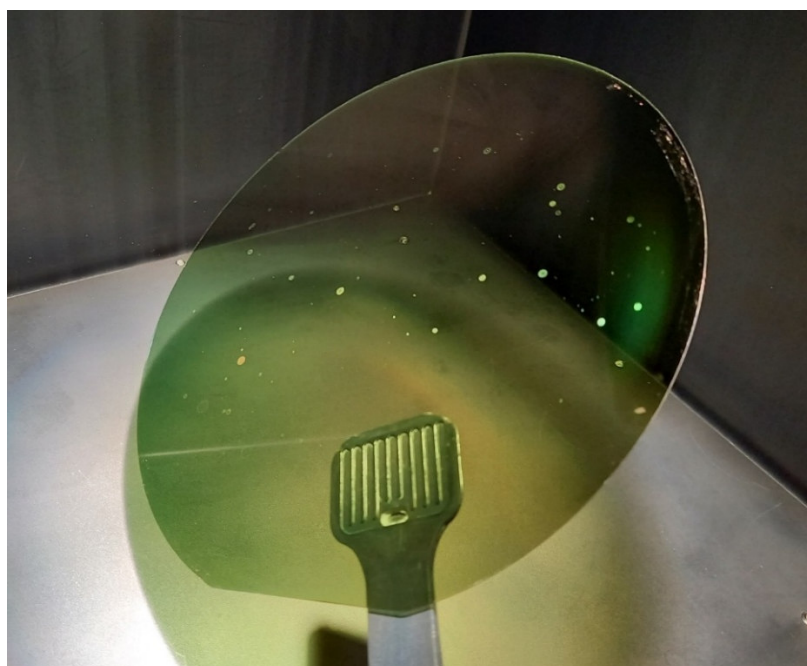
ID	Poč. průhyb [μm]	Průhyb před HTA [μm]	Průhyb po HTA [μm]	Delta [μm]	Relativní snížení průhybu [%]
O294-20	29,7	290,25	33,8	256,45	88,35

I přes velmi vysoký počáteční průhyb došlo vlivem aktivačního žíhání k výraznému snížení průhybu o 88,35 %. Průhyb byl poté velmi blízko hodnotě počátečního průhybu, viz obrázek 53. Metoda HTA je tedy účinná i pro extrémně prohnuté desky.



Obrázek 53: Průběh průhybu desky O294-20

Na desce se nečekaně objevily fleky, viz obrázek 54, které budou předmětem dalšího zkoumání, jelikož jejich výskyt není standardní.



Obrázek 54: Fleky vzniklé po HTA

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo popsat techniky iontové implantace a analyzovat vliv parametrů implantace na průhyb desek. Využití implantace při výrobě polovodičových součástek z karbidu křemíku je zásadní. V rešeršní části byly popsány používané dopanty a tradiční zdrojové látky a byl popsán princip fungování jednotlivých částí implantátoru. Dále byla popsána problematika defektů krystalické mřížky včetně popisu amorfizace a vlivu implantace za zvýšené teploty a implantace pod kanálovacím úhlem. Experimenty nebylo možné z důvodu vysoké ceny SiC desek a potřebných procesů opakovat a vyhodnocovat statisticky, proto byla v úvodu praktické části provedena zkouška přesnosti měřidla průhybu desek, o které se práce opírá. Uspokojivá přesnost byla také nezávisle potvrzena výsledky měření provedených v Jižní Koreji. Byly provedeny experimenty implantace hliníku do 4H-SiC desek při různých dávkách a energiích a popsán vliv jednotlivých parametrů na průhyb. Výsledky experimentů ukazují, že deformace je silně závislá na parametrech implantace a kompenzačními metodami lze dosáhnout snížení průhybu pod manipulační limit, což vede k menší pravděpodobnosti rozbití desky při manipulaci a také k eliminaci problémů při fotolitografii, čímž je naplněn hlavní cíl práce.

Hlavním cílem práce bylo navrhnout a experimentálně otestovat metody prevence vzniku a případného snížení průhybu desek. Byly vyzkoušeny postupy depozice vrstev různého typu a tloušťky ze zadní strany desek a také vliv leptání struktur na průhyb po implantaci. Dále byl proveden experiment implantace za zvýšené teploty při stejných parametrech jako při pokojové teplotě, ve spolupráci s pobočkou onsemi v Jižní Koreji. Provedeny byly také pokusy s tepelným zpracováním desek v difuzní peci při teplotě 1100 °C a vysokoteplotní aktivační žihání při teplotě 1650 °C ve spolupráci s pobočkou onsemi ve Švédsku.

Na základě provedených experimentů lze vyvodit tyto závěry:

- Průhyb desek roste s dávkou a energií implantace. Při vysokých dávkách bylo pozorováno snížení deformace, pravděpodobně vlivem amorfizace materiálu.
- Depozice vrstvy ze zadní strany (zejména polykrystalického křemíku) vedla ke snížení průhybu o desítky procent v závislosti na tloušťce vrstvy a tato metoda se ukázala jako nejefektivnější.
- Implantace za zvýšené teploty snížila míru defektů v krystalické mřížce a vedla k menší deformaci při stejných implantačních podmínkách
- Při tepelném zpracování desek v difuzní peci desky implantované za tepla vykazovaly nižší hodnoty poměrného snížení průhybu.

Ekonomické vyhodnocení jednotlivých metod prevence prohnutí závisí na konkrétní konfiguraci výrobní linky, typu produktu a komplexních výrobních postupech, a proto nebylo výstupem experimentální části doporučení pro implementaci do výroby. Odborný odhad úspory při implementaci způsobů prevence prohnutí je přibližně 3 \$ na jednu desku, tedy ročně přibližně 450 000 \$. Podrobná ekonomická bilance nebyla možná provést z důvodu vnitřních předpisů firmy.

Tato práce poskytuje komplexní přehled vlivu iontové implantace na mechanické vlastnosti SiC desek a přináší relevantní experimentální data využitelná při technologickém vývoji polovodičových součástek.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROCCAFORTE, Fabrizio, Filippo GIANNAZZO a Giuseppe GRECO. Ion Implantation Doping in Silicon Carbide and Gallium Nitride Electronic Devices. *Micro* [online]. 2022, 2(1), 23–53. ISSN 2673-8023. Dostupné z: doi:10.3390/micro2010002
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika-HRW*. Druhé, přepracované vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTUM, 2021. ISBN 978-80-214-6123-9.
- [3] DRÁPALA, JAROMÍR, KURSA, Miroslav. *Elektrotechnické materiály* [online]. 2012. vyd. 2012. ISBN 978-80-248-2570-0. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>
- [4] KIMOTO, Tsunenobu a James A. COOPER. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications*. Singapore: Wiley [u.a.], 2014. ISBN 978-1-118-31352-7.
- [5] AFANASEV, A. V., V. A. ILYIN a V. V. LUCHININ. Ion Doping of Silicon Carbide in the Technology of High-Power Electronic Devices (Review). *Semiconductors* [online]. 2022, 56(13), 472–486. ISSN 1090-6479. Dostupné z: doi:10.1134/S1063782622130024
- [6] SANDERSON, R. *Polar Covalence*. B.m.: Elsevier, 2012. ISBN 978-0-323-15902-9.
- [7] POLITZER, Peter, Jane S. MURRAY a Felipe A. BULAT. Average local ionization energy: A review. *Journal of Molecular Modeling* [online]. 2010, 16(11), 1731–1742. ISSN 0948-5023. Dostupné z: doi:10.1007/s00894-010-0709-5
- [8] HALLÉN, Anders a Margareta LINNARSSON. Ion implantation technology for silicon carbide. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2016, 306, The 19th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams [SMMIB2015], 190–193. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2016.05.075
- [9] *Dissertation: Thermal Oxidation and Dopant Activation of Silicon Carbide — Dopant Activation* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/simonka/Dopant-Activation.html>
- [10] WU, Fanzhengshu, Jie ZHANG, Wei XI, Yan-Qing CHI, Qi-Bin LIU, Lei YANG, Hong-Ping MA a Qing-Chun ZHANG. Insights into the effects of Al-ion implantation temperature on material properties of 4H-SiC. *Applied Surface Science* [online]. 2023, 613, 156014. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2022.156014
- [11] WONG-LEUNG, J., M. S. JANSON, A. KUZNETSOV, B. G. SVENSSON, M. K. LINNARSSON, A. HALLÉN, C. JAGADISH a D. J. H. COCKAYNE. Ion implantation in 4H-SiC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* [online]. 2008, 266(8), Ion Beam Analysis, 1367–1372. ISSN 0168-583X. Dostupné z: doi:10.1016/j.nimb.2007.12.049
- [12] TANG, Yi-Dan, Xin-Yu LIU, Zheng-Dong ZHOU, Yun BAI a Cheng-Zhan LI. Defects and electrical properties in Al-implanted 4H-SiC after activation annealing*. *Chinese*

- Physics B* [online]. 2019, **28**(10), 106101. ISSN 1674-1056. Dostupné z: doi:10.1088/1674-1056/ab3cc2
- [13] ROCCAFORTE, Fabrizio, Patrick FIORENZA, Giuseppe GRECO, Raffaella LO NIGRO, Filippo GIANNAZZO, Ferdinando IUCOLANO a Mario SAGGIO. Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices. *Microelectronic Engineering* [online]. 2018, **187–188**, 66–77. ISSN 0167-9317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2017.11.021
- [14] WANG, Jiawei. A Comparison between Si and SiC MOSFETs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, **729**, 012005. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/729/1/012005
- [15] NEUBERT, Thomas a Michael VERGÖHL. Chapter 10 - Organic optical coatings. In: Angela PIEGARI a François FLORY, ed. *Optical Thin Films and Coatings (Second Edition)* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2018 [vid. 2025-02-10], Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, s. 425–447. ISBN 978-0-08-102073-9. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102073-9.00010-2
- [16] 150mm SIC Wafer, 4H-N Type SiC Substrate, Zero Grade Silicon Carbide Wafer, Silicon Carbide Wafer. *SHANGHAI FAMOUS TRADE CO.,LTD* [online]. [vid. 2025-03-11]. Dostupné z: <https://www.sapphire-substrate.com/sale-37681960-6inch-150mm-sic-wafer-4h-n-type-sic-substrate-dummy-production-and-zero-grade.html>
- [17] (PDF) Wide Band Gap Devices and Their Application in Power Electronics. *ResearchGate* [online]. 2025 [vid. 2025-04-12]. Dostupné z: doi:10.3390/en15239172
- [18] FELCH, S B, Susan Felch CONSULTING a Los Altos HILLS. Ion Implantation for Semiconductor Devices: The Largest Use of Industrial Accelerators [online]. 2013 [vid. 2025-02-27]. Dostupné z: <https://accelconf.web.cern.ch/pac2013/papers/weyb2.pdf>
- [19] RADU, Ionut. Layer transfer of semiconductors and complex oxides by helium and, or hydrogen implantation and wafer bonding / [online]. 2003. Dostupné z: <https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/10119/1/prom.pdf>
- [20] ZIEGLER, James, ed. *Ion Implantation - Science and Technology (2012)*. 2012. ISBN 978-0-12-394173-2.
- [21] *Plasma Processing and Processing Science* [online]. Washington, D.C.: National Academies Press, 1995 [vid. 2024-10-02]. ISBN 978-0-309-57516-4. Dostupné z: doi:10.17226/9854
- [22] WALTHER, Steve, B.O. PEDERSEN a C.M. MCKENNA. *Ion sources for commercial ion implanter applications* [online]. 1991. Dostupné z: doi:10.1109/PAC.1991.164876
- [23] BROWN, Ian G., ed. *The physics and technology of ion sources*. 2nd, rev.extended ed vyd. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. ISBN 978-3-527-40410-0.
- [24] TANG, Ying, Ed JONES, Joseph DESPRES, Kavita MURTHI a Joseph SWEENEY. Investigation of source materials, co-gases, and methods for aluminum ion implantation.

- MRS Advances* [online]. 2022, 7(36), 1404–1406. ISSN 2059-8521. Dostupné z: doi:10.1557/s43580-022-00426-9
- [25] SINGER, Pete. Source Materials Enable the Evolution of the Ion-Implantation Process. *Semiconductor Digest* [online]. 8. únor 2020 [vid. 2025-01-26]. Dostupné z: <https://www.semiconductor-digest.com/source-materials-enable-the-evolution-of-the-ion-implantation-process/>
- [26] CHIVERS, D. J. Freeman ion source: An overview (invited). *Review of Scientific Instruments* [online]. 1992, 63(4), 2501–2506. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.1142874
- [27] PEISERT, Anna a Fabio SAULI. *Drift and diffusion of electrons in gases: a compilation (with an introduction to the use of computing programs)* [online]. Geneva: CERN. 1984 [vid. 2024-11-10]. *CERN Yellow Reports: Monographs*. Dostupné z: doi:10.5170/CERN-1984-008
- [28] TUREK, Marcin Tomasz, Dariusz MĄCZKA, Andrzej Zdzisław DROŻDZIEL, Krzysztof Andrzej PYSZNIAK, Yuriy VAGANOV a Paweł WĘGIEREK. Influence of Penning ionization on ion source efficiency – numerical simulations. *Przegląd Elektrotechniczny* [online]. 2018, 94(nr 7) [vid. 2024-11-10]. ISSN 0033-2097. Dostupné z: doi:10.15199/48.2018.07.29
- [29] BAILEY, R. *CAS - CERN Accelerator School, Ion Sources* [online]. B.m.: CERN. 2013 [vid. 2025-04-29]. Dostupné z: doi:10.5170/CERN-2013-007
- [30] ZIEGLER, James, ed. *Ion implantation: science and technology*. Nachdr. Edgewater: Ion Implantation Technology, 2000. ISBN 978-0-9654207-0-9.
- [31] LOPES, José, Jorge ROCHA, Luís REDONDO a Francisco ALEGRIA. Improvement of the Mass Spectrometry Process on an Ion Implantation. *Open Journal of Optimization* [online]. 2016, 5(1), 31–34. Dostupné z: doi:10.4236/ojop.2016.51004
- [32] Ion Implanter - Integrated Circuit Fabrication. *Ebrary* [online]. [vid. 2025-02-18]. Dostupné z: <https://ebrary.net/184570/engineering/implanter>
- [33] CURRENT, Michael, Leonard RUBIN a Frank SINCLAIR. Commercial Ion Implantation Systems. In: [online]. 2018. ISBN 0-9654208-4-4. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/330357221_Commercial_Ion_Implantation_Systems
- [34] Purion XE Series | High Energy Ion Implantation. *Axcelis* [online]. [vid. 2025-04-22]. Dostupné z: <https://www.axcelis.com/products/purion-xe-series-high-energy-ion-implantation/>
- [35] HENDERSON, Christopher. Ion Implantation Part I – Equipment [online]. 2012, (33) [vid. 2025-02-23]. Dostupné z: <https://www.semitracks.com/newsletters/march/2012-march-newsletter.pdf>
- [36] GIBBONS, J.F. Ion implantation in semiconductors—Part I: Range distribution theory and experiments. *Proceedings of the IEEE* [online]. 1968, 56(3), 295–319. ISSN 1558-2256. Dostupné z: doi:10.1109/PROC.1968.6273

- [37] TERANISHI, Nobukazu, Genshu FUSE a Michiro SUGITANI. A Review of Ion Implantation Technology for Image Sensors †. *Sensors* [online]. 2018, **18**(7), 2358. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s18072358
- [38] A SiC Trench MOSFET concept offering improved channel mobility and high reliability. *ResearchGate* [online]. [vid. 2025-04-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321355641_A_SiC_Trench_MOSFET_concept_offering_improved_channel_mobility_and_high_reliability
- [39] KONDRATENKO, Serguei I., Leonard M. RUBIN a Eric A. G. WEBSTER. Analysis of Very High Energy Implantation Profiles at Channeling and Non-Channeling Conditions. In: *2018 22nd International Conference on Ion Implantation Technology (IIT): 2018 22nd International Conference on Ion Implantation Technology (IIT)* [online]. Würzburg, Germany: IEEE, 2018, s. 307–310 [vid. 2025-02-24]. ISBN 978-1-5386-6828-3. Dostupné z: doi:10.1109/IIT.2018.8807946
- [40] CHEN, Po-Chih, Wen-Chien MIAO, Tanveer AHMED, Yi-Yu PAN, Chun-Liang LIN, Shih-Chen CHEN, Hao-Chung KUO, Bing-Yue TSUI a Der-Hsien LIEN. Defect Inspection Techniques in SiC. *Nanoscale Research Letters* [online]. 2022, **17**(1), 30. ISSN 1556-276X. Dostupné z: doi:10.1186/s11671-022-03672-w
- [41] KIMOTO, Tsunenobu, Koutaro KAWAHARA, Hiroki NIWA, Naoki KAJI a Jun SUDA. Ion implantation technology in SiC for power device applications. In: *2014 International Workshop on Junction Technology (IWJT): 2014 International Workshop on Junction Technology (IWJT)* [online]. 2014, s. 1–6 [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: doi:10.1109/IWJT.2014.6842018
- [42] LINNARSSON, M K, A HALLÉN a L VINES. Intentional and unintentional channeling during implantation of 51V ions into 4H-SiC. *Semiconductor Science and Technology* [online]. 2019, **34**(11), 115006. ISSN 0268-1242. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6641/ab4163
- [43] HALLÉN, Anders, Per PERSSON, Andrej KUZNETSOV, Lars HULTMAN a Bengt SVENSSON. Damage Evolution in Al-implanted 4H SiC. *Materials Science Forum - MATER SCI FORUM* [online]. 2000, **338–342**, 869–872. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.338-342.869
- [44] MCHARGUE, Carl J. a J. M. WILLIAMS. Ion implantation effects in silicon carbide. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* [online]. 1993, **80–81**, 889–894. ISSN 0168-583X. Dostupné z: doi:10.1016/0168-583X(93)90703-9
- [45] HALLÉN, A, M. S JANSON, A. Yu KUZNETSOV, D ÅBERG, M. K LINNARSSON, B. G SVENSSON, P. O PERSSON, F. H. C CARLSSON, L STORASTA, J. P BERGMAN, S. G SRIDHARA a Y ZHANG. Ion implantation of silicon carbide. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* [online]. 2002, **186**(1), 186–194. ISSN 0168-583X. Dostupné z: doi:10.1016/S0168-583X(01)00880-1
- [46] ZHU, Dailei, Wenbo LUO, Sijie YANG, Yao SHUAI, Chuangui WU a Wanli ZHANG. Repair of H⁺ Implantation Induced Defects in SiC Single Crystal Film Fabricated by Crystal-Ion-Slicing Technique. In: *2024 9th International Conference on Integrated*

- Circuits and Microsystems (ICICM): 2024 9th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)* [online]. 2024, s. 87–92 [vid. 2025-04-14]. Dostupné z: doi:10.1109/ICICM63644.2024.10814513
- [47] FRIEDRICH, Jochen, Wilfried VON AMMON a Georg MÜLLER. 2 - Czochralski Growth of Silicon Crystals. In: Peter RUDOLPH, ed. *Handbook of Crystal Growth (Second Edition)* [online]. Boston: Elsevier, 2015 [vid. 2025-04-14], Handbook of Crystal Growth, s. 45–104. ISBN 978-0-444-63303-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63303-3.00002-X
- [48] GARCON, I., A. ROUAULT, M. ANIKIN, C. JAUSSAUD a R. MADAR. Study of SiC single-crystal sublimation growth conditions. *Materials Science and Engineering: B* [online]. 1995, **29**(1), European Materials Research Society 1994 Spring Meeting Symposium E: High Temperature Electronics: Materials, Devices and Applications, 90–93. ISSN 0921-5107. Dostupné z: doi:10.1016/0921-5107(94)04002-L
- [49] ZHU, Dailei, Wenbo LUO, Gengyu WANG, Kuangkuang LI, Limin WAN, Yuedong WANG, YiZhuo GAO, Yao SHUAI, Chuangui WU a Wanli ZHANG. H⁺ implantation induced defects distribution in 4H-SiC single crystal film fabricated by Crystal-Ion-Slicing and its effects on electrical behavior: A multiple characterization study. *Applied Surface Science* [online]. 2024, **670**, 160673. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2024.160673
- [50] LIU, Rui, Hao WU, Hongdan ZHANG, Chen LI, Liang TIAN, Ling LI, Jialin LI, Junmin WU a Yan PAN. A dry etching method for 4H-SiC via using photoresist mask. *Journal of Crystal Growth* [online]. 2020, **531**, 125351. ISSN 0022-0248. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcrysgro.2019.125351
- [51] TAN, Xiaoyu, Guoming LIN, Ankuan JI a Yuanwei LIN. Plasma etching of silicon carbide trenches with high aspect ratio and rounded corners. *Materials Science in Semiconductor Processing* [online]. 2025, **188**, 109172. ISSN 1369-8001. Dostupné z: doi:10.1016/j.mssp.2024.109172
- [52] 6 in Silicon Carbide Wafers 4H-SiC N-Type or Semi-Insulating. *MSE Supplies LLC* [online]. [vid. 2025-03-15]. Dostupné z: <https://www.msесupplies.com/products/6-inch-diameter-silicon-carbide-6h-sic-or-4h-sic-crystal-substrates-and-wafers-n-type-or-semi-insulating>
- [53] *Thin film stress measurement – LNF Wiki* [online]. [vid. 2025-03-17]. Dostupné z: https://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/index.php?title=Thin_film_stress_measurement&mobileaction=toggle_view_desktop

V práci byl pouze k jazykové korektuře a ke zlepšení čtivosti některých částí textu použit nástroj ChatGPT od společnosti OpenAI (verze GPT-4). Nástroj nebyl nikde využit k vytváření odborného obsahu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schematické znázornění aktivačního žíhání (upraveno) [9].....	15
Obrázek 2: Míra elektrické aktivace v závislosti na žíhací teplotě (Al, dávka $11\text{E}+10\text{ at./cm}^2$) [4]	15
Obrázek 3: Porovnání vybraných vlastností Si a SiC [14].....	16
Obrázek 4: Schéma výrobního postupu SiC MOSFETu.....	17
Obrázek 5: Deska SiC [16].....	17
Obrázek 6: Struktura planárního SiC MOSFETu [17].....	18
Obrázek 7: Zjednodušené schéma implantátoru [18].....	19
Obrázek 8: Freemanův zdroj [22]	21
Obrázek 9: Bernasův zdroj [22]	21
Obrázek 10: Jednoduchý extrakční systém [29].....	22
Obrázek 11: Zjednodušení schéma funkce magnetického analyzáru (upraveno) [32]	23
Obrázek 12: Schéma iontového implantátoru [33]	24
Obrázek 13: Implantační disk [35].....	24
Obrázek 14: Znázornění směru pohybu svazku při implantaci [7]	25
Obrázek 15: Znázornění natočení KM a kanálování [37]	25
Obrázek 16: IMS měření a MC-BCA simulace vanadových implantací do 4H-SiC.....	26
Obrázek 17: SIMS profily pro As do Si, 4.5MeV , $1\times 10^{13}\text{ at/cm}^2$ [39].....	26
Obrázek 18: Arrheniuv graf difuzních koeficientů pro hlavní dopanty SiC a Si [4]	27
Obrázek 19: Vliv energie na hloubkový profil dopantu.....	27
Obrázek 20: Profily dopantů v 4-H SiC a) hloubkový profil Al; b) mělká oblast Al, mělká oblast P [5]	28
Obrázek 21: Závislost relativní deformace KM na teploty implantace [43].....	29
Obrázek 22: Možnosti využití amorfizace metoda CIS (upraveno) [49]	31
Obrázek 23: Průběh průhybu při výrobním procesu součástky ze SiC.....	32
Obrázek 24: Zkoumané způsoby kompenzace prohnutí desky	33
Obrázek 25: Ilustrativní znázornění procesu leptání trenchů [51]	34
Obrázek 26: Schematické znázornění vlivu hloubky trenchů	35
Obrázek 27: Měřicí zařízení Tencor Flexus 2320 (cenzurováno).....	37
Obrázek 28: Schematické znázornění principu měření Flexusu [53]	37
Obrázek 29: Výstup ze zařízení Flexus.....	38
Obrázek 30: Naměřené hodnoty průhybu při zkoušce přesnosti měřidla Flexus.....	39
Obrázek 31: Rozložení dávek pro zafixovanou energii.....	41
Obrázek 32: Graf vývoje delty prohnutí v závislosti na velikosti dávky Al.....	42
Obrázek 33: Graf vývoje delty prohnutí v závislosti na velikosti implantační energie Al	43
Obrázek 34: Graf vývoje delty prohnutí v závislosti na postupně implantovaných energiích dle předpisu	44
Obrázek 35: Graf vývoje delty prohnutí v závislosti na velikosti implantační energie Al při teplotě $500\text{ }^{\circ}\text{C}$	45
Obrázek 36: Vizualizace prohnutí desek po implantaci za zvýšené teploty	47
Obrázek 37: Porovnání delt průhybu při různých teplotách implantace	48
Obrázek 38: Heatmapa průhybu desek v závislosti na energii a dávce	49
Obrázek 39: Znázornění prohnutí desek	50
Obrázek 40: Znázornění vlivu jednotlivých deponovaných vrstev na průhyb desky	51
Obrázek 41: Míra snížení průhybu desky vůči referenci vlivem depozice	52

Obrázek 42: TCAD koncentrační profil implantace Al, 900keV, 5,00E+13 at./cm ²	53
Obrázek 43: Jednotlivé čipy s detailem leptaných struktur.....	54
Obrázek 44: Vyleptané masky A, B, C na deskách.....	55
Obrázek 45: Míra snížení průhybu desky vůči referenci (trench 1 μm)	55
Obrázek 46: Delta průhybu desek v závislosti na poměru ploch trenchů a chipu.....	56
Obrázek 47: Schématické znázornění vlivu šířky zákopů	56
Obrázek 48: Detail leptaných trenchů masky C	57
Obrázek 49: Míra snížení průhybu desky vůči referenci pro masku C	58
Obrázek 50: Předpokládaný vliv hloubky na hodnotu průhybu pro masku C	58
Obrázek 51: Výsledné porovnání jednotlivých metod prevence prohnutí desek.....	59
Obrázek 52: Míra snížení desek zpracovaných v DFF; 1000 °C	61
Obrázek 53: Průběh průhybu desky O294-20	62
Obrázek 54: Fleky vzniklé po HTA	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled vybraných vlastností nejčastěji implantovaných prvků [3–5]	14
Tabulka 2: Zdrojové látky pro vybrané prvky [20, 24, 25].....	20
Tabulka 3: Vybrané fyzikální vlastnosti SiC a Si [4]	30
Tabulka 4: Zvolené metody depozice vrstev s technickými parametry procesu.....	33
Tabulka 5: Hodnoty průhybu pro kontrolu přesnosti přístroje Flexus	39
Tabulka 6: Výsledky dat měření přesnosti měřidla Flexus	40
Tabulka 7: Výsledky experimentu se zafixovanou energií	41
Tabulka 8: Výsledky experimentů se zafixovanou dávkou.....	42
Tabulka 9: Výsledky experimentu dle přepisu.....	44
Tabulka 10: Výsledky implantace za zvýšené teploty z měřidla Flexus.....	45
Tabulka 11: Porovnání delt naměřených hodnot (rozdíl před a po implantaci).....	46
Tabulka 12: Relativní snížení prohnutí (vztaženo k RT)	48
Tabulka 13: Výsledky vlivu depozice vrstvy na průhyb před implantací.....	50
Tabulka 14: Výsledky vlivu depozice vrstev na průhyb po implantaci	51
Tabulka 15: Geometrické parametry masek.....	53
Tabulka 16: Výsledky vlivu masek na průhyb po implantaci Al.....	55
Tabulka 17: Výsledky vlivu hloubky na průhyb po implantaci Al.....	57
Tabulka 18: Výsledky pokusu DFF; 1000 °C, 1 h.....	60
Tabulka 19: Výsledky pokusu DFF; 1000 °C 0,5 h.....	60
Tabulka 20: Výsledky pokusu HTA;	62