

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Disertační práce

srpen, 2017

Libor Pína

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

***DIODY S RYCHLÝM
ZOTAVENÍM NA BÁZI
KATODOVÝCH MIKROSVODŮ***

Disertační práce

Ing. Libor Pína

Praha, srpen, 2017

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika P2612
Studijní obor: Elektronika 2612V015

Školitel: Prof. Ing. Jan Vobecký, DrSc.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli Prof. Ing. Janu Vobec-kému, za vstřícnost a trpělivost při vedení mé disertační práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Doc. RNDr. Janu Vovsovi, CSc. za pomoc při získávání potřebných informací.

Prohlášení

Já, Ing. Libor Pína, bytem Jívanská 1941/40, 193 00 Praha 9, nar. 8. 3. 1963, uděluji Českému vysokému učení technickému v Praze, Fakultě elektrotechnická (dále jen FEL) trvalý neodvolatelný souhlas se zveřejněním své disertační práce nazvané „Diody s rychlým zotavením na bázi katodových mikrosvodů.“

Zveřejnění může předcházet obhajobě práce i recenznímu řízení.

Zároveň prohlašuji, že tato práce neporušuje autorská práva třetích osob a že jsem si vědom toho, že případné přihlášky k patentové ochraně je třeba podat před zveřejněním práce.

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

V Praze dne 29. srpna 2017

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

© 2017 Libor Pína. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Pína, Libor. *Diody s rychlým zotavením na bázi katodových mikrosvodů*. Disertační práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2017.

Abstrakt

Předložená disertační práce prezentuje novou generaci velkoplošných výkonových diod s rychlou komutací pro obvody s tyristory IGCT realizovanou s pomocí konceptu diody s mikrosvody vodivosti typu P^+ na katodové straně.

V práci je popsán současný stav používaných konstrukcí rychlých výkonových diod, jsou definovány možnosti, problémy a omezení současného stavu s ohledem na dosažení měkké komutace a snížení elektrických ztrát.

Je zde provedena fyzikální analýza závěrného zotavení s pomocí počítačových simulací, která je nezbytná pro pochopení mechanismů odehrávajících se při komutaci diody za extrémních podmínek.

V práci je vysvětlena funkce a rizika použití mikrosvodů a současně aplikační možnosti a omezení diod realizovaných s využitím tohoto návrhového konceptu.

S pomocí počítačové simulace vytvořené na základě experimentálních výsledků je v návrhových pravidlech shrnuto řešení přetrvávajících problémů diody. Navrhovaný koncept umožňuje nejen požadované zlepšení parametrů, ale byla také prokázána jeho realizovatelnost v podmínkách polovodičového průmyslu.

Cílem práce bylo vytvořit funkční koncept polovodičové struktury výkonové diody s rychlou komutací, který by zajistil zásadní zlepšení jejích elektrických parametrů a poskytl tak pro obvody s tyristory IGCT novou generaci diod s nižšími elektrickými ztrátami a bezpečným provozem v důsledku omezení napěťových překmitů v co nejširším rozsahu pracovního režimu z hlediska napájecího napětí, zpracovávaných proudů a bezpečného teplotního rozsahu.

Těžištěm této práce je exaktní pochopení konceptu katodových mikrosvodů, následně nalezení návrhových pravidel a demonstrace funkčního prototypu na diodách o ploše větší než 50 cm^2 v obvodech s tyristory IGCT s vysokou parazitní indukčností. Uvedená návrhová pravidla pro konstrukci diody s mikrosvody, zajistí bezpečný provoz velkoplošné diody s rychlou komutací v širokém rozsahu pracovního režimu.

Diody využívající katodové mikrosvody umožňují nejen významné ztenčení

křemíkové desky a tím dosažení stanoveného cíle, tj. snížení provozních ztrát ale také jsou schopny pracovat na vyšším pracovním napětí než srovnatelné diody bez mikrosvodů.

Klíčová slova vysokonapěťová výkonová dioda, rychlá dioda s měkkým zotavením, zpětné zotavení, měkkost, snap-off, vypínání, kmitání, zničení, dynamická lavina, plazma, robustnost, ztráty

Abstract

The presented dissertation presents a new generation of high-speed power diodes with fast commutation for IGCT thyristor circuits, which is realized with the help of the P⁺ shorts diode concept on the cathodic side.

The thesis describes the current state of used fast diode power constructions and defines possibilities, problems and limitations of the current state with regard to achievement of soft commutation and reduction of electric losses.

Physical analysis of the final recovery is performed using computer simulations, which is necessary to understand the mechanisms involved in commutation of diodes under extreme conditions.

The thesis explains the function and the risks of shorts and at the same time the application possibilities and limitations of the diodes realized using this design concept.

With the help of computer simulation based on experimental results, a solution of persistent diode problems is summarized in the design rules. The proposed concept not only allows for the desired improvement in parameters but also demonstrates its feasibility in the semiconductor industry.

The aim of the thesis was to create a functional concept of the semiconductor structure of the fast diode power diode, which would ensure a significant improvement of its electrical parameters and thus provide IGCT thyristor circuits with a new generation of diodes with lower electric losses and safe operation due to the limitation of voltage surges in the widest range of working mode in terms of supply voltage, applicable currents and safe temperature range.

The main focus of this work is the exact understanding of the concept of cathode shorts, followed by the finding of design rules and demonstration of a functional prototype on diodes with an area greater than 50 cm^2 in circuits with IGCT thyristors with high parasitic inductance. The proposed design rules for diode with shorted cathode ensure safe operation of large-area diodes with fast commutation over a wide range of operating modes.

Diodes using cathode shorts not only allow for a significant thickness reduction of the silicon wafer and thus achieve a set target, i.e. to reduce operating losses, but also to be able to work at higher operating voltages than comparable diodes without shorts.

Keywords high voltage power diode, fast recovery diode, reverse recovery, softness, snap-off, turnoff, oscillation, destruction, dynamic avalanche, plasma, ruggedness, losses

Seznam použitých zkratk

CAL controlled axial lifetime diode

CIBH Controlled Injection of Backside Holes (řízená injekce ze zadní strany)

DA dynamic avalanche; dynamický lavinový jev

DUT device under test (testovaná součástka)

EI resp. EO elektronové ozáření

EMC Electromagnetic Compatibility (elektromagnetická kompatibilita)

EMCON (EMmitter Controlled plasma distribution during the ON-state)

FCE Field Charge Extraction

FRD fast recovery diode (dioda s rychlou komutací)

FWD dioda s rychlou komutací ve funkci nulové diody (Free-Wheeling Diode)

IGCT Integrated Gate Commutated Thyristor (tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou)

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)

MPS Merged P-i-N Schottky

NDR záporný diferenciální odpor (negative differential resistance)

OPN oblasti prostorového náboje

PI protonové ozáření

RFC Relaxed Field of Cathode

snappy diode dioda s tvrdou komutací

snap-off diode diody s tvrdou komutací

soff recovery diode diody s měkkým zotavením (poměr t_f/t_S větší než snap-off diody)

SOA Safe Operation Area (bezpečná pracovní oblast)

SPEED Self - adjusting P Emitter Efficiency

C_{CL} (F) kapacita kondenzátoru v RLC obvodu omezovače napětí

d_{eff} (cm) minimální velikost poloměru mikrosvodu

d_{iF}/dt (A/ μs) strmota poklesu propustného proudu

E (V/cm) intenzita elektrického pole

E_{fr} (J) dynamické ztráty při spínání diody

E_{rr} (J) ztráty závěrného zotavení

E_{rec} (J) výkonové ztráty při závěrném zotavení diody

i_{rr} (A) komutační proud

i_{rrM} (A) maximální hodnota komutačního proudu

J_p (A/cm²) proudová hustota děr

L (H) indukčnost

L_σ (H) parazitní indukčnost obvodu

N_D (cm⁻³) koncentrace donorů

N_{eff} (cm⁻³) efektivní koncentrace ionizovaných příměsí

n_{av} (cm⁻³) koncentrace generovaných elektronů v důsledku lavinového jevu

n_{ex} (cm⁻³) koncentrace elektronů extrahovaných z vrstvy plazmy během komutace

n_L (cm⁻³) koncentrace elektronů na anodové straně plazmy

n_R (cm⁻³) koncentrace elektronů na katodové straně plazmy

p_{ex} (cm⁻³) koncentrace děr extrahovaných z vrstvy plazmy během komutace

R (Ω) rezistivita
t_f (μ s) doba poklesu komutačního proudu z maximální hodnoty i_{rrM} na 10
t_{rr} (μ s) závěrná zotavovací doba $t_{rr} = t_s + t_f$
t_S (μ s) doba zpoždění (od okamžiku, kdy i_F prochází nulou do doby kdy se začínají obnovovat závěrné vlastnosti diody a napětí na diodě je nulové)
q (C) náboj elektronu $q = 1,602 \times 10^{-19}$ C
Q_f (C) náboj zbytkový
Q_{rr} (C) náboj závěrného zotavení ($Q_{rr} = Q_S + Q_f$)
Q_S (C) náboj zpoždění zaniká v době zpoždění záporného napětí t_S
T_{jmax} ($^{\circ}$ C) maximální teplota p-n přechodu
V_{bi} (V) prahové napětí
V_{rrM} (V) komutační přepětí (reverse recovery maximum voltage)
V_{DC} (V) napětí meziobvodového kondenzátoru, stejnosměrné napájecí napětí
v_L, v_R (m/s) rychlost rozšiřování OPN u anodové resp. u katodové strany
V_F (V) úbytkem napětí v propustném stavu
v_{sat} (m/s) satureovaná rychlosti děr v OPN
 ϵ_0 (F/m) permitivita vakua
 ϵ_r (F/m) relativní permitivita křemíku
 μ_n (m^2/Vs) pohyblivost elektronů
 μ_p (m^2/Vs) pohyblivost děr

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Diody s rychlou komutací (zotavením) ve výkonové elektronice	2
1.2 Závěrné zotavení diody při tvrdém spínání a odpovídající fyzikální mechanismy transportu nositelů náboje	5
1.3 Význam měkké komutace	9
1.4 Požadavky na rychlé výkonové diody	12
2 Používané konstrukce rychlých výkonových diod s měkkou komutací	13
2.1 Nastavení měkké komutace optimalizací jednorozměrného dotačního profilu	13
2.2 Lifetime engineering	17
2.3 Nastavení elektrických parametrů optimalizací dvourozměrného dotačního profilu	21
3 Rychlé diody s katodovými mikrosvody a funkce mikrosvodu během komutace	25
4 Metodika návrhu velkoplošné diody s katodovými mikrosvody	31
4.1 Dvourozměrný model struktury diody	32
4.2 Elektrický obvod pro simulaci diody s komutací vnějším napětím	36
5 Optimalizace parametrů velkoplošné diody s katodovými mikrosvody	41
5.1 Statické parametry	41
5.2 Dynamické parametry	48
5.3 Návrhová pravidla pro zajištění měkké komutace u velkoplošné diody s rychlou komutací	70
6 Shrnutí	73

Literatura	75
A Seznam publikací autora	81
A.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce	81
A.2 Ostatní publikace	82
B Obsah přiloženého CD	97

Seznam obrázků

1.1	Polovodičová část měniče s tyristory IGCT a diodami s rychlou komutací (FRD)	2
1.2	Měnič s tyristory IGCT (a) a tranzistory IGBT (b) a diodami s rychlou komutací ve funkci nulových diod FWD (Free-Wheeling Diode).	4
1.3	Příklady vypnutí proudu 30 a 3000 A se strmostí 1000 A/ μ s do pracovního napětí 2800 V; T = 25° C	5
1.4	Porovnání rozložení intenzity elektrického pole na diodě s přiloženým statickým napětím 3,6 kV a při závěrném zotavení (3,6 kV). Z rozložení koncentrace elektronů a děr je patrná existence OPN u anody a částečně také u katody.	6
1.5	Vlevo: VA charakteristika v oblasti prostorového náboje na anodové straně. Vpravo: Intenzita elektrického pole v oblasti prostorového náboje, v 120 μ m široké N ⁻ vrstvě, pro různé proudové hustoty [1].	7
1.6	Simulace koncentrace elektronů během závěrného zotavení. Nahoře je anoda a dole je katoda [2].	8
1.7	Simulace koncentrace elektronů během závěrného zotavení. Nahoře je anoda a dole je katoda [3].	9
1.8	Simulace „tvrdé“ (snappy diode) diody při závěrném zotavení. Koncentrační profil a koncentrace elektronů a děr během závěrného zotavení (vpravo). Průběh proudu a napětí během komutace (vlevo), vypínaný proud 30 A se strmostí 1000 A/us při 25° C do pracovního napětí 2,8 kV, dioda s plochou anodového kontaktu 55 cm ² pro jmenovité napětí 4,5 kV.	10
1.9	Simulace „měkké“ (soft diode) diody při závěrném zotavení. Koncentrační profil a koncentrace elektronů a děr (vpravo). Průběh proudu a napětí během komutace (vlevo); vypínaný proud 30 A se strmostí 1000 A/us při 25° C do pracovního napětí 2,8 kV, dioda s plochou anodového kontaktu 55 cm ² pro jmenovité napětí 4,5 kV.	11

2.1	Rozložení volných elektronů a děr v průběhu komutace: před začátkem poklesu napětí (plná čára) a v době krátce před vyčerpáním vrstvy plamy v závěru komutace (čárkovaná čára). Červeně je zobrazeno rozložení u diody s tvrdým zotavením „snappy dioda“ a modrá čára zobrazuje typickou diodu s měkkým zotavením „soft-dioda“.	14
2.2	Rozložení volných elektronů a děr v propustném stavu pro $J=5,45\text{A}/\text{cm}^2$ při 25°C pro různé koncentrační profily.	15
2.3	Simulovaný průběh komutace diody s tloušťkou 600 a 660 μm , vypínaný proud je 300 A a pracovní napětí 2800 V. Dioda má aktivní povrch 55 cm^2 a jmenovité napětí 4,5 kV.	16
2.4	Rozložení plazmy (nahore) a elektrického pole (dole) v průběhu komutace diody o tloušťce 600 μm (vlevo) a 660 μm (vpravo). Průběh komutace je na obr. 2.3.	16
2.5	Koncentrační profil zastavených elektronů v křemíku pro různé velikosti energie [4].	17
2.6	Rozložení volných elektronů a děr v propustném stavu v N^- vrstvě pro $J=5,45\text{A}/\text{cm}^2$ 25°C u diody před (modrá přerušovaná čára) a po elektronovém ozáření (červená přerušovaná čára); homogenní koncentrace vybraných rekombinačních center vzniklých el. ozářením je zobrazena červenou plnou čarou.	18
2.7	Rozložení volných elektronů a děr v propustném stavu pro $J=5,45\text{A}/\text{cm}^2$ 25°C u diody před elektronovým ozářením (modrá přerušovaná čára), po elektronovém ozáření (červená přerušovaná čára) a po ozáření protony (černá přerušovaná čára). Homogenní koncentrace rekombinačních center vzniklých el. ozářením je zobrazena červenou plnou čarou a center po protonovém ozáření je zobrazena plnou černou čarou.	19
2.8	Průběh komutace před ozářením (proud-modrá plná, napětí-modrá přerušovaná), po elektronovém ozáření (proud-červená plná, napětí-červená přerušovaná) a po ozáření protony (proud-černá plná, napětí-černá přerušovaná) při 25°C .	20
2.9	Rozložení volných elektronů a děr na začátku komutace (0 us) a v čase 2 us u diody s el. oz. a u diody s ozářením elektrony i protony (vlevo). Vpravo je průběh komutace obou diod.	20
2.10	Struktury na anodové straně pro samoregulaci emitorové injekční účinnosti [3].	21
2.11	Schématické znázornění rozdílu konvenční PIN diody a diody se segmentovaným katodovým kontaktem [5].	23
2.12	Průběh rozložení plazmy v propustném stavu v N^- vrstvě při malých a velkých proudových hustotách pro diodu se segmentovaným katodovým kontaktem (červená čára) a konvenční diodu (černá) [5].	23
2.13	Vlevo: koncept mikrosvodů na katodě. Vpravo: koncept CIBH	24

3.1	Důvod pro použití mikrosvodů je snížení elektrických ztrát při provozu.	25
3.2	Průběhy napětí a proudu při komutaci diod s tloušťkou 600 μm pro diodu bez mikrosvodů naměřené při pokojové teplotě (plná čára - vypínaný proud 300 A) a pro diodu s mikrosvody (přerušovaná čára - vypínaný proud 300 A, tečkovaná čára - vypínaný proud 30 A).	26
3.3	Schematický nákres řezu diody s mikrosvodem(vlevo) a příklady koncentračního profilu anody (vpravo nahoře) a koncentračního profilu katody se stlačující vrstvou vodivosti typu N a vrstvou mikrosvodu typu P (vpravo dole).	27
3.4	Příklad simulovaného řezu diodou s mikrosvodem s průměrem 600 μm obklopeným vrstvou katody o šířce 100 μm	27
3.5	Porovnání průběhu komutace klasické diody a diody s mikrosvodem	28
3.6	Průběh napětí a proudu během komutace diody s mikrosvody o průměru 600 μm (vlevo), vpravo je rozložení koncentrace děr v čase 0,4 μs	29
3.7	Detail mikrosvodu z obr. 3.6 (čas 0,4 μs). Elektrony proudí směrem ke katodě a obtékají mikrosvod (vlevo). Díry injektují z mikrosvodu (vpravo).	29
3.8	Rozložení koncentrace elektronů (vlevo) a děr (vpravo) v řezu diody v čase 0,6 μs	30
3.9	Rozložení koncentrace elektronů (vlevo) a děr (vpravo) v řezu diody v čase 0,7 μs	30
4.1	Koncentrační profily akceptorů, donorů a vybraných rekombinačních center po protonovém a elektronovém ozáření pro simulaci. . .	32
4.2	Příklad naměřené a simulované propustné voltampérové charakteristiky diody bez a s mikrosvody (mikrosvod P^+ zabírá 50% katodové plochy) před a po ozáření protony použité pro nastavení koncentrací rekombinačních center po protonovém ozáření.	33
4.3	Vlevo: členění P^+ a N^+ vrstvy na straně katody. Vpravo: zjednodušení struktury použité pro dvojrozměrnou simulaci v cylindrických souřadnicích.	33
4.4	Ukázka masky diody pro členění N^+ vrstvy na katodové straně. Průměr opsané kružnice hexagonu je 1000 μm . Mikrosvod P^+ zabírá 75% katodové plochy. Šířka katody N^+ je 134 μm (mezera mezi hexagony).	34
4.5	Ukázka masky diody pro členění N^+ vrstvy na katodové straně. Průměr opsané kružnice hexagonu je 1000 μm . Mikrosvod P^+ zabírá 50% katodové plochy. Šířka katody N^+ je 359 μm (mezera mezi hexagony).	35

4.6	Ukázka masky diody pro členění N^+ vrstvy na katodové straně. Průměr opsané kružnice hexagonu je $1000 \mu\text{m}$. Mikrosvod P^+ zabírá 25% katodové plochy. Šířka katody N^+ je $866 \mu\text{m}$ (mezera mezi hexagony).	35
4.7	Schéma testovacího obvodu s IGCT tyristory a rychlými diodami (FRD).	36
4.8	Schéma obvodu pro simulaci komutace diody.	37
4.9	Porovnání měřených a simulovaných průběhů komutace diody s mikrosvody zabírající 75% katodové plochy s maximální dávkou elektronového ozařování pro teplotu 25°C ; $V_{DC} = 2,8 \text{ kV}$; rozměry masky: průměr hexagonu $1000 \mu\text{m}$, plocha mikrosvodu P^+ 75%, šířka mezery katody N^+ $134 \mu\text{m}$ (maska obr. 4.4); vypínaný proud 30 A ; $C_{CL} = 4 \text{ uF}$; $L_{CL} = 600 \text{ nH}$; $R_{CL} = 0,625 \text{ Ohm}$	38
4.10	Porovnání měřených a simulovaných průběhů komutace diody s mikrosvody zabírající 25% katodové plochy s maximální dávkou elektronového ozařování pro teplotu 25°C ; $V_{DC}=2,8 \text{ kV}$; rozměry masky: průměr hexagonu $1000 \mu\text{m}$, plocha mikrosvodu P^+ 25%, šířka mezery katody N^+ $866 \mu\text{m}$ (maska obr. 4.6); vypínaný proud 30 A ; $C_{CL}=4 \text{ uF}$; $L_{CL}=600 \text{ nH}$; $R_{CL}=0,625 \text{ Ohm}$	39
5.1	Změřený koncentrační profil anodové vrstvy.	42
5.2	Změřený koncentrační profil katodové vrstvy.	42
5.3	Naměřený dotační profil bufferu pod mikrosvodem pro různé dávky implantace P (vpravo detail).	43
5.4	Měřené a simulované VA závěrné charakteristiky pro různé koncentrační profily stlačující vrstvy (bufferu) pro diodu bez elektronového ozáření s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 při teplotě 25°C	44
5.5	Změřený koncentrační profil mikrosvodu s hloubkou $2 \mu\text{m}$ (mělčí - A) a $3,5 \mu\text{m}$ (hlubší - B).	45
5.6	Měřené závěrné VA charakteristiky diod s mikrosvody hlubokými $2 \mu\text{m}$ (konc. profil A) pro různé velikosti plochy mikrosvodu s maximální dávkou elektronového ozáření, s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 , při teplotě 25°C	45
5.7	Změřené závěrné VA charakteristiky diod s mikrosvody hlubokými $3,5 \mu\text{m}$ (konc. profil B) pro různé velikosti plochy mikrosvodu s maximální dávkou elektronového ozáření, s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 , při teplotě 25°C	45
5.8	Závislost závěrného proudu na velikosti elektronového ozáření a velikosti plochy mikrosvodů u diod s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 , při teplotě 140°C a s koncentračním profilem varianty A. . .	46

5.9	Vlevo jsou naměřené koncentrační profily katodového emitoru diody s mělkým ($6\ \mu\text{m}$ -K1) a diody s hlubším ($11\ \mu\text{m}$ -K2) profilem emitoru. Vpravo jsou naměřené VA charakteristiky obou diod pro teploty 25 a 125°C . Elektronové ozáření dvojnásobnou dávkou a mikrosvod zaujímá 50% plochy katody.	47
5.10	Naměřené VA charakteristiky diod pro teploty 25 a 125°C pro různé dávky EO. Mikrosvod zaujímá 75% plochy katody.	47
5.11	Měřené VA charakteristiky diod pro teploty 25 a 125°C pro diody s různou velikostí plochy mikrosvodu (0 až 75% a elektronovým ozářením čtyřnásobnou dávkou).	48
5.12	Průběhy komutace diod při 25°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; EI: 4x; rozměry masky: mikrosvody 100 , 300 a $600\ \mu\text{m}$ (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody) ;vypínaný proud 30 A ; $C_{CL}=4\ \mu\text{F}$; $L_{CL}=600\ \text{nH}$; $R_{CL}=0,625\ \Omega$; dioda pro $4,5\text{ kV}$; max. strmost komutace= 1000 A/ms	49
5.13	Rozložení proudové hustoty děr během komutace v řezu $100\ \mu\text{m}$ mikrosvodu (vlevo) a $600\ \mu\text{m}$ mikrosvodu (vpravo) pro průběh z obr. 5.12 a,c.	50
5.14	Vypočtená teplotní závislost minimálního poloměru mikrosvodu podle vztahu 5.1 pro různé koncentrace donorů pod emitorem.	50
5.15	Závislost maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a třech různých dávkách el. ozáření při 25°C (nahore) a 125°C (dole); $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; rozměry masky: průměr mikrosvodu - $300\ \mu\text{m}$ (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 4% plochy katodové strany); $L_{CL}=600\ \text{nH}$; dioda s nominálním napětím $4,5\text{ kV}$; tloušťka diody je $600\ \mu\text{m}$	51
5.16	Průběhy komutace diod při 25° a 125°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; rozměry masky: průměr mikrosvodu – $300\ \mu\text{m}$ (cm^2 plocha mikrosvodu zabírá 4% plochy katodové strany); vypínaný proud 200 A ; $L_{CL}=600\ \text{nH}$; dioda s nominálním napětím $4,5\text{ kV}$; tloušťka diody je $600\ \mu\text{m}$; elektronové ozáření čtyřnásobnou dávkou.	52
5.17	Průběhy komutace diod pro různé šířky katody (nahore) při 25°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; EI:4x; rozměry masky: průměr mikrosvodu- $1000\ \mu\text{m}$ (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody u šířky N^+ vrstvy $134\ \mu\text{m}$; 50% pro šířku N^+ $359\ \mu\text{m}$ a 25% pro šířku N^+ $866\ \mu\text{m}$); vypínaný proud 30 A ; $L_{CL}=600\ \text{nH}$; dioda s nominálním napětím $4,5\text{ kV}$; tloušťka diody je $600\ \mu\text{m}$; Dole je příklad uspořádání P a N vrstev na katodové straně diody pro šířku katodové vrstvy $134\ \mu\text{m}$	53

5.18	Měřené a simulované průběhy komutace pro diody šířkou N^+ vrstvy 134 μm (dole) a 866 μm (nahore) při 25°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; EI:4x; rozměry masky: průměr mikrosvodu-1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody pro šířku N^+ vrstvy 134 μm a 25% pro šířku N^+ 866 μm); vypínaný proud 30 A; $L_{CL}=600\text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm	54
5.19	Řezy diodou od středu mikrosvodu do poloviny vrstvy katody se simulovaným rozložením koncentrace děr v okamžiku těsně před konečným kolapsem plazmy nad katodou (0,72 a 0,73 us) pro šířku N^+ vrstvy 134 μm (vlevo) a 866 μm (vpravo).	56
5.20	Řezy diodou od středu mikrosvodu do poloviny vrstvy katody se simulovaným rozložením koncentrace děr v okamžiku těsně po konečném kolapsu plazmy nad katodou (0,74 a 0,75 us) pro šířku N^+ vrstvy 134 μm (vlevo) a 866 μm (vpravo).	57
5.21	Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a šířce katodové vrstvy N^+ (el. ozáření 4x, 25°C , průměr mikr. 1000 μm , $V_{DC}=2,8\text{ kV}$, $L_{CL}=600\text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 560 μm), v závorce jsou procenta plochy, které zabírá mikrosvod.	58
5.22	Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a dávce elektronového ozáření při 25° a 125° (průměr mikrosvodu 300 μm , mikrosvod zabírá 4% plochy, $V_{DC}=2,8\text{ kV}$, $L_{CL}=600\text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm a plochou 55 cm^2).	59
5.23	Naměřené průběhy komutace pro různé dávky elektronového ozáření při 25°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; průměr mikrosvodu 300 μm ; mikrosvod má kruhový tvar; (plocha P^+ zabírá 4% katody) ;vypínaný proud 100 A; $L_{CL}=600\text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm ; plocha diody 55 cm^2	59
5.24	Měřené průběhy komutace pro různé dávky elektronového ozáření při 25°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; průměr mikrosvodu 1000 μm (plocha P^+ zabírá 25% katody); šířka katody je 866 μm ; vypínaný proud 100 A; $L_{CL}=600\text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm ; plocha diody 55 cm^2	60
5.25	Měřené průběhy komutace pro různé dávky elektronového ozáření při 25°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; rozměry masky: průměr mikrosvodu - 1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany); šířka katody=134 μm ; vypínaný proud 100 A; $L_{CL}=600\text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm ; celková aktivní plocha diody 55 cm^2	60

- 5.26 Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a velikosti parazitní indukčnosti pro různé designy mikrosvodu ($EO=4x$; $25^\circ C$; průměr mikrosvodu 1000 μm , mikrosvod zabírá 25% plochy pro šířku N^+ katody 866 μm , 50% plochy pro N^+ 358 μm a 75% pro N^+ 134 μm , $V_{DC}=2,8$ kV. 61
- 5.27 Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a velikosti parazitní indukčnosti pro různé tloušťky diody ($EO=4x$; $25^\circ C$; průměr mikr. 750 μm , mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 100 μm , $V_{DC}=2,8$ kV, tloušťka diody je 560 nebo 600 μm). 62
- 5.28 Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na velikosti parazitní indukčnosti pro různé designy mikrosvodu pro vypínanou proudovou hustotu 1,5 A/cm² ($EO=4x$; $25^\circ C$; průměr mikr. 1000 μm - mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 134 μm , 50% plochy pro N^+ 359 μm , 25% plochy pro N^+ 866 μm ; průměr mikr. 750 μm - mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 100 μm , průměr mikr. 1500 μm - mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 200 μm , $V_{DC}=2,8$ kV, tloušťka diody je 560 μm). 62
- 5.29 Měřené průběhy komutace klasické diody 4,5 kV a diod s mikrosvody pro $V_{DC}=2,8$ kV(nahoře) a 3,6 kV(dole). Průměr mikrosvodu je 1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N^+ vrstvy 134 μm ; 50% pro 359 μm a 25% pro 866 μm , vypínaný proud je 100 A; $L_s=600$ nH; tloušťka diody s mikrosvody je 600 μm , $EO = 4x$; vypínaný proud je 100 A). 63
- 5.30 Měřená závislost maximálního překmitu během komutace na propustném proudu u klasické diody 4,5 kV (5,5 kV) a diod s mikrosvody pro $V_{DC}=2,8$ kV(nahoře) a 3,6 kV(dole). Průměr mikrosvodu je 1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N^+ vrstvy 134 μm ; 50% pro 359 μm a 25% pro 866 μm), $L_s=600$ nH; tloušťka diody s mikrosvody je 600 μm ; $EO=4x$ 64
- 5.31 Naměřená závislost maximálního překmitu během komutace na velikosti napětí V_{DC} u klasické diody 4,5 kV (5,5 kV) a diod s mikrosvody pro vypínanou proudovou hustotu 1,5 A/cm². Průměr mikrosvodu je 1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N^+ vrstvy 134 μm ; 50% pro 359 μm a 25% pro 866 μm), $L_s=600$ nH; tloušťka diody s mikrosvody je 600 μm ; $EO= 4x$ 65

5.32	Naměřená technologická křivka pro vypínaný proud 2,5 kA pro klasickou diodu a diodu s mikrosvody pro teploty 25 a 140° C. Průměr mikrosvodu je 1000 um (P ⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N ⁺ vrstvy 134 um; 50% pro 359 um a 25% pro 866 um), L _s =600 nH; tloušťka diody s mikrosvody je 600 μm, klasická dioda 4,5 kV je o 10% tlustší; celková aktivní plocha diody 55 cm ²	66
5.33	Měřená a simulovaná technologická křivka pro vypínaný proud 2,5kA pro diodu s mikrosvody pro teplotu 140° C. Průměr mikrosvodu je 1000 um (P ⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody pro šířku katodové N ⁺ vrstvy 134 um), L _s =600 nH; celková aktivní plocha diody 55 cm ²	68
5.34	Simulované průběhy komutace různě tlustých diod s mikrosvody pro V _{DC} =2,8 kV při 25° C. Průměr mikrosvodu je 1000 um (P ⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N ⁺ vrstvy 134 um), vypínaný proud je 40 A; L _s =600 nH; celková aktivní plocha diody 55 cm ² ; EO=4x.	68
5.35	Simulované průběhy komutace různě tlustých diod s mikrosvody pro V _{DC} =2,8 kV. Průměr mikrosvodu je 1000 um (P ⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N ⁺ vrstvy 134 um), vypínaný proud je 2500 A; L _s =600 nH; EO=4x; teplota 140° C.	69
5.36	Simulované průběhy závěrné VA charakteristiky diod s mikrosvody s tloušťkou 550, 500 a 450 um a měrným odporem 330 Ωcm pro teplotu teplota 25° C.	69

Seznam tabulek

4.1	rozměry hexagonů a počet buněk přítomných na maskách z obr. č. 4.4, 4.5 a 4.6	34
4.2	Základní parametry standardně vyráběné diody	39
4.3	Seznam zkoumaných vlivů designu na výsledné parametry diod . .	40

Úvod

Cílem mé práce bylo vytvořit funkční koncept polovodičové struktury výkonové diody s rychlou komutací, který by zajistil zásadní zlepšení jejích elektrických parametrů a poskytl tak pro obvody s tyristory IGCT novou generaci diod s nižšími elektrickými ztrátami a bezpečným provozem v důsledku omezení napěťových překmitů v co nejširším rozsahu pracovního režimu z hlediska napájecího napětí, zpracovávaných proudů a bezpečného teplotního rozsahu.

V úvodní kapitole je uvedena motivace pro požadovaná zlepšení elektrických parametrů a popsáno použití diody v měniči s vypínacím tyristorem IGCT. Dále je provedena fyzikální analýza závěrného zotavení s pomocí počítačových simulací, která je nezbytná pro pochopení mechanismů odehrávajících se při komutaci diody za extrémních podmínek.

V druhé kapitole je popsán současný stav používaných konstrukcí rychlých výkonových diod se snahou o dosažení měkké komutace. Ve třetí kapitole je vysvětlena funkce a rizika použití mikrosvodů na katodové straně diody a současná technologická úroveň, aplikační možnosti a omezení diod realizovaných s využitím tohoto návrhového konceptu.

Následující kapitola popisuje návrh řešení přetrvávajících problémů diody s rychlou komutací s pomocí počítačové simulace vytvořené na základě experimentálních výsledků dosažených autorem. Cílem bylo, aby navrhovaný koncept umožnil nejen požadované zlepšení parametrů, ale aby byl také realizovatelný v podmínkách polovodičového průmyslu a umožnil výrobu s vysokým stupněm reprodukovatelnosti, tj. aby představoval robustní návrh.

Vyhodnocení provedených experimentů a simulací, které je uvedeno v 5. kapitole, je provedeno s cílem zjistit, které mikrofyzikální a prostorové parametry struktury ovlivňují chování diody a aplikačního obvodu a jaké kombinace těchto parametrů vedou k dosažení výše uvedeného cíle. Důležitou součástí přitom představuje shrnutí ověřovacích měření nově navržených struktur s cílem experimentální demonstrace dosaženého zlepšení elektrických parametrů diod a jeho dopadu na aplikační obvody. Závěrečná část třetí kapitoly si pak klade za cíl shrnout stěžejní parametry návrhu a dopad volby jejich hodnot

na výsledné elektrické parametry (citlivost parametrů).

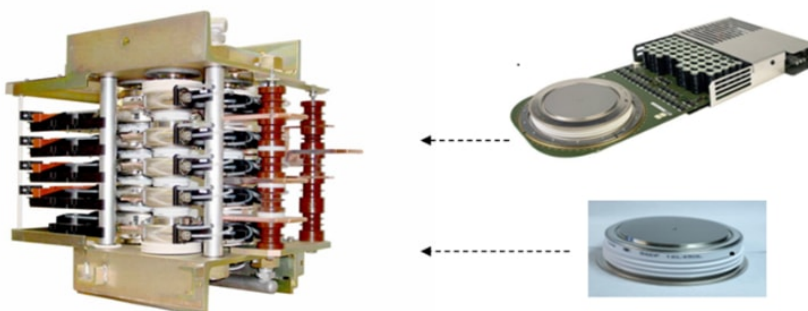
Vlastní soubor návrhových pravidel je pojat hlavně koncepčně. Některé technologické detaily nejsou v práci záměrně uvedeny, protože jsou předmětem průmyslového tajemství. Proto například na osách grafů uvádějících rozložení koncentrace příměsí chybí oproti standardním normám pro kreslení grafů absolutní jednotky, které jsou nahrazeny jednotkami libovolnými. I přes toto omezení poskytuje tato práce dostatečný popis návrhových principů nové generace diod s rychlou komutací umožňující jeho ověření.

1.1 Diody s rychlou komutací (zotavením) ve výkonové elektronice

Výkonové polovodiče pro vysoké napětí hrají významnou úlohu v moderních systémech výkonové elektroniky v oblastech trakce, přenosu a distribuce elektrické energie a v průmyslových aplikacích.

Důraz ve vývoji designu výkonových polovodičů v energetických zařízeních byl vždy zaměřen na zvýšení výkonu při současném snížení energetických ztrát, zvýšení elektrické robustnosti, lepší ovladatelnosti a spolehlivého chování za normálních a poruchových podmínek.

Předložená práce se zabývá problematikou rychlých diod, které se používají v pohonech středního a velkého výkonu (10-100 MW). Rychlé diody společně se spínacími prvky IGCT a IGBT patří mezi hlavní součástky vícehladinových měničů (Obr. 1.1). Rychlé frekvenční diody se používají v různých typech měničů nejčastěji jako tzv. nulové nebo zpětné.



Obrázek 1.1: Polovodičová část měniče s tyristory IGCT a diodami s rychlou komutací (FRD)

Zavedení výkonových polovodičových prvků IGCT a IGBT v posledních desetiletích zásadně zvýšilo nároky kladené na elektrické parametry diod, které jsou zcela nezbytné pro činnost nových topologií elektrických obvodů přinášejících úspory elektrické energie. Nově vzniklá kategorie diod s rychlou komutací (zkráceně též rychlých diod) od té doby představuje slabší článek soustavy

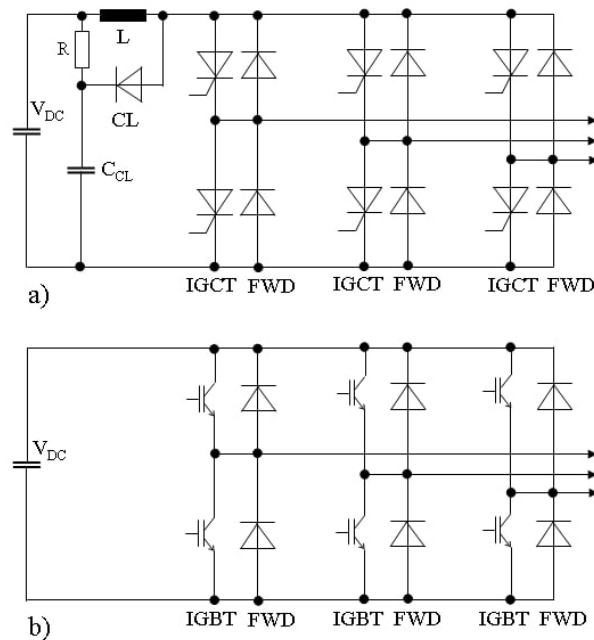
spínač-diody. Důvodem jsou problémy s dosažením potřebných parametrů v oblasti komutace elektrického napětí, strmosti nárůstu vypínaného proudu a rozsahu vypínaných proudů při neustálém tlaku ze strany jejich uživatelů na co nejnižší statické a dynamické ztráty.

V případě tranzistoru IGBT je situace jednodušší díky možnosti řídit jeho rychlost spínání velikostí rezistoru v řídicí elektrodě. V případě tyristoru IGCT taková možnost z fyzikálních důvodů neexistuje. Lze ji jen omezit indukčností L vhodné velikosti vložené na obr. 1.2a do série se spínačem. Vložený induktor omezí hodnotu nárůstu proudu (di/dt) pod kritickou mez a vymezí tak provoz diody do oblasti dovolené činnosti (SOA). Pak je ale nutné připojit omezovač napětí (Clamp) tvořený kapacitorem C_{CL} , rezistorem R a omezovací diodou CL , která v okamžiku výskytu napětového překmitu na indukčnosti L zabrání napětovému průrazu spínače i diody. Výsledný průběh napětí a proudu při vypínání diody (Obr. 1.3) pak vede v závislosti na rozptylové indukčnosti přívodů L_{σ} (stray inductance) a stejnosměrnému napájecímu napětí měniče V_{DC} (DC link voltage) k výskytu proudových nestabilit (zápornému diferenciálnímu odporu NDR spojenému s výskytem proudových filamentů), napětovým překmitům při vypínání malých proudových hustot a periodickému tepelnému přetěžování nadměrným ztrátovým výkonem v okamžiku nárůstu napětí diody nad hodnotu V_{DC} při vypínání. Tyto skutečnosti kladou na diody v obvodech s IGCT ještě vyšší nároky než je tomu u dnes široce rozšířených obvodů s IGBT. Motivací výrobců výkonových polovodičů k překonávání těchto problémů je schopnost aplikací s IGCT ovládat mnohem větší elektrické výkony, což vyplývá z mnohem menšího úbytku napětí na tyristoru IGCT v sepnutém stavu oproti IGBT, který vede na mnohem nižší celkové elektrické ztráty daného systému. Odtud také vyplynula motivace vytvořit původní polovodičové struktury v diodách s rychlou komutací, které by zajistily zásadní zlepšení jejich elektrických parametrů a poskytly tak pro obvody s tyristory IGCT novou generaci diod s nižšími elektrickými ztrátami. Tyto struktury, jejich princip teoretické činnosti, optimalizace jejich návrhu pomocí počítačové simulace a v neposlední řadě i experimentální ověření v testovacích obvodech plně odpovídajících podmínkám reálné průmyslové praxe, jsou náplní této disertační práce.

Mezi zvýšené nároky na parametry diod patří zejména:

- Nízké výkonové ztráty v sepnutém stavu charakterizované úbytkem napětí v tomto stavu V_F ,
- Nízké výkonové ztráty při vypínání (komutaci diody) vnějším elektrickým napětím, charakterizované elektrickými ztrátami při závěrném zotavení diody E_{rec} (recovery losses)
- Technologická křivka $E_{rec} - V_F$ dávající do souvislosti protichůdnost výše uvedeného požadavku na dosažení co nejnižších hodnot E_{rec} a V_F ,

1. ÚVOD



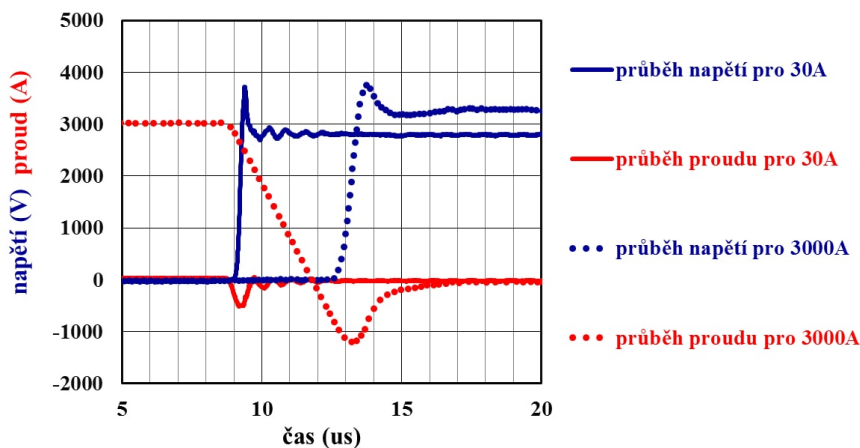
Obrázek 1.2: Měnič s tyristory IGCT (a) a tranzistory IGBT (b) a diodami s rychlou komutací ve funkci nulových diod FWD (Free-Wheeling Diode).

- Velká oblast dovolené činnosti SOA při vypínání velkých proudových hustot při maximální povolené teplotě diody T_{jmax} (maximální teplota p-n přechodu),
- Závěrné zotavení bez napěťových překmitů v co největším rozsahu napájecích napětí V_{DC} při vypínání proudů blízkým nule v celém rozsahu povolených pracovních teplot a v co největším rozsahu parazitních indukčností.

Tyto požadavky jsou z hlediska technologického návrhu ve většině případů navzájem protichůdné. Dosažení optimálního návrhu diody proto vyžaduje detailní znalost fyzikálních mechanismů probíhajících v jednotlivých režimech činnosti. Zcela zásadní je pak dokonalé pochopení těchto mechanismů při komutaci diody za extrémních podmínek a vazba dosažených parametrů na parametry polovodičového návrhu. Tato problematika je stručně shrnuta v následujících kapitolách.

1.2 Závěrné zotavení diody při tvrdém spínání a odpovídající fyzikální mechanismy transportu nositelů náboje

Pro rychlé výkonové diody je spolehlivá funkce závěrného zotavení klíčovým požadavkem. Především jsou požadovány nízké ztráty (malý náboj Q_{rr} a nízké komutační ztráty E_{rec} závěrného zotavení při současném dosažení nízkého úbytku napětí v propustném stavu V_F) a schopnost pracovat při vysokých rychlostech přepnutí z propustného stavu do závěrného (vysoká strmost di_F/dt) [1]. Diody musí spínat a vypínat v širokém rozsahu proudu od nuly až do maximální stanovené hodnoty vypínatelného proudu s vysokou strmostí poklesu proudu a v krátkém čase obnovit pracovní závěrné napětí. Na obr. 1.3 jsou ukázány typické příklady vypnutí proudu 30 a 3000 A se strmostí proudu 1000 A/ μ s do pracovního napětí 2800 V u diody s plochou kontaktu anody 55 cm². Při rychlém přepnutí diody z vodivého do nevodivého stavu může dojít k destrukci diody [6]. Zničení diody, zvláště při vypínání vysokých proudových hustot, bývá připisováno působení proudových filamentů v situaci, kdy dojde k jejich lokálnímu ukotvení, prostorovému zaškrčení a kdy vzniklá extrémní proudová hustota způsobí roztavení křemíkové destičky v místě filamentu a tím i zkrat mezi anodou a katodou. V důsledku toho dojde ke zničení spínače (v našem případě IGCT) a popřípadě k explozi pouzdra diody, popřípadě IGCT.



Obrázek 1.3: Příklady vypnutí proudu 30 a 3000 A se strmostí 1000 A/ μ s do pracovního napětí 2800 V; $T = 25^\circ \text{C}$

Během zpětného zotavení jsou díry a elektrony extrahovány z kvazi neutrální vrstvy elektrono-děrové plazmy k elektrodám a ve vyprázdněných oblastech mezi neutrální plazmou a emitory se vytvářejí oblasti prostorového náboje s narůstající intenzitou elektrického pole.

Díry z plazmy (p_{ex}) proudí oblastí prostorového náboje směrem k anodě,

1. ÚVOD

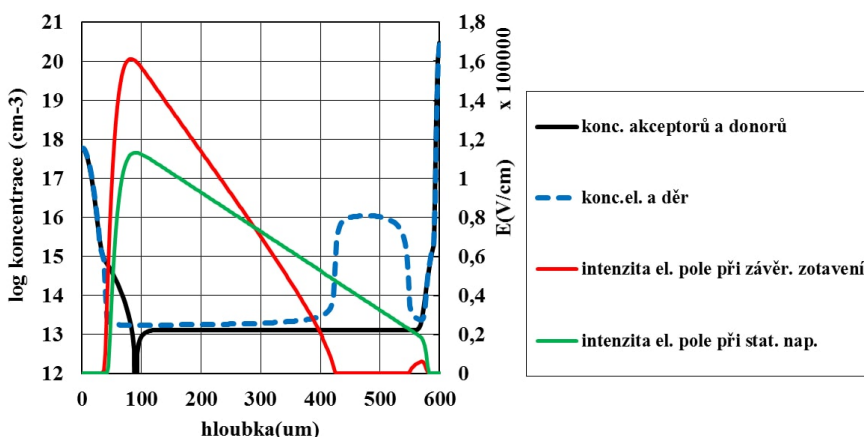
$J = J_p$, a jelikož mají stejnou polaritu jako náboj pozitivně nabitých ionizovaných donorů (příměsí), přidávají se v Poissonově rovnici (1.2) k jejich koncentraci. Tato koncentrace je obvykle označována jako efektivní koncentrace N_{eff} a je oproti režimu s přiloženým statickým napětím mnohem větší, protože vysoká hodnota intenzity elektrického pole v oblasti prostorového náboje způsobuje saturaci nárůstu rychlosti děr v_{sat} , jak ukazuje rovnice (1.2).

$$N_{eff} = N_D^+ + p_{ex} \quad (1.1)$$

S rostoucí koncentrací extrahovaných děr ve vyčerpané oblasti se zvyšuje gradient elektrického pole.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{e}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot (N_D^+ + p_{ex}) = \frac{e}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \left(N_D^+ + \frac{J_p}{e \cdot v_{sat}} \right) \quad (1.2)$$

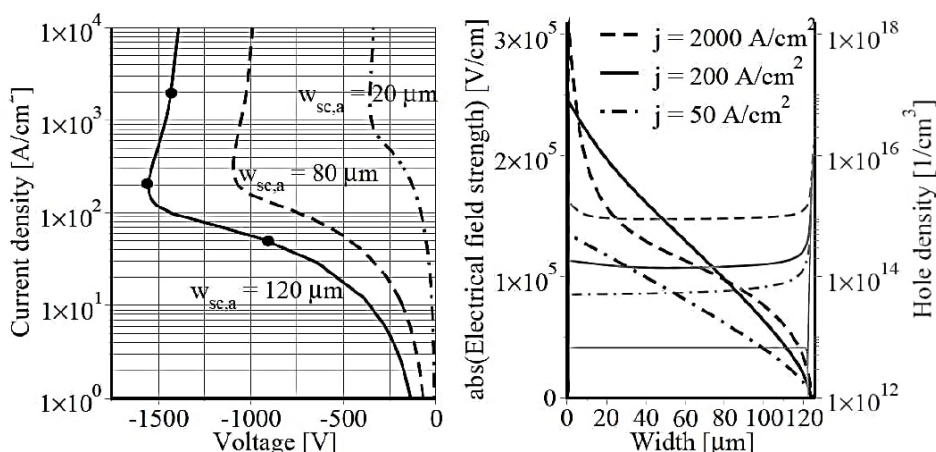
Při vzrůstu N_{eff} může být dosažena v oblasti anodového přechodu taková intenzita elektrického pole, kdy dochází k zásadnímu zvýšení rychlosti generace volných elektronů a děr mechanismem nárazové ionizace již při relativně nízkém závěrném napětí na anodě v porovnání s režimem přiloženého statického napětí. Tuto situaci ilustruje obrázek 1.4. Skutečnost, že k mohutnému lavinovému jevu dochází v dynamickém režimu již při mnohem nižších napětích a z důvodu potřeby jeho odlišení od mechanismu statického lavinového jevu, se v literatuře pro mechanismus z rovnice (1.2) používá označení dynamický lavinový jev (dynamic avalanche), dále jen DA.



Obrázek 1.4: Porovnání rozložení intenzity elektrického pole na diodě s přiloženým statickým napětím 3,6 kV a při závěrném zotavení (3,6 kV). Z rozložení koncentrace elektronů a děr je patrná existence OPN u anody a částečně také u katody.

1.2. Závěrné zotavení diody při tvrdém spínání a odpovídající fyzikální mechanismy transportu nositelů náboje

V místě s vysokým elektrickým polem, kde dochází k DA, se generují elektrony a díry, které ovlivňují profil efektivní koncentrace a tím i rozložení elektrického pole v oblasti prostorového náboje. Deformace rozložení elektrického pole v daném místě způsobí snížení závěrného napětí. Toto chování je spojeno s takzvaným záporným diferenciálním odporem (NDR), jak je možné pozorovat na přechodové VA charakteristice v oblasti prostorového náboje zobrazené na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Vlevo: VA charakteristika v oblasti prostorového náboje na anodové straně. Vpravo: Intenzita elektrického pole v oblasti prostorového náboje, v 120 μm široké N⁻ vrstvě, pro různé proudové hustoty [1].

S negativním diferenciálním odporem je spojena elektrická nestabilita, která vede ke vzniku proudového vlákna neboli filamentu. Ve filamentu dosahuje proudová hustota vysoko nad hodnoty 200 A/cm², tvar intenzity elektrického pole se deformuje (viz obr. 1.5 vpravo) a v místě filamentu se sníží napětí, což má za následek rozšíření oblasti prostorového náboje v daném místě. Vysoká hustota proudu vede současně k lokálnímu zvýšení teploty. Jelikož je teplotní koeficient nárazové ionizace záporný, vede to spolu s rozšířením oblasti prostorového náboje (OPN) v místě filamentu k jeho vyhasnutí nebo jeho přesunu do blízké polohy s menší šířkou OPN nebo nižší teplotou s vyšší intenzitou nárazové ionizace.

Pokud není filament zafixován na nehomogenitu ve struktuře, má snahu se přemístit do místa s kratší cestou v oblasti prostorového náboje nebo zhasnout. Příklad pohybu filamentu v oblasti prostorového náboje u anodové strany je znázorněn v simulovaném průběhu komutace na obrázku 1.6 v horní části obrázků u anody.

Při růstu oblasti prostorového náboje u katodové strany elektrony opouš-

1. ÚVOD

tějí plazmu n_{ex} a snižují efektivní koncentraci donorů N_{eff} .

$$N_{eff} = N_D - n_{ex} \quad (1.3)$$

K lavinovému jevu v OPN na straně katody může dojít v případě posílení proudu elektronů n_{ex} o elektrony přicházející z filamentů v OPN u anody n_{av} . V případě, že hustota volných elektronů je tak vysoká, že kompenzuje kladně nabitě donory z pozadí koncentračního profilu, při $n_{ex} + n_{av} \gg N_D$ dochází k deformaci rozložení intenzity elektrického pole a ke vzniku filamentu.

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} * (n_{ex} + n_{av} - N_D) \quad (1.4)$$

Na obr. 1.7 je simulace vzniku, zániku a pohybu filamentů na straně pn přechodu a jeden ukotvený filament u přechodu nn+.

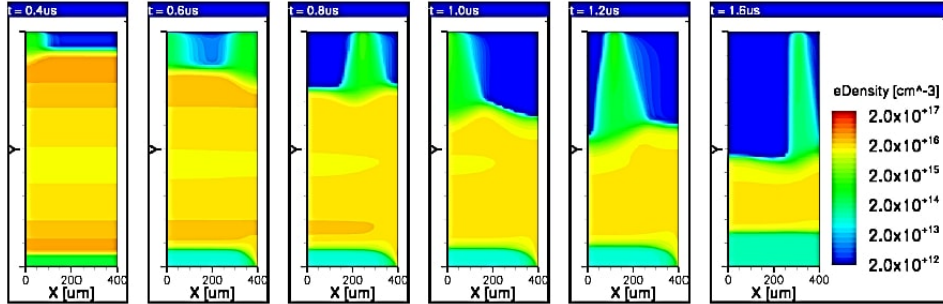
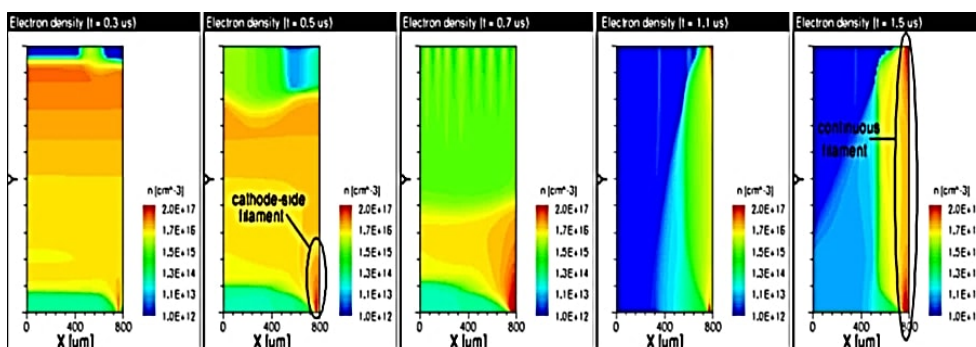


Fig. 3. Electron density during turn-off at certain points in time marked in Fig. 2 (top: anode, bottom: cathode)

Obrázek 1.6: Simulace koncentrace elektronů během závěrného zotavení. Nahoře je anoda a dole je katoda [2].

Zabránit vzniku nárazové ionizace na přechodu nn+ lze u klasických diod optimalizací koncentračního profilu (např. vysokou koncentrací N^+ vrstvy, pozvolným gradientem stlačující vrstvy na přechodu nn+, nízkou injekční schopností p anody), optimalizací rozložení doby života nadbytečných nositelů náboje, koncentrací N_D v ν vrstvě a tloušťkou křemíkové destičky.

Výše uvedená analýza ukazuje, že při vypínání vysokých hodnot proudu může při vysoké strmosti poklesu propustného proudu (di_F/dt) dojít k vzniku filamentů v důsledku DA. Tento stav může některých situacích způsobit destrukci diody, zejména pak v důsledku oboustranné injekce nositelů náboje způsobené DA současně na anodové a katodové straně, jak prvně publikoval Egawa v roce 1966 [7].



Obrázek 1.7: Simulace koncentrace elektronů během závěrného zotavení. Nahoře je anoda a dole je katoda [3].

- Filament je ukotven k nějaké poruše nebo anomálii (např. okraj planárního přechodu anodové vrstvy se zvýšenou proudovou hustotou na kraji aktivní oblasti) [8] [9] [10].
- Koncentrační profil anodové P-vrstvy má příliš nízkou koncentraci a OPN může dosáhnout povrchu anody.
- na katodové straně na přechodu N+N se vytvoří proudové vlákno – filament [11] [12].

1.3 Význam měkké komutace

Důležitým požadavkem na rychlé diody je měkká komutace napětí, což znamená vypínání proudu bez napěťových překmitů nad úroveň pracovního napětí a v každém případě bez překmitů nad úroveň jmenovité hodnoty průrazného napětí. Tato vlastnost se projevuje zvláště při velmi rychlém vypínání malých proudových hustot a souvisí s rychlostí zániku (kolapsu) plazmy během komutace. Při rychlém kolapsu plazmy poklesne proud s vysokou hodnotou strmosti di/dt , což vede ke generaci přídavného napětí V na parazitní (rozptylové) indukčnosti L_σ vypínaného obvodu dle rovnice (1.5).

$$V = -L_\sigma * \frac{di}{dt} \quad (1.5)$$

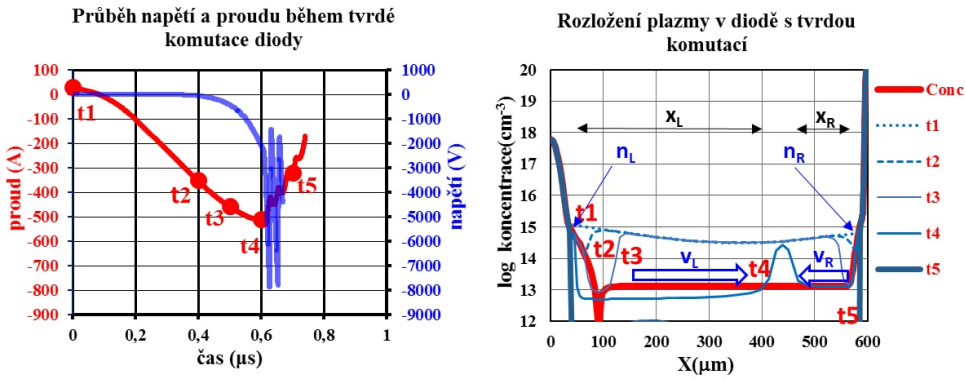
Toto napětí je přidáno k napětí meziobvodového kapacitoru V_{DC} tvořícího stejnosměrné napájení obvodu (DC link voltage) a dioda je tak vystavena celkovému napětí $V_{DC} + V$. Obr. 1.8 ukazuje simulaci tohoto jevu na diodě s tvrdou komutací (snappy diode) a obr. 1.9 s měkkou komutací (soft diode).

Při konečném vyčerpání vrstvy plazmy u snappy diody se OPN skokově rozšíří přes celou ochuzenou vrstvu báze typu N a trojúhelníkový tvar rozložení intenzity elektrického pole se změní na lichoběžníkový (viz obr. 1.4).

1. ÚVOD

Dioda s tvrdou komutací na obr. 1.8 by byla v reálné situaci zničena překročením jejího průrazného napětí. Generované nadměrné napětí může vést ke zničení jiných komponentů v obvodu (typicky paralelně připojená zařízení). V situaci, kdy dioda není zničena, napěťový překmit způsobí rezonanci LC obvodu tvořeného rozptylovou indukčností a kapacitou diody. Výsledkem jsou oscilace napětí a proudu o velkém výkonu, které znamenají nežádoucí rušení (elektromagnetické interference) [13] [14].

Hlavní příčinou tvrdé komutace (rychlého přerušování proudu v diodě) je chybějící plazma na straně katody v závěrečné fázi zpětného zotavení, jak je popsáno níže.



Obrázek 1.8: Simulace „tvrdé“ (snappy diode) diody při závěrném zotavení. Koncentrační profil a koncentrace elektronů a děr během závěrného zotavení (vpravo). Průběh proudu a napětí během komutace (vlevo), vypínaný proud 30 A se strmostí 1000 A/us při 25° C do pracovního napětí 2,8 kV, dioda s plochou anodového kontaktu 55 cm² pro jmenovité napětí 4,5 kV.

Máme-li diodu s přibližně ekvivalentní vstřikovací účinností anody i katody ($n_L \approx n_R$) a symetrickým rozložením profilu rekombinačních center, pak rychlost rozšiřování OPN u anody (v_L) a OPN u katodové strany (v_R) na obr. 1.8 vpravo je dána poměrem pohyblivosti elektronů μ_n a děr μ_p . V křemíku jsou pohyblivosti v poměru $b = \mu_n/\mu_p \approx 3$ a finální kolaps plazmy proto nastane ve vzdálenosti tří čtvrtin šířky N-báze blíže ke katodě (viz obr. 1.8) [15, 16, 17].

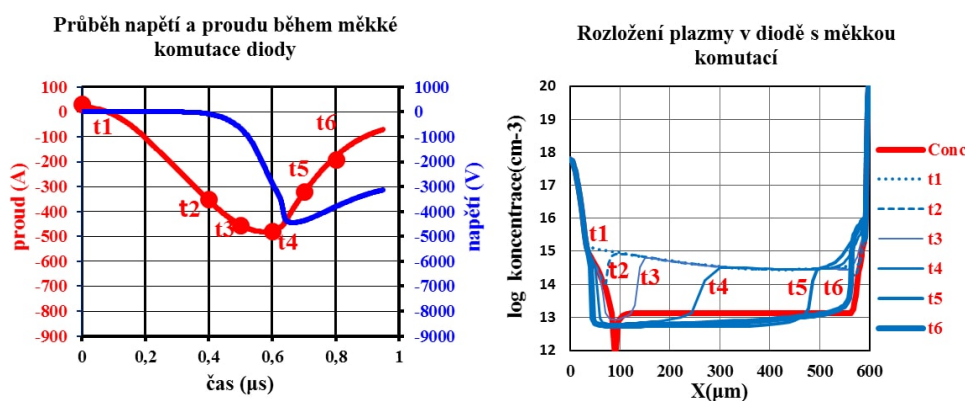
$$v_L = \left| \frac{dx_L}{dt} \right| = \frac{b}{1+b} \frac{J_R}{ne} \quad (1.6)$$

$$v_R = \left| \frac{dx_R}{dt} \right| = \frac{1}{1+b} \frac{J_R}{ne} \quad (1.7)$$

V případě, že n_L a n_R jsou rozdílné ($n_L \neq n_R$), platí pro poslední pozici bodu setkání oblastí prostorového náboje ($x_R=w-x_L$) vztah 1.8.

$$\left(\frac{x_L}{w}\right)_{nL \neq nR} = \frac{b \frac{n_R}{n_L}}{1 + b \frac{n_R}{n_L}} \quad (1.8)$$

Na rozdíl od „tvrdých“ diod, „měkké“ (soft diody) diody udržují vrstvu plazmy u katodové strany bez vzniku katodové OPN (obr. 1.9). Tím zabránějí náhlému přerušení proudu s vysokou strmostí poklesu di/dt v důsledku náhlého kolapsu plazmy (1.8). Způsobem, jak dosáhnout správného rozložení plazmy v sepnutém stavu a následně během komutace se zabývají další kapitoly práce.



Obrázek 1.9: Simulace „měkké“ (soft diode) diody při závěrném zotavení. Koncentrační profil a koncentrace elektronů a děr (vpravo). Průběh proudu a napětí během komutace (vlevo); vypínaný proud 30 A se strmostí 1000 A/us při 25 °C do pracovního napětí 2,8 kV, dioda s plochou anodového kontaktu 55 cm² pro jmenovité napětí 4,5 kV.

Výkonové rychlé diody pro IGCT pracují s vysokými napájecími napětími a proudy, a proto jsou zapouzdřeny v relativně objemných pouzdech s chladiči. Přílehlé obvody proto dosahují významné parazitní indukčnosti, která podporuje vznik oscilací při rychlém vypínání. Dosažení nízké parazitní indukčnosti je spojeno se zvýšenými provozními náklady a s existencí nízké parazitní indukčnosti nelze vždy u uživatele počítat.

Další komplikací je nutnost použití vysokého měrného odporu křemíkových desek pro výrobu diod tak, aby byla zajištěna dostatečná odolnost proti kosmickému záření. Čím větší je měrný odpor křemíkových desek, tím nižší je maximální hodnota elektrického pole v diodě při závěrné polarizaci a dioda je méně náchylná k elektrickému průrazu vlivem dopadajících kosmických částic. To ale vede na rychlejší šíření OPN s přiloženým závěrným napětím při komutaci a tím pádem i k tvrdší komutaci.

Všeobecný požadavek nízkých elektrických ztrát přináší požadavek co nejnižší tloušťky křemíkových desek, což opět zvyšuje náchylnost k napětovým překmitům. Z výše uvedených důvodů je dosažení měkké komutace (obr. 1.9) tak důležitým a zároveň obtížným úkolem, že je diskutován v dalších kapitolách této práce.

1.4 Požadavky na rychlé výkonové diody

V důsledku vysokých zpracovávaných výkonů výkonových měničů jsou použité polovodiče enormně zatěžovány energetickými ztrátami. Od velikosti energetických ztrát se pak odvíjí nutná velikost použitých chladičů a potřebný chladicí výkon a následně i cena zařízení a jeho provozu. Největší energetické ztráty na diodě vznikají v sepnutém stavu díky poměrně vysoké hodnotě propustného úbytku napětí V_F (statické ztráty). Během komutace při vyšších spínacích kmitočtech pak vznikají významné vypínací (dynamické) ztráty. Vypínací ztráty vzniklé při komutaci napětí E_{rec} závisí na velikosti komutačního náboje, který úzce souvisí s návrhem struktury diody a s použitými technologiemi výroby. Nezanedbatelné jsou také dynamické ztráty při spínání diody v režimu „forward recovery“ E_{fr} , které se projevují zejména u diod s vyšším průrazným napětím jako důsledek široké báze vodivosti typu N. Jejich velikost je ale výrazně nižší než v případě E_{rec} , a proto je v našich dalších úvahách zanedbáme.

Obecně platí, že čím větší jsou dynamické ztráty při komutaci, tím nižší jsou ztráty statické a naopak. V anglosaské literatuře je pro tuto kontroverzi zaveden pojem „ $E_{rec} - V_F$ trade-off“. Tato kontroverze je důsledkem toho, že chceme-li vyrobit robustní měkké diody s rychlou komutací odolné proti DA, musíme učinit taková technologická opatření, která bohužel vedou na vysoké hodnoty V_F . Čím větší je požadovaná rychlost komutace, tím větší dostáváme V_F pro danou napětovou třídu. Opakem jsou usměrňovací výkonové diody ($f = 50/60$ Hz), kde dochází k pomalé komutaci a dosahované hodnoty V_F jsou pak nízké a maximální povolená teplota přechodu může být oproti rychlým diodám výrazně vyšší.

Používané konstrukce rychlých výkonových diod s měkkou komutací

Používané konstrukce rychlých výkonových diod, které splňují požadavky na náročný a bezpečný provoz v měniči s tyristory IGCT, vyžadují precizní nastavení mnoha technologických parametrů. Souhrn použitých konstrukčních prvků pak rozhoduje o vlastnostech součástky a obvodů, kde jsou použity.

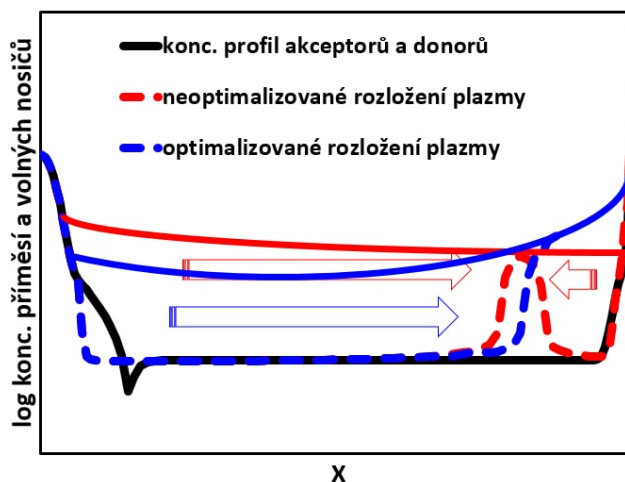
2.1 Nastavení měkké komutace optimalizací jednorozměrného dotačního profilu

Primární možností splnit požadavky kladené na rychlé diody je optimalizace koncentračního profilu akceptorů a donorů v aktivní oblasti diody. Jedná se tedy o tloušťky jednotlivých vrstev a jejich povrchové koncentrace.

Schopnost vypínat jak malé, tak i velké hodnoty proudu s vysokou strmostí jejich poklesu a bez nebezpečných překmitů, jak bylo ukázáno na obr. 1.9, je možné zajistit optimalizací rozložení elektronoděrové plazmy během sepnutého stavu před začátkem komutace. Princip spočívá v tom, že koncentrace plazmy musí být výrazně vyšší u katodové strany, než na straně anody, jak je znázorněno na níže uvedeném obrázku obr. 2.1. Nastavením této počáteční podmínky vypínacího procesu lze vykompenzovat negativní vliv poměru pohyblivosti elektronů a děr na kolaps plazmy ve $\frac{3}{4}$ tloušťky báze a místo kolapsu plazmy posunout úplně ke katodě. Tím se zabrání vytvoření druhé OPN u katody, oboustranná rychlá extrakce plazmy nenastane a pokles proudu nezpůsobí napěťový překmit.

Moderní diodové struktury zajišťují rychlou extrakci plazmy z oblasti vrstvy N^- blízko anody a udržují zbytky plazmy v okolí rozhraní N^-N^+ u katodové strany. Tento požadavek je možné splnit snížením injekční schopnosti anodové

2. POUŽÍVANÉ KONSTRUKCE RYCHLÝCH VÝKONOVÝCH DIOD S MĚKKOU KOMUTACÍ



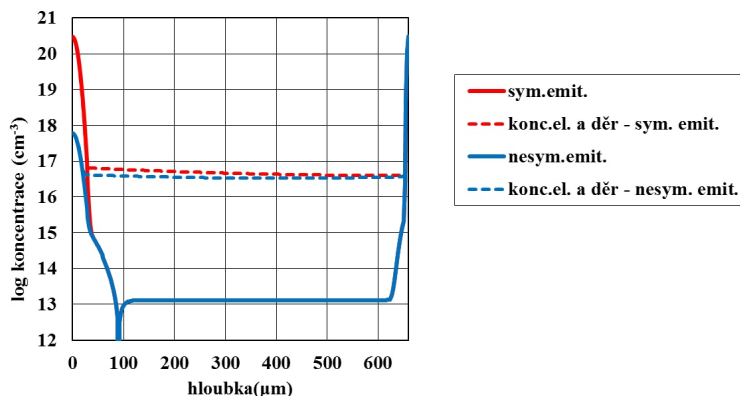
Obrázek 2.1: Rozložení volných elektronů a děr v průběhu komutace: před začátkem poklesu napětí (plná čára) a v době krátce před vyčerpáním vrstvy plamy v závěru komutace (čárkovaná čára). Červeně je zobrazeno rozložení u diody s tvrdým zotavením „snappy dioda“ a modrá čára zobrazuje typickou diodu s měkkým zotavením „soft-dioda“.

P vrstvy a naopak zvýšením injekční schopnosti katody. Toho se obvykle dosáhne snížením povrchové koncentrace anody resp. úpravou koncentračního profilu rekombinačních center v blízkosti PN přechodu a zvýšením povrchové koncentrace katodové vrstvy N+. Povrchová koncentrace akceptorů anodové vrstvy by kvůli co nejvýhodnějšímu rozložení plazmy v propustném směru z hlediska měkkosti zotavení měla být co nejmenší [18]. To je prakticky možné z toho důvodu, že nízká koncentrace akceptorů na povrchu anody u křemíku není pro většinou používanou kontaktní vrstvu z hliníku (Al) omezující, jelikož Al má nízký kontaktní odpor [19]. Co se týká katody, měla by typická povrchová koncentrace donorů v katodové vrstvě z důvodu vysoké injekční účinnosti a dobrého kontaktu na n typu křemíku přesahovat 10^{19} at/cm³ [19]. Současné metody depozice a difúze fosforu umožňují dosažení povrchových koncentrací nad 10^{20} at/cm³. Tím jsou definovány praktické meze tohoto přístupu.

Na obr. 2.2 je vypočtené rozložení plazmy v propustném stavu pro $J = 5,45$ A/cm² pro stejnou maximální koncentraci emitorů (červená přerušovaná čára) a rozložení při snížení koncentrace anodového emitoru o 2,5 řádu (modrá přerušovaná čára). Z obrázku je patrné, že takto jednoduchý postup k výraznému snížení koncentrace plazmy na anodové straně nevede. Integrál koncentrace akceptorů je zjevně nutné snížit na co nejnižší hodnotu. K té lze dospět následující úvahou.

Celkové množství akceptorů v anodové vrstvě musí být tak veliké, aby nedošlo k destrukci diody, když na PN přechodu dojde k lavinovému jevu.

2.1. Nastavení měkké komutace optimalizací jednorozměrného dotačního profilu



Obrázek 2.2: Rozložení volných elektronů a děr v propustném stavu pro $J=5,45\text{A}/\text{cm}^2$ při 25°C pro různé koncentrační profily.

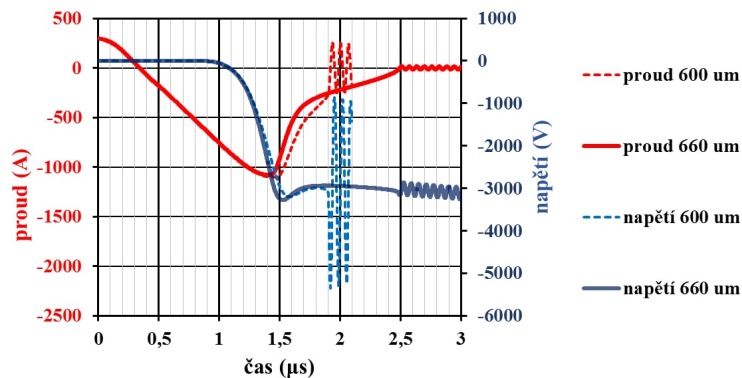
K tomuto jevu dochází pravidelně během komutace při strmém poklesu propustného proudu (viz kapitola 1.2). V případě, kdy je průrazný náboj odvozen od průrazného napětí podle druhé Maxwellovy rovnice, je hodnota průrazného náboje přibližně $1,3 \times 10^{12}$ až $1,8 \times 10^{12}$ atomů na cm^3 což je minimální množství elektricky aktivních akceptorů anodové vrstvy k zajištění spolehlivé blokovací schopnosti anodového přechodu [19]. Technologie využívající minimální integrál koncentrace anodových akceptorů je označována jako EMCON (EMmitter Controlled plasma distribution during the ON-state) [20]. Při použití této technologie bývá dosažena velmi nízká hodnota i_{rrM} a měkké zotavení i bez použití zvýšené koncentrace rekombinačních center v oblasti anody. Zvýšenou pozornost je přitom nutné věnovat návrhu zakončení blokovacího přechodu na okraji diody. V opačném případě by dioda ztratila dynamickou odolnost při rychlém vypínání v oblasti vysokých proudů.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2 je pro omezení vysokých hodnot elektrického pole při vzniku oblastí prostorového náboje důležitý pozvolný gradient stlačující vrstvy jak na katodovém přechodu NN^+ , tak na anodovém PN přechodu. Dalším stěžejním parametrem jednorozměrného návrhu je proto tloušťka křemíkové destičky.

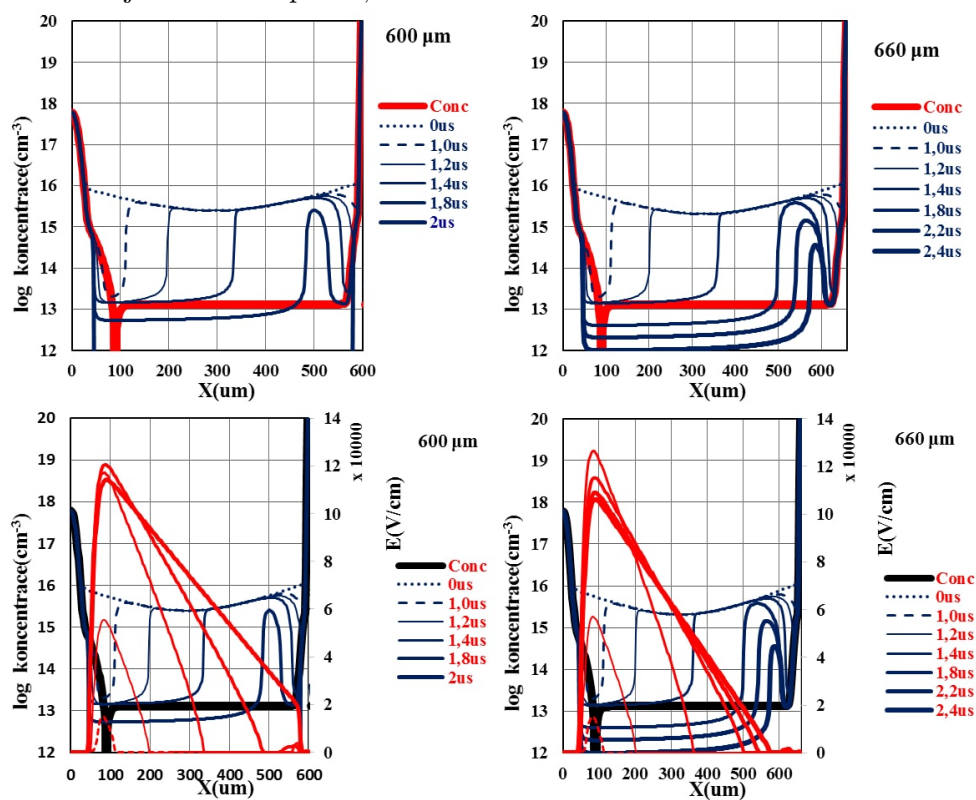
Malá tloušťka diody může v důsledku rychlého vyčerpání vrstvy plazmy způsobit vznik překmitů, jak je znázorněno na obrázku 2.3 a 2.4. Zde vidíme, že v čase $1,9 \mu\text{s}$ dochází u diody s tloušťkou $600 \mu\text{m}$ k rychlému vyčerpání náboje a současnému prudkému poklesu proudu diodou s následným vznikem překmitů. Dioda, která má jen o $60 \mu\text{m}$ větší tloušťku, má dostatečné množství náboje u katody k dokončení komutace bez zákmitů.

Je patrné, že konzervativní design s vysokou tloušťkou diody může zajistit hladký průběh komutace bez překmitů. Toto řešení ale přináší velké propustné a komutační ztráty, které je žádoucí u nových generací diod omezit.

2. POUŽÍVANÉ KONSTRUKCE RYCHLÝCH VÝKONOVÝCH DIOD S MĚKKOU KOMUTACÍ



Obrázek 2.3: Simulovaný průběh komutace diody s tloušťkou 600 a 660 μm , vypínaný proud je 300 A a pracovní napětí 2800 V. Dioda má aktivní povrch 55 cm^2 a jmenovité napětí 4,5 kV.

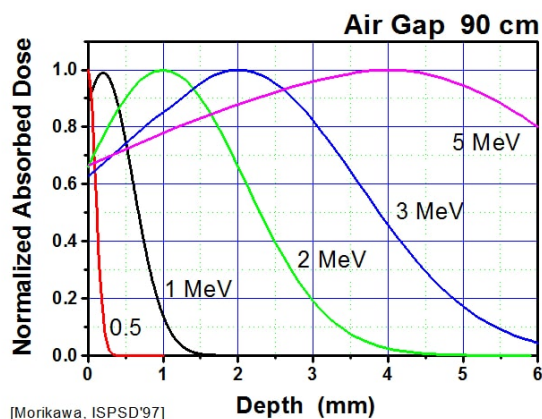


Obrázek 2.4: Rozložení plazmy (nahore) a elektrického pole (dole) v průběhu komutace diody o tloušťce 600 μm (vlevo) a 660 μm (vpravo). Průběh komutace je na obr. 2.3.

2.2 Lifetime engineering

Ozařování diod vysokoenergetickými částicemi je nejrozšířenější způsob regulace rozložení prostorového plazmatu v sepnutém stavu rychlých diod tím, že se snižuje doba života volných elektronů a děr. Důvodem jeho širokého využití je, že proces ozáření může být aplikován po dokončení výroby součástky, to znamená po skončení všech procesů používajících vysoké teploty. Po samotném ozařování následuje jen žíhání při nízké teplotě (200 až 350° C), aby byly odstraněny nestabilní bodové poruchy, které by mohly vést ke změnám stěžejních parametrů diod při jejich aplikaci.

Elektronové ozařování se obvykle používá pro homogenní snížení doby života minoritních nositelů ve směru osy ozáření. Ve srovnání s iontovým ozařováním pronikají elektrony celou součástkou již při relativně nízkých energiích (viz obr. 2.5) [4]. Je to proto, že hmotnost elektronu je asi 1000-krát nižší než hmotnost protonu a tomu odpovídá i zásadně nižší intenzita brzdění pohybu těchto částic při průletu křemíkem. Volba energie je pak ovlivněna zejména tloušťkou součástky a požadovaným profilem poruch, který modifikuje příslušné elektrické parametry.

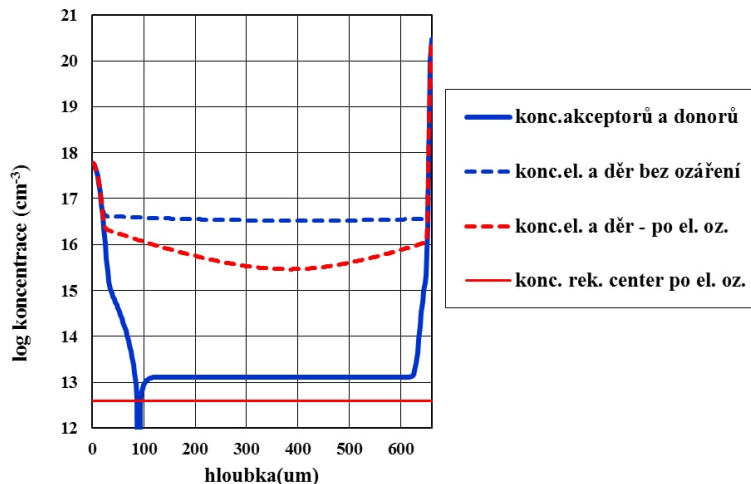


Obrázek 2.5: Koncentrační profil zastavených elektronů v křemíku pro různé velikosti energie [4].

Hlavním cílem homogenního snížení doby života nositelů v diodě je snížení náboje závěrného zotavení Q_{rr} na požadovanou hodnotu a nastavení optimální kombinace propustného napětí V_f , komutačních ztrát E_{rec} a špičkového závěrného proudu i_{rrM} pro danou aplikaci. Při ozáření vysokoenergetickými elektrony (v uvedeném příkladu se jedná o energii $\geq 2\text{MeV}$) se snižuje koncentrace volných elektronů a děr v propustném stavu, jak je znázorněno na obr. 2.6. Snížení doby života potlačuje vznik oscilací při nižších dávkách ozáření. Při vyšších dávkách ale v důsledku rychlejšího kolapsu plazmy v nízko dotované

2. POUŽÍVANÉ KONSTRUKCE RYCHLÝCH VÝKONOVÝCH DIOD S MĚKKOU KOMUTACÍ

oblasti N vrstvy hrozí vznik oscilací, jak je znázorněno na obrázcích 2.8 a 2.9.



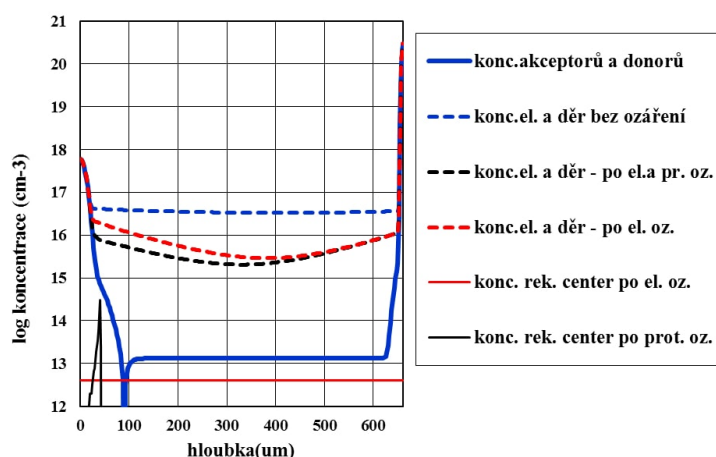
Obrázek 2.6: Rozložení volných elektronů a děr v propustném stavu v N^- vrstvě pro $J = 5,45 \text{ A/cm}^2$ 25° C u diody před (modrá přerušovaná čára) a po elektronovém ozáření (červená přerušovaná čára); homogenní koncentrace vybraných rekombinačních center vzniklých el. ozářením je zobrazena červenou plnou čarou.

Při ozařování elektrony s nižší energií ($< 2 \text{ MeV}$) skrz anodovou vrstvu, lze vytvořením gradientu rekombinačních center snížit koncentraci nosičů u anody a tím zvýšit měkkost komutace. Současně to vede ke snížení koncentrace radičních poruch ležících uprostřed zakázaného pásu energií ve prospěch radičních poruch ležících blízko vodivostního pásu křemíku, což vede na snížení svodových proudů a možnost zvýšení maximální pracovní teploty. Uvedená změna poměru koncentrací rekombinačních hladin pro nízké energie elektronového ozařování ale způsobuje vznik silného záporného teplotního koeficientu propustného napětí diody. To vede ke zhoršené přetížitelnosti nárazovým proudem, snížené dlouhodobé stabilitě diod při významném tepelném zatížení, což znemožňuje spolehlivé paralelní řazení [21, 22, 23].

Na rozdíl od elektronového ozáření je možné lehké ionty, jako jsou protony a jádra helia, implantovat s relativně nízkou energií do požadované hloubky křemíku s přesností několika μm . Jedná se o implantaci s použitím urychlovače částic s energií v rozmezí jednotek MeV pro vodík a několikanásobek pro helium. Vytvořený koncentrační profil poruch má energetické hladiny v horní polovině zakázaného energetického pásu křemíku. Tyto poruchy se chovají buď jako generačně rekombinační centra nebo energetické pasti [24, 25].

Kombinací koncentračního profilu akceptorů a profilu rekombinačních center je možno dosáhnout požadované rozložení plazmy jak ukazuje obrázek simulace 2.7. Technologie s řízenou axiální dobou života se používá od půlky devadesátých let pod názvem controlled axial lifetime (CAL) diode [26].

Při ozáření lehkými ionty je vhodné zvolit takovou hloubku, že před maximální koncentrací iontů v křemíku je stlačující vrstva s integrálem koncentrace akceptorů splňující podmínky pro diodu typu EMCON. Při této kombinaci ozáření a koncentračního profilu elektrické pole nepronikne do ozařované oblasti a díky tomu je možné dosahovat nízký závěrný proud. [27, 28]

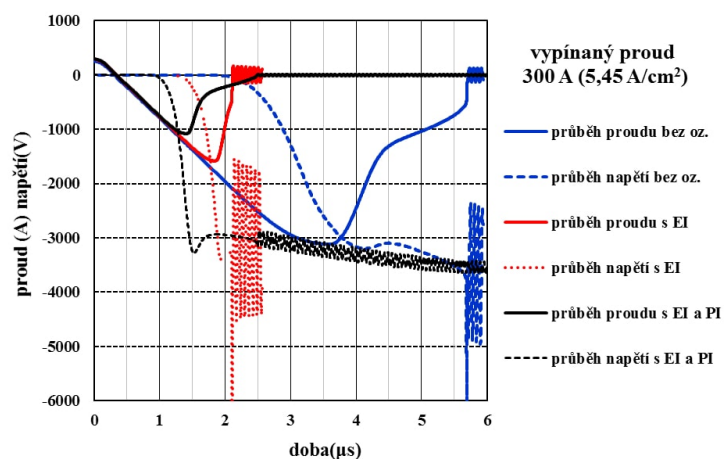


Obrázek 2.7: Rozložení volných elektronů a děr v propustném stavu pro $J = 5,45 \text{ A/cm}^2$ 25° C u diody před elektronovým ozářením (modrá přerušovaná čára), po elektronovém ozáření (červená přerušovaná čára) a po ozáření protony (černá přerušovaná čára). Homogenní koncentrace rekombinačních center vzniklých el. ozářením je zobrazena červenou plnou čarou a center po protonovém ozáření je zobrazena plnou černou čarou.

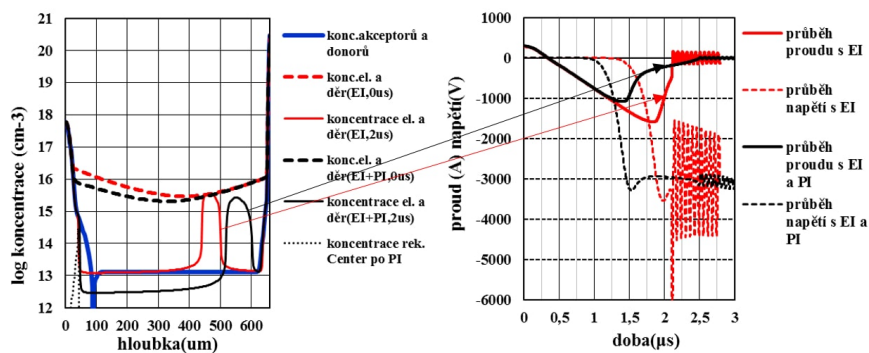
Potlačení doby života v anodové vrstvě ozářením lehkými ionty, jak je znázorněno na obr. 2.9, přináší měkčí průběh závěrného zotavení při vypínání diody do vysokého pracovního napětí a při nízké proudové hustotě.

Implantace iontů vodíku a helia do větších hloubek se také používá k regulaci doby života ve vrstvě N^- za účelem potlačení dynamické laviny [29, 30], způsobené proudem děr procházejícím přes oblast prostorového náboje u anody. Pro vytvoření maxima v takové hloubce je potřeba vysoké energie. Například pro hloubku cca $400 \mu\text{m}$ v Si je potřeba energie 5MeV .

2. POUŽÍVANÉ KONSTRUKCE RYCHLÝCH VÝKONOVÝCH DIOD S MĚKKOU KOMUTACÍ



Obrázek 2.8: Průběh komutace před ozářením (proud-modrá plná, napětí-modrá přerušovaná), po elektronovém ozářením (proud-červená plná, napětí-červená přerušovaná) a po ozářením protony (proud-černá plná, napětí-černá přerušovaná) při 25° C.

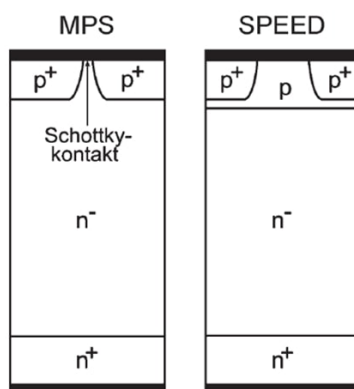


Obrázek 2.9: Rozložení volných elektronů a děr na začátku komutace (0 us) a v čase 2 us u diody s el. oz. a u diody s ozářením elektrony i protony (vlevo). Vpravo je průběh komutace obou diod.

2.3 Nastavení elektrických parametrů optimalizací dvourozměrného dotačního profilu

V kapitolách 2.1 a 2.2 byly popsány metody, které nastavují prostorové rozložení volných nositelů náboje v propustném stavu před následnou komutací jednorozměrným koncentračním profilem ionizovaných příměsí a rekombinačních center. Rozložení plazmy je možné také regulovat laterálním členěním dotačních profilů anodových nebo katodových vrstev. Tento přístup bývá označován jako „Emitter Engineering“.

2.3.1 Možnosti návrhu na straně anody



Obrázek 2.10: Struktury na anodové straně pro samoregulaci emitorové injekční účinnosti [3].

Motivací pro vývoj struktur Merged P-i-N Schottky (MPS) a Self-adjusting P Emitter Efficiency (SPEED) byla možnost využít pro malé proudové hustoty v propustném stavu, kdy jsou největší nároky na měkký průběh komutace buď nízkou koncentrací P vrstvy (SPEED) nebo Schottkyho kontakt. Nízkodotovaná vrstva typu P má velmi malou injekční účinnost děr a Schottkyho kontakt prakticky žádnou [31]. Tím se dosáhne nízké koncentrace plazmy v sepnutém stavu na anodové straně bez zavedení rekombinačních center, což činí uvedený princip velmi atraktivním [32]. Při vysokých proudových hustotách se pak uplatňuje převážně injekce z anodového emitoru s vysokou koncentrací [33]. Emitor s vysokou koncentrací příměsí zajišťuje nízké propustné ztráty a vysokou proudovou přetížitelnost.

Struktury na anodové straně ale zásadně neřeší děje určující měkkost diody, které se odehrávají v blízkosti katodového emitoru, nezabraňují vytvoření OPN na katodové straně ani nepomáhají udržet plazmu až do konce komutace. Kromě toho se ukázaly problematické z hlediska dosažení robustnosti při vypínání velkých proudových hustot v režimu rychlé komutace. To je dáno

2. POUŽÍVANÉ KONSTRUKCE RYCHLÝCH VÝKONOVÝCH DIOD S MĚKKOU KOMUTACÍ

tím, že v oblasti zakřivení P vrstvy (p-n přechodu) dochází ke zhušťování čar proudové hustoty, což se negativně projevuje při vzniku dynamického lavinového jevu a následném ukotvení vzniklých proudových filamentů. Dalším problémem konceptu MPS je absence nízkodotované vrstvy typu P před anodou (tzv. P-buffer), která snižuje intenzitu elektrického pole na anodovém přechodu při rychlé komutaci a posouvá nástup dynamického lavinového jevu k vyšším provozním napětím, resp. proudovým hustotám. Diody demonstrováné v této práci tuto vrstvu obsahují, což zajišťuje jejich vysokou dynamickou odolnost.

2.3.2 Možnosti návrhu na straně katody

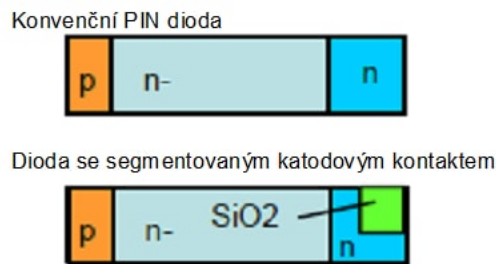
Děje v průběhu komutace odehrávající se v blízkosti katody jsou rozhodující jak pro měkkost komutace, tak i pro širokou oblast dovolené činnosti SOA. Úpravou stlačující vrstvy N a katodové vrstvy N^+ lze změnit rozložení propustného proudu nebo množství náboje v závěru komutace. Pomocí těchto metod, které neumožňují přidávání potřebného náboje v závěru (týlu) komutace, k zabránění prudkého poklesu proudu a následným napěťovým oscilacím, není možné výrazně snížit tloušťku Si destičky a tudíž ani statické a vypínací ztráty. Pro účely této práce je označujeme jako metody „pasivní“.

Ve vrstvě katody lze ale vytvořit struktury, které v závěru komutace aktivně přidávají náboj, a tím ochrání diodu před náhlým přerušením proudu a napěťovými překmity. V případě použití „aktivních“ metod lze docílit měkké komutace i na tenčích diodách a výrazného snížení energetických ztrát dosáhnout.

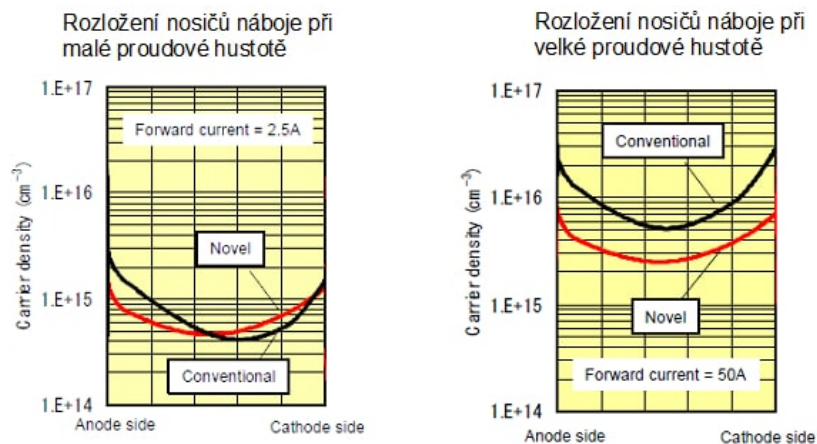
2.3.2.1 Pasivní metody

Příkladem pasivní metody je tzv. segmentace katodového kontaktu. Rozdělením kontaktní vrstvy na straně katody lze při správných poměrech rozměrů změnit rozložení náboje při malých proudových hustotách tak, že dioda bude mít menší napěťové překmity. Segmentaci katodového kontaktu lze provést např. vyčleněním tenké oxidové vrstvy před nanesením kontaktní vrstvy na katodu, jak je zobrazeno na obr. 2.11. Segmentace katodového kontaktu při správné konfiguraci rozměrů pomáhá nastavit co nejvýhodnější průběh rozložení plazmy v propustném stavu při malých proudových hustotách (obr. 2.12) a tím vylepšuje měkkost [5].

2.3. Nastavení elektrických parametrů optimalizací dvourozměrného dotačního profilu



Obrázek 2.11: Schématické znázornění rozdílu konvenční PIN diody a diody se segmentovaným katodovým kontaktem [5].



Obrázek 2.12: Průběh rozložení plazmy v propustném stavu v N^- vrstvě při malých a velkých proudových hustotách pro diodu se segmentovaným katodovým kontaktem (červená čára) a konvenční diodu (černá) [5].

2.3.2.2 Aktivní metody

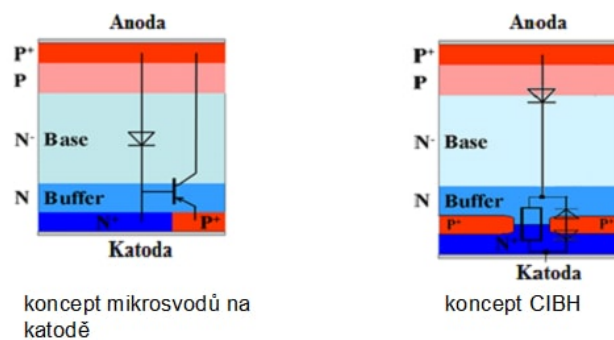
Na rozdíl od výše uvedených pasivních metod, které jsou založeny na interakci plazmy v objemu diody s dotačním a rekombinačním profilem, jsou aktivní metody založeny na principu integrace struktur na katodové straně, které během komutace dodávají dostatečné množství volných nositelů náboje do oblasti katodového přechodu NN^+ tak, aby nedošlo ke vzniku katodové OPN, prudkému poklesu proudu a následným napěťovým překmitům. Výsledkem je pak možnost zásadně ztenčit bázi diody a dosažení lepší technologické křivky při zachování původní měkkosti závěrného zotavení.

V případě členění katodové vrstvy znázorněné na obr. 2.13 vlevo je do katodové oblasti vložen mikrosvod vodivosti typu P^+ , čímž vlastně dochází k integraci PNP tranzistoru paralelně k původní diodové struktuře P i N. Mikrosvod

2. POUŽÍVANÉ KONSTRUKCE RYCHLÝCH VÝKONOVÝCH DIOD S MĚKKOU KOMUTACÍ

injektuje díry a posiluje a udržuje vrstvu plazmy na straně katody během rozšiřování oblasti prostorového náboje. K injekci děr dochází v důsledku proudu elektronů z vrstvy plazmy v blízkosti P vrstvy mikrosvodu. Tím je zabráněno rychlému přerušení proudu po vyčerpání plazmy a proud děr z mikrosvodu zajišťuje plynulý pokles proudu a brání vzniku překmitů.

Členění podle obr. 2.13 vlevo bývá v literatuře označováno pod různými názvy, např. Field Charge Extraction (FCE) [34, 35] nebo RFC (Relaxed Field of Cathode) [36, 37, 38]. Vzhledem k tomu, že tyto názvy nevystihují přesně podstatu funkce integrovaného PNP tranzistoru, je tato struktura dále jednoduše označována jako mikrosvod na katodě.

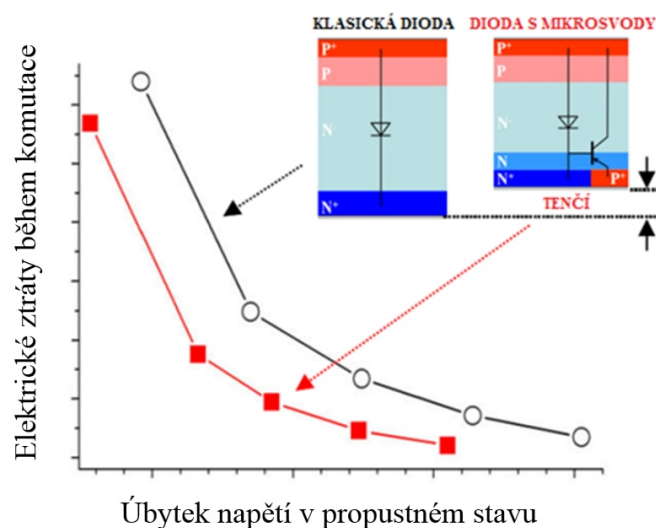


Obrázek 2.13: Vlevo: koncept mikrosvodů na katodě. Vpravo: koncept CIBH

Na obr. 2.13 vpravo je znázorněn koncept v literatuře zavedený pod označením Controlled Injection of Backside Holes (CIBH), což lze volně přeložit jako „řízená injekce ze zadní strany“ [33, 39]. Tato struktura také vytváří nadbytečnou koncentraci děr při komutaci jako je tomu u konceptu s mikrosvodem na katodě. Nejedná se ale o injekci děr, nýbrž o jejich generaci v procesu nárazové ionizace v silném elektrickém poli. Zkratka CIBH velmi dobře vystihuje princip tohoto konceptu, zároveň však i konceptu katodových mikrosvodů. Za účelem odlišení obou struktur se budeme u prvně popsaného konceptu držet názvu mikrosvod.

Rychlé diody s katodovými mikrosvody a funkce mikrosvodu během komutace

Motivací pro zabudování dodatečné struktury PNP tranzistoru do diody (P vrstva na povrchu katody označovaná jako mikrosvod) je možné zmenšení tloušťky diody, které vede na požadované snížení propustných a komutačních ztrát, jak je schematicky znázorněno pomocí technologických křivek na obr. 3.1.



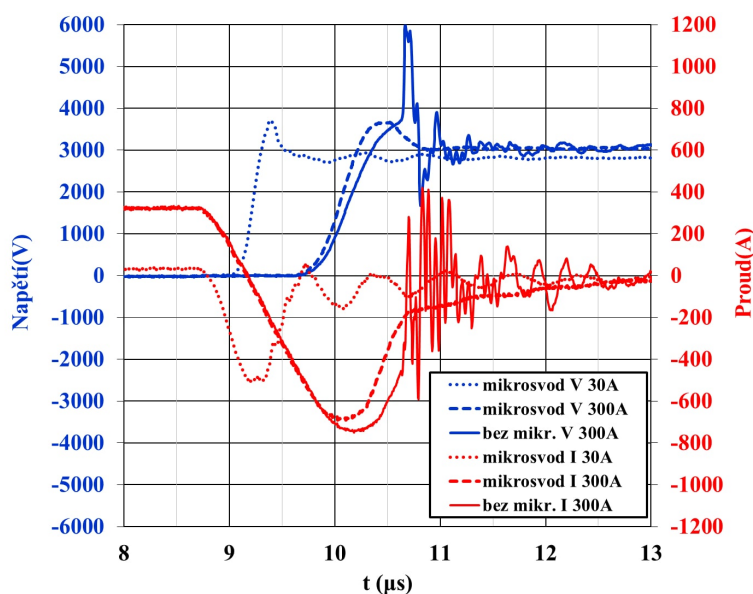
Obrázek 3.1: Důvod pro použití mikrosvodů je snížení elektrických ztrát při provozu.

U klasického návrhu rychlé diody není možné tento přístup použít z důvodu vzniku napěťových překmitů během komutace, jak ilustrují měření na obrázku

3. RYCHLÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY A FUNKCE MIKROSVODU BĚHEM KOMUTACE

3.2. Dioda bez mikrosvodu s tloušťkou $600 \mu\text{m}$ má při vypnutí proudu 300 A napěťový překmit až 6000V a při vypínání nižšího proudu by již došlo k její destrukci. Naopak dioda s mikrosvodem může vypínat proudy až do nejnižších možných hodnot. V uvedeném případě se jedná o proud 30 A, který představuje nejnižší nastavitelnou hodnotu dostupného testeru. V průmyslové praxi jsou pak diody testovány z nulového proudu.

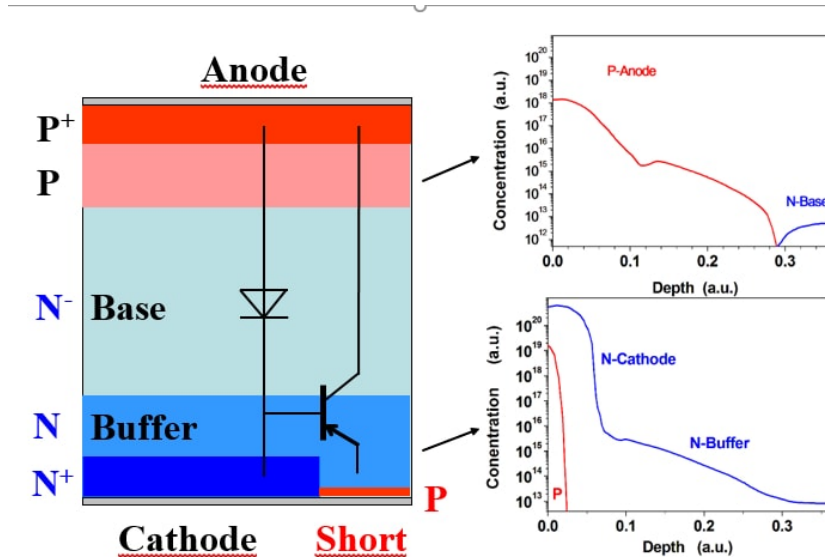
Charakteristickým rysem diod s mikrosvody je dominantní týlový proud při vypínání vyšších hodnot proudů, v tomto případě 300 A. Jedná se o důkaz, že zabudované mikrosvody jsou skutečně funkční. U klasické diody naopak tento týl chybí a místo něj vidíme strmý pokles proudu následovaný oscilacemi.



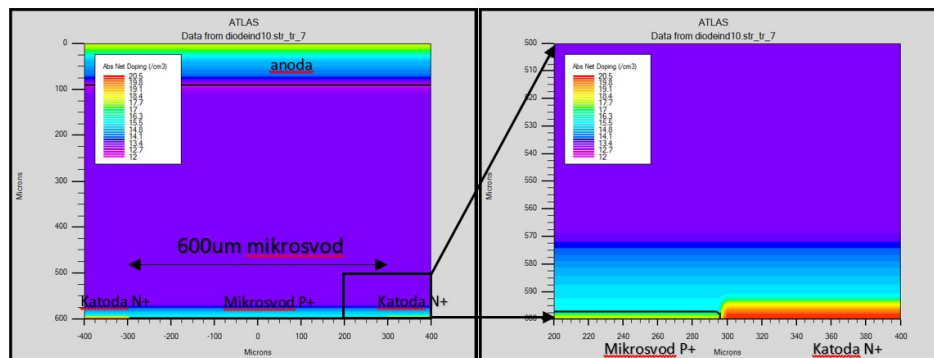
Obrázek 3.2: Průběhy napětí a proudu při komutaci diod s tloušťkou $600 \mu\text{m}$ pro diodu bez mikrosvodů naměřené při pokojové teplotě (plná čára - vypínaný proud 300 A) a pro diodu s mikrosvody (přerušovaná čára - vypínaný proud 300 A, tečkovaná čára - vypínaný proud 30 A).

Jak již bylo naznačeno výše, je struktura diody s mikrosvody na katodové straně modifikována tak, že N^+ vrstva katodového emitoru je po úsecích přerušena a nahrazena vrstvou vodivosti typu P^+ , tzv. mikrosvody. Vložením P^+ zkratů dojde k vytvoření paralelní tranzistorové P-N-P struktury k původní diodě P-i-N, jak je dále rozvedeno na obr. 3.3 a 3.4. Z uvedených koncentračních profilů vyplývá, že anodová strana se od klasické diody neliší. Na katodové straně je kromě mikrosvodu P^+ vložena ještě vrstva stlačující elektrické pole (buffer), která zajišťuje, že bude dosaženo stejné hodnoty průrazného napětí jako u klasické diody bez mikrosvodů. Struktura z obr. 3.3 a 3.4 se periodicky opakuje v trojrozměrném prostoru s rozměry, které mají zajišťovat optimální fungování. Princip a návrh parametrů jednotlivých vrstev je podrobně rozbí-

rán v dalších kapitolách.



Obrázek 3.3: Schematický náčrt řezu diody s mikrosvodem (vlevo) a příklady koncentračního profilu anody (vpravo nahoře) a koncentračního profilu katody se stlačující vrstvou vodivosti typu N a vrstvou mikrosvodu typu P (vpravo dole).



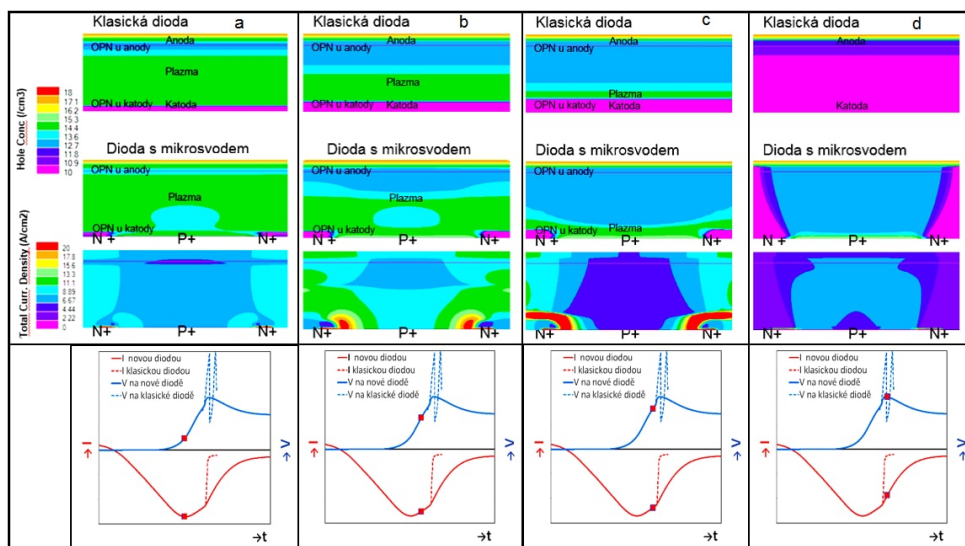
Obrázek 3.4: Příklad simulovaného řezu diodou s mikrosvodem s průměrem 600 μm obklopeným vrstvou katody o šířce 100 μm .

Na obr. 3.5 dole je schematické porovnání průběhů proudu a napětí při komutaci klasické diody a diody s mikrosvodem ve čtyřech významných po sobě jdoucích časových okamžicích. Na prvním řádku jsou pak zobrazeny simulované průběhy proudové hustoty a koncentrace děr na řezu klasické diody. Zelená barva představuje koncentraci děr přibližně 10^{15} cm^{-3} . Koncentrace děr se v průběhu komutace postupně zmenšuje na hodnotu odpovídající dotaci báze a nižší (obr. 3.5a-c). Na posledním obrázku klasické diody nahoře

3. RYCHLÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY A FUNKCE MIKROSVODU BĚHEM KOMUTACE

vpravo je celá vrstva plazmy vyčerpána a na časové ose komutace (obr. 3.5d dole) je vyznačen prudký pád proudu způsobující napěťové zákmity. Na prostorovém rozložení koncentrace děr na obr. 3.5 a-c je významná existence OPN jak na straně anody, tak i katody, a to po celé délce anodového a katodového kontaktu. Stojí za připomenutí, že právě prudké pohlcení posledního zbytku plazmy oběma OPN současně je příčinou prudkého poklesu proudu vedoucího na napěťové oscilace.

Pod obrázkem klasické diody je zobrazen řez diody s mikrosvodem. Druhý řádek představuje rozložení koncentrace děr a pod ním je navíc rozložení proudové hustoty v řezu diody. P⁺ vrstva mikrosvodu je uprostřed a na okrajích je N⁺ vrstva katody. Rozměry jednotlivých vrstev lze nalézt na obr. 3.4.

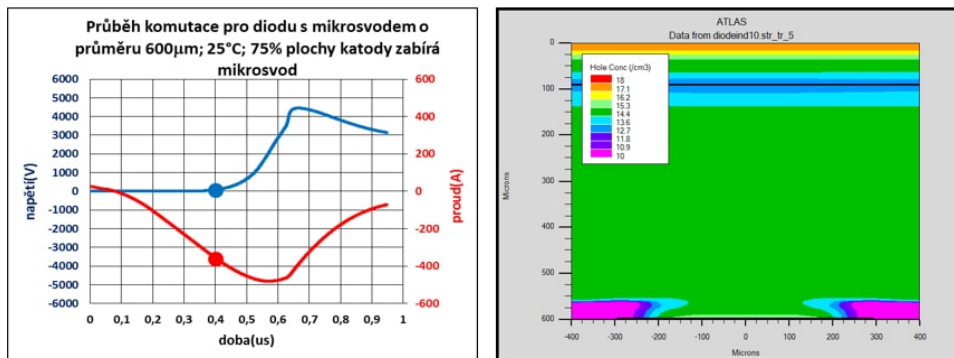


Obrázek 3.5: Porovnání průběhu komutace klasické diody a diody s mikrosvodem

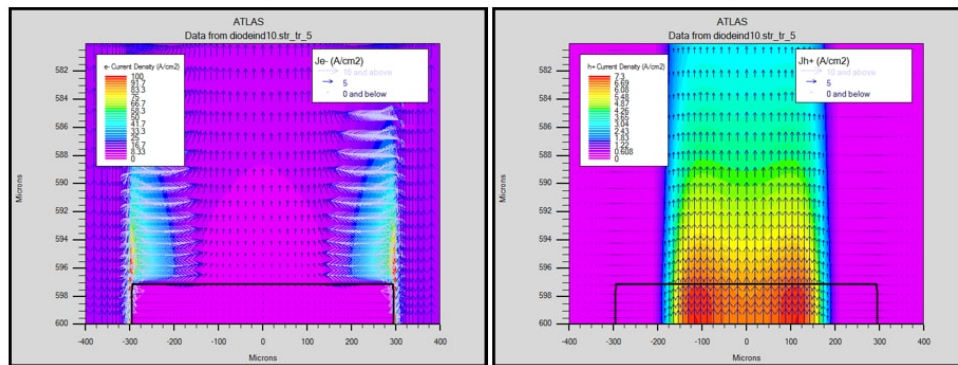
Na obr. 3.6 vpravo je zvětšený obrázek rozložení koncentrace děr v čase 0,4 μ s včetně měřítek z řezu na obr. 3.4 vlevo. Zde je možné pozorovat souvislou OPN v okolí anodového PN přechodu. Protože mikrosvod na katodové straně injektuje díry, je OPN u katody přerušena a oblast neutrální plazmy se zanedbatelnou intenzitou elektrického pole je zde zachována. Další fáze rozšiřování OPN u anody a katody jsou detailně zobrazeny na obr. 3.7 až 3.9.

Díry z plazmy jsou odsávány směrem k anodě a elektrony proudí směrem ke katodě. Elektrony přitom obtékají mikrosvod (obr. 3.7 vlevo) a na přechodu mikrosvodu vzniká napětí. Při překročení prahového napětí začne injekce děr z mikrosvodu (obr. 3.7 vpravo).

OPN u anody se s rostoucím časem postupně rozšiřuje. V čase 0,6 μ s je u katodové strany stále lokalizována pouze v úzké vrstvě nad N⁺ katodou. Injekcí děr z mikrosvodu je plazma propojena až k povrchu diody na katodové



Obrázek 3.6: Průběh napětí a proudu během komutace diody s mikrosvodem o průměru 600 μm (vlevo), vpravo je rozložení koncentrace děr v čase 0,4 μs.



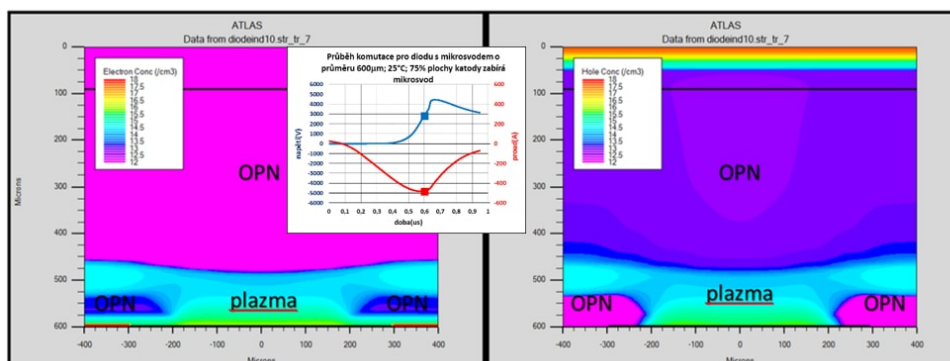
Obrázek 3.7: Detail mikrosvodu z obr. 3.6 (čas 0,4 μs). Elektrony proudí směrem ke katodě a obtékají mikrosvod (vlevo). Díry injektují z mikrosvodu (vpravo).

straně (obr. 3.8) a zabraňuje prudkému přerušení proudu.

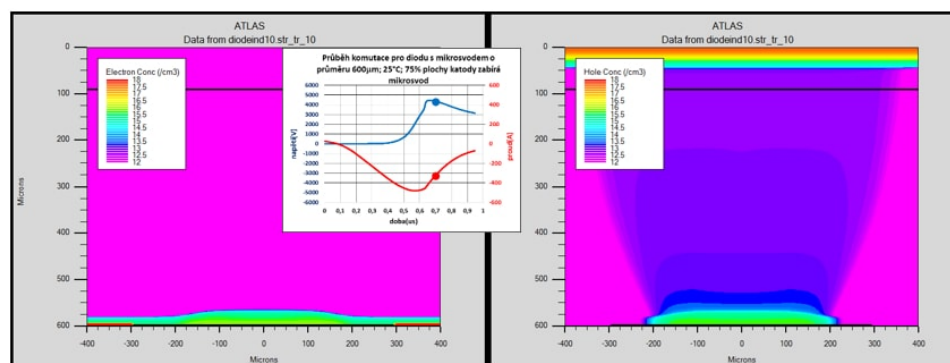
Po závěrečném kolapsu plazmy dochází k injekci děr z mikrosvodu. U správně navržené diody zaplavují díry téměř celou plochu diody a brání přerušení proudu a vzniku překmitů, jak je patrné z obr. 3.9.

Integrace katodového mikrosvodu může vedle výše popsané výhody měkké komutace způsobit několik problémů. Jedním z nich je zvýšení ztrát v sepnutém stavu, které rostou se zvětšující se plochou, kterou P⁺ vrstva na katodě zaujímá a kterou odebrala z původní plochy N⁺ katody. Snížená celková injekční účinnost katody se pak projeví zhoršenou technologickou křivkou. Čím větší je použitá plocha správně navržených mikrosvodů, tím měkčí je dioda za nejhorších provozních podmínek a tím horší je zároveň technologická křivka energetických ztrát. Kompenzace tohoto problému dala vzniknout obtížnému optimalizačnímu úkolu, který bylo nutné řešit.

3. RYCHLÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY A FUNKCE MIKROSVODU BĚHEM KOMUTACE



Obrázek 3.8: Rozložení koncentrace elektronů (vlevo) a děr (vpravo) v řezu diody v čase 0,6 μ s.



Obrázek 3.9: Rozložení koncentrace elektronů (vlevo) a děr (vpravo) v řezu diody v čase 0,7 μ s.

Přidání tranzistorové struktury do struktury diody dále přináší nebezpečí sníženého průrazného napětí ve statickém režimu. I když je vhodným návrhem dotačních profilů dosaženo shodné úrovně průrazného napětí jako ve výchozí struktuře klasické diody, stále hrozí problém vysokých závěrných proudů za vysokých teplot. V našem případě se jedná o teploty 140° C a výše, které jsou určující při testování dosažení dlouhodobé blokovací stability. Také tato skutečnost znamená omezení manérovacího prostoru pro návrh mikrosvodů. Vlivy parametrů mikrosvodu na statické a dynamické vlastnosti diody a z nich vyplývající strategie návrhu jsou proto podrobněji probrány v 5 kapitole.

Metodika návrhu velkoplošné diody s katodovými mikrosvody

Návrh diody s mikrosvody je trojrozměrný problém, který přesahuje možnosti intuitivního návrhu s využitím existujících analytických modelů. Vzhledem ke složitosti okrajových podmínek nebylo možné odpovídající vhodný model vytvořit ani na dvourozměrné úrovni a bylo proto nutné přistoupit k intenzivnímu využití počítačové simulace v kombinaci s rozsáhlými experimenty.

Byla proto postupně provedena řada experimentů na osmi výrobních dávkách (dohromady 400 diod), které měly za cíl získat naměřené průběhy pro různé modifikace technologického zpracování v procesu jeho postupné optimalizace. Jednalo se primárně o optimalizaci dotačních profilů vrstev stěžejních pro správnou funkci mikrosvodů v širokém rozsahu pracovních podmínek spolu s optimalizací tloušťky diody. Vedle optimalizace ve vertikálním směru byla velká pozornost věnována laterálnímu uspořádání struktur na katodové straně, velikosti mikrosvodů, šířce katodové vrstvy, poměru ploch N^+ katody a plochy mikrosvodu a dalším parametrům laterálního návrhu.

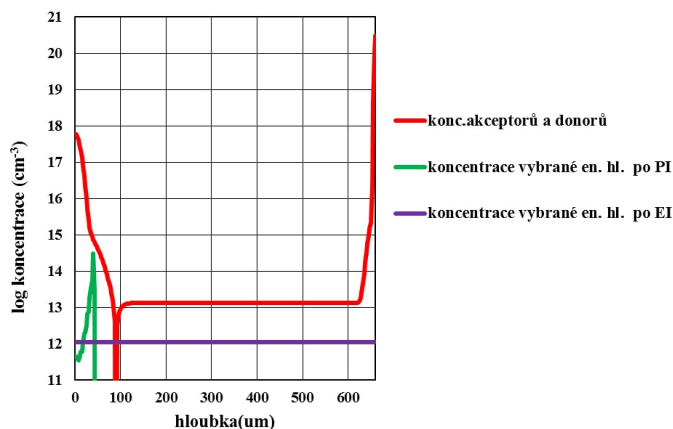
Naměřené výsledky byly použity pro vytvoření a kalibraci modelu rychlé diody v prostředí Technology CAD společnosti Silvaco tak, aby bylo možné nejen vysvětlit složité elektrodynamické efekty probíhající při komutaci diod s mikrosvody, ale aby se tyto simulace co nejvíce kvantitativně shodovaly s reálnými výsledky měření. Tímto postupem pak byla vypracována návrhová pravidla potřebná pro konstrukci velkoplošných diod nové generace v obvodech s IGCT s nižšími elektrickými ztrátami a bezpečným provozem spojeným s omezením napěťových překmitů při vypínání v co nejširším rozsahu pracovního režimu.

4.1 Dvourozměrný model struktury diody

Pro vytvoření modelu struktury diody byl použit simulační součástkový program „Atlas“ využívající metodu konečných prvků s drift-difúzní aproximací proudových hustot.

Kalibrace struktury byla provedena na základě měřených statických a dynamických parametrů referenční diody bez mikrosvodů a měřených parametrů na diodách s mikrosvody. Měřeny byly velkoplošné kruhové diody s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 o jmenovitém závěrném napětí $4,5 \text{ kV}$, které měly stejný koncentrační profil anodové vrstvy a stejnou koncentrací základního materiálu. Koncentrační profil katodové a stlačující vrstvy (buffer) byly předmětem podrobných experimentů.

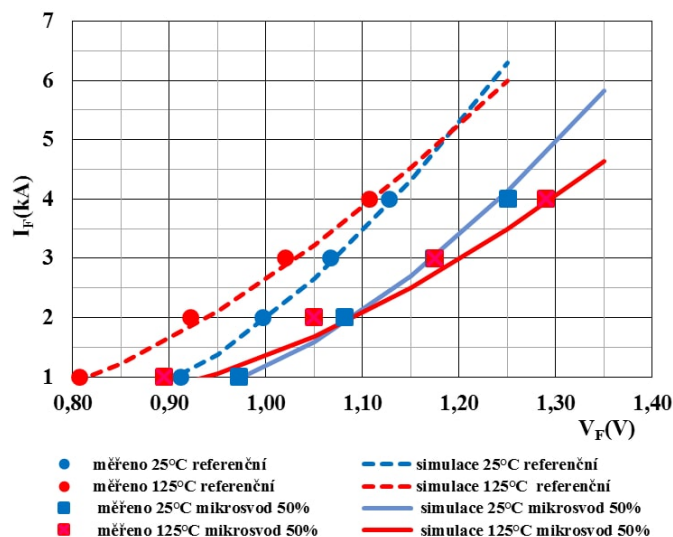
Diody byly dále ozářeny protony do anodové strany s maximem poruch v hloubce $40 \mu\text{m}$ od povrchu křemíku anody. Po ozáření protony byly diody ozářeny čtyřmi různými dávkami elektronů v řádu jednotek kGy a s energií jednotek MeV , která zaručuje dobrou homogenitu rozložení rekombinačních center v celém objemu diody a zároveň příznivý poměr dominantních rekombinačních center. Základními vstupní parametry simulačního modelu elektronového ozáření jsou energetické hladiny, záchytný průřez elektronů a děr, stupeň degenerace a koncentrační profily rekombinačních center. Velikost energetických hladin a záchytných průřezů není nápní této práce, a proto byla převzata z dostupné literatury [40, 41, 42]. Použitý koncentrační profil akceptorů, donorů a vybraných rekombinačních center referenční diody bez mikrosvodů je na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Koncentrační profily akceptorů, donorů a vybraných rekombinačních center po protonovém a elektronovém ozáření pro simulaci.

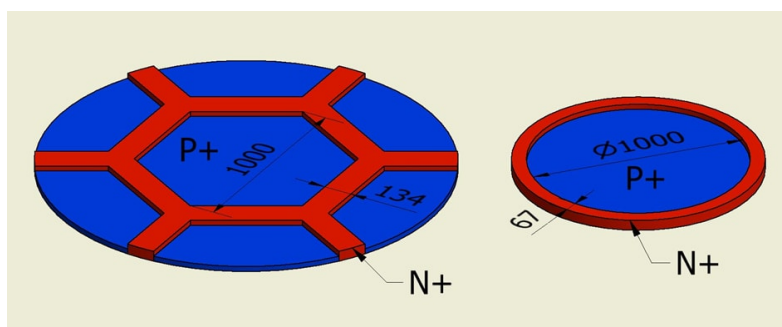
Nastavení koncentrací jednotlivých rekombinačních center bylo provedeno tak, aby naměřené a simulované propustné voltampérové charakteristiky před a po ozáření protony a elektrony byly v kvantitativní shodě. Porovnání vybra-

ných naměřených a simulovaných průběhů VA charakteristik referenční diody je uvedeno na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Příklad naměřené a simulované propustné voltampérové charakteristiky diody bez a s mikrosvodem (P^+ zabírá 50% katodové plochy) před a po ozáření protony použité pro nastavení koncentrací rekombinačních center po protonovém ozáření.

P^+ vrstva reálné struktury mikrosvodu na katodové straně je v laterálním směru tvořena vnitřkem hexagonu a N^+ vrstva katody jejím obvodem, jak schematicky ukazuje obr. 4.3 vlevo. Tohoto členění je v procesu výroby struktury dosaženo difuzí fosforu přes oxidovou masku vyrobenou běžným fotolitografickým postupem.



Obrázek 4.3: Vlevo: členění P^+ a N^+ vrstvy na straně katody. Vpravo: zjednodušení struktury použité pro dvojrozměrnou simulaci v cylindrických souřadnicích.

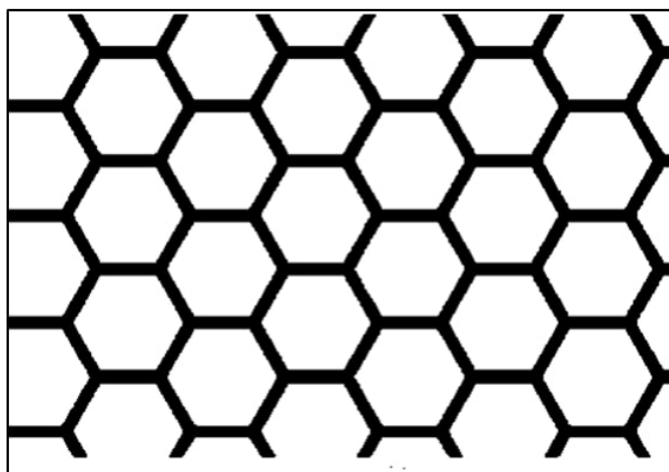
4. METODIKA NÁVRHU VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY

Mikrosvody ve tvaru hexagonu byly zvoleny z důvodu potřeby dosažení co největší hustoty mikrosvodů na katodě. Hexagon zároveň zajišťuje, že katodová vrstva N^+ má po celé ploše katody konstantní šířku, která se ukázala jako důležitý parametr pro optimální funkci mikrosvodu a je diskutována v samostatné kapitole níže.

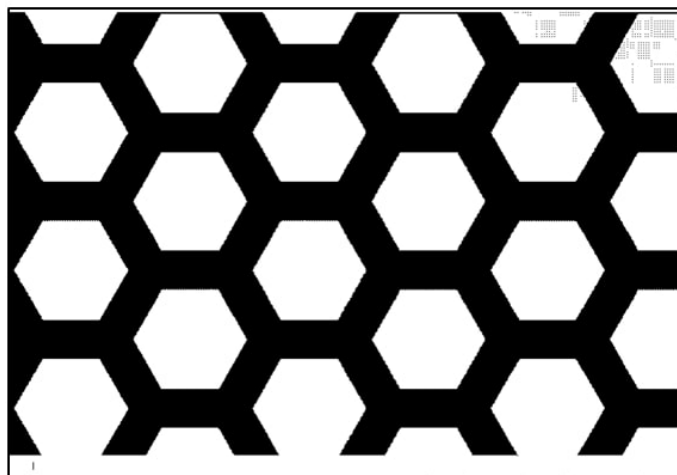
Pro výpočet simulací bylo nutné použít následující zjednodušení: buňka hexagonální byla nahrazena diodou s cylindrickým rozměrem (obr. 4.3 vpravo). Počet hexagonálních buněk v katodové masce byl použit pro přepočítání plochy do cylindrických souřadnic v simulaci. Části masek použitých pro členění N^+ vrstvy katodového emitru jsou ukázány na obr. 4.4 až 4.6.

dioda	počet buněk	Průměr mikrosvodu (μm)	šířka katody (μm)	plocha buňky (mm^2)	plocha mikrosvodu (P^+) na katodě (%)
obr. 4.4	5660	1000	134	1,009987	75
obr. 4.5	3793	1000	359	1,450537	50
obr. 4.6	1891	1000	866	2,734722	25

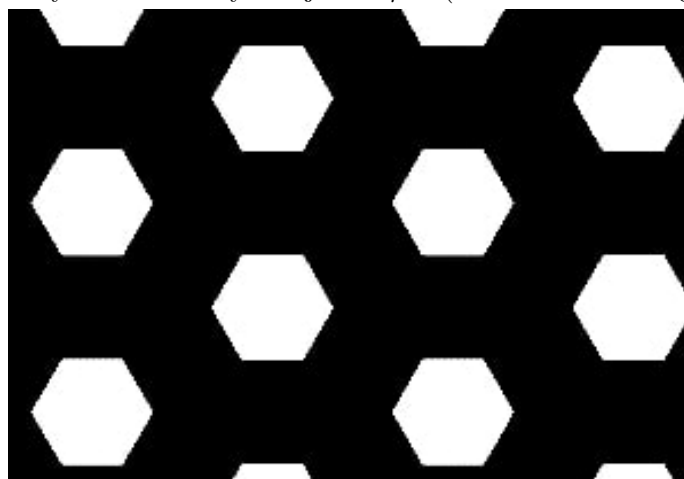
Tabulka 4.1: rozměry hexagonů a počet buněk přítomných na maskách z obr. č. 4.4, 4.5 a 4.6



Obrázek 4.4: Ukázka masky diody pro členění N^+ vrstvy na katodové straně. Průměr opsané kružnice hexagonu je $1000 \mu\text{m}$. Mikrosvod P^+ zabírá 75% katodové plochy. Šířka katody N^+ je $134 \mu\text{m}$ (mezera mezi hexagony).



Obrázek 4.5: Ukázka masky diody pro členění N^+ vrstvy na katodové straně. Průměr opsané kružnice hexagonu je $1000 \mu\text{m}$. Mikrosvod P^+ zabírá 50% katodové plochy. Šířka katody N^+ je $359 \mu\text{m}$ (mezera mezi hexagony).

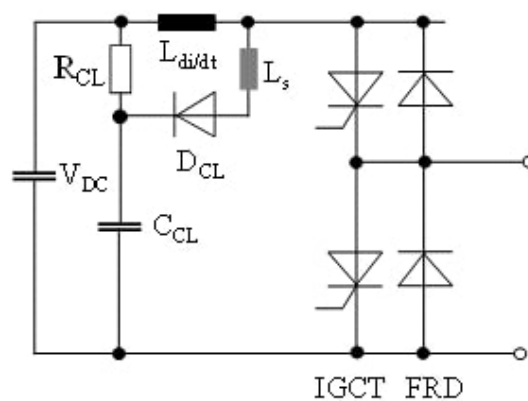


Obrázek 4.6: Ukázka masky diody pro členění N^+ vrstvy na katodové straně. Průměr opsané kružnice hexagonu je $1000 \mu\text{m}$. Mikrosvod P^+ zabírá 25% katodové plochy. Šířka katody N^+ je $866 \mu\text{m}$ (mezera mezi hexagony).

V tabulce 4.1 je uveden popis tří charakteristických variant masek z obr. 4.4 až 4.6. Plocha mikrosvodů byla zvolena v co nejširším rozsahu poté, co bylo experimentálně zjištěno, že plocha pod 25% nepřináší potřebnou měkkost komutace při pokojových teplotách. Plocha 75% pak představuje praktické maximum plochy mikrosvodů, kterou lze na katodu umístit. Kromě průměru mikrosvodu $1000 \mu\text{m}$ byly ještě studovány průměry 300 , 750 a $1500 \mu\text{m}$ s cílem ověření teoretických předpokladů uplatněných při návrhu experimentů.

4.2 Elektrický obvod pro simulaci diody s komutací vnějším napětím

Pro měření průběhu proudu a napětí při komutaci byl použit standardní testovací obvod s tyristory IGCT, (obr. 4.7) který odpovídá podmínkám reálné průmyslové praxe. Stěžejními parametry ovlivňujícími měkkost komutace je stejnosměrné napětí meziobvodového kapacitoru V_{DC} , rozptylová indukčnost omezovacího obvodu L_S , proud diodou v sepnutém stavu a strmost nárůstu komutačního proudu daná indukčností $L_{di/dt}$.



Obrázek 4.7: Schéma testovacího obvodu s IGCT tyristory a rychlými diodami (FRD).

Pro počítačovou simulaci průběhu komutace byl použit obvodový simulátor v simulační konfiguraci „Mixed-mode“, kde tyristor IGCT byl nahrazen proměnným zdrojem napětí V_1 a proměnnými rezistory R_2 a R_3 podle schématu na obr. 4.8.

4.2. Elektrický obvod pro simulaci diody s komutací vnějším napětím

Seznam prvků a zařízení simulace obvodu smíšeného režimu (výkazy prvků):

V₁ zdroj napětí představující stejnosměrné napětí meziobvodového kapacitoru V_{DC}

DUT testovaná dioda FRD

R₁ sériový odpor diody FRD

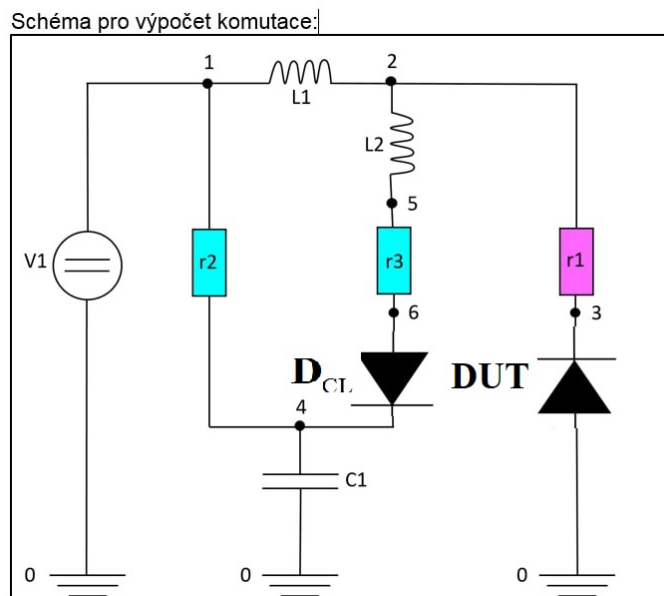
R_{2,3} proměnné rezistory simulující spínací prvek (IGCT) v obvodu

C1 kapacitor upínacího obvodu (clamp capacitor), $c1 = 4 \mu\text{F}$

L1 induktor pro nastavení di_F / dt

D_{CL} omezovací (upínací) dioda

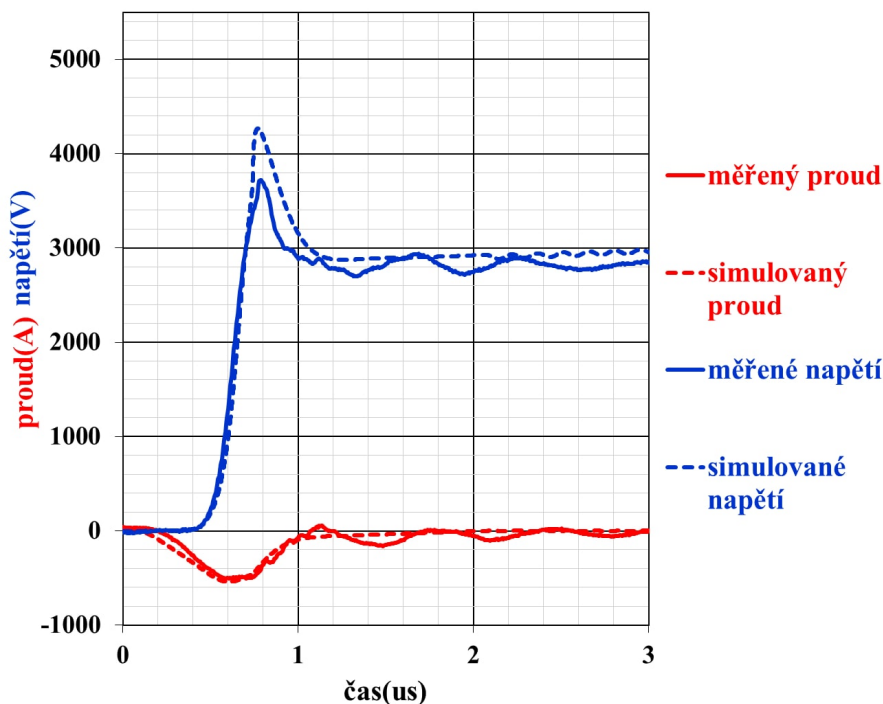
L2 L_σ - rozptylová indukčnost přívodů (stray inductance)



Obrázek 4.8: Schéma obvodu pro simulaci komutace diody.

Na obr. 4.9 a 4.10 jsou porovnány průběhy komutace diod ozářených nejvyšší dávkou elektronů, jejímž cílem je co největší snížení komutačních ztrát. Tato dávka představuje nejhorší možný případ z hlediska napěťových překmitů, protože způsobuje největší snížení koncentrace elektronoděrové plazmy v sepnutém stavu, které vede ke vzniku vysokých intenzit elektrického pole reprezentovaného překmity anodového napětí. Z tohoto porovnání v náročných

podmínkách komutace při vypínání proudu 30 A (přibližně $0,5 \text{ A/cm}^2$) při pokojové teplotě vyplývá, že rozdíly v průbězích jsou dostatečně malé na to, aby bylo možné využít simulace pro odhad trendů vedoucích k přesnějšímu určení návrhových pravidel. Skutečnost, že simulovaný průběh dosahuje v závislosti na rozměru masky vyšší hodnoty překmitu než je tomu u měřených průběhů (500 – 1000 V) je dána tím, že simulační obvod nepostihuje úplně všechny parazitní prvky měřicího obvodu. Je běžnou praxí, že jsou součástky díky tomu navrhovány s rezervou, která kompenzuje případné statistické odchylky v průmyslové praxi ať už výrobní nebo aplikační.

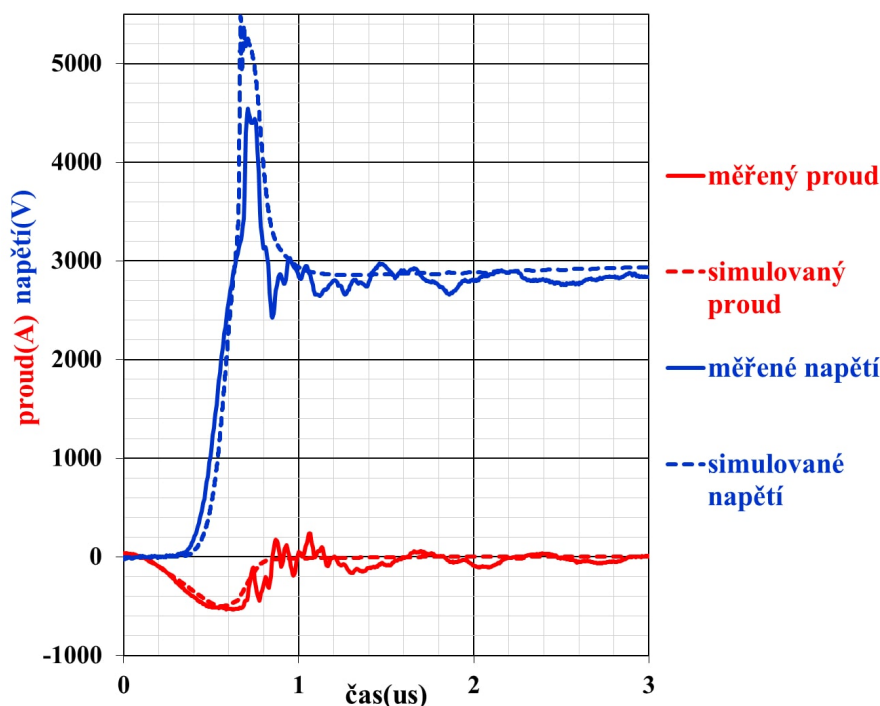


Obrázek 4.9: Porovnání měřených a simulovaných průběhů komutace diody s mikrosvody zabírající 75% katodové plochy s maximální dávkou elektronového ozařování pro teplotu 25° C ; $V_{DC} = 2,8 \text{ kV}$; rozměry masky: průměr hexagonu $1000 \mu\text{m}$, plocha mikrosvodu P^+ 75%, šířka mezery katody N^+ $134 \mu\text{m}$ (maska obr. 4.4); vypínaný proud 30 A; $C_{CL} = 4 \text{ uF}$; $L_{CL} = 600 \text{ nH}$; $R_{CL} = 0,625 \text{ Ohm}$.

4.2.1 Podmínky simulace a návaznost na experimenty

Výše uvedený součástkový a obvodový model byl využit pro porovnání naměřených a simulovaných průběhů parametrů na experimentálních sériích a standardně vyráběných diodách současné generace. Návrh diod, který nebyl pokryt experimenty, byl dopočítán podle výše uvedené kalibrované simulace.

4.2. Elektrický obvod pro simulaci diody s komutací vnějším napětím



Obrázek 4.10: Porovnání měřených a simulovaných průběhů komutace diody s mikrosvody zabírající 25% katodové plochy s maximální dávkou elektronového ozařování pro teplotu 25° C; $V_{DC}=2,8$ kV; rozměry masky: průměr hexagonu 1000 μm , plocha mikrosvodu P^+ 25%, šířka mezery katody N^+ 866 μm (maska obr. 4.6); vypínaný proud 30 A; $C_{CL}=4$ uF; $L_{CL}=600$ nH; $R_{CL}=0,625$ Ohm.

Parametry diod vyrobených podle tohoto návrhu pak byly experimentálně porovnávány se standardně vyráběnou rychlou diodou bez mikrosvodů užívanou v měničích s IGCT tyristory. Toto porovnání je uvedeno v následující kapitole. Základní parametry standardně vyráběné rychlé diody v napěťové třídě 4,5 kV, která představuje referenční vzorek a tedy i referenční návrh jsou uvedeny v tab. 4.2. Výsledky měření na diodách s mikrosvody byly s ohledem na jejich výjimečné parametry porovnány také s klasickou diodou napěťové třídy 5,5 kV. Tato dioda má s výjimkou nižší hodnoty propustného proudu obdobné parametry a není proto v tab. 4.2 uvedena.

Nominální, opakovatelné napětí	4,5 kV
Střední propustný proud	3,0 kA
Pracovní, stejnosměrné napětí meziobvodu	2,8 kV
Průměr součástky	85 mm

Tabulka 4.2: Základní parametry standardně vyráběné diody

4. METODIKA NÁVRHU VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY

V následující 5. kapitole bylo provedeno měření a simulace statických a dynamických parametrů různých návrhových modifikací tak, aby bylo možné v závěru 5. kapitoly stanovit základní návrhová pravidla pro novou generaci diod s mikrosvody. Seznam zkoumaných vlivů na výsledné elektrické parametry diod je uveden v tabulce 4.3.

Měřený nebo simulovaný parametr	rozsah
Tloušťka Si	Tenčí o 0-15%(měřeno); 0-48% (simulováno)
Velikost mikrosvodů	300 až 1500 μm
plocha mikrosvodů	4 až 75%
Šířka katody	100-866mm (pro 25-75% plochy mikrosvodů)
Teplota	25-140° C
Elektronové ozáření	0-10 kGy
Pracovním stejnosměrném napětí	2800-3600 V

Tabulka 4.3: Seznam zkoumaných vlivů designu na výsledné parametry diod

Optimalizace parametrů velkoplošné diody s katodovými mikrosvody

V této kapitole jsou shrnuty experimenty a simulace rychlých diod v obvodu s IGCT pro jmenovité napětí 4,5 kV. Ty jsou následně použity pro odvození stěžejních návrhových pravidel. Rozdělení diskuse na statické a dynamické parametry odpovídá obvyklému přístupu k návrhu polovodičových prvků, kdy bez zajištění statické funkce nelze ověřit funkci dynamickou. V našem případě diod pro IGCT, které musí spolehlivě pracovat v náročném frekvenčním režimu do nejvyšších teplot (minimálně 140° C), je kladen zvýšený důraz již na stabilitu při statické činnosti. Výsledkem optimalizace je pak dioda splňující nároky nejen výrobních „single-shot“ (pulsních) testů, ale i frekvenčních testů v reálných provozních podmínkách.

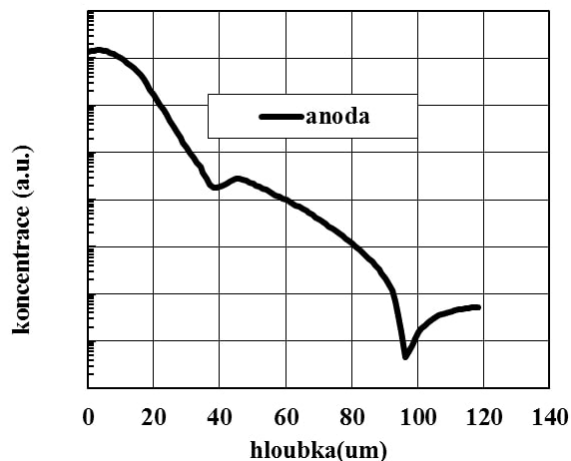
5.1 Statické parametry

5.1.1 Vliv dotačního profilu bufferu vodivosti typu N na svodový proud a průrazné napětí

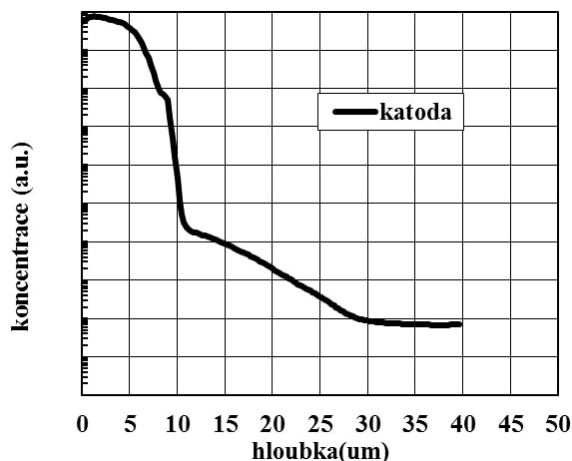
Koncentrační profil celé diody a jeho precizní nastavení je nezbytnou podmínkou správné funkce jak ve statickém režimu, tak při rychlé komutaci. Na obr. 5.1 je naměřený profil anodové vrstvy metodou odporu šíření (Spreading Resistance), který se skládá ze dvou vrstev. Hlubší nízkodotovaná vrstva, označovaná jako buffer, slouží ke snížení elektrického pole na povrchu zakončení blokovacího přechodu na okraji destičky. Zároveň slouží jako vrstva stlačující elektrické pole, resp. buffer brání tomu, aby OPN dosáhla vrstvy s maximální koncentrací radiačních poruch po ozáření protony. Toto ozáření pak nezvyšuje svodový proud a dioda může pracovat do vysokých teplot. Vysocedotovaná vrstva slouží k dosažení nízké hodnoty propustného úbytku napětí a vysoké

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY

hodnoty nárazového proudu. Použitý koncentrační profil byl pro všechny experimenty stejný.



Obrázek 5.1: Změřený koncentrační profil anodové vrstvy.



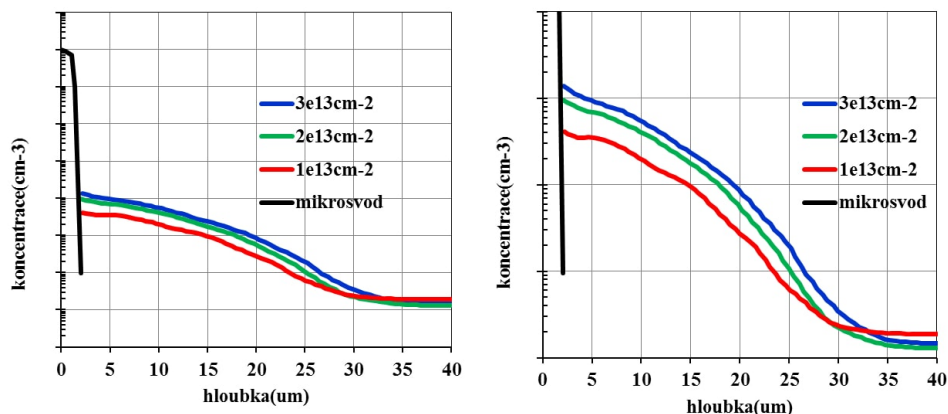
Obrázek 5.2: Změřený koncentrační profil katodové vrstvy.

Na obrázku 5.2 je změřený koncentrační profil příměsí vodivosti typu N na katodové straně, který se také skládá ze dvou vrstev. Vysocedotovaná vrstva emitoru N^+ s tloušťkou nastavenou na $11 \mu\text{m}$ zajišťuje dosažení nízké hodnoty propustného úbytku napětí. Hlubší nízkodotovaná vrstva, má také funkci vrstvy stlačující elektrické pole (buffer) katody. Tato vrstva zároveň nastavuje hodnotu proudového zesílení PNP tranzistoru při komutaci diody, kdy dochází k injekci děr z mikrosvodu a její správné nastavení jejich parametrů je proto naprosto stěžejní. Pro přesné nastavení a reprodukovatelnou tvorbu koncentračního profilu tohoto bufferu byla proto na všech zkoumaných diodách použita iontová implantace fosforu.

Koncentrační profil bufferu má zásadní vliv na:

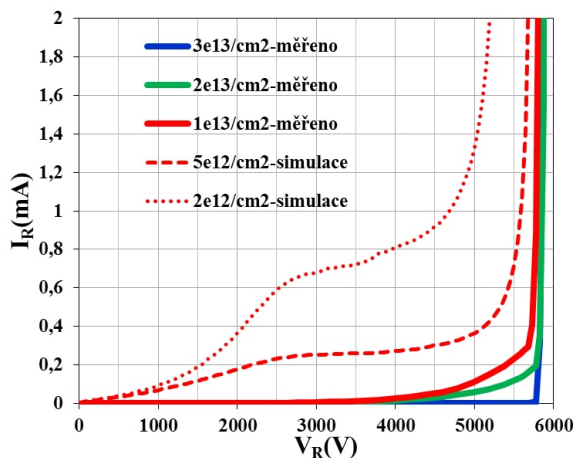
- VA charakteristiku během dynamického lavinového jevu [10, 43]
- Měkkost závěrného zotavení [44]
- Průrazné napětí
- Svodový proud a stabilitu blokovací schopnosti při vysokých teplotách
- Funkci mikrosvodu během komutace, jeho laterální rozměr (viz kap. 5.1.2 a kap. 5.2)

Jak bylo uvedeno výše, bylo v průběhu optimalizace návrhu nutné věnovat zvýšenou pozornost integrovanému PNP tranzistoru, který při nevhodném návrhu snižuje průrazné napětí a zvyšuje svodový proud při vyšších pracovních teplotách. Tato skutečnost je dokumentována porovnáním změřených koncentračních profilů stlačujících vrstev typu N s výslednými průběhy VA charakteristik na obrázcích 5.3 a 5.4.



Obrázek 5.3: Naměřený dotační profil bufferu pod mikrosvodem pro různé dávky implantace P (vpravo detail).

Jak je z grafů zřejmé, při nižších hodnotách koncentračního profilu stlačující vrstvy a při dávce implantace fosforu pod 10^{13} cm^{-2} , hodnoty průrazného napětí rychle klesají a strmě vzrůstá svodový proud. Pro dosažení co největšího účinku katodového mikrosvodu je z principu dosažení co největšího zesilovacího činitele bipolárního tranzistoru žádoucí, aby byla koncentrace bufferu co nejnižší. Dosažení vysoké hodnoty průrazného napětí a nízké hodnoty svodového proudu představuje v tomto ohledu protichůdný požadavek a znamená zásadní omezení při návrhu diody.



Obrázek 5.4: Měřené a simulované VA závěrné charakteristiky pro různé koncentrační profily stlačující vrstvy (bufferu) pro diodu bez elektronového ozáření s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 při teplotě 25° C .

5.1.2 Vliv dotačního profilu mikrosvodu a velikosti jeho plochy na svodový proud a průrazné napětí

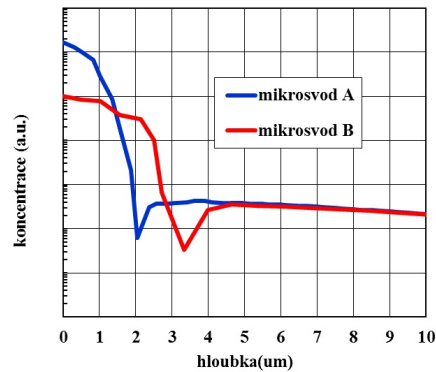
Během experimentů byly zkoumány koncentrační profily mikrosvodů s maximálními koncentracemi v rozsahu 10^{18} až 10^{20} at/cm^3 . Z výsledků experimentů lze konstatovat, že rozdílné maximální koncentrace ve zkoumaném rozsahu nemají na funkčnost mikrosvodů během komutace (dynamické parametry) zásadní vliv. V případě statických parametrů byl pozorován zásadní vliv dotace mikrosvodu na svodový proud v případě použití velmi nízké koncentrace příměsí stlačující vrstvy (bufferu) katody v procesu stanovení hraničních hodnot. Tyto hodnoty byly proto z konečného návrhu diody vyloučeny.

Parametrem, který má dle provedených experimentů zásadní vliv na svodový proud a průrazné napětí, je hloubka přechodu mikrosvodu. Ta rozhoduje o koncentraci a elektrické vodivosti stlačující vrstvy N bufferu pod mikrosvodem a o vzdálenosti P^+N přechodu mikrosvodu od rozhraní N bufferu a nízkodotované vrstvy N.

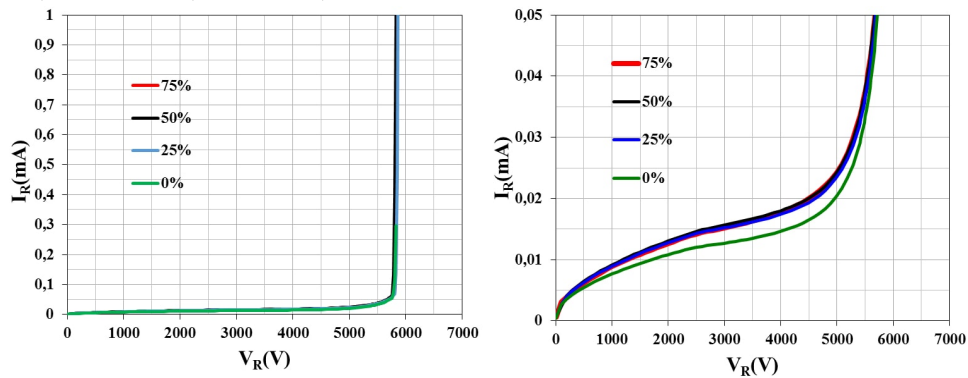
Vliv hloubky mikrosvodu a velikosti plochy mikrosvodu na svodový proud a průrazné napětí je pro vybrané příklady ukázán na obrázcích 5.5 až 5.7. Z obrázků je patrný nárůst svodového proudu u hlubšího mikrosvodu na obr. 5.7.

Nejnižší hodnota koncentrace v grafu odpovídá přibližně koncentraci příměsí N báze.

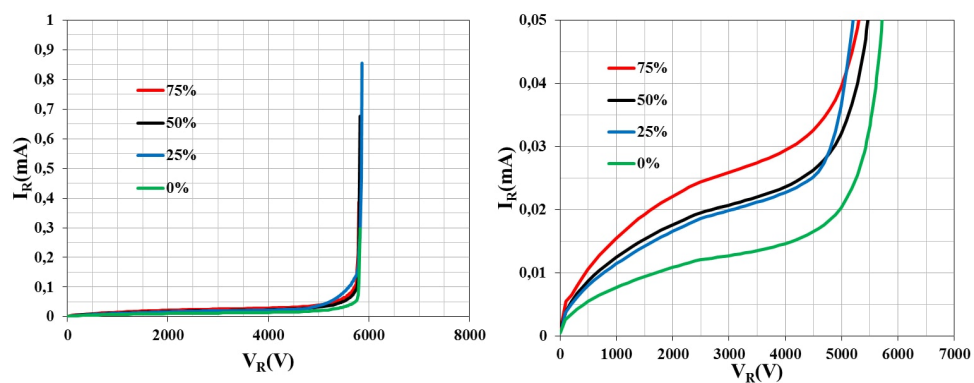
Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje průrazné napětí a svodový proud, je velikost plochy mikrosvodu. U diody s mělkým mikrosvodem se vliv velikosti jeho plochy na svodový proud při 25° C příliš neprojevuje (obr. 5.6). U varianty B s hlubším přechodem je přírůstek svodového proudu s velikostí



Obrázek 5.5: Změřený koncentrační profil mikrosvodu s hloubkou $2 \mu\text{m}$ (mělčí - A) a $3,5 \mu\text{m}$ (hlubší - B).



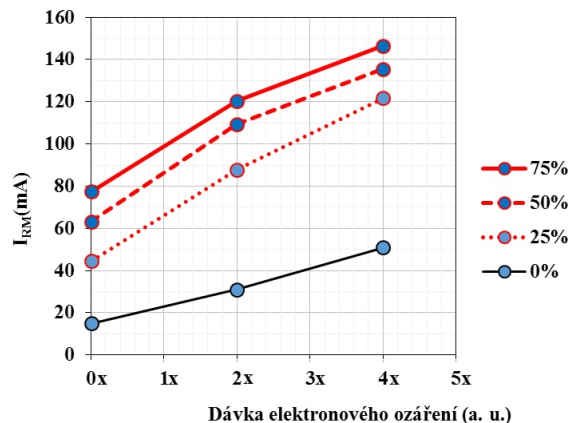
Obrázek 5.6: Měřené závěrné VA charakteristiky diod s mikrosvody hlubokými $2 \mu\text{m}$ (konc. profil A) pro různé velikosti plochy mikrosvodu s maximální dávkou elektronového ozáření, s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 , při teplotě 25°C .



Obrázek 5.7: Změřené závěrné VA charakteristiky diod s mikrosvody hlubokými $3,5 \mu\text{m}$ (konc. profil B) pro různé velikosti plochy mikrosvodu s maximální dávkou elektronového ozáření, s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 , při teplotě 25°C .

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY

plochy již významný (obr. 5.7) a při teplotě 140°C se blíží 200 mA . U diody s mělkým přechodem svodový proud při teplotě 140°C sice s dávkou elektronového ozáření a velikostí plochy mikrosvodu stoupá, ale drží se bezpečně pod hranicí $I_{RRM} = 200\text{ mA}$ (obr. 5.8).

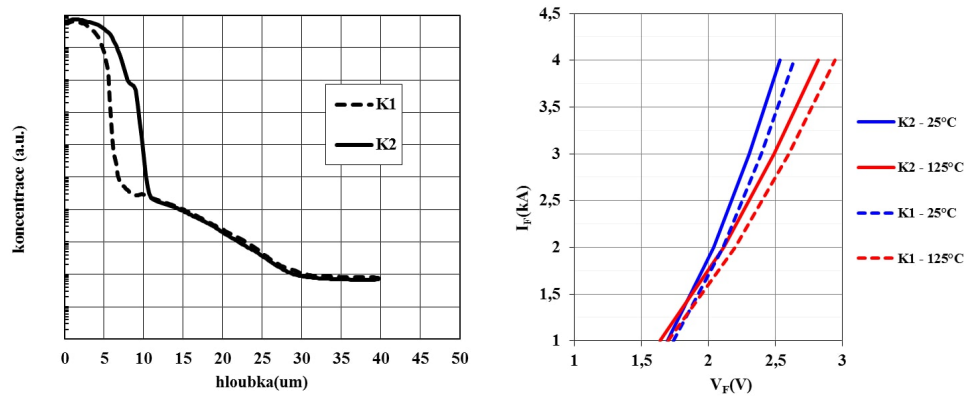


Obrázek 5.8: Závislost závěrného proudu na velikosti elektronového ozáření a velikosti plochy mikrosvodů u diod s plochou anodového kontaktu 55 cm^2 , při teplotě 140°C a s koncentračním profilem varianty A.

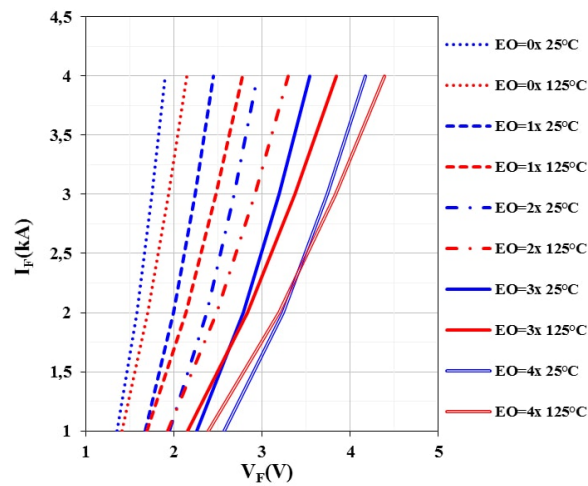
5.1.3 Vliv návrhu mikrosvodu a N+ katodové vrstvy na propustné úbytky napětí a jeho teplotní koeficient

Velikost ztrát v propustném směru závisí na mnoha parametrech diody. Nejdůležitější z nich je koncentrační profil, zvláště profil anodového a katodového emitoru (obr. 5.9) a jejich injekční účinnost, rozložení rekombinačních center v objemu diody (obr. 5.10) a pro diody s mikrosvody jejich plocha.

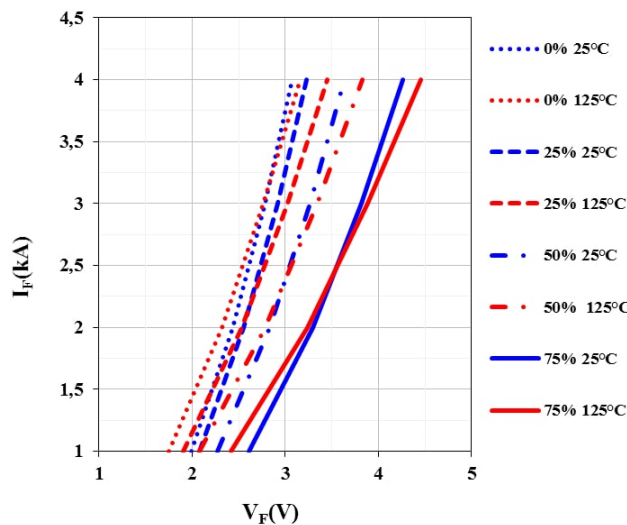
Velikost plochy, kterou zaujímá mikrosvod, zásadně ovlivňuje propustné úbytky diody (obr. 5.11). Jeho rozměr musí být tak velký, aby se na něm vytvořilo během komutace dostatečné napětí nutné k injekci děr. Požadavek na jeho dostatečné rozměry je v rozporu se snahou o co nejmenší propustné ztráty. Řešením toho rozporu zejména s ohledem na měkkost diody se podrobněji zabývají kapitoly věnované dynamickým parametrům.



Obrázek 5.9: Vlevo jsou naměřené koncentrační profily katodového emitoru diody s mělkým (6 μm -K1) a diody s hlubším (11 μm -K2) profilem emitoru. Vpravo jsou naměřené VA charakteristiky obou diod pro teploty 25 a 125° C. Elektronové ozáření dvojnásobnou dávkou a mikrosvod zaujímá 50% plochy katody.



Obrázek 5.10: Naměřené VA charakteristiky diod pro teploty 25 a 125° C pro různé dávky EO. Mikrosvod zaujímá 75% plochy katody.



Obrázek 5.11: Měření VA charakteristiky diod pro teploty 25 a 125° C pro diody s různou velikostí plochy mikrosvodu (0 až 75% a elektronovým ozářením čtyřnásobnou dávkou).

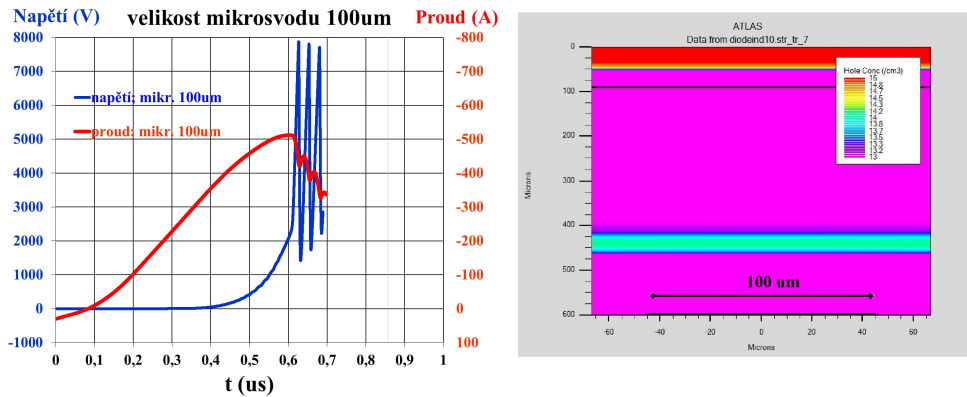
5.2 Dynamické parametry

5.2.1 Vliv velikosti mikrosvodu na měkkost zotavení

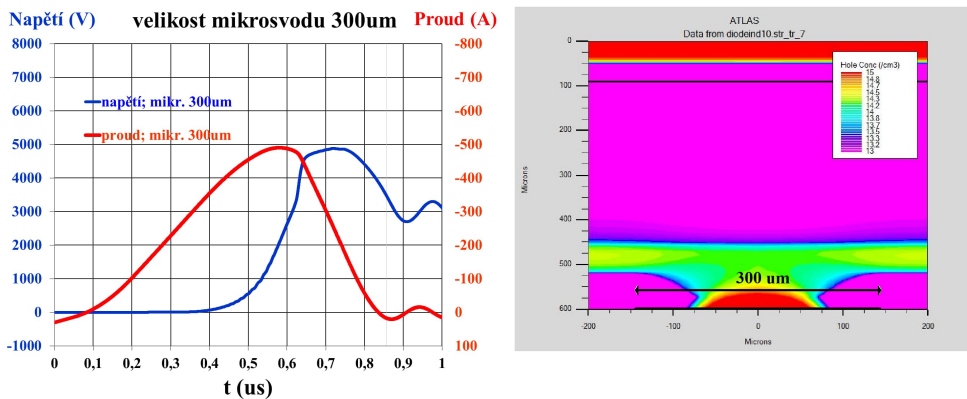
Na správnou funkci mikrosvodu má zásadní vliv jeho velikost, koncentrační profil, rozložení doby života minoritních nositelů náboje a teplota. Koncentrační profil má zajišťovat optimální injekční účinnost vrstvy P^+ mikrosvodu a současně nezpůsobit nežádoucí zvýšení závěrného proudu při maximální provozní teplotě. Mikrosvod a N^+ vrstva katody mají mít neměnné rozměry po celé jeho ploše, a proto byl při experimentech použit hexagonální tvar. Například kruhový tvar požadavku dodržení shodné šířky N^+ vrstvy katody nevyhoví. Jestliže je průměr mikrosvodu příliš malý, nedojde při komutaci k překročení prahového napětí a dioda se chová, jako by žádné mikrosvody neměla. Na obr. 5.12 vlevo jsou průběhy komutace diod s různými průměry mikrosvodu s tím, že na katodě mikrosvody pokrývají 75% plochy. Na obrázcích 5.12 vpravo je rozložení plazmy v čase 0,6 μs od začátku komutace, kdy se dioda nachází před bezprostředním konečným kolapsem plazmy.

Z výsledků simulace je patrné, že při rozměru mikrosvodu 100 μm téměř nedochází k injekci děr a dioda se při komutaci chová, jako by struktura mikrosvod neměla. Dosáhne-li mikrosvod velikosti 600 μm , plní bezpečně svoji funkci. Dioda je „měkká“ a nedochází k zákmitům, přičemž proudová hustota děr z 600 μm mikrosvodu je téměř o 4 řády větší než u šířky mikrosvodu 100 μm (obr. 5.13).

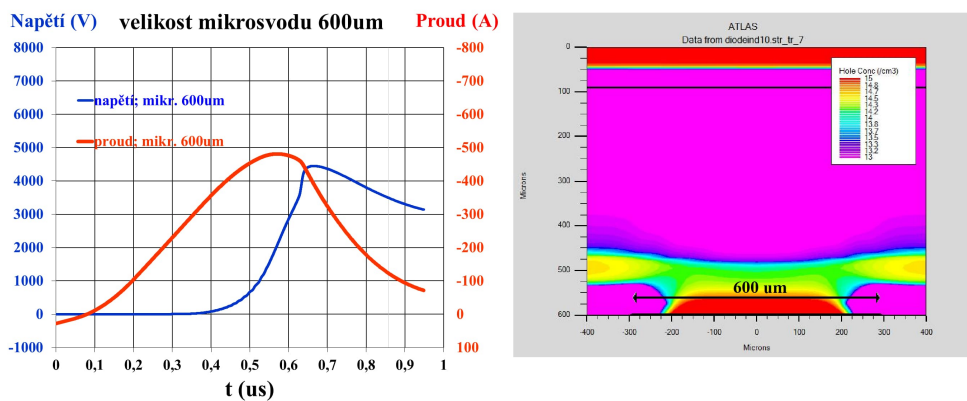
5.2. Dynamické parametry



(a) vlevo – komutace diody s \varnothing mikrosvodu 100µm; vpravo – rozložení koncentrace děr v čase 0,6µs



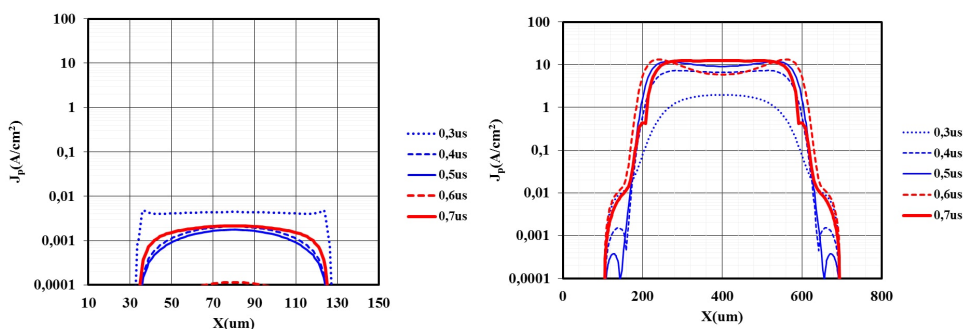
(b) vlevo – komutace diody s \varnothing mikrosvodu 300µm; vpravo – rozložení koncentrace děr v čase 0,6µs



(c) vlevo – komutace diody s \varnothing mikrosvodu 600µm; vpravo – rozložení koncentrace děr v čase 0,6µs

Obrázek 5.12: Průběhy komutace diod při 25° C; $V_{DC}=2,8$ kV; EI: 4x; rozměry masky: mikrosvody 100, 300 a 600 µm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody); vypínaný proud 30 A; $C_{CL}=4$ uF; $L_{CL}=600$ nH; $R_{CL}=0,625$ Ohm; dioda pro 4,5 kV; max. strmost komutace=1000 A/ms

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY

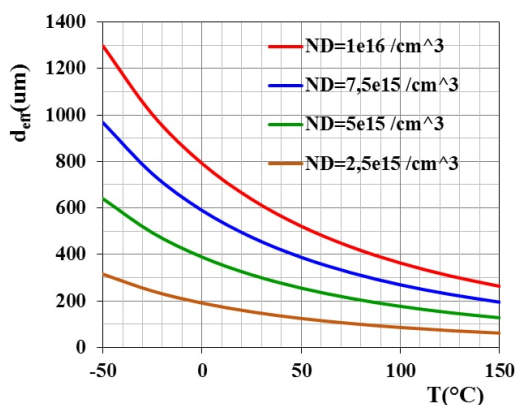


Obrázek 5.13: Rozložení proudové hustoty děr během komutace v řezu $100 \mu m$ mikrosvodu (vlevo) a $600 \mu m$ mikrosvodu (vpravo) pro průběh z obr. 5.12 a,c.

5.2.2 Vliv teploty na průběh komutace v souvislosti s velikostí mikrosvodu

Aby došlo k překročení prahového napětí na PN přechodu mikrosvodu a stlačující vrstvy, musí mít mikrosvod dostatečnou velikost. Pro minimální velikost poloměru mikrosvodu d_{eff} udává Matthias [45] vztah 5.1, kde V_{bi} je prahové napětí, $j(T)$ je proud elektronů nad mikrosvodem a N_D je koncentrace donorů ve stlačující vrstvě nad mikrosvodem.

$$V_{bi}(T) = j(T) \frac{d_{eff}}{e N_D \mu_n(T)} \quad (5.1)$$



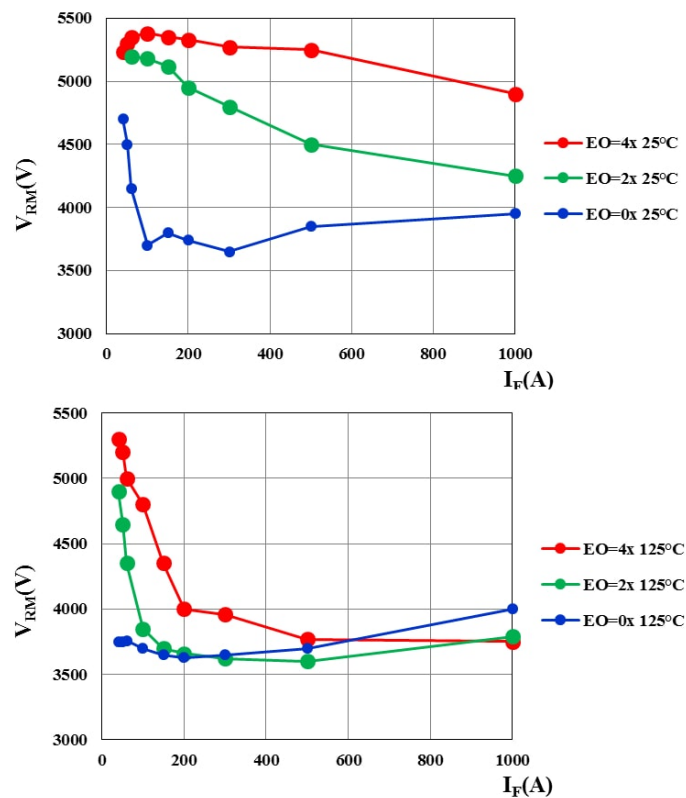
Obrázek 5.14: Vypočtená teplotní závislost minimálního poloměru mikrosvodu podle vztahu 5.1 pro různé koncentrace donorů pod emitorem.

Injekce děr z mikrosvodu závisí na teplotě. Při snižování teploty roste pohyblivost elektronů μ_n ve stlačující vrstvě a roste prahové napětí V_{bi} . Ze vztahu

je přímo patrné, že pokud při snižování teploty roste pohyblivost elektronů μ_n a prahové napětí V_{bi} , pak musí růst i velikost mikrosvodu d_{eff} .

$$d_{eff} = \frac{V_{bi} * e * N_D * \mu_n}{j(T)} \quad (5.2)$$

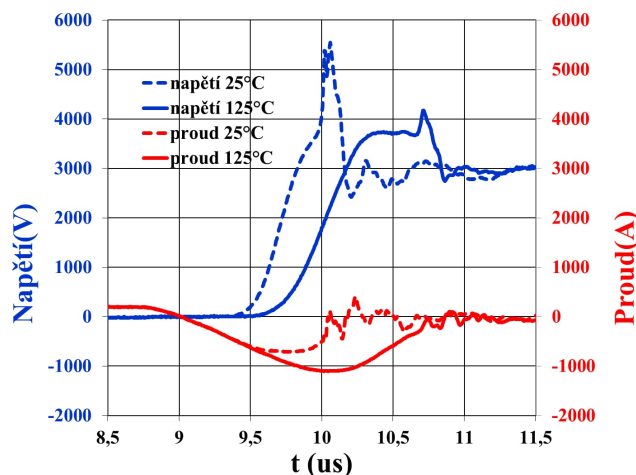
Je-li velikost mikrosvodu menší než je výše uvedený minimální rozměr, pak je velikost překmitu silně teplotně závislá a s klesající teplotou velikost překmitu roste. Tato závislost byla měřena na diodách s rychlou komutací s průměrem mikrosvodu $300 \mu\text{m}$ a s nominálním napětím 4,5 kV (obr. 5.15) a 6,5 kV [46, 47].



Obrázek 5.15: Závislost maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a třech různých dávkách el. ozáření při 25°C (nahore) a 125°C (dole); $V_{DC}=2,8 \text{ kV}$; rozměry masky: průměr mikrosvodu - $300 \mu\text{m}$ (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 4% plochy katodové strany); $L_{CL}=600 \text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je $600 \mu\text{m}$.

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY

Obr. 5.16 ilustruje rozdíly v naměřeném průběhu komutace při 25 a 125 °C pro diodu o tloušťce 600 μm s nedostatečnou velikostí mikrosvodu o průměru 300 μm (4% plochy katodové strany) a vypínaným proudem 200 A.



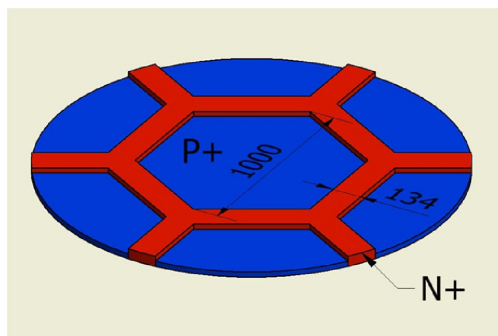
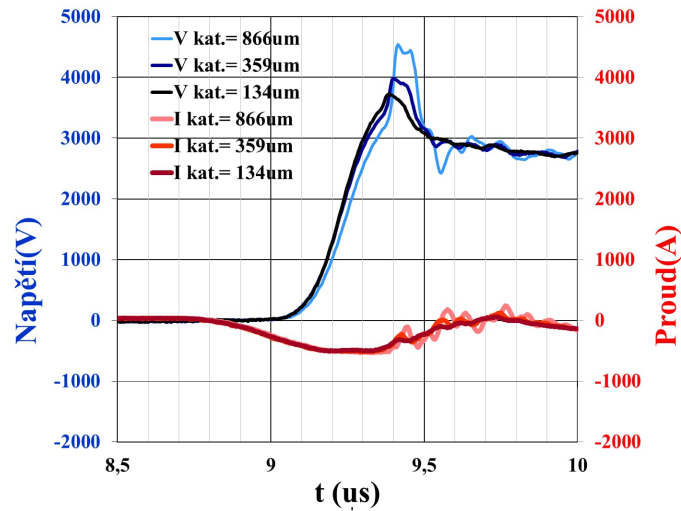
Obrázek 5.16: Průběhy komutace diod při 25° a 125° C; $V_{DC}=2,8$ kV; rozměry masky: průměr mikrosvodu – 300 μm (cm^2 plocha mikrosvodu zabírá 4% plochy katodové strany); vypínaný proud 200 A; $L_{CL}=600$ nH; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm ; elektronové ozáření čtyřnásobnou dávkou.

Při správné volbě velikosti průměru mikrosvodu, šířky katody (kap. 5.2.3) a velikosti plochy obsazené mikrosvody nedochází k překmitům při nízkých pracovních teplotách ani při vysokých dávkách elektronového ozáření (kap. 5.2.4). Z výše uvedených důvodů je proto při volbě šířky mikrosvodu nezbytné zvláště zohlednit koncentrační profil stlačující vrstvy a provozní teplotu.

5.2.3 Vliv parametrů katodového emitoru na velikost napěťových překmitů při komutaci

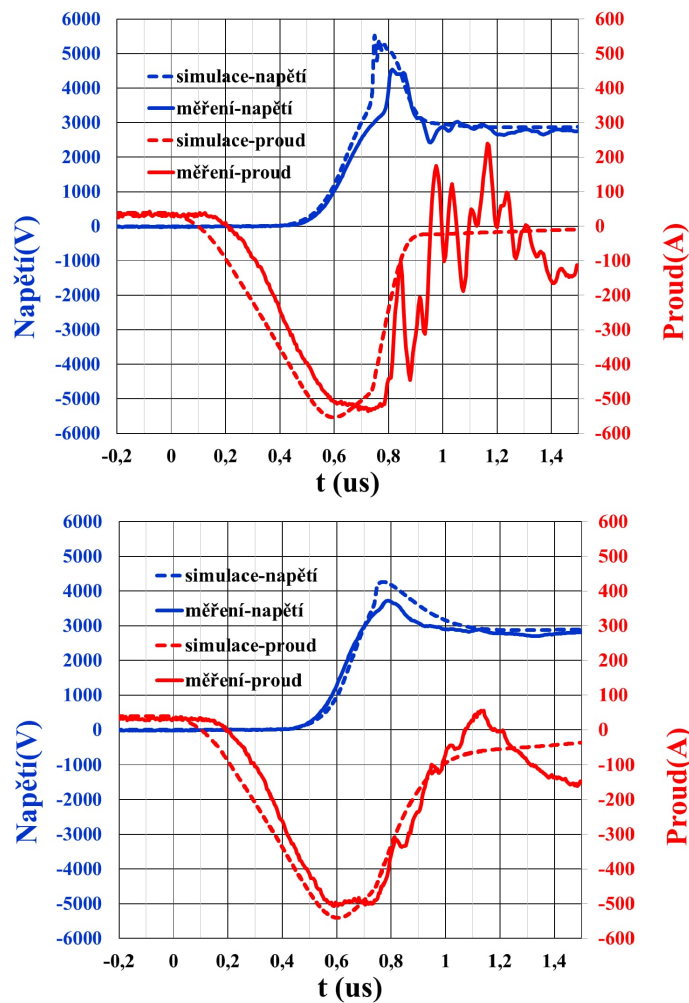
Také šířka katodového emitoru výrazně ovlivňuje měkkost diody, jak je znázorněno na obr. 5.17. Vlevo je měřený průběh komutace pro různé šířky katody (134, 359 a 866 μm) a vpravo je příklad uspořádání P a N vrstev na katodové straně diody pro šířku katodové vrstvy 134 μm .

Pro pochopení příčiny vzniku překmitů u diody s širší vrstvou N^+ vrstvy katody bylo provedeno porovnání simulací diod s šířkou katody 134 a 866 μm . Na obrázcích 5.18 jsou jejich měřené a simulované průběhy komutací. Na dalších obrázcích (5.19 a 5.20) jsou zobrazeny řezy diodou od středu mikrosvodu do poloviny vrstvy katody se simulovaným rozložením koncentrace děr v okamžiku těsně před a po konečném kolapsu plazmy.



Obrázek 5.17: Průběhy komutace diod pro různé šířky katody (nahore) při 25° C; $V_{DC}=2,8$ kV; EI:4x; rozměry masky: průměr mikrosvodu-1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody u šířky N^+ vrstvy 134 μm ; 50% pro šířku N^+ 359 μm a 25% pro šířku N^+ 866 μm); vypínaný proud 30 A; $L_{CL}=600$ nH; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm ; Dole je příklad uspořádání P a N vrstev na katodové straně diody pro šířku katodové vrstvy 134 μm .

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



Obrázek 5.18: Měřené a simulované průběhy komutace pro diody šířkou N^+ vrstvy 134 μm (dole) a 866 μm (nahore) při 25°C ; $V_{DC}=2,8\text{ kV}$; EI:4x; rozměry masky: průměr mikrosvodu-1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody pro šířku N^+ vrstvy 134 μm a 25% pro šířku N^+ 866 μm); vypínaný proud 30 A; $L_{CL}=600\text{ nH}$; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm .

Dostatečně veliký mikrosvod (průměr 1000 um) dobře plní svou funkci, ale při šířce katodové vrstvy větší než dvě difúzní délky děr není vrstva plazmy dobře zásobována (obr. 5.19 vpravo) na rozdíl od šířky katody 134 um (obr. 5.19 vlevo). U široké katody dojde k přiškrcení vrstvy plazmy nad rozhraním mikrosvod-katoda v čase 0,72 us (obr. 5.19 vpravo), vzniku potenciálové bariéry v čase 0,73 - 0,74 us (obr. 5.19 vpravo a 5.20 vpravo), vyprázdnění N^- vrstvy nad oblastí katody v čase 0,75 us a v důsledku prudkého poklesu proudu (obr. 5.20 vpravo) nastává napěťový překmit. Existence předčasně vyprázdněných oblastí nad katodou vede ke skokové změně efektivní plochy diody a tím ke změně strmosti poklesu komutačního proudu a následně ke vzniku přepětí (vpravo).

Dominantní hladiny v blízkosti katody jsou rekombinační centra vytvořená při elektronovém ozařování a mají významný vliv na dobu života nositelů náboje v závislosti na teplotě. Odvozená doba života a difúzní délka děr a elektronů je tak silně teplotně závislá. Při teplotě 125° C je oproti 25° C doba života přibližně 6,5 krát vyšší a difúzní délka děr je více než dvojnásobná [48, 49]. Teplotní závislost difúzní délky způsobuje, že při vyšších provozních teplotách nemusí dojít k napěťovým překmitům pro větší šířku N^+ katodové vrstvy.

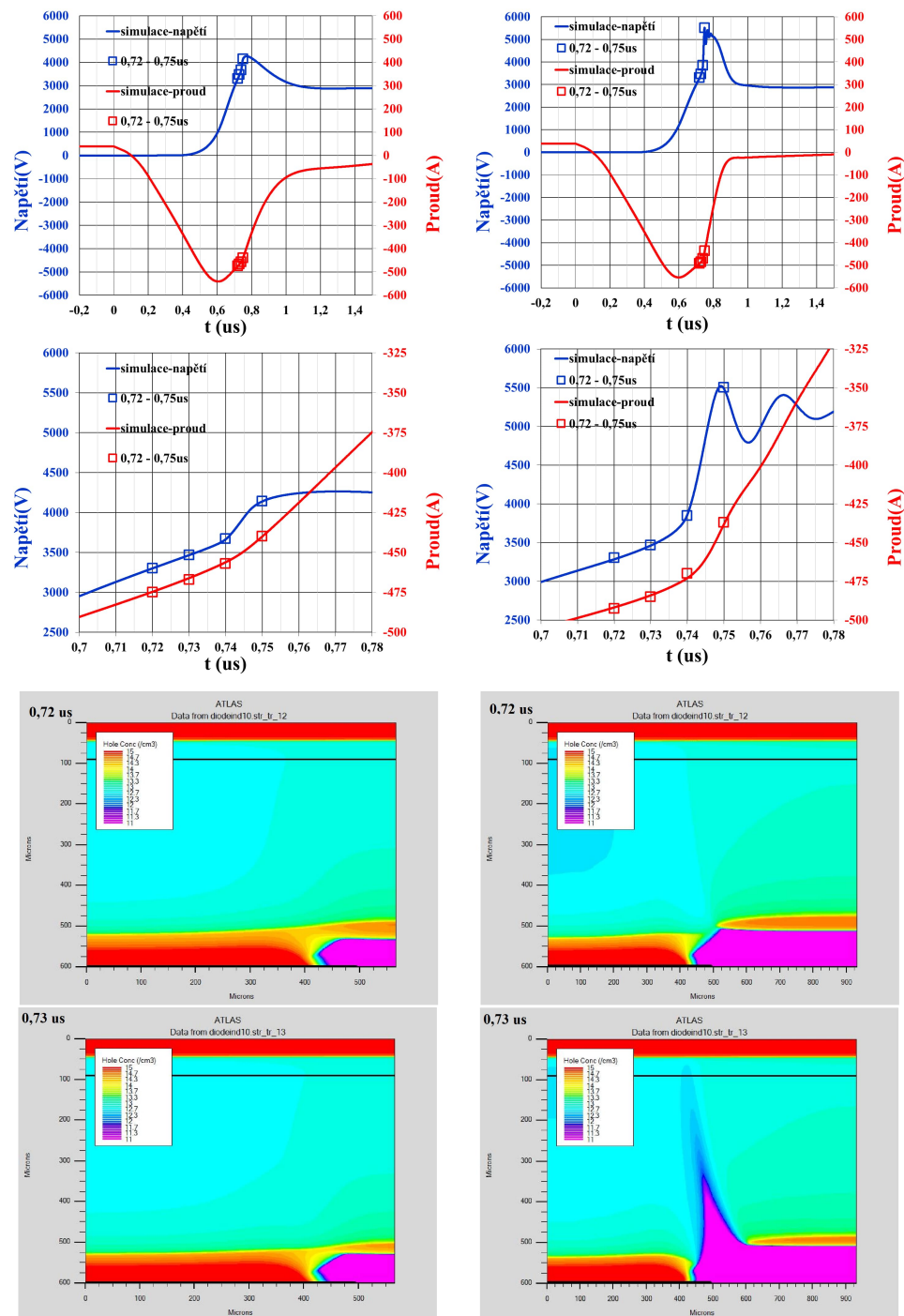
Difúzní délka děr je pro danou technologii a elektronové ozáření s maximální použitou dávkou pod 100 um a jak je patrné z měřených závislostí na obr. 5.21, při šířce N^+ vrstvy 134 um jsou maximální přemity napětí bezpečně pod 4000 V.

5.2.4 Vliv elektronového ozáření na průběh komutace v souvislosti s velikostí mikrosvodu a katody

V případě, že velikost mikrosvodu nedosahuje minimálního poloměru podle vztahu 5.1 nebo je šířka katodové vrstvy větší než dvojnásobek difúzní délky děr, je velikost maximálních překmitů silně závislá na elektronovém ozáření jak, je znázorněno na obrázcích 5.22 a 5.23.

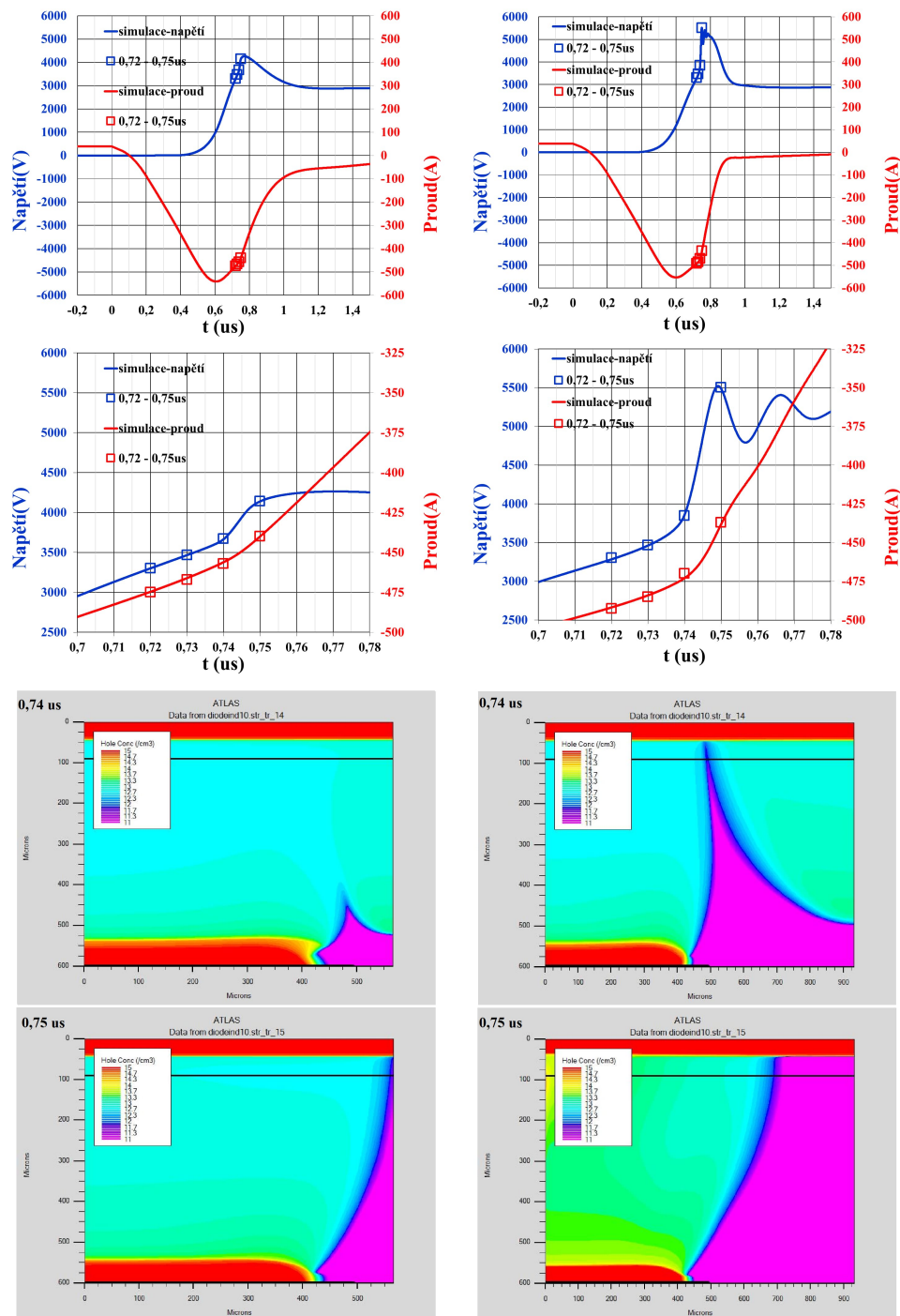
Dioda může být „tvrdá“ i v případě, že velikost mikrosvodu je dostatečná, ale vzdálenost mezi nimi je příliš velká (obr. 5.24), jak bylo popsáno v kapitole 5.2.3. Při dobře navržené struktuře se mění jenom komutační náboj a propustné ztráty. Maximální velikost napětí při komutaci je pak na velikosti elektronového ozáření a teplotě prakticky nezávislá (obr. 5.25).

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



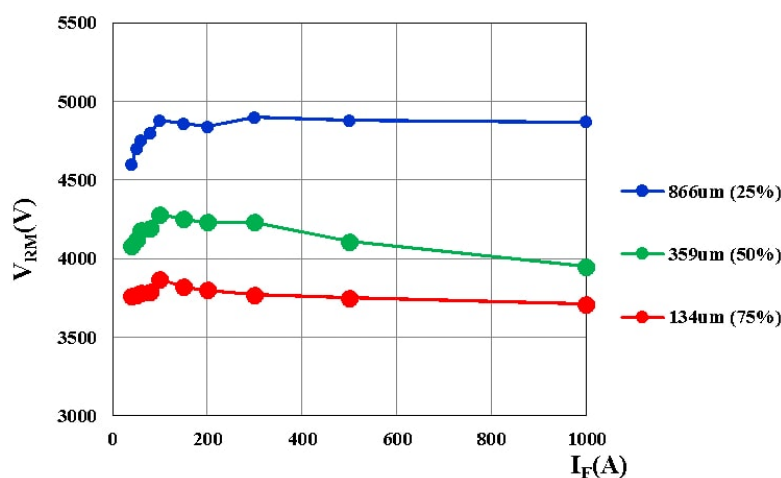
Obrázek 5.19: Řezy diodou od středu mikrosvodu do poloviny vrstvy katody se simulovaným rozložením koncentrace děr v okamžiku těsně před konečným kolapsem plazmy nad katodou (0,72 a 0,73 us) pro šířku N^+ vrstvy 134 um (vlevo) a 866 um (vpravo).

5.2. Dynamické parametry



Obrázek 5.20: Řezy diodou od středu mikrosvodu do poloviny vrstvy katody se simulovaným rozložením koncentrace děr v okamžiku těsně po konečném kolapsu plazmy nad katodou (0,74 a 0,75 us) pro šířku N⁺ vrstvy 134 um (vlevo) a 866 um (vpravo).

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



Obrázek 5.21: Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a šířce katodové vrstvy N+ (el. ozáření 4x, 25° C, průměr mikr. 1000 μ m, $V_{DC}=2,8$ kV, $L_{CL}=600$ nH; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 560 μ m), v závorce jsou procenta plochy, které zabírá mikrosvod.

5.2.5 Vliv aplikačního obvodu na průběh komutace v souvislosti s parametry mikrosvodu

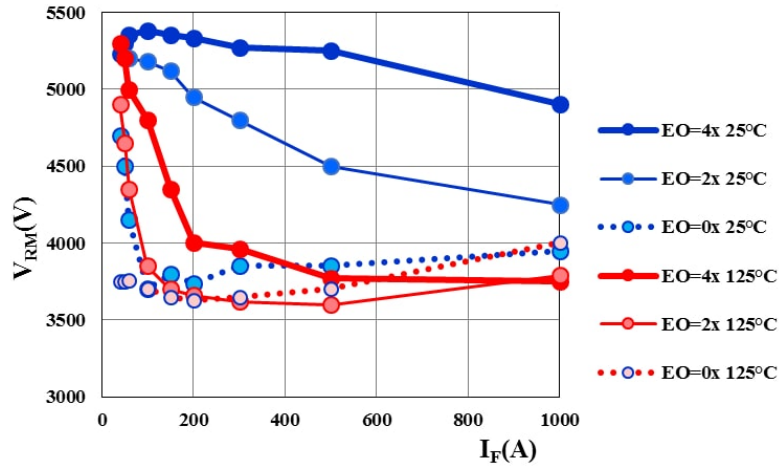
Při rychlém vypínání proudu s vysokou hodnotou strmosti di/dt dochází ke generaci přídavného napětí na parazitní (rozptylové) indukčnosti přívodů $L\sigma$ vypínaného obvodu dle rovnice (1.5). Vznik napěťových překmitů, zvláště při vypínání malých proudových hustot, souvisí s rychlostí zániku (kolapsu) plazmy během komutace. Integrace správně navržených mikrosvodů výrazně zpomaluje kolaps plazmy a odstraňuje nebezpečné překmity i pro rozptylové indukčnosti kolem 600 nH (obr. 5.26).

I když má mikrosvod průměr 750 μ m, ale zabírá 75% povrchu katody (N+ vrstva katody je široká 100 μ m), napěťový překmit nepřesahuje při tloušťce diody 600 (modrá čára) nebo 560 μ m (červená čára) bezpečných 4500 V (obr.5.27).

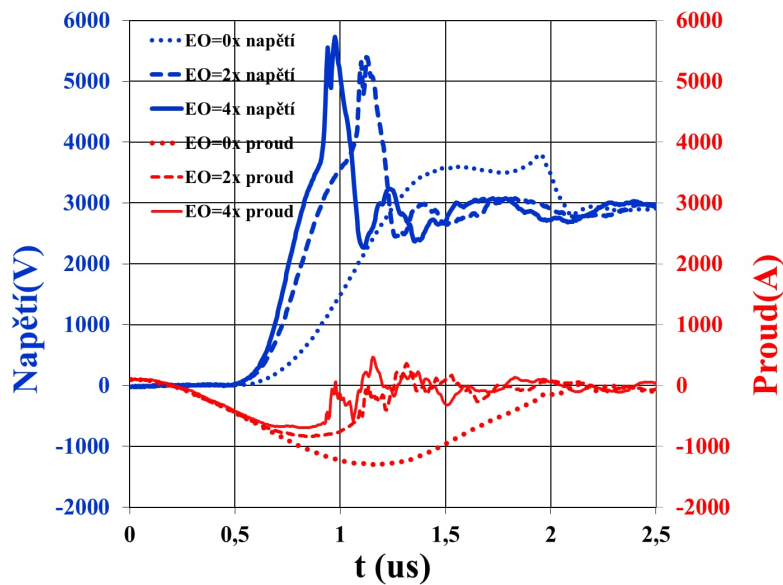
Optimalizovaný design vrstev na katodě má na velikost překmitu rozhodující vliv a je možné dosáhnout podobných hodnot jako má referenční dioda bez mikrosvodů, která je o 100 μ m tlustší (obr. 5.28).

5.2.6 Napěťová přetížitelnost diod s mikrosvody z hlediska stejnosměrného napětí na napájecím kapacitoru

Stejnosemné napájecí napětí měniče V_{DC} (DC link voltage) výrazně ovlivňuje výsledný průběh napětí a proudu při vypínání diody (obr. 5.29, 5.30 a 5.31).

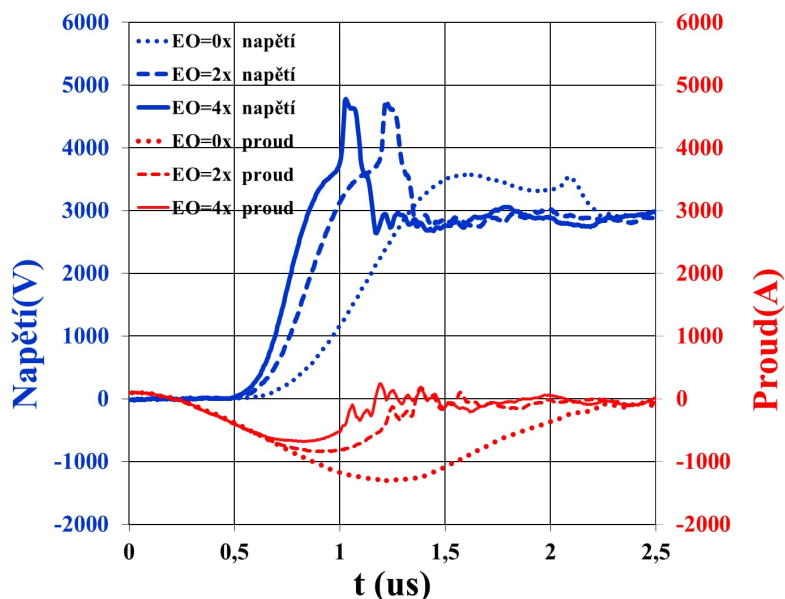


Obrázek 5.22: Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a dávce elektronového ozáření při 25 a 125° (průměr mikrosvodu 300 μm , mikrosvod zabírá 4% plochy, $V_{DC}=2,8$ kV, $L_{CL}=600$ nH; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm a plochou 55 cm^2).

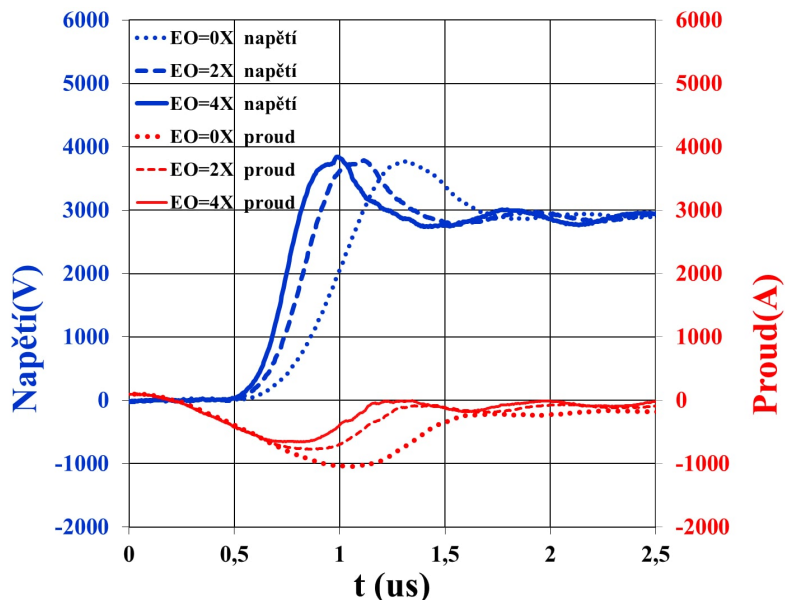


Obrázek 5.23: Naměřené průběhy komutace pro různé dávky elektronového ozáření při 25° C; $V_{DC} = 2,8$ kV; průměr mikrosvodu 300 μm ; mikrosvod má kruhový tvar; (plocha P^+ zabírá 4% katody) ; vypínaný proud 100 A; $L_{CL}=600$ nH; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm ; plocha diody 55 cm^2

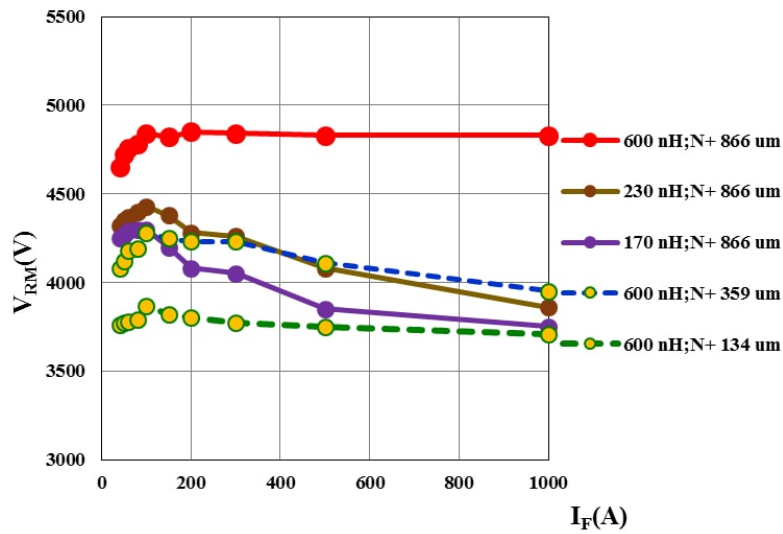
5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



Obrázek 5.24: Měřené průběhy komutace pro různé dávky elektronového ozáření při 25° C; $V_{DC}=2,8$ kV; průměr mikrosvodu 1000 um (plocha P⁺ zabírá 25% katody); šířka katody je 866 um; vypínaný proud 100 A; $L_{CL}=600$ nH; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm; plocha diody 55 cm²



Obrázek 5.25: Měřené průběhy komutace pro různé dávky elektronového ozáření při 25° C; $V_{DC}=2,8$ kV; rozměry masky: průměr mikrosvodu - 1000 um (P⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany); šířka katody=134 um; vypínaný proud 100 A; $L_{CL}=600$ nH; dioda s nominálním napětím 4,5 kV; tloušťka diody je 600 μm; celková aktivní plocha diody 55 cm²

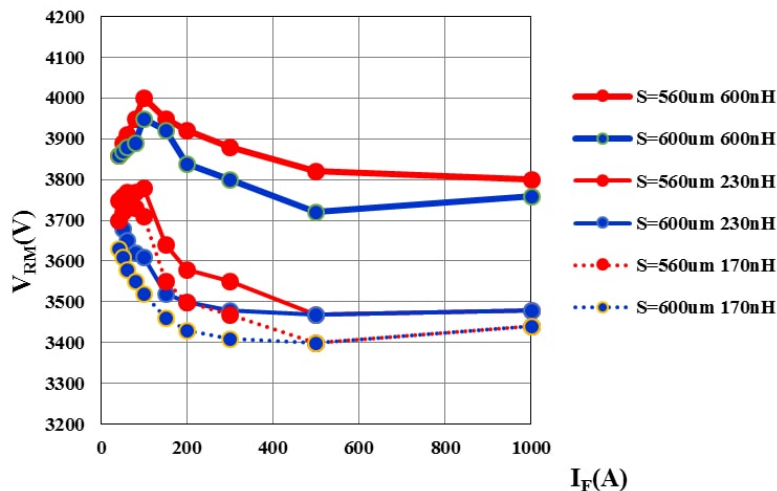


Obrázek 5.26: Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a velikosti parazitní indukčnosti pro různé designy mikrosvodu ($EO=4x$; 25°C ; průměr mikrosvodu 1000 μm , mikrosvod zabírá 25% plochy pro šířku N^+ katody 866 μm , 50% plochy pro N^+ 358 μm a 75% pro N^+ 134 μm , $V_{DC}=2,8\text{ kV}$).

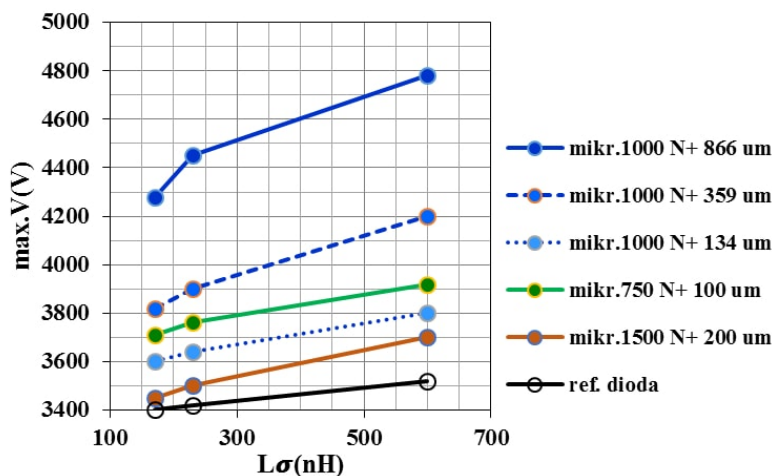
U klasické rychlé 4,5 kV diody, při vzrůstu V_{DC} , mohou překmity překračovat jmenovité napětí (obr. 5.29 dole, 5.30 dole a 5.31).

Diody s mikrosvody jsou proti vzrůstu napájecího napětí odolnější. Při správném nastavení designu rozměrů masky na katodové straně se překmit zmenšuje s rostoucí velikostí plochy mikrosvodu a zmenšující se šířkou katodové vrstvy. Když mikrosvod zaujímá 75%, jsou překmity při $V_{DC} = 3600\text{ V}$ stejné nebo nižší než u klasické diody pro 5,5 kV v celém rozsahu používaných proudů (obr. 5.30 vpravo).

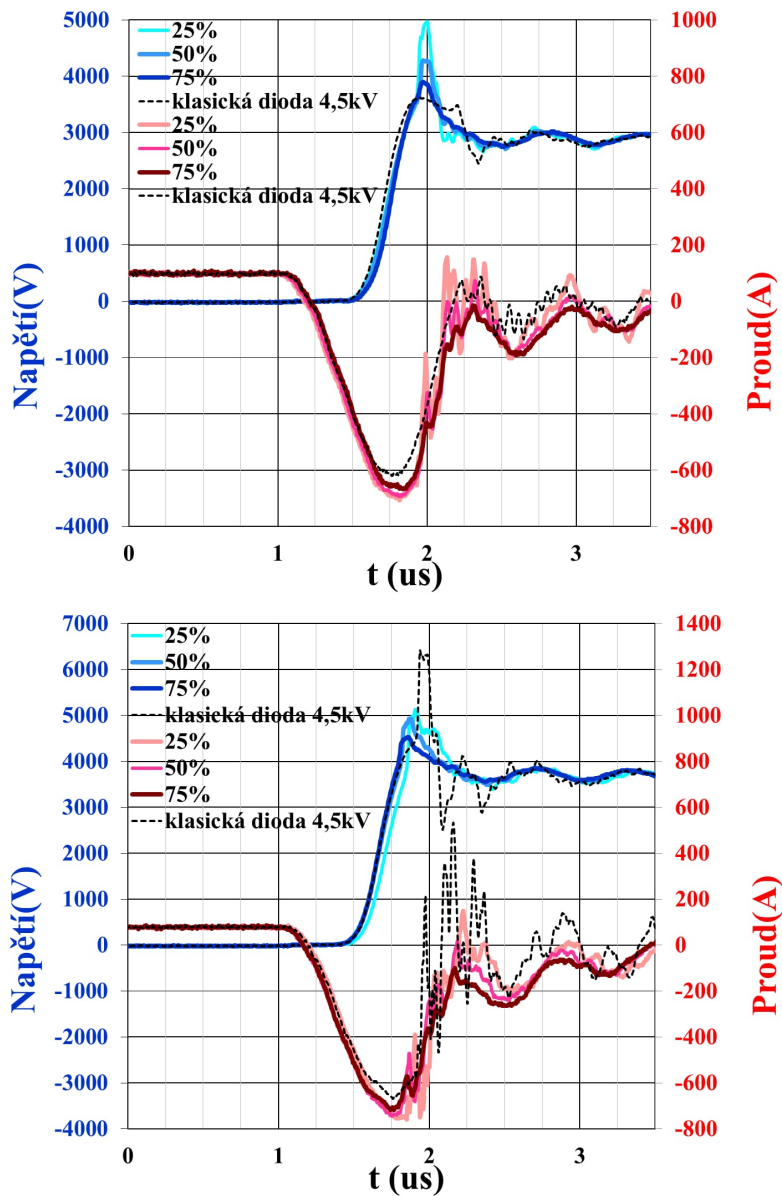
5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



Obrázek 5.27: Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na propustném proudu a velikosti parazitní indukčnosti pro různé tloušťky diody ($EO=4x$; 25°C ; průměr mikr. 750 μm , mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 100 μm , $V_{DC}=2,8\text{ kV}$, tloušťka diody je 560 nebo 600 μm).

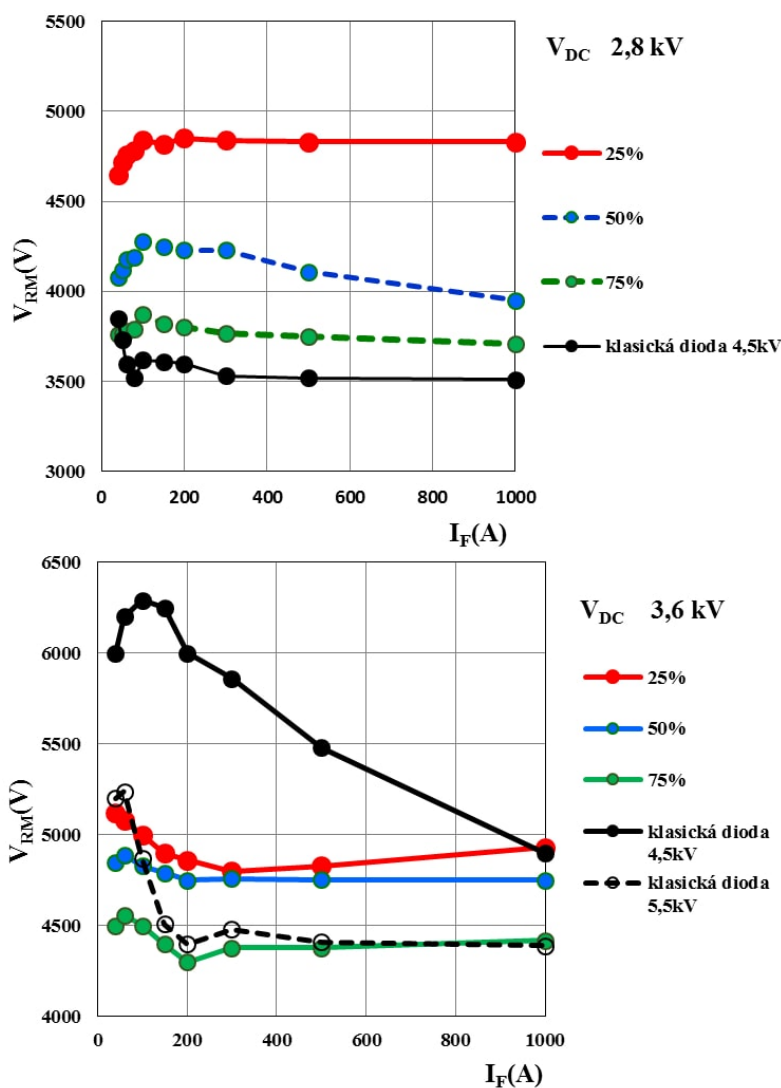


Obrázek 5.28: Závislost naměřeného maximálního překmitu během komutace na velikosti parazitní indukčnosti pro různé designy mikrosvodu pro vypínacovou proudovou hustotu $1,5\text{ A/cm}^2$ ($EO=4x$; 25°C ; průměr mikr. 1000 μm - mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 134 μm , 50% plochy pro N^+ 359 μm , 25% plochy pro N^+ 866 μm ; průměr mikr. 750 μm - mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 100 μm , průměr mikr. 1500 μm - mikrosvod zabírá 75% plochy pro šířku N^+ katody 200 μm , $V_{DC}=2,8\text{ kV}$, tloušťka diody je 560 μm).

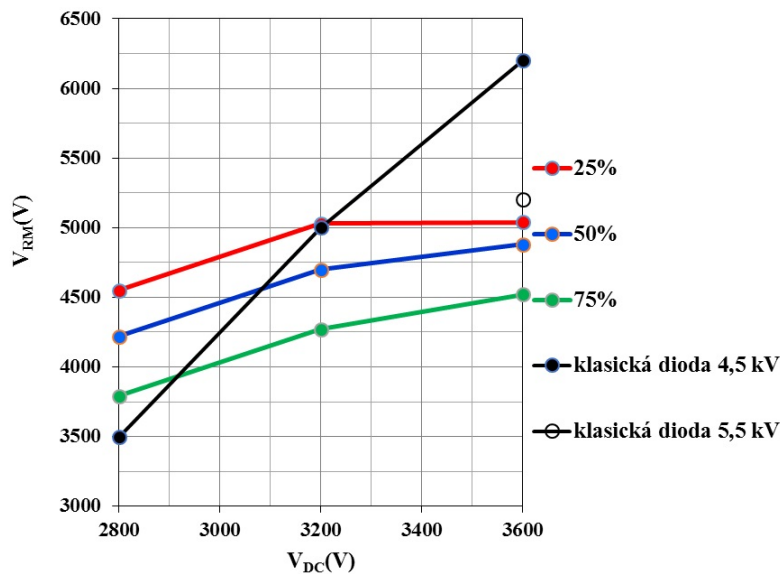


Obrázek 5.29: Měřené průběhy komutace klasické diody 4,5 kV a diod s mikrosvody pro $V_{DC}=2,8 \text{ kV}$ (nahore) a $3,6 \text{ kV}$ (dole). Průměr mikrosvodu je $1000 \mu\text{m}$ (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N^+ vrstvy $134 \mu\text{m}$; 50% pro $359 \mu\text{m}$ a 25% pro $866 \mu\text{m}$, vypínaný proud je 100 A ; $L_s=600 \text{ nH}$; tloušťka diody s mikrosvody je $600 \mu\text{m}$, $EO = 4x$; vypínaný proud je 100 A).

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



Obrázek 5.30: Měřená závislost maximálního překmitu během komutace na propustném proudu u klasické diody 4,5 kV (5,5 kV) a diod s mikrosvody pro $V_{DC}=2,8 \text{ kV}$ (nahore) a 3,6 kV (dole). Průměr mikrosvodu je 1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N^+ vrstvy 134 μm ; 50% pro 359 μm a 25% pro 866 μm), $L_s=600 \text{ nH}$; tloušťka diody s mikrosvody je 600 μm ; $EO=4x$.



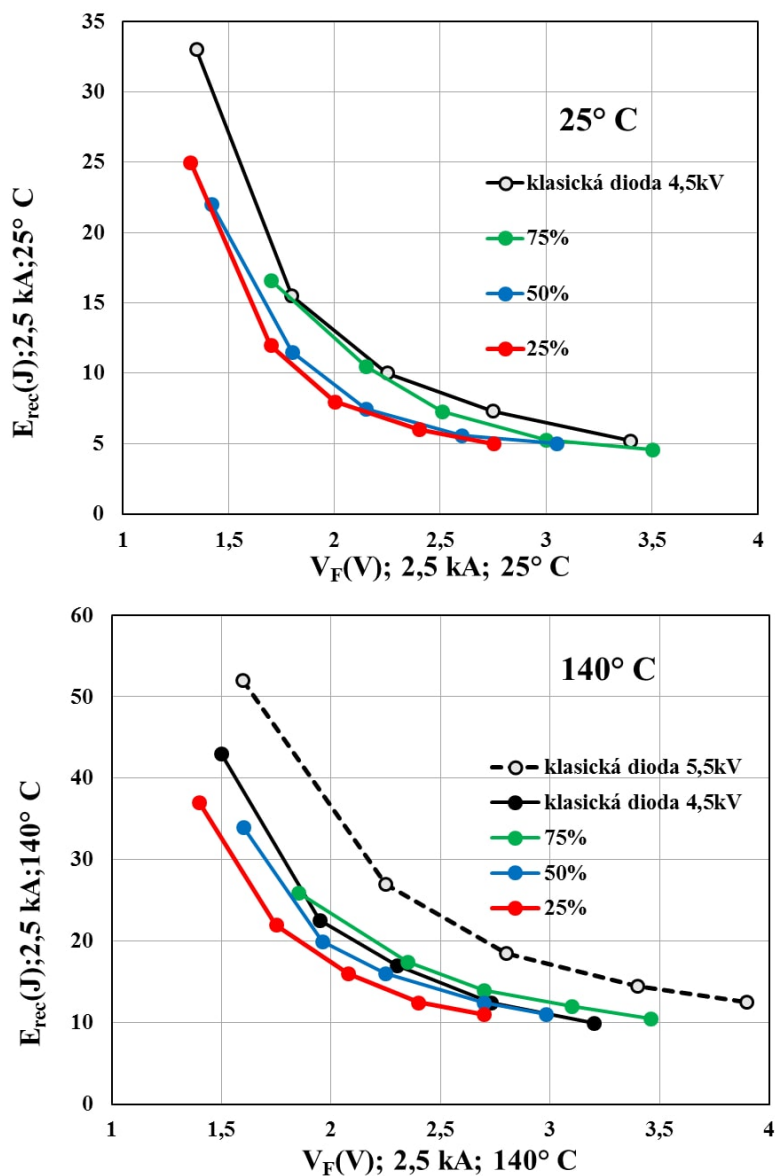
Obrázek 5.31: Naměřená závislost maximálního překmitu během komutace na veličnosti napětí V_{DC} u klasické diody 4,5 kV (5,5 kV) a diod s mikrosvodou pro vypínanou proudovou hustotu $1,5 \text{ A/cm}^2$. Průměr mikrosvodu je $1000 \text{ }\mu\text{m}$ (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N^+ vrstvy $134 \text{ }\mu\text{m}$; 50% pro $359 \text{ }\mu\text{m}$ a 25% pro $866 \text{ }\mu\text{m}$), $L_s=600 \text{ nH}$; tloušťka diody s mikrosvodou je $600 \text{ }\mu\text{m}$; $EO=4x$.

5.2.7 Technologická křivka diod s mikrosvodou

Z předešlých kapitol o vlivu návrhových parametrů katodové strany diody na velikost překmitů plyne požadavek na dostatečnou velikost průměru mikrosvodu (vztah 5.1) a naproti tomu na šířku N^+ vrstvy katody menší než dvě difúzní délky děr (kap. 5.2.3). Tyto požadavky splňuje pouze dioda, u které mikrosvod zabírá 75% plochy katody, jelikož je difúzní délka děr pro danou technologii a maximální dávku elektronového ozáření pod $100 \text{ }\mu\text{m}$. Při požadavku pracovní teploty do -40° C je potřebná velikost průměru mikrosvodu kolem $1000 \text{ }\mu\text{m}$.

S rostoucí velikostí plochy mikrosvodu ale vzrůstá propustné napětí, což má za následek zhoršenou technologickou křivku (obr. 5.32). Pro diodu s mikrosvodou, která má tloušťku křemíku o 10% tenčí oproti klasické 4,5 kV diodě jsou při teplotě 25° C ztráty zobrazené na technologické křivce stejné nebo nepatrně nižší, než u diody klasické (obr. 5.31 vlevo). Při 140° C jsou ztráty již vyšší (obr. 5.32 vpravo). Z obr. 5.32 je patrná ztráta výhod nové konstrukce diody při vysokém procentu plochy mikrosvodů (75%). Snížení ztrát pro vypínání v aplikaci s hodnotou s napájecího napětí $V_{DC} = 2800 \text{ V}$ se proto neobejde bez výraznějšího ztenčení tloušťky diody.

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



Obrázek 5.32: Naměřená technologická křivka pro vypínaný proud 2,5 kA pro klasickou diodu a diodu s mikrosvody pro teploty 25 a 140° C. Průměr mikrosvodu je 1000 um (P⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N⁺ vrstvy 134 um; 50% pro 359 um a 25% pro 866 um), L_s=600 nH; tloušťka diody s mikrosvody je 600 μm, klasická dioda 4,5 kV je o 10% tlustší; celková aktivní plocha diody 55 cm².

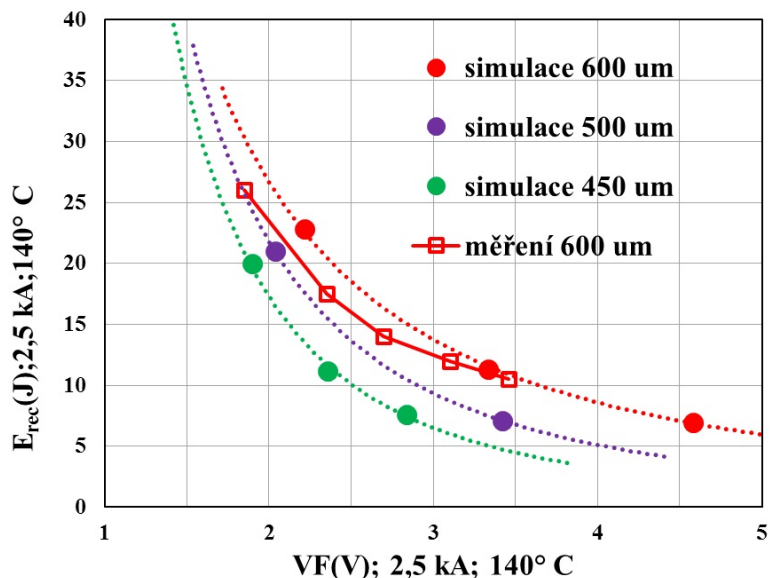
5.2.8 Snížení statických a vypínacích ztrát snížením tloušťky diody

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že při tloušťce diody 600 μm nebylo při aplikaci funkčních mikrosvodů dosaženo zlepšení propustných a komutačních ztrát. Pokud se nespokojíme s tím, že diodu s mikrosvodem lze spolehlivě aplikovat v obvodech průmyslových měničů se ss napětím napětím nikoliv jen 2800 V, ale až 3400 V s přetížením do 3600 V, což pokrývá napěťové třídy 5,5 a 6,5 kV, kde jsou klasické diody mnohem tlustší a mají mnohem horší technologické křivky, musíme návrhové parametry upravit tak, aby bylo možné diodu ještě více ztenčit. Za tímto účelem byla provedena simulace diod s průměrem mikrosvodu 1000 μm (75% plochy) a šířkou katodové vrstvy 134 μm pro tloušťky snížené z 600 μm na 550, 500 a 450 μm .

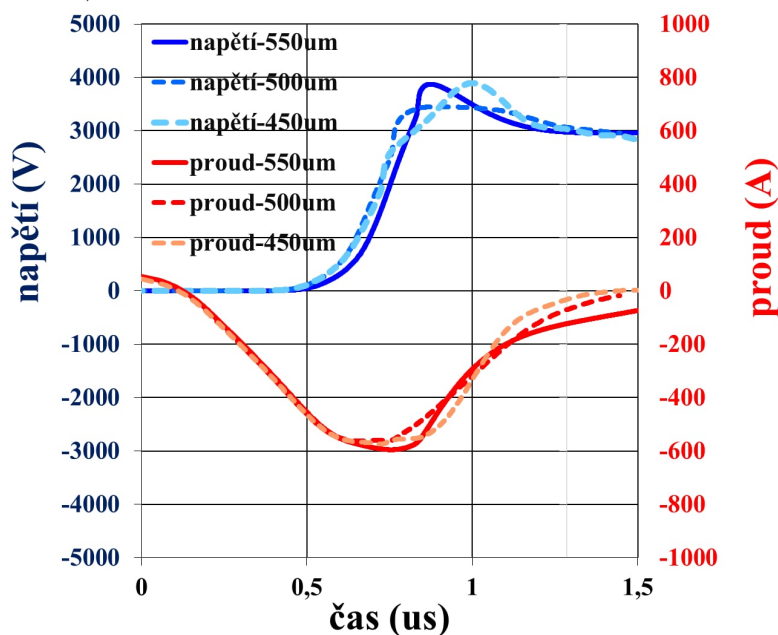
Na obr. 5.33 jsou porovnány měřené a simulované technologické křivky pro tloušťku diody 600 μm . Simulované ztráty jsou pro vyšší propustné ztráty ve shodě s měřením (EO 4x). Pro nižší hodnoty propustných ztrát vychází simulovaný průběh technologické křivky odlišně, ale stále v dobré shodě s měřeními.

Tenčí diody mají komutační ztráty přibližně stejné, ale propustné ztráty jsou zřetelně nižší (obr. 5.33). Podle výsledků simulace je tedy možné při použití mikrosvodů snížit tloušťku diody až na 450 μm . Při ztenčování se při simulaci neobjevily překmity (obr. 5.33) ani se neprodlužoval a nezvětšoval proud týlu (obr. 5.35). Pro počítaný Si materiál s měrným odporem 330 Ωcm a tloušťkou 450 μm bylo vypočteno závěrné napětí přes 5 kV pro závěrný proud 1 mA (obr. 5.36).

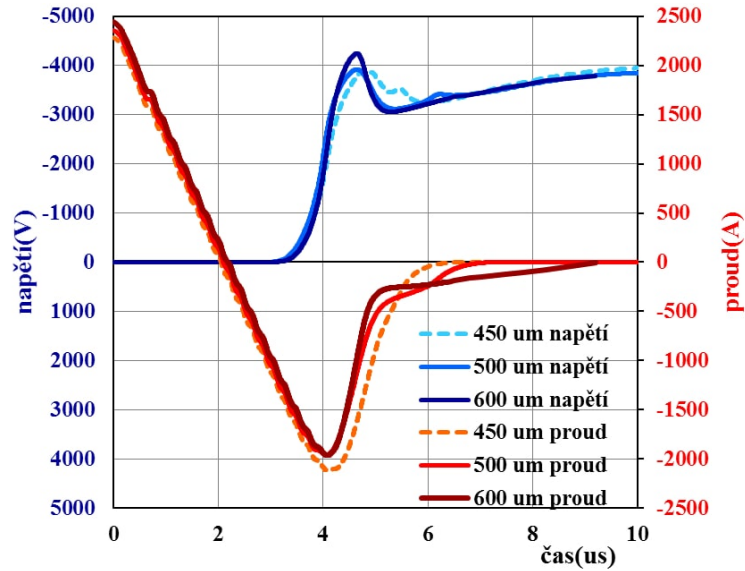
5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY



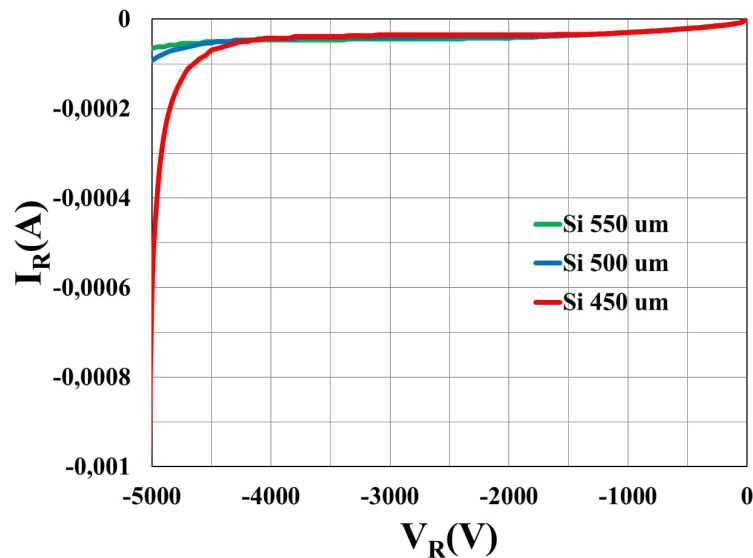
Obrázek 5.33: Měřená a simulovaná technologická křivka pro vypínaný proud 2,5kA pro diodu s mikrosvody pro teplotu 140° C. Průměr mikrosvodu je 1000 um (P⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katody pro šířku katodové N⁺ vrstvy 134 um), L_s=600 nH; celková aktivní plocha diody 55 cm².



Obrázek 5.34: Simulované průběhy komutace různě tlustých diod s mikrosvody pro V_{DC}=2,8 kV při 25° C. Průměr mikrosvodu je 1000 um (P⁺ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N⁺ vrstvy 134 um), vypínaný proud je 40 A; L_s=600 nH; celková aktivní plocha diody 55 cm²; EO=4x.



Obrázek 5.35: Simulované průběhy komutace různě tlustých diod s mikrosvodu pro $V_{DC}=2,8$ kV. Průměr mikrosvodu je 1000 μm (P^+ plocha mikrosvodu zabírá 75% plochy katodové strany pro šířku katodové N^+ vrstvy 134 μm), vypínaný proud je 2500 A; $L_s=600$ nH; $EO=4x$; teplota 140° C.



Obrázek 5.36: Simulované průběhy závěrné VA charakteristiky diod s mikrosvodu s tloušťkou 550, 500 a 450 μm a měrným odporem 330 Ωcm pro teplotu 25° C.

5.3 Návrhová pravidla pro zajištění měkké komutace u velkoplošné diody s rychlou komutací

V kapitole 5. byl proveden rozbor naměřených a simulovaných parametrů diod pro jmenovité napětí 4,5 kV s aktivní plochou 55 cm² s mikrosvody a jejich porovnání s diodou bez mikrosvodů.

Realizace nové generace diod využívající katodové mikrosvody je podmíněna precizním nastavením všech technologických parametrů a současně dodržením níže uvedených návrhových pravidel. To pak rozhoduje o výsledných vlastnostech součástky a obvodů, ve kterých jsou použity.

Návrhová pravidla:

- **Koncentrační profil:** Koncentrační profil akceptorů ve vrstvě anody, donorů v katodové vrstvě a rekombinačněgeneračních center v celém objemu diody zajišťuje správné rozložení elektronoděrové plazmy během sepnutého stavu před začátkem komutace. Koncentrační profil je proto nastaven tak, aby snížil injekční schopnost anodové P vrstvy a naopak zvýšil injekční schopnost katody. To pomáhá rychlé extrakci plazmy z oblasti vrstvy N⁻ blízko anody a udržuje zbytky plazmy v okolí rozhraní N⁻N⁺ u katodové strany, čímž je zabráněno kolapsu plazmy a prudkému poklesu proudu vedoucím na napěťové oscilace.
 - **Koncentrační profil anodové vrstvy:** pro vytvoření anodové vrstvy je použita kombinace koncentračního profilu akceptorů a profilu rekombinačních center vytvořených implantací lehkými ionty (protony nebo jádra helia). Rekombinační centra mají maximum v takové hloubce, kdy maximálně snižují injekční účinnost, ale zároveň integrál koncentrace akceptorů pod maximem koncentrace rekombinačních center (místem doletu iontů při iontovém ozařování) zajišťuje spolehlivou blokovací schopnost anodového přechodu. Jedná se o použití technologie CAL a splnění podmínek pro blokovací schopnost, jak bylo vysvětleno v souvislosti s diodou typu EMCON, jak bylo popsáno v kapitolách 2.1 a 2.2.
 - **Koncentrační profil katodové vrstvy:** Povrchová koncentrace donorů v katodové vrstvě by z důvodu vysoké injekční účinnosti a vysoké proudové přetížitelnosti měla přesahovat 10²⁰ at/cm³ a hloubka by měla být větší, než 10 μm.
 - **Koncentrační profil mikrosvodu:** Maximální povrchová koncentrace akceptorů se může pohybovat v rozmezí 10¹⁸ až 10²⁰ at/cm³. Tato povrchová koncentrace současně s malou hloubkou přechodu (cca 2 μm) a koncentrací stlačující N vrstvy pod mikrosvodem

5.3. Návrhová pravidla pro zajištění měkké komutace u velkoplošné diody s rychlou komutací

v řádu 10^{15} at/cm³ zajišťuje dostatečnou injekční účinnost mikrosvodu.

- **Koncentrační profil stlačující N vrstvy:** Tranzistor v podobě mikrosvodu na katodové straně může při nevhodném návrhu způsobit snížení průrazného napětí a způsobit vysoký svodový proud, zvláště při vyšších pracovních teplotách. Maximální koncentrace stlačující vrstvy pod mikrosvodem by se proto měla nacházet v rozmezí 1.10^{15} až 5.10^{15} at/cm³ při hloubce několika desítek μm v závislosti na použitém měrném odporu a tloušťce výchozí křemíkové destičky, resp. napěťové třídě diody.

• Laterální rozměry P⁺ mikrosvodu a N⁺ vrstvy katody:

- **Velikost mikrosvodu:** Minimální velikost mikrosvodu souvisí, jak bylo popsáno v kapitolách 5.2.1 a 5.2.2, s koncentračním profilem stlačující vrstvy a s provozní teplotou diody. Velikost mikrosvodu musí být taková, aby při průběhu komutace došlo k překročení prahového napětí na PN přechodu mikrosvodu a stlačující vrstvy. Minimální velikost mikrosvodu se řídí vztahem 5.1 resp. grafem na obr. 5.14.
- **Šířka N⁺ vrstvy katody:** Šířka katodové vrstvy nesmí přesahovat dvě difúzní délky děr. V opačném případě vzniká nad vrstvou katody při kolapsu plazmy skokově nevodivá oblast, což má za následek zvýšení strmosti komutačního proudu a vznik přepěťových kmitů (kapitola 5.3). Minimální šířka katodové vrstvy je omezena rozlišovací schopností litografického procesu při expozici masek a dosažením přijatelné technologické křivky mezi statickými a dynamickými ztrátami. Pozornost je také třeba věnovat zamezení vzniku katodových proudových filamentů, aby nedošlo k nežádoucímu snížení dynamické SOA.
- **Tloušťka:** pro standardní diodu bez mikrosvodů je pro zajištění hladkého průběhu komutace bez překmitů nezbytná velká tloušťka křemíkové destičky, jak je popsáno v kapitole 2.1. Pro novou generaci diod, na rozdíl od standardních diod bez mikrosvodů, je možné aplikovat výrazně menší tloušťku, která je omezena pouze požadovaným závěrným napětím a odolností proti kosmickému záření. Snížení statických a vypínacích ztrát snížením tloušťky diody bez uvážení omezení daného kosmickým zářením je ukázáno na simulacích v kapitole 5.2.8.

Uvedená návrhová pravidla pro konstrukci diody s mikrosvodem zajistí bezpečný provoz velkoplošné diody s rychlou komutací v širokém rozsahu pracovního režimu. Diody využívající katodové mikrosvodem umožňují významné

5. OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÉ DIODY S KATODOVÝMI MIKROSVODY

ztenčení křemíkové desky, a tím dosažení stanoveného cíle, tj. snížení provozních ztrát. Obecně, lze tato pravidla aplikovat na diody se strukturou využívající katodové mikrosvody.

Shrnutí

Předložená práce prezentuje novou generaci velkoplošných výkonových diod s rychlou komutací pro obvody s tyristory IGCT. Pro dosažení tohoto výsledku byl zvolen koncept diody s mikrosvody, a to z důvodu jeho praktické realizovatelnosti v polovodičovém průmyslu v kombinaci s velkou měrou principiálně možného zlepšení elektrických parametrů vyplývajících z fyzikálních principů tohoto konceptu.

Použitý koncept není ve svém principu nový. Jeho celková složitost však vedla k tomu, že byl v polovodičovém průmyslu spolehlivě uplatněn až v posledních letech, a to jen na čípech o rozměrech nepřesahujících 1 – 2 cm². Přínos této práce lze pak nalézt v tom, že podává originální analýzu funkce katodových mikrosvodů. Uvádí soubor návrhových pravidel a demonstraci funkčního prototypu na diodách o ploše větší než 50 cm² v obvodech s tyristory IGCT s vysokou parazitní indukčností. Jedná se o velmi náročné podmínky pro činnost rychlých diod, což poskytuje jedno z možných vysvětlení absence tohoto tématu v recenzovaných publikacích.

Originalitu výsledků dosažených v této práci dále potvrzuje skutečnost, že v dostupné literatuře nenalezneme žádnou práci, která by obdobnou problematiku na velkoplošných diodách řešila. Problematika katodových mikrosvodů na čípech malých rozměrů pro obvody IGBT je přitom předmětem neustálé publikační aktivity předních světových výrobců polovodičů. Vědeckou hodnotu výsledků této práce potvrzuje skutečnost, že příspěvek autora na toto téma byl přijat k publikaci na nejprestižnějším sympoziu v oboru výkonových polovodičů, kterým je ISPSD organizované společností IEEE.

Původní výsledky dosažené v této práci, veřejně publikované lze chronologicky shrnout následovně. V roce 2013 byla autorem disertace časopisecky publikována skutečnost, že velkoplošné diody s mikrosvody v napěťové třídě 4,5 kV nedosahují za pokojových teplot potřebné měkkosti komutace [46, 47]. Přestože se tato negativní vlastnost uplatňuje obecně, a tudíž i u čipových diod, nebyla tato skutečnost v předchozích člancích nikdy uvedena. Tento výsledek byl pak ověřen a publikován také na velkoplošných diodách napěťových

tříd 5,5 a 6,5 kV v obvodech s IGCT [50]. Oba tyto výsledky stimulovaly snahu o odstranění tohoto problému intenzivním zkoumáním mikrosvodů s pokrytím katody v co největším možném rozsahu, jejíž výsledky tvoří těžiště této práce. Výsledkem je již zmíněná prestižní publikace na sympoziu ISPSD [51], která demonstruje překvapivý výsledek, že dioda v napěťové třídě 4,5 kV dokáže spolehlivě vypnout i při $V_{DC} = 3600$ V a může v tomto ohledu nahradit diody z vyšších napěťových tříd s mnohem horšími technologickými křivkami, resp. vyššími energetickými ztrátami.

Předložená práce byla vytvořena ve výrobním podniku ABB, a má proto ještě další dopady, které však nelze veřejně publikovat, protože podléhají průmyslovému tajemství. Jedná se například o skutečnost, že výše uvedený soubor návrhových pravidel pro diskrétní diodu s rychlou komutací lze přímo aplikovat při vývoji zpětně propustných tyristorů RC IGCT, kde je dioda s mikrosvody integrována do struktury tyristoru IGCT. Vzhledem k principiálně mnohem větší technologické náročnosti takové integrace bude zveřejnění pozitivních výsledků na toto téma možné až v delším časovém horizontu.

Literatura

- [1] J. Lutz, R. Baburske: Dynamic avalanche in bipolar power devices. *Microelectronics Reliability*, 2012: s. 475–481.
- [2] Roman Baburske, Birk Heinze, Franz-Josef Niedernostheide†, Josef Lutz, Dieter Silber: On the formation of stationary destructive cathode-side filaments in p+-n-n+ diodes. In *ISPSD*, 2009.
- [3] H.-J. Schulze, F.-J. Niedernostheide, F. Pfirsch, and R. Baburske: Limiting Factors of the Safe Operating Area for Power Devices. In *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, s. 551–562.
- [4] Y. Morikawa, T. Miura, M. Kekura, S. Miyazaki, F. Ichikawa: Sloping Lifetime Control by Electron Irradiation for 4.5kV PT-SITHs. In *Proceedings ISPSD97, Weimar*, 1997, str. . 61 – 64.
- [5] M. Tsukuda, Y. Sakiyama: Dynamic Punch-Through Design of High-Voltage Diode for Suppression of Waveform Oscillation and Switching Loss. In *IEEE*, 2009, s. 128–131.
- [6] R. Baburske, J. Lutz H. Schulze, J. Niedernostheide: Analysis of the destruction mechanism during reverse recovery of power diodes. In *Data Compression Conference*, 2010, s. 47–54.
- [7] H. Egawa: Avalanche characteristics and failure mechanism of high voltage diodes. In *IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-13*, 1966, s. 754–758.
- [8] Nagasu M et al: 3.3 kV IGBT Modules having Soft Recovery Diodes with high Reverse Recovery di/dt Capability. In *Proceedings of the PCIM 98 Japan*, 1998, str. 175.
- [9] Lutz J, Domeij M: Dynamic avalanche and reliability of high voltage diodes. In *Microelectronics Reliability 43*, 2003, str. 529–536.

- [10] Heinze B, Lutz J, Felsl HP, Schulze HJ: Ruggedness of High Voltage Diodes under very hard Commutation Conditions. In *Proceedings EPE 2007*, 2007.
- [11] M. Domeij; J. Lutz; D. Silber: On the Destruction Limit of Si Power Diodes During Reverse Recovery with Dynamic Avalanche. In *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, 2003, str. 486–493.
- [12] Baburske R, Domes D, Lutz J, Hofmann W: Passive turn-on process of IGBTs in Matrix converter applications. In *Proceedings EPE*, 2009.
- [13] D. L. Scharfetter , H. K. Gummel: Large-Signal Analysis of a Silicon Read Diode Oscillator. In *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, str. 64 – 77.
- [14] J. Lutz, W. Sudkamp, W. Gerlach: : IMPATT Oscillations in Fast recovery Diodes due to Temporarily Charged Radiation- Induced Deep Levels. In *Solid-State Electronics*, 1998, s. 931–938.
- [15] J. Vobecky, V. Zahlava, N. Galster : Impact of Lifetime Control on the Reverse Recovery of High-Power P-i-N Diode. In *Proc. ISPS'1998*, 1998.
- [16] H. Benda, E. Spenke: Reverse Recovery Processes in Silicon Power Rectifiers. In *Proceedings of the IEEE*, 1967, s. 1331–54.
- [17] R. Baburske, B. Heinze, J. Lutz, and F.-J. Niedernostheide: Chargecarrier plasma dynamics during the reverse-recovery period of p+-n-n+ diodes. In *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 55, 2008, str. . 2164–2172.
- [18] Vobecky J. Hazdra P. Záhlava V.: Impact of the electron, proton and helium irradiation on the forward I–V characteristics of high-power P–i–N diode. In *Microelectronics Reliability*, 2003, str. 537–44.
- [19] Mauder, A; Port, A: High-voltage diode. 2005. In *US Patent 6888211*, 2005.
- [20] Laska T, Lorenz L, Mauder A: The Field Stop IGBT Concept with an Optimized Diode. In *Proceedings of the 41th PCIM*, 2000.
- [21] J. Vobecky, P. Hazdra, O. Humbel, N. Galster: Crossing Point Current of Electron and Proton Irradiated Power P-i-N Diodes. In *Microelectronics Reliability 40*, 2000, str. 427 – 433.
- [22] J. Vobecky, P. Hazdra, V. Zahlava: Impact of the Electron, Proton and Helium Irradiation on the Forward I-V Characteristics of High-Power P-i-N Diode. In *Microelectronics Reliability 43*, 2003, str. 537 – 544.

-
- [23] J. Vobecky, R. Siegrist, M. Arnold K. Tugan : Large Area Fast Recovery Diode with Very High SOA Capability for IGCT Applications. In *PCIM Europe 2011*, 2011, s. 44–49.
- [24] Silber D, Novak WD, Wondrak W, Thomas B, Berg H: Improved Dynamic Properties of GTO-Thyristors and Diodes by Proton Implantation. In *IEDM, Washington*, 1985.
- [25] Wondrak W, Boos A: Helium Implantation for Lifetime Control in Silicon Power Devices,. In *Proc. Of ESSDERC 87*, 1987, str. 649–652.
- [26] Lutz J, Scheuermann U.: Advantages of the New Controlled Axial Lifetime Diode. In *Proceedings of the 28th PCIM*, 1994.
- [27] Vobecky J., Kopta, A., Cammarata M: Fast recovery diode. In *US Patent 8912623B2*, 2014.
- [28] Vobecký J., Hemman K., Duran H., Rahimo M. : Fast recovery diode 2013. In *US Patent 8395244B2*, Mar. 12, 2013.
- [29] J. Vobecky, and P. Hazdra: “Future Trends in Local Lifetime Control. In ”, *Proc. ISPSD 96*, 1996, str. 161.
- [30] O. Humbel, N. Galster, F. Bauer, and W. Fichtner: 4.5kv fast diodes with expanded SOA using a multi-energy proton lifetime control technique. In *Proc. ISPSD. Toronto*, 1999, s. 121–124.
- [31] Baliga B. J: Power Devices. In *S.M. Sze: Modern Semiconductor Device Physics, John Wiley Sons*, 1998.
- [32] Advanced tcad manual", booktitle = ". Synopsys Inc. Mountain View. 2007, str. online : <http://www.Synopsys.com>.
- [33] Chen M Lutz J Domeij M Felsl HP Schulze H-J: A novel diode structure with Masuoka Controlled Injection of Backside Holes (CIBH). In *Proceedings ISPSD 2006*, 2006, str. 9–12.
- [34] J. Oetjen, R. Jungblut, U. Kuhlman, J. Arkenau, R. Sittig : Current filamentation in bipolar power devices during dynamic avalanche breakdown. In *Solid-State Electronics, vol. 44 no. 1*, 2000, s. 117–123.
- [35] Kopta A, Rahimo M: The Field Charge Extraction (FCE) Diode – A Novel Technology for Soft Recovery High Voltage Diodes. In *Proc. ISPSD Santa Barbara*, 2005, str. 83–86.
- [36] Masuoka F, Nakamura K, Nishii A, Terashima, T.: Great impact of RFC technology on fast recovery diode towards 600 V for low loss and high dynamic ruggedness. In *Proceedings ISPSD 2012*, 2012, str. 373–376.

- [37] Masuoka F., Tanaka K., Kachi T.: RFC diode with High Avalanche Stability and UIS Capability. In *Proc. ISPSD. Sapporo*, 2017, s. 131 – 134.
- [38] Nakamura K., Shimizu K.: Advanced RFC diode utilizing a Novel Vertical Structure for Softness and High Dynamic Ruggedness. In *Proc. ISPSD. Sapporo*, 2017, s. 117 – 120.
- [39] J. Lutz, R. Baburske, M. Chen, B. Heinz, M. Domeij, H. P.Felsl, H.-J. Schulze: The nn+-Junction as the Key to Improved Ruggedness and Soft Recovery of Power Diodes. In *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009.
- [40] J. Vobecky: Lifetime engineering in high-power devices. In " *Proceedings ASDAM*, 2000, s. 21–28.
- [41] P. Hazdra, K. Brand, J. Rubes, J. Vobecky: „Local lifetime control by light ion irradiation: impact on blocking capability of power P–i–N diode. In *Microelectron. J.* 32, 2001, str. 449–456.
- [42] P. Hazdra, J. Vobecky, H. Dorschner, K. Brand: Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons. In *Microelectronics Journal*, 2004, s. 249 – 257.
- [43] B. Heinze, J. Lutz, H. P. Fell, and H.-J. Schulze: Ruggedness analysis of 3.3 kV high voltage diodes considering various buffer structures and edge terminations. In *Microelectron*, 2008, str. 868–877.
- [44] Wolley ED, Bevaqua SF: High Speed, Soft Recovery Epitaxial Diodes for Power Inverter Circuits. In *IEEE IAS Meeting Digest*, 1981.
- [45] S. Matthias; S. Geissmann; M. Bellini; A. Kopta; M. Rahimo: Inherently soft free-wheeling diode for high temperature operation. In *proc. of the 25th Int. Symposium on Power Semiconductor Devices IC's (ISPSD)*, 2013, str. 335 — 338.
- [46] J. Vobecky, L. Pina: Cathode Short Technology for High-Voltage Large Area Fast Recovery Silicon Diodes: The Impact of Operating Temperature. In *Proc. of the 12th Int. Seminar on Power Semiconductors ISPS*, 2014, str. 23.
- [47] L. Pina, J. Vobecky: High-power silicon P–i–N diode with cathode shorts: The impact of electron irradiation. In *Microelectronics Reliability*, 2013, str. 681 – 686.
- [48] S. Daliento, A. Sanseverino, P. Spirito: Parametric Description of the Effect of Electron in Silicon Layers. In *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 14, 1999, s. 117–123.

- [49] R. Carlson, Y. S. Sun and H. B. Assalit: Lifetime control in silicon, power devices by electron or gamma irradiation. In *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 24, 1977, str. 1103–1108.
- [50] J. Vobecky, L. Pina: Large Area 6.5 kV Fast Recovery Diode with Cathode Shorts for Very High Current Handling Capability. In *Proceedings of the 51th PCIM Europe 2014*, 2014, s. 54 – 59.
- [51] L. Pina, J. Vobecky: Fast Recovery High-Power P-i-N Diode with Heavily Shorted Cathode for Enhanced Ruggedness in the Circuits with IGCTs. In *Proc. ISPSD. Prague*, 2016, s. 303 – 306.

Seznam publikací autora

A.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce

A.1.1 Publikace v impaktovaných časopisech

1. "L. Pina, J. Vobecky, "High-power silicon P-i-N diode with cathode shorts: The impact of electron irradiation", *Microelectronics Reliability* 53, pp. 681 – 686, 2013."

A.1.2 Příspěvek ve sborníku prestižní konference

1. "L. Pina, J. Vobecky, "Fast Recovery High-Power P-i-N Diode with Heavily Shorted Cathode for Enhanced Ruggedness in the Circuits with IGCTs", *Proc. ISPSD. Prague*, pp. 303 - 306, 2016."

A.1.3 Příspěvky na mezinárodních konferencích

1. J. Vobecky, L. Pina, " Large Area 6,5 kV Fast Recovery Diode with Cathode Shorts for Very High Current Handling Capability ", *Proceedings of the 51th PCIM Europe 2014, Nuremberg*, pp. 54 - 59, 2014.
2. J. Vobecky, L. Pina, "Cathode Short Technology for High-Voltage Large Area Fast Recovery Silicon Diodes: The Impact of Operating Temperature", *Proc. of the 12th Int. Seminar on Power Semiconductors ISPS 14, Prague*, p., 23, 2014.

A.1.4 Patenty (podané patentové přihlášky)

1. Homola, J., Radvan, L., Pina, L.: „High-Power Semiconductor Device for the Circuits with Fast Switching Components“, *Patentová přihláška* 2009-05-06

2. Homola, J., Podzemský, J., Pína, L.: „High power fast recovery diode“, EP3051590 (A1) — 2016-08-03
3. Homola, J., Radvan, L., Pína, L.: „Power semiconductor device for circuits with quick switching components“, CZ301460 (B6) — 2010-03-10
4. Homola, J., Radvan, L., Pína, L.: „Power semiconductor diode for circuits provided with IGCT thyristors“, CZ18486 (U1) — 2008-05-07

A.1.5 Odborný příspěvek ve sborníku konference ostatní nebo studentské

1. Pína, L.: Integrated Gate Commutated Thyristor with Improved Safe Operation Area. In POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2011, vol. 1, p. 1-2. ISBN 978-80-01-04806-1.

A.2 Ostatní publikace

A.2.1 Patenty (podané patentové přihlášky)

1. Homola, J. - Holcová, L. - Pína, L.: Semiconductor Component for the Rectification of a Large Alternating Current. Patentová přihláška Úřad průmyslového vlastnictví, 2007-10-17.
2. Homola, J., Podzemský, J., Pína, L.: „Semiconductor device for rectification of high power alternating current“, CZ301473 (B6) — 2010-03-17
3. Homola, J. - Holcová, L. - Pína, L.: „Výkonová polovodičová dioda s vysokou proudovou zatížitelností“, CZ16693 (U1) — 2006-08-16

A.2.2 Užité vzory

1. Homola, J. - Radvan, L. - Pína, L.: High-Power Semiconductor Diode for IGCT Circuits. Užité vzor 2008-04-28.

A.2.3 Výzkumné zprávy

1. Pína, L.: Difuzní technologie na SOFT diodách. In Výzkumná zpráva NTÚ - 11/99, Polovodiče a. s. Praha: 1999.
2. Pína, L.: Diody 6 kV z plynného galia. In Výzkumná zpráva NTÚ - 25/99, Polovodiče a. s. Praha: 1999.
3. Pína, L.: Příměsi typu P v leptaném povrchu po dif. Al In Výzkumná zpráva NTÚ - 28/99, Polovodiče a. s. Praha: 1999.

4. Pína, L. - Holcová, L.: DV 808-2000-50 FV 2 - dif. technologie. In Výzkumná zpráva NTÚ - 42/00, Polovodiče a. s. Praha: 2000.
5. Pína, L. - Holcová, L.: DV 808-2000-50 FV 1- pap. difuze. In Výzkumná zpráva NTÚ - 44/00, Polovodiče a. s. Praha: 2000.
6. Pína, L.: Návrh konstrukce FV D807-810-50. In Výzkumná zpráva NTÚ - 07/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
7. Pína, L.: Návrh konstrukce FV D807-1070-28 D808-2415-28. In Výzkumná zpráva NTÚ - 08/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
8. Pína, L.: Návrh konstrukce FV tyrist.IGCT na prům. Si 2". In Výzkumná zpráva NTÚ - 09/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
9. Pína, L.: Vyhodnocení T908-NT28 (S.81-84/00). In Výzkumná zpráva NTÚ - 17/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
10. Pína, L.: Tyristory na Si povrchem HKL. In Výzkumná zpráva NTÚ - 27/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
11. Pína, L.: Tyristory konkurenčních výrobců. In Výzkumná zpráva NTÚ - 28/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
12. Pína, L.: Návrh prototypové serie D808-2415-28. In Výzkumná zpráva NTÚ - 33/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
13. Pína, L.: Vyhodnocení D 807-810-50. In Výzkumná zpráva NTÚ - 39/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
14. Pína, L.: Návrh základního materiálu pro IGCT. In Výzkumná zpráva NTÚ - 45/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
15. Pína, L.: Náhrada výrobce křemenných ampulí jiným, rozbor. In Výzkumná zpráva NTÚ - 46/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
16. Pína, L.: Vyhodnocení FV2 D807-810-50. In Výzkumná zpráva NTÚ - 47/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
17. Pína, L.: Návrh konstrukce prototypové serie D807-810-50. In Výzkumná zpráva NTÚ - 48/01, Polovodiče a. s. Praha: 2001.
18. Pína, L.: Návrh konstrukce FV diody na prům. Si 53mm IGCT. In Výzkumná zpráva NTÚ - 08/02, Polovodiče a. s. Praha: 2002.
19. Pína, L.: Srovnání technologií u diod NT50 na pr. 53mm. Si 53mm IGCT. In Výzkumná zpráva NTÚ - 18/02, Polovodiče a. s. Praha: 2002.
20. Pína, L.: Tyristor s dif. Ga plyn. a s dif.PAP. In Výzkumná zpráva NTÚ - 26/02, Polovodiče a. s. Praha: 2002.

A. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

21. Pína, L.: Závislost Urd na odporu zák.mat. a tloušť.Si u tyr. nové řady. In Výzkumná zpráva NTÚ - 27/02, Polovodiče a. s. Praha: 2002.
22. Pína, L.: Dif. fosforu 1230C 1 hod.a 2hod u T908-1500-28. In Výzkumná zpráva NTÚ - 28/02, Polovodiče a. s. Praha: 2002.
23. Pína, L.: Návrh experimentu na ověření Si materiálu diody NT40. In Výzkumná zpráva NTÚ - 29/02, Polovodiče a. s. Praha: 2002.
24. Pína, L.: Mok na dif. zdroj. bóru(diffusion preforms) . In Výzkumná zpráva NTÚ - 30/02, Polovodiče a. s. Praha: 2002.
25. Pína, L.: Návrh konstrukce IGCT pro NT 2,5kV, 4,5 kV a 6kV. In Výzkumná zpráva NTÚ - 18/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
26. Pína, L.: Návrh konstrukce součástky pro IGCT pro NT 2,5kV typ 918. In Výzkumná zpráva NTÚ - 19/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
27. Pína, L.: Návrh konstrukce IGCT pro NT 2,5kV, 4,5 kV typ 929. In Výzkumná zpráva NTÚ - 20/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
28. Pína, L.: Návrh konstrukce DM889. In Výzkumná zpráva NTÚ - 21/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
29. Pína, L.: Ověření Si materiálu pro diodu NT40. In Výzkumná zpráva NTÚ - 24/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
30. Pína, L.: Vyhodnocení serii diod DV889-4000-40. In Výzkumná zpráva NTÚ - 26/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
31. Pína, L.: Zjednodušená technologie pro novou řadu tyristoru. In Výzkumná zpráva NTÚ - 28/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
32. Pína, L.: Návrh základního materiálu na tyristor 4,2 kV. In Výzkumná zpráva NTÚ - 56/03, Polovodiče a. s. Praha: 2003.
33. Pína, L.: Návrh konstrukce IGCT pro 4,5 kV typ 918. In Výzkumná zpráva NTÚ - 06/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
34. Pína, L.: Vliv nehomogenity koncentrace Ga na dU/dt. In Výzkumná zpráva NTÚ - 07/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
35. Pína, L.: Udržovací teplota 400C při oxidaci parní. In Výzkumná zpráva NTÚ - 08/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
36. Pína, L.: Srovnání dif.zdrojů bóru (diffusion preforms) pro DV889. In Výzkumná zpráva NTÚ - 15/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.

37. Pína, L.: Porovnání dif.zdrojů bóru (diffusion preforms) pro DV818-2480-28. In Výzkumná zpráva NTÚ - 17/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
38. Pína, L.: Návrh konstrukce FV diod pro IGCT. In Výzkumná zpráva NTÚ - 22/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
39. Pína, L.: Návrh základního materiálu pro TR NT12. In Výzkumná zpráva NTÚ - 27/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
40. Pína, L. - Holcová, L.: Vyhodnocení FV T, TV918R. In Výzkumná zpráva NTÚ - 30/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
41. Pína, L. - Kuzma, R. – Radvan,L.: Měření T 907-1000-12 pro tvorbu předběžné TS. In Výzkumná zpráva NTÚ - 45/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
42. Pína, L.: Návrh konstrukce FV diod 6kV s dif. zdroji bóru a fosforu(diffusion preforms). In Výzkumná zpráva NTÚ - 48/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
43. Pína, L.: Vliv tloušťky Si na parametry DV827-800-50. In Výzkumná zpráva NTÚ - 50/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
44. Pína, L.: Rozbor vlivu základního mat. a VTO u TV989-28. In Výzkumná zpráva NTÚ - 65/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
45. Pína, L.: FV diod 6kV s dif. zdroji bóru a fosforu(diffusion preforms). In Výzkumná zpráva NTÚ - 73/04, Polovodiče a. s. Praha: 2004.
46. Pína, L.: Návrh konstrukce FV diod 6kV. In Výzkumná zpráva NTÚ - 22/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
47. Pína, L.: Ověření praní Si desek v DSI na DV827-800-50. In Výzkumná zpráva NTÚ - 24/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
48. Pína, L.: Návrh základního materiálu TR NT 12. In Výzkumná zpráva NTÚ - 27/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
49. Pína, L. - Radvan, L.: Vyhodnocení parametrů jednotlivých konstrukčních variant diod DV 827-xxx-60. In Výzkumná zpráva NTÚ - 32/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
50. Pína, L.: Měření prašnosti v místnosti 184 (pouzdrění). In Výzkumná zpráva NTÚ - 48/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
51. Pína, L.: Návrh základního materiálu a technol. postupu pro tyristor NT60. In Výzkumná zpráva NTÚ - 52/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.

A. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

52. Pína, L.: Měření prašnosti v místnosti 164 (difúze). In Výzkumná zpráva NTÚ - 53/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
53. Pína, L.: Monitorování difúzních procesů. In Výzkumná zpráva NTÚ - 58/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
54. Pína, L.: Vliv vykružování na závěrné vlastnosti diod. In Výzkumná zpráva NTÚ - 59/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
55. Pína, L.: Navrh konstrukce tranzistoru pro NT6 a NT10. In Výzkumná zpráva NTÚ - 62/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
56. Pína, L.: Vlastnosti diod se stlačeným polem. In Výzkumná zpráva NTÚ - 80/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
57. Pína, L.: Návrh konstrukce PS TR918-12,20,30. In Výzkumná zpráva NTÚ - 84/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
58. Pína, L. - Palamarčuk, D.: Rozbor tyristorů RCT od konkurenčních výrobců. In Výzkumná zpráva NTÚ - 86/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
59. Pína, L.- Palamarčuk, D.: Monitorování difúzních procesů. In Výzkumná zpráva NTÚ - 106/05, Polovodiče a. s. Praha: 2005.
60. Pína, L.- Palamarčuk, D.: Ověření vlivu praní po vykružování na parametry diod DV808-1000-60. In Výzkumná zpráva NTÚ - 38/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.
61. Pína, L.: Návrh Si materiálu pro DV889-50 pro ABB. In Výzkumná zpráva NTÚ - 41/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.
62. Pína, L.: Difúze bóru skrz oxid. In Výzkumná zpráva NTÚ - 43/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.
63. Pína, L.- Palamarčuk, D.: Zkoušky technologických procesů v difúzní peci SVCS. In Výzkumná zpráva NTÚ - 52/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.
64. Pína, L.: Návrh konstrukce PS TC929. In Výzkumná zpráva NTÚ - 54/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.
65. Pína, L.- Palamarčuk, D.: Difúze bóru a fosforu přes oxid. In Výzkumná zpráva NTÚ - 55/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.
66. Pína, L.: DV889-50 s gáliovým přechodem. In Výzkumná zpráva NTÚ - 68/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.

67. Pína, L.: Návh konstrukce PS nové řady diod. In Výzkumná zpráva NTÚ - 78/06, Polovodiče a. s. Praha: 2006.
68. Pína, L. - Palamarčuk, D.: Zkoušky omezení difúze B a P oxidem na kraji systému. In Výzkumná zpráva NTÚ - 03/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
69. Ptáková, Z. - Pína, L. - Palamarčuk, D.: Rozbor konstrukce diody ABB v pouzdře P85. In Výzkumná zpráva NTÚ - 06/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
70. Pína, L.: DV 889-60 technologií z dif. zdrojů bóru a fosforu(diffusion preforms) a s Gáliovým přechodem. In Výzkumná zpráva NTÚ - 16/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
71. Palamarčuk, D. - Pína, L.: Planární difuzní zdroje fosforu a bóru. In Výzkumná zpráva NTÚ - 17/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
72. Palamarčuk, D. - Pína, L.: Porovnání parametrů a výtěžnosti diod DV 889-3800-50 s a bez odlapování před legováním. In Výzkumná zpráva NTÚ - 25/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
73. Palamarčuk, D. - Pína, L.: Doba života vysokonapěťových diod nové řady po difuzi papírkové. In Výzkumná zpráva NTÚ - 26/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
74. Palamarčuk, D. - Pína, L.: Prohnutí Si destiček po papírkové difuzi. In Výzkumná zpráva NTÚ - 35/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
75. Pína, L.: Konstrukce prototypové série TP919FC. In Výzkumná zpráva NTÚ - 39/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
76. Radvan, L. - Pína, L.: Alternativní technologie výroby 6kV diod, srovnávací měření, projekce parametrů pro typ DV 889. In Výzkumná zpráva NTÚ - 43/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
77. Palamarčuk, D. - Pína, L.: Hledání příčin "kanálových" charakteristik. In Výzkumná zpráva NTÚ - 56/07, Polovodiče a. s. Praha: 2007.
78. Palamarčuk, D. - Pína, L.: Vliv doby života na UBR TC(TG)-45 tyristorů. In Výzkumná zpráva NTÚ - 03/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.
79. Pína, L.: Srovnání výsledků diod DV889-60 s různou technologií. In Výzkumná zpráva NTÚ - 09/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.
80. Palamarčuk, D. - Pína, L.: DV889 s N+ vrstvou z fosforu(diffusion preforms). In Výzkumná zpráva NTÚ - 15/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.

A. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

81. Raus, K. - Pína, L.: Měření prašnosti v místnosti 163 (difúze). In Výzkumná zpráva NTÚ - 28/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.
82. Pína, L.: Rozbor koncentračního profilu tyristoru IGCT od ABB. In Výzkumná zpráva NTÚ - 36/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.
83. Radvan, L. - Pína, L.: Konstrukce prototypové série typu DC 889. In Výzkumná zpráva NTÚ - 37/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.
84. Pína, L.: Porovnání difuzní a kombinované technologie pro DV889-60. In Výzkumná zpráva NTÚ - 38/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.
85. Radvan, L. - Pína, L. - Vala, J.: Náhrada technologie pro DA 808-1410-50. In Výzkumná zpráva NTÚ - 39/08, Polovodiče a. s. Praha: 2008.
86. Pína, L.: Návrh konstrukce TA929-25 a TA929-45. In Výzkumná zpráva NTÚ - 08/09, Polovodiče a. s. Praha: 2009.
87. Pína, L.: Vliv odporu pod emitory na parametry TG a TC. In Výzkumná zpráva NTÚ - 30/09, Polovodiče a. s. Praha: 2009.
88. Pína, L.: Vliv povrchového odporu P vrstvy na parametry TG919-25. In Výzkumná zpráva NTÚ - 16/10, Polovodiče a. s. Praha: 2010.
89. Pína, L. - Leubner, K.: Návrh Si materiálu pro diodu IGCT 6,5 kV. In Výzkumná zpráva NTÚ - 24/10, Polovodiče a. s. Praha: 2010.
90. Pína, L.: Návrh Si materiálu pro svářecí diodu pro $U_r > 650$ V. In Výzkumná zpráva NTÚ - 32/10, Polovodiče a. s. Praha: 2010.
91. Pína, L.: Návrh Si materiálu pro síťový tyristor NT 36. In Výzkumná zpráva NTÚ - 33/10, ABB s.r.o. Praha: 2010.
92. Leubner, K. - Pína, L.: Difúze 4" diod typu DV890-40 na stávajícím zařízení. In Výzkumná zpráva NTÚ - 36/10, ABB s.r.o. Praha: 2010.
93. Pína, L.: Kapacity v oblasti VTO pro DC889 a DV889. In Výzkumná zpráva NTÚ - 05/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
94. Leubner, K. - Pína, L. - Čumpelíková, J.: Vyhodnocení technologického postupu GTO do leptaného povrchu. In Výzkumná zpráva NTÚ - 06/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
95. Leubner, K. - Pína, L.: Porovnání praní Si desek po odlapování a jeho vliv na difúzi Al. In Výzkumná zpráva NTÚ - 18/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
96. Pína, L.: Návrh konstrukce TV907-65 a TV989-52. In Výzkumná zpráva NTÚ - 20/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.

97. Pína, L. - Leubner, K. – Podzemský, J.: Difúze bóru z difúzantu nanášeném Spin-On. In Výzkumná zpráva NTÚ - 25/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
98. Pína, L. - Leubner, K.: Vyhodnocení mezí difúzních technologií. In Výzkumná zpráva NTÚ - 38/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
99. Pína, L.: Vliv Si materiálu na závěrné a blokovací schopnosti SFT. In Výzkumná zpráva NTÚ - 39/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
100. Pína, L. - Leubner, K.: Vliv teploty HF na rychlost leptání SiO₂. In Výzkumná zpráva NTÚ - 40/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
101. Pína, L.: Oxidace bórová-naměřené odpory a hloubky přechodu. In Výzkumná zpráva NTÚ - 45/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
102. Pína, L.: Návrh Si materiálu pro diodu NT 80. In Výzkumná zpráva NTÚ - 53/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
103. Pína, L. - Leubner, K.: Porovnání difúze bóru z různých difúzních zdrojů a porovnání teploty praní v HF na TV907-65. In Výzkumná zpráva NTÚ - 57/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
104. Pína, L. - Ettelová, J.: Měření a model rozložení povrchového odporu na ploše IGCT v místě vyleptání. In Výzkumná zpráva NTÚ - 62/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
105. Pína, L. - Leubner, K.: Porovnání vlivu teploty praní v HF na TV907-65. In Výzkumná zpráva NTÚ - 64/11, ABB s.r.o. Praha: 2011.
106. Ettelová, J. - Pína, L.: Zkouška odolnosti oxidu křemičitého při hloubkovém leptání křemíku. In Výzkumná zpráva NTÚ - 02/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.
107. Leubner, K. - Pína, L.: Vyhodnocení difúze bóru, né technologie a zařízení. In Výzkumná zpráva NTÚ - 03/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.
108. Leubner, K. - Pína, L. – Šrámková, L.: Vyhodnocení alternativních technologií výroby diod v napěťových třídách 5 a 6 kV. In Výzkumná zpráva NTÚ - 09/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.
109. Leubner, K. - Pína, L.: Návrh Si materiálu pro diodu DV890-55. In Výzkumná zpráva NTÚ -18/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.
110. Leubner, K. - Pína, L.: Porovnání měření koncentračních profilův Lenzburgu (CHSEM) a CZSEM. In Výzkumná zpráva NTÚ -20/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.

A. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

111. Leubner, K. - Pína, L.: Vyhodnocení DV889-50 s odporem nad 260 ohmcm. In Výzkumná zpráva NTÚ -22/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.
112. Leubner, K. - Pína, L.: Difúze Al do broušeného povrchu a regulace koncentrace. In Výzkumná zpráva NTÚ -29/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.
113. Pína, L. – Podzemský, J.: Návrh úpravy konstrukce vnitřních vrstev DC889-45. In Výzkumná zpráva NTÚ -31/12, ABB s.r.o. Praha: 2012.
114. Pína, Zkoušky technologií na TV907-65 - rozpracováno. Výzkumná zpráva R&D-56/13 , ABB s.r.o. Praha: 2013.
115. Pína, Výpočet konc. Profilu pro RBIGCT série 94001-94004. Výzkumná zpráva R&D-03/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
116. Pína, Zkoušky technologií na TV918-65. Výzkumná zpráva R&D-12/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
117. Pína, Zkoušky technologií na TV989-52. Výzkumná zpráva R&D-15/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
118. Frantík, Pína, DiF Al - vliv rozložení křemíkových desek ve vysokoteplotní peci. Výzkumná zpráva R&D-19/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
119. Pína, Frantík, Návrh kruhového diodového čipu NT22 pro BPM. Výzkumná zpráva R&D-31/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
120. Pína, Loužecký, Vliv EO do fazety na parametry TV907-65. Výzkumná zpráva R&D-32/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
121. Pína, Loužecký, Vliv žíhání 270C na parametry TV907-65. Výzkumná zpráva R&D-33/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
122. Frantík, Pína, Optimalizace difúze galia plynou metodou. Výzkumná zpráva R&D-34/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
123. Frantík, Pína, Matějec, Měření doby života minoritních nosičů metodou MWPCD na vybraných součástkách. Výzkumná zpráva R&D-38/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
124. Pína, Vyhodnocení série 93046,2 - TV907-65. Výzkumná zpráva R&D-39/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
125. Pína, Frantík, Návrh základního materiálu pro TV907-65. Výzkumná zpráva R&D-40/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
126. Pína, Dosažené výsledky na sériích TV907-65 s technologií Duplex (93046, 93047, 93052, 93055, 94008, 94015, 94016, 94019). Výzkumná zpráva R&D-52/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.

127. Pína, Rozložení intenzity el. pole na dvojité kladné fazetě pro tyristory NT65 (výpočty na Silvacu). Výzkumná zpráva R&D-58/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
128. Pína, Frantík, Porovnání měřených koncentračních profilů po kalibraci profiloměru. Výzkumná zpráva R&D-59/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
129. Pína, Frantík, Regulace povrchového odporu Al vrstvy pro FRD. Výzkumná zpráva R&D-69/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
130. Pína, Frantík, Návrh experimentu pro TV907-65 s různou povrchovou koncentrací N+ emitorů. Výzkumná zpráva R&D-75/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
131. Pína, Dosažené výsledky na sériích TV989-52 (93057, 93058, 94011). Výzkumná zpráva R&D-78/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
132. Pína, TV907-65: Série 93052; legovaný P+ emitor 700 a 750C s tloušťkou Si 1200 um. Výzkumná zpráva R&D-81/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
133. Pína, TV907-65: Série 93055 a 94008; P+ emitor legovaný 750C bez Bóru a s Bórem; leg. resp. kluzný systém (tloušťka Si 1150 um). Výzkumná zpráva R&D-82/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
134. Pína, TV907-65: Série 94039 a 94040; zkouška RO Si mat. na Si 1200 um (P+ emitor legovaný 750C bez Bóru). Výzkumná zpráva R&D-97/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
135. Pína, TV907-65: Optimalizace koncentračního profilu N+ a P+ emitoru; série 94044. Výzkumná zpráva R&D-98/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
136. Pína, Návrh levné technologie a Si materiálu pro diodu NT60. Výzkumná zpráva R&D-102/14 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
137. Pína, TV907-65: Vyhodnocení sérií 94053 až 94056. Výzkumná zpráva R&D-04/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
138. Pína, TV907-18 pro přítlačné moduly: Vyhodnocení sérií 94048 až 94052. Výzkumná zpráva R&D-07/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
139. Pína, Diody NT22: porovnání technologií a výpočty v Silvacu. Výzkumná zpráva R&D-22/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
140. Pína, Diody NT50 : výpočty v Silvacu. Výzkumná zpráva R&D-23/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
141. Pína, Diody NT60 technologie a výpočty v Silvacu. Výzkumná zpráva R&D-24/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.

A. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

142. Pína, :Technologie, výsledky a výpočty na svářecích diodách. Výzkumná zpráva R&D-27/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
143. Pína, :DV NT22 pro přítlačné moduly. Výzkumná zpráva R&D-61/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
144. Pína, :TV907-65: Vyhodnocení lotů 11265,11269,11270,11271,11272 a 11274 z výroby. Výzkumná zpráva R&D-63/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
145. Pína, :TV907-65: vliv pomalé masky a hlubšího Ga přechodu na měřené parametry tyristoru. Výzkumná zpráva R&D-65/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
146. Pína, :Dioda NT 75 : návrh Si materiálu. Výzkumná zpráva R&D-79/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
147. Pína, :Výpočet difúze Ga v programu Silvaco. Výzkumná zpráva R&D-93/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
148. Pína, :TV907-65: Vyhodnocení lotů 95063-95065 z R&D a 95075-95080 transfer lotů z výroby. Výzkumná zpráva R&D-99/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
149. Pína, :Porovnání technologií na DV827-50. Výzkumná zpráva R&D-109/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
150. Pína, :WD: výpočty VF a VD na Silvaco a porovnání s reálným měřením. Výzkumná zpráva R&D-111/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
151. Pína, :Výpočet průběhu sepnutí, komutace a přechdu do blokovacího směru na tyristoru v programu Silvaco-rozpracováno. Výzkumná zpráva R&D-112/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
152. Pína, :FRD - komutace na jednorozměrné a 2D diodě v programu Silvaco-rozpracováno. Výzkumná zpráva R&D-113/15 , ABB s.r.o. Praha: 2015.
153. Pína, :Ideal model for WD in Silvaco. Výzkumná zpráva R&D-016/16 , ABB s.r.o. Praha: 2014.
154. Pína, :Thyristors for presser modules: Evaluation of lots 95059 - 95061. Výzkumná zpráva R&D-022/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
155. Pína, Boháček, :The properties of the layers P and N made of various diffuse sources spin-on dopants. Výzkumná zpráva R&D-025/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
156. Pína, Loužecký, :Final chip technology of 5SED_0890T2240. Výzkumná zpráva R&D-030/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.

-
157. Pína,;Evaluation of WD with the technology spin-on. Výzkumná zpráva R&D-046/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 158. Pína,;The influence of the concentration profile and the technology on the cross point. Výzkumná zpráva R&D-047/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 159. Pína,;Evaluation of lot 95092. Výzkumná zpráva R&D-055/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 160. Pína,;Evaluation of lot 96010; diode chip 5SED_xxxT6540_(chip 40 mm). Výzkumná zpráva R&D-059/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 161. Pína, Boháček,;The properties of the layers P and N made of spin-on technology with different flow of gases. Výzkumná zpráva R&D-060/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 162. Pína,;Calculating the diffusion of Ga in the program Silvaco; version DeckBuild 4.1.25.A and 4.2.5.R. Výzkumná zpráva R&D-061/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 163. Pína,;Diode chip technology with Ga junction without lapping. Výzkumná zpráva R&D-065/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 164. Pína,;Test of various compositions diffuse sources and comparing properties of PN junctions Al and B. Výzkumná zpráva R&D-070/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 165. Pína, Loužecký,;Evaluation of the lots diodes 5kV DV827-50; lots 95084 and 96013. Výzkumná zpráva R&D-097/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 166. Pína, Loužecký,;Evaluate lots diodes with voltage class 22 of technology spin-on. Výzkumná zpráva R&D-099/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 167. Pína,;The diode produced from Si wafer 330 um wire cut and Technology PAP and spin-on. Výzkumná zpráva R&D-100/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 168. Pína,;Thickness effect on the Forward IV characteristics of welding diodes for different technologies. Výzkumná zpráva R&D-105/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 169. Pína,;Spin-on technology: The influence of drying of the diffuse source on the overlap of N layers per side P type. Výzkumná zpráva R&D-109/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.
 170. Pína,;DC889-45-zvýšení povrchové koncentrace P vrstvy difúzí Ga. Výzkumná zpráva R&D-111/16 , ABB s.r.o. Praha: 2016.

A. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

171. Pína,;EvaluatIon of diodes with different silicon material and surface treatment. Výzkumná zpráva R&D-001/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
172. Pína,;Measuring the homogeneity of the diffusion layers on the technology of spin on diode DV827-22. Výzkumná zpráva R&D-004/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
173. Pína,;Comparison of properties of diffuse sources B200 Filmtronocs and alcoholic solution B2O3.. Výzkumná zpráva R&D-011/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
174. Pína,;WD made of 100 mm Si material. Výzkumná zpráva R&D-041/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
175. Pína,;WD made of 170 um Si material using technology PAP and spin-on. Výzkumná zpráva R&D-046/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
176. Pína,;WD made of 230 um Si material using technology spin-on and solution of ethanol with B2O3 and P2O5 as diffusion source. Výzkumná zpráva R&D-047/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
177. Pína,;WD made of lapped Si material(170,200 and 230 um) using technology spin-on and solution of ethanol with B2O3 and P2O5 as diffusion source. Výzkumná zpráva R&D-050/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
178. Pína,;Comparison of round diode chips for press-pack module. Výzkumná zpráva R&D-056/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
179. Pína,;Comparison of diodes with silicone material from Shin-Etsu and ABB. Výzkumná zpráva R&D-066/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
180. Pína,;Change of concentration profile using HCl diffusion from platforms P15XTO and B15XEC. Výzkumná zpráva R&D-069/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
181. Pína,;Calculated field strengths of the FRD bevel. Výzkumná zpráva R&D-076/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
182. Pína,;Influence of lapped surface from different producers on concentration profile and surface resistivity after spin-on diffusion (ABB, Siltronic, S.E. and Topsil). Výzkumná zpráva R&D-081/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
183. Pína,;WD made of 230 mm Si material using technology spin-on and diffusion source B200 from Filtronics. Výzkumná zpráva R&D-082/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.

184. Pína,;Effect of drying after application spin-on diffusion source to the surface resistivity and the overlapping of N type to P. Výzkumná zpráva R&D-086/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.
185. Pína,;Evaluation of the lots diodes 7,5kV DV827-75; lots 95086 and 95087. Výzkumná zpráva R&D-090/17 , ABB s.r.o. Praha: 2017.

Obsah přiloženého CD

readme.txt.....	stručný popis obsahu CD
src	
thesis	zdrojová forma práce ve formátu L ^A T _E X
text	text práce
thesis.pdf	text práce ve formátu PDF