

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Pavel Jirkovský**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Svazkové technologie při výrobě výkonových součástek**

Pokyny pro vypracování:


1. Seznamte se s používanými svazkovými technologiemi při výrobě polovodičových součástek. Porovnejte mezi sebou iontovou implantaci, elektronové a protonové ozařování.
2. Prakticky vyzkoušejte vliv elektronového ozařování především na dynamické parametry výkonových součástek. Statisticky vliv ozařování vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:


- [1] Kuba, J., Mach, P.: Technologické procesy. Skripta ČVUT, Praha, 2001.
- [2] Bouda, V. a kol.: Vlastnosti a technologie materiálů. Skripta ČVUT, Praha, 1996.
- [3] Janovský, I. a kol.: Historie a současný stav urychlovačů částic v českých zemích I/II. Československý časopis pro fyziku, č. 3/4, roč. 2012, svazek 62.
- [4] interní dokumentace spol. ABB s.r.o, jednotka Polovodiče.

Vedoucí: Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 3. 2014



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

**Svazkové technologie při výrobě výkonových polovodičových
součástek**

Beam technology used for power semiconductor devices

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

Pavel Jirkovský

Praha 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 23. 5.2014

Pavel Jirkovský

Abstrakt

Svazkové technologie se při výrobě polovodičových součástek využívají ke zlepšení jejich komutace. Tato práce se zabývá popsáním jednotlivých svazkových technologií a praktickým ověřením vlivu elektronového ozařování na komutaci výkonových diod.

Klíčová slova

Výkonová dioda, polovodič, technologie elektronového svazku, svazkové technologie, PN přechod, komutace diody

Abstract

Beam technologies are used in manufacture of semiconductors to improve their commutation. This thesis aims to classify each beam technology and to practically confirm influence of electron beam irradiation on commutation of power diodes

Key-words

Power diode, semiconductor, electron beam technology, beam technologies, PN junction, commutation of diode

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D. za spoustu cenných rad a umožnění využití služeb a zařízení společnosti ABB s.r.o., jednotka Polovodiče pro měření.

Obsah

1 Úvod	1
2 Svazkové technologie	2
2.1 Elektronový svazek	2
2.2 Iontová implantace	5
2.3 Protonové ozařování	6
3 Jednotky pro kvantifikaci svazku	8
4 Základní parametry diody	10
4.1 Statické vlastnosti diody	10
4.2 Dynamické vlastnosti diody	13
4.3 Seznam katalogových parametrů diod užitých v práci	15
5 Experimentální část	16
5.1 Princip lineárního urychlovače LINAC 4 – 1200	16
5.2 Popis vzorků a předpokládaný výsledek měření	18
5.3 Výsledky měření	19
5.3.1 Svařovací dioda 666 / 2	19
5.3.2 Svařovací dioda 676 / 14	22
5.3.3 Síťová dioda 670 / 32	25
5.3.4 Síťová dioda 667 / 6	28
5.3.5 Síťová dioda 653 / 13	29
6 Závěr	30
7 Použité zdroje	31
Příloha A	CD

1 Úvod

Svazkové technologie fungují na principu vytvoření usměrněného proudu urychlených částic, nejčastěji elektronů, protonů nebo iontů. Jejich uplatnění můžeme najít ve velkém množství oborů. Tím je například sterilizace farmaceutického a zdravotnického materiálu, vytváření tepelně smrštitelných plastů, radiační degradace chlorovaných uhlovodíků, mikroobrábění nebo výroba elektroniky. V případě výroby elektroniky se jedná především o zlepšení práce polovodičových součástek při vysokých frekvencích, o kterém dále pojednává tato práce.

Pro práci polovodičových součástek s vysokým kmitočtem je velice zásadní rychlost jejich komutace. Ne vždy je možné dosáhnout požadované rychlosti při vlastní výrobě součástky.

Cílem této práce je popsat základní technologie, které umožňují zlepšení komutačních vlastností již vyrobených diod. Výhodou tohoto způsobu je, že lze dosáhnout takové změny parametrů PN přechodu, které podmínky při jeho výrobě neumožňují. Dále je v práci popsán základní princip diody a lineárního urychlovače společně se základními parametry, které popisují elektronové ozařování. V závěrečné části práce je praktické ověření vlivu elektronového ozařování na dynamické vlastnosti několika typů běžně užívaných diod.

2 Svazkové technologie

V této části jsou probrány základní svazkové technologie používané pro zlepšení dynamických parametrů polovodičových součástek jejich ozařováním proudem urychlených elektronů, protonů nebo iontů. Toto zlepšení funguje na principu deformace krystalové mřížky polovodiče nebo implantace cizích příměsí do ní. Tímto se zrychluje komutace polovodičových součástek. Toto má ovšem negativní vliv na propustné ztráty součástky.

Čerpáno bylo z literatury [1], [2], [5], [6] a [12]

2.1 Elektronový svazek

Elektronový svazek funguje na principu urychlování usměrněného proudu elektronů, které interagují s jednotlivými atomy materiálu, na který dopadají. Interakce spočívá v předání části anebo celé energie interagujících elektronů atomům ozařovaného materiálu. To pak může mít za následek generaci tepla, ionizaci nebo vychýlení atomů v mřížce materiálu.

Elektronový svazek musí být tvořen ve vakuu, a pokud není energie elektronů vyšší než 150 keV, tak musí být ve vakuu i používán. Porovnání mezi průchodem elektronového svazku vakuem a průchodem svazku vzduchem je na obr. 1. Ve vzduchu se elektrony svazku srážejí s molekulami plynů a dochází tak k jeho útlumu. V případě využívání elektronového svazku v normální atmosféře musí elektrony vycházet z vakuového prostředí kovovou fólií.

Důležitým parametrem, popisujícím účinek elektronového svazku na materiál je hloubka vniku S , která je závislá na hustotě materiálu ρ a urychlovacím napětí U_B podle vztahu:

$$S = 6,67 \times 10^{-11} \times U_B^{\frac{5}{3}} \times \rho^{-1} \quad (1)$$

Dalším parametrem je výkonová hustota dodávaná elektronovým svazkem pro různé hloubky pod povrchem ozařovaného materiálu. Velikost této hustoty v závislosti na hloubce vniku vyjadřuje vztah:

$$\frac{p_Y(z)}{p_{Y \max}} = 1 - \frac{9}{4} \times \left(\frac{z}{S} - \frac{1}{3} \right)^2 \quad (2)$$

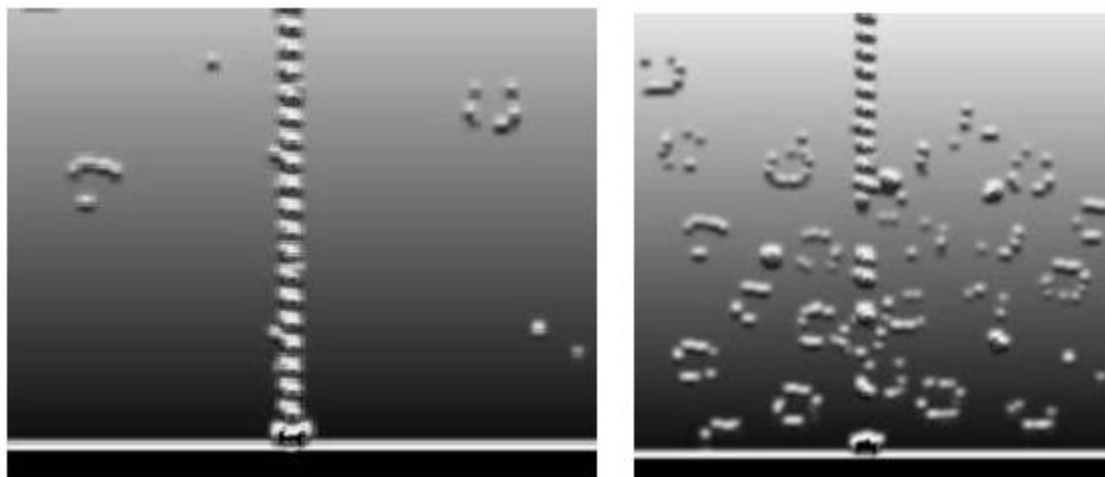
$$0 \leq z \leq S \quad (3)$$

Kde $p_Y(z)$ je absorbovaná výkonová hustota ve vzdálenosti z od povrchu,

$p_{Y \max}$ je maximální absorbovaná výkonová hustota,

S je hloubka vniku. [1]

Ze vztahu (2) vyplývá, že nejvyšší absorbovaná výkonová hustota je v $\frac{1}{3}$ hloubky vniku a na povrchu ozařovaného materiálu je o velikosti cca. $\frac{3}{4} p_Y \max$. Po překročení hloubky vniku je absorbovaná výkonová hustota p_Y nulová.



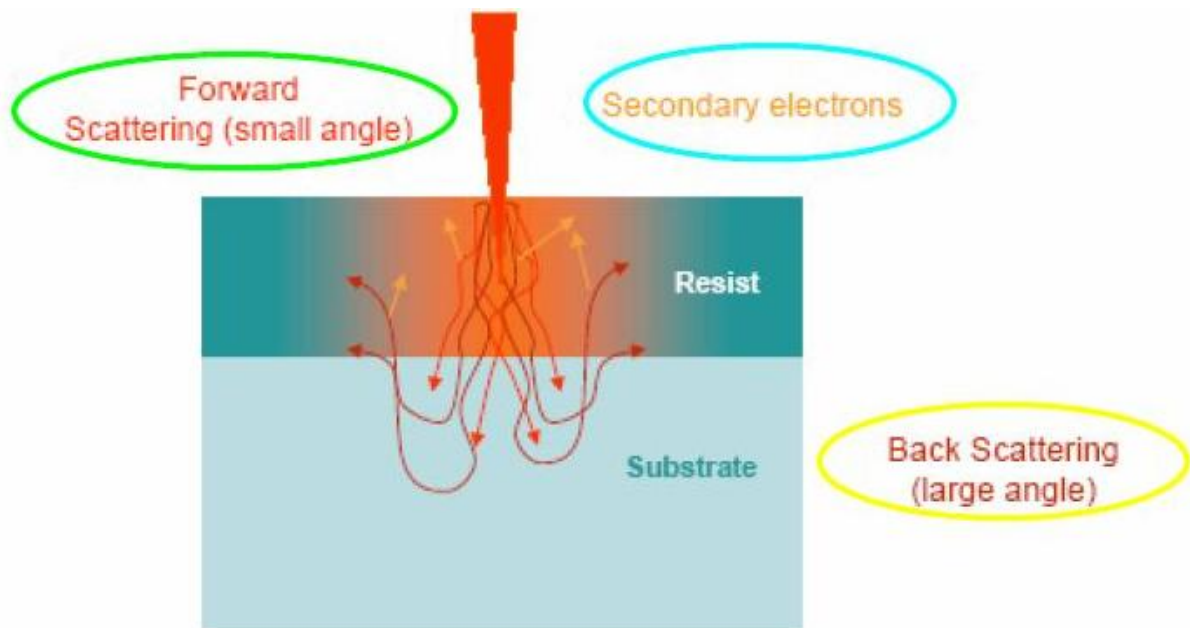
Obr. 1 Vliv koncentrace částic na elektronový svazek. Vlevo je průchod elektronového svazku vakuem a napravo průchod vzduchem [5]

Když ozařujeme materiál elektronovým svazkem, tak se část elektronů od materiálu odrazí. Zaprvé to jsou zpětné elektrony, které mají energii od nulové hodnoty až po energii elektronů dopadajících na povrch materiálu. Zadruhé jsou odrazeny sekundární elektrony, což jsou elektrony s energií menší, jak 50 eV. Látkou jsou také vyzařovány tepelné elektrony, které mají energii menší, než 1 eV. Dalšími efekty dopadu elektronového svazku jsou zvýšení povrchové teploty ozařovaného materiálu a absorpce části energie elektronového svazku. Dále materiál vyzařuje záření fluorescenční, tepelné a charakteristické rentgenové.

Ozařovaný materiál se v místě absorpce dopadajícího záření ohřívá a toto teplo se pak dále díky tepelné vodivosti materiálu rozvádí do okolí. Podíl na energetických ztrátách způsobených zpětnými elektrony odraženými od povrchu materiálu závisí na jeho atomovém čísle a je vyjádřen koeficientem zpětného záření, který může nabývat hodnoty až 0,5. Tedy až 50% energie dopadajícího svazku může být zpětnými elektrony odraženo zpět.

V závislosti na vlastnostech ozařovaného materiálu a velikosti energie dopadajících elektronů se mění energie sekundárních elektronů. Tato energie je poměrně malá a může být snadno ovlivněna povrchovými vrstvami materiálu, které mohou být tvořeny např. oxidy. Poměr množství emitovaných sekundárních elektronů na jeden primární elektron je vyjádřen koeficientem sekundární emise, který je u kovů mnohem menší než 1, ale u izolantů a polovodičů se může přiblížit hodnotě 1 a někdy tuto hodnotu i přesáhnout.

Příklad rozptylu elektronů v ozařovaném materiálu je na obr. 2, kde vidíme ozařování substrátu pokrytého vrstvou rezistu. Dále na obrázku vidíme pronikání elektronů materiálem společně se vznikem a rozptylem sekundárních elektronů.



Obr. 2 Rozptyl elektronů v rezistu a substrátu. Světle červené šipky zobrazují přímý rozptyl elektronů s malým úhlem, tmavě červené šipky zobrazují zpětný rozptyl elektronů s velkým úhlem a oranžové šipky zobrazují sekundární elektrony.[6]

Vlivem ohřívání povrchu jeho povrchu jsou z materiálu emitovány tepelné elektrony s energií menší než 1 eV. Množství a energie těchto elektronů jsou závislé na materiálu a jeho povrchové teplotě.

Největší podíl na tepelných ztrátách mají zpětné elektrony. Všechny ostatní mechanismy jako termické a sekundární elektrony nebo různé druhy záření se na ztrátách podílejí jen minimálně. Největší vliv na energetickou bilanci technologie využívající elektronového svazku mají však tepelné vlastnosti ozařovaného materiálu. Těmi jsou odvod tepla tepelnou vodivostí z místa ozařování a vyzařování tepla z tohoto místa.

Účinky elektronového svazku, které můžeme technologicky využít, jsou především přenos energie, impulsu nebo elektrického náboje. Využití jednotlivých účinků je rozebrán v následujícím výčtu, který byl převzat z [1].

„Termické efekty:

- ohřívání (vytvzování, rekystalizace v pevné fázi, žíhání),
- tavení (vakuové tavení, tavení tenkých povrchových vrstev, rekystalizace v kapalně fázi),
- sváření (konstrukční, mikrosváření),
- odebírání materiálu (vrtání, gravírování, vytváření obrazců tenkých vrstev, nastavování jmenovité hodnoty).

Netermické efekty:

- přenos náboje (paměti),

- fyzikální efekty vyvolané elektronovým zářením (realizace definovaných defektů krystalové mřížky),
- chemické reakce vyvolané elektronovým zářením (polymerizace, síťování, depolymerizace, radiolýza),
- biologické reakce vyvolané elektronovým zářením (sterilizace). [1]

Výhodou elektronového svazku je snadné řízení jeho energie elektrostatickým polem. Tím můžeme dosáhnout rozsahu jeho proudu od jednotek nA až po desítky kA. Dále můžeme elektronový svazek snadno zaostřit nebo vychýlit pomocí magnetického nebo elektrostatického pole.

Největší výhodou elektronového svazku je však možnost úplné automatizace technologického procesu s vysokou přesností dávkování energie, proudu a průměru elektronového svazku.

2.2 Iontová implantace

Technologie iontové implantace funguje na principu zavádění atomů do pevné látky. Toho se docílí bombardováním povrchové vrstvy této látky urychlenými ionty. Ionty zavedené do pevné látky mohou změnit její fyzikální nebo chemické vlastnosti. Tato technologie se může využít pro vytváření PN přechodů nebo ve spoustě jiných odvětví.

Hlavní výhodou iontové implantace je, že můžeme dotovat jakýmkoliv prvkem nebo jeho izotopem za poměrně nízké teploty. Celý proces můžeme snadno řídit nastavením dávky iontů a jejich energie. Tyto parametry je také možné snadno měřit, což umožňuje dobrou automatizaci celého procesu. Další výhodou iontové implantace je, že díky nezávislosti procesu na nerovnovážné rozpustnosti dotujících iontů v základním materiálu, může být úroveň příměsí vyšší než u jiných metod.

Další bezspornou výhodou iontové implantace je, že na sebe různé implantace nemají vliv a tak můžeme vytvářet víceúrovňové dotační oblasti, aniž bychom poškodili předchozí dotace.

Nevýhodou iontové implantace je bohužel její vysoká cena.

Při ozařování základního materiálu se část dopadajících iontů odrazí a zbytek vstoupí do materiálu. Tyto vstupující ionty mají energii několik keV tuto energii průchodem materiálem postupně ztrácejí, až v něm zůstanou lokalizovány. Ionty mohou ztrácet energii buď interakcí s jádry atomů, nebo elektrony. První druh interakce se nazývá jaderné brzdění a je to pružný srážkový proces. Druhý druh interakce je elektronové brzdění, které díky spotřebě energie na excitaci a ionizaci atomů pružným srážkovým procesem není.

Dalším faktorem ovlivňujícím hloubku průniku je krystalická struktura substrátu, která ovlivňuje pohyb iontů v něm. Například pokud se iont arzenu pohybuje v křemíku ve směru jeho krystalografických os, pronikne 50krát hlouběji, než kdyby se pohyboval v jiném směru. Tento způsob pohybu iontů v materiálu se nazývá kanálování.

Průběh iontové implantace závisí na energii a protonovém čísle implantovaného iontu. Dále závisí na protonovém čísle materiálu substrátu, kde v případě monokrystalu přichází v úvahu ještě orientace a amplituda tepelných kmitů atomů v mřížce substrátu.[2]

Iontová implantace musí probíhat v prostorech s vysokou čistotou, regulovanou teplotou a vlhkostí. Příklad čistého prostoru je na obr. 3.



Obr. 3 Příklad čistého prostoru [13]

2.3 Protonové ozařování

Technologie protonového ozařování se využívá u výkonových polovodičových součástek pro zlepšení jejich dynamických charakteristik. Polovodičové součástky vyrobené za pomoci protonového ozařování mají malý vypínací čas a komutační náboj.

Protonovým ozařováním se uvnitř polovodiče vytvářejí skryté lokální vrstvy se sníženou dobou života nosičů náboje. Dále je možné takto vytvářet vrstvy s implantovanými atomy vodíku, které vytvářejí oblasti se specifickým odporem.

Změnou střední dráhy protonů můžeme ovlivňovat hloubku vrstvy, kterou se snažíme vytvořit. Implantovaný vodík stimuluje centra donorového typu uvnitř křemíku, podobně jako donorové dopanty, což napomáhá vytváření oblastí se změněným specifickým odporem. [12]

Ozařování se provádí pomocí svazku urychlených protonů. Příklad lineárního urychlovače protonů je na obr. 4.



Obr. 4 Lineární urychlovač protonů [12]

3 Jednotky pro kvantifikaci svazku

V této části jsou popsány základní jednotky měření záření potřebné pro vysvětlení elektronového ozařování a jeho účinků. Čerpáno bylo z literatury [9]

Aktivita - A

Jednotkou aktivity je Becquerel [Bq] – střední počet radioaktivních přeměn v látce vztažený na jednotku času [s^{-1}]

Aktivitu je možné vztáhnout k jednotce hmotnosti látky - hmotnostní aktivita [Bq/kg], k ploše - plošná aktivita [Bq/m²] nebo k objemu – objemová aktivita [Bq/m³].

Dávka - D

Jednotkou dávky je Gray [Gy] – střední energie záření předaná látce, vztažená na jednotku hmotnosti [J/kg]. Dávku vyjadřuje vztah (4).

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (4)$$

Fluence energie – Φ

Fluence je hustota energie prošlé jednotkovou plochou v [J/m²]

Energie – E

Základní jednotkou energie je Joul [J]. Energie se ale také vyjadřuje v elektronvoltech [eV] – energie elektronu urychleného ve vakuu napětím 1 V. Převodní vztah mezi [J] a [eV] je vyjádřen vztahem (5).

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (5)$$

Dávkový přírůstek - $\frac{dD}{dt}$

Dávkový přírůstek má jednotku [Gy/s] – přírůstek dávky v látce vztažený k jednotce času.

Expozice - X

Jednotkou expozice je [C/kg] – „absolutní hodnota celkového elektrického náboje iontů jednoho znaménka vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony v objemovém elementu vzduchu o hmotnosti dm .“ [9]

Expozice je vyjádřena vztahem (6).

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (6)$$

Expoziční příkon $\frac{dX}{dt}$

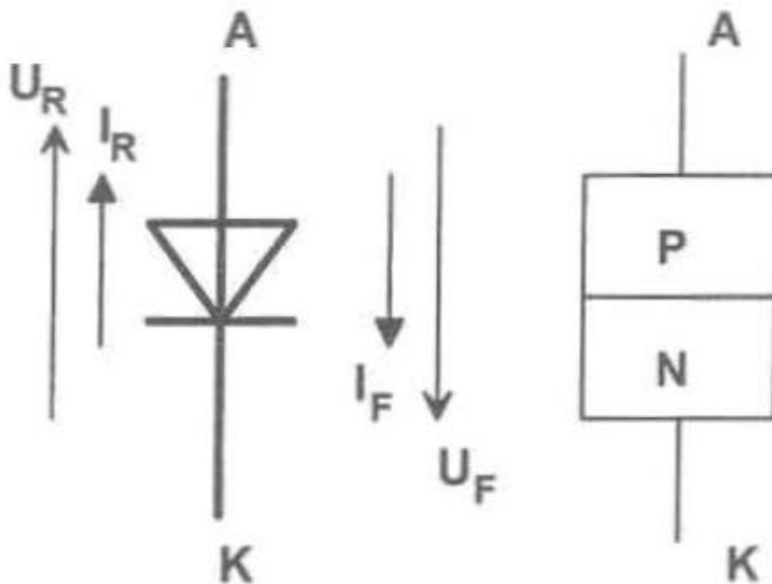
Expoziční příkon je přírůstek expozice vztažený k jednotce času. Má jednotku buď [C/kg × s] nebo [A/kg]. Kde [C] je Coulomb a [A] je Ampér.

4 Základní parametry diody

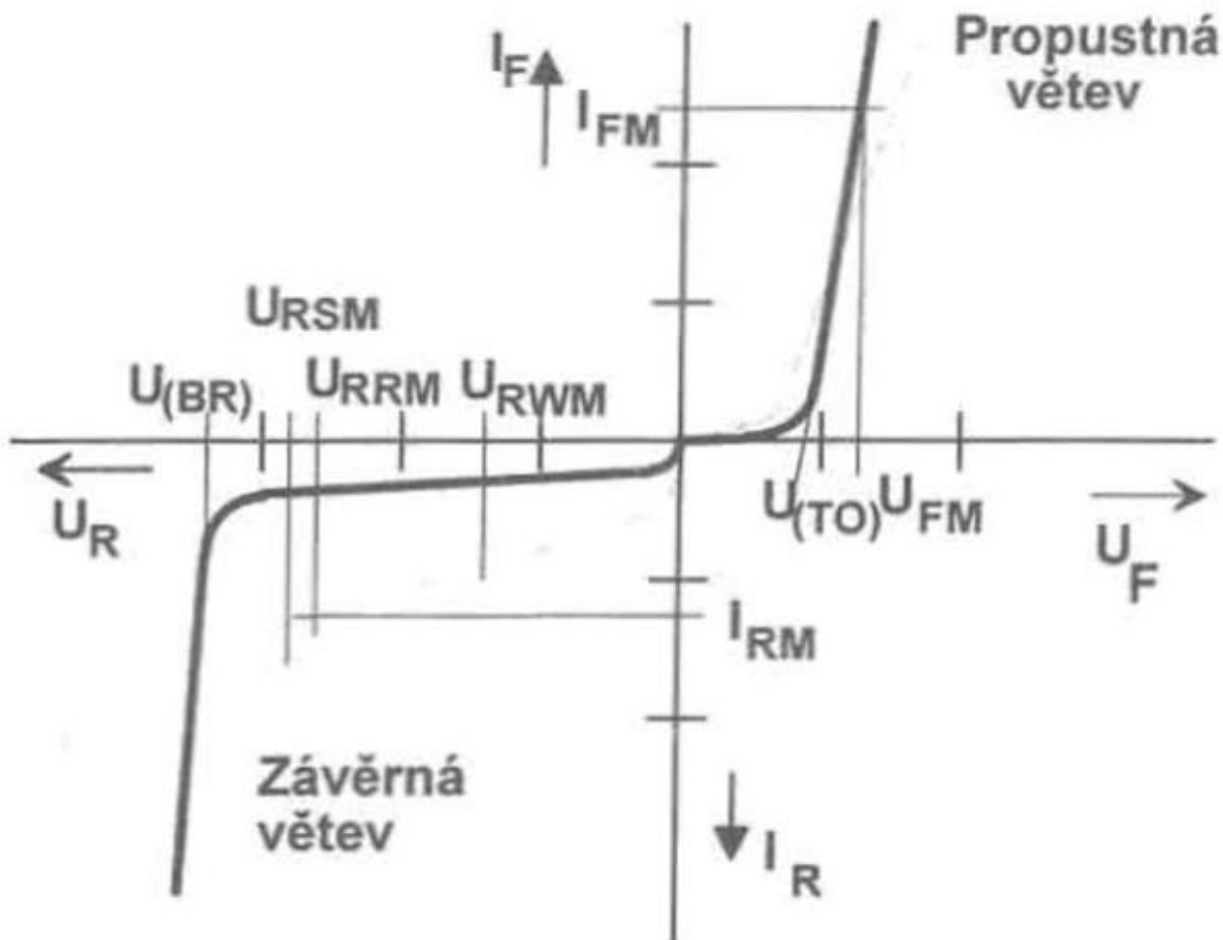
V této části je popsán princip fungování diody a její základní statické a dynamické parametry. Čerpáno bylo z literatury [7] a [8]

4.1 Statické vlastnosti diody

Dioda je elektronická součástka s jedním PN přechodem. Její základní strukturu a schematickou značku vidíme na obr. 5 a její V-A charakteristiku vidíme na obr. 6. Základní vlastností diody je, že když přiložíme kladnou elektrodu k části P (anodě), a zápornou elektrodu k části N (katodě), PN přechodu, tak dioda vede elektrický proud, tomuto zapojení se říká zapojení v propustném směru, zatímco při opačném zapojení elektrod dioda elektrický proud nevede, tomuto zapojení se říká zapojení v závěrném směru.



Obr. 5 Schematická značka a struktura PN přechodu diody [7]



Obr. 6 V-A charakteristika diody [7]

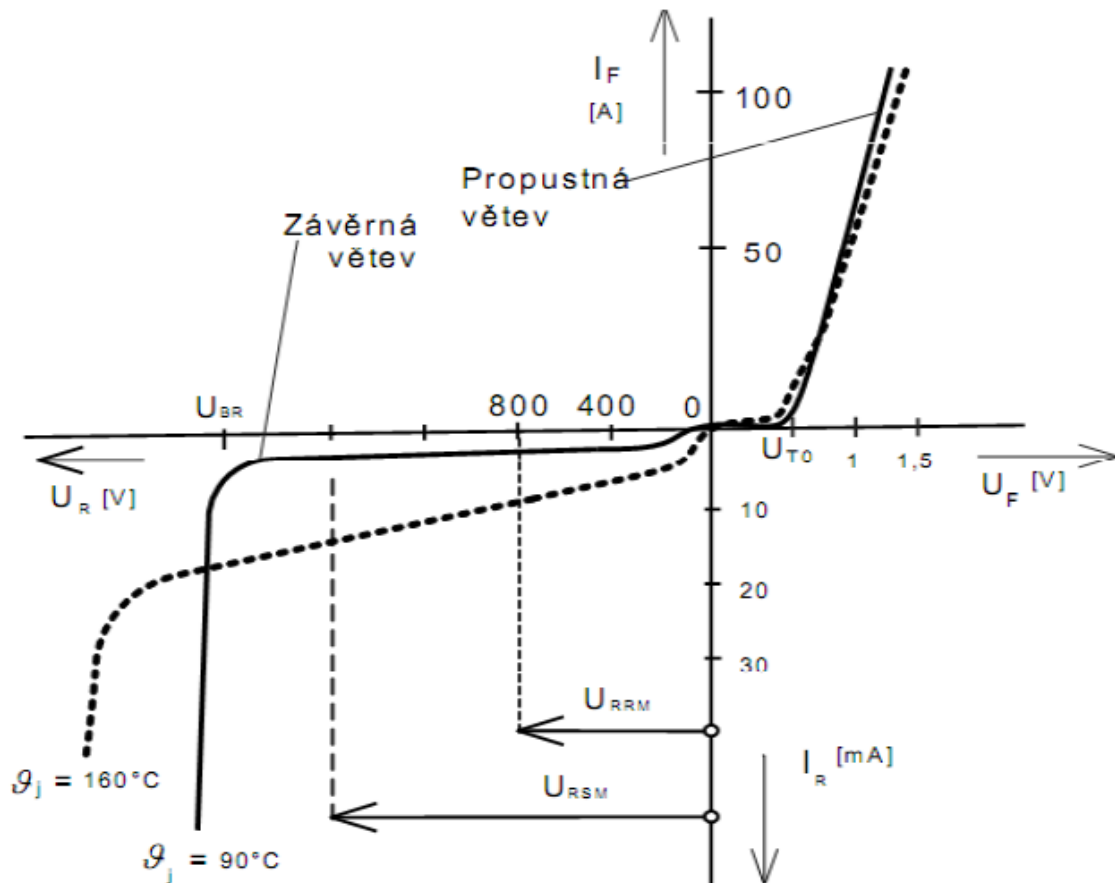
Charakteristika pro zapojení v propustném směru je část V-A charakteristiky diody v 1. kvadrantu na obr. 6, kde U_F a I_F jsou označení propustného napětí a proudu. Propustnou část V-A charakteristiky diody lze aproximovat přímkou, která je určena body charakteristiky $0,1 \times I_{FM}$ a $0,9 \times I_{FM}$, kde I_{FM} je maximální propustný proud, který se váže k maximálnímu propustnému napětí U_{FM} . Směrnice této přímky se nazývá diferenciální odpor r_F a bod, ve kterém tato přímka protíná osu x, se nazývá prahové napětí $U_{(TO)}$, které se liší podle typu použitého materiálu a pro křemík je cca $U_{(TO)} = 1V$. Propustná část V-A charakteristiky diody je pak vyjádřena rovnicí (7).

$$U_F = U_{(TO)} + r_F \times i_F \quad (7)$$

Zapojení diody v závěrném směru má část V-A charakteristiky ve 3. kvadrantu na obr. 6, kde U_R a I_R jsou označení závěrného napětí a proudu. Závěrné napětí, které můžeme na diodu přiložit, je limitováno průrazným napětím $U_{(BR)}$, jehož překročením zničíme PN přechod tepelným průrazem, způsobeným příliš vysokým procházejícím proudem. Dalším důležitým bodem závěrné charakteristiky je amplituda opakovatelného napětí U_{RRM} , které pokud překročíme, dojde k elektrickému průrazu, kde součástka začne vést proud. Pokud překročíme průrazné napětí $U_{(BR)}$, proud diodou při tomto napětí zničí PN přechod.[7]

Dalším bodem je U_{RSM} , což je amplituda opakovatelného špičkového závěrného napětí, která je o trochu vyšší než U_{RRM} . Pro provoz diod je ještě významným bodem amplituda pracovního závěrného napětí U_{RWM} , které může být od $0,5 \times U_{RRM}$ až do velikosti celého napětí U_{RRM} .

Důležitým faktorem, zásadně ovlivňujícím statickou charakteristiku diody, je teplota. Vliv teploty na statickou V-A charakteristiku diody je zobrazen na obr. 7.



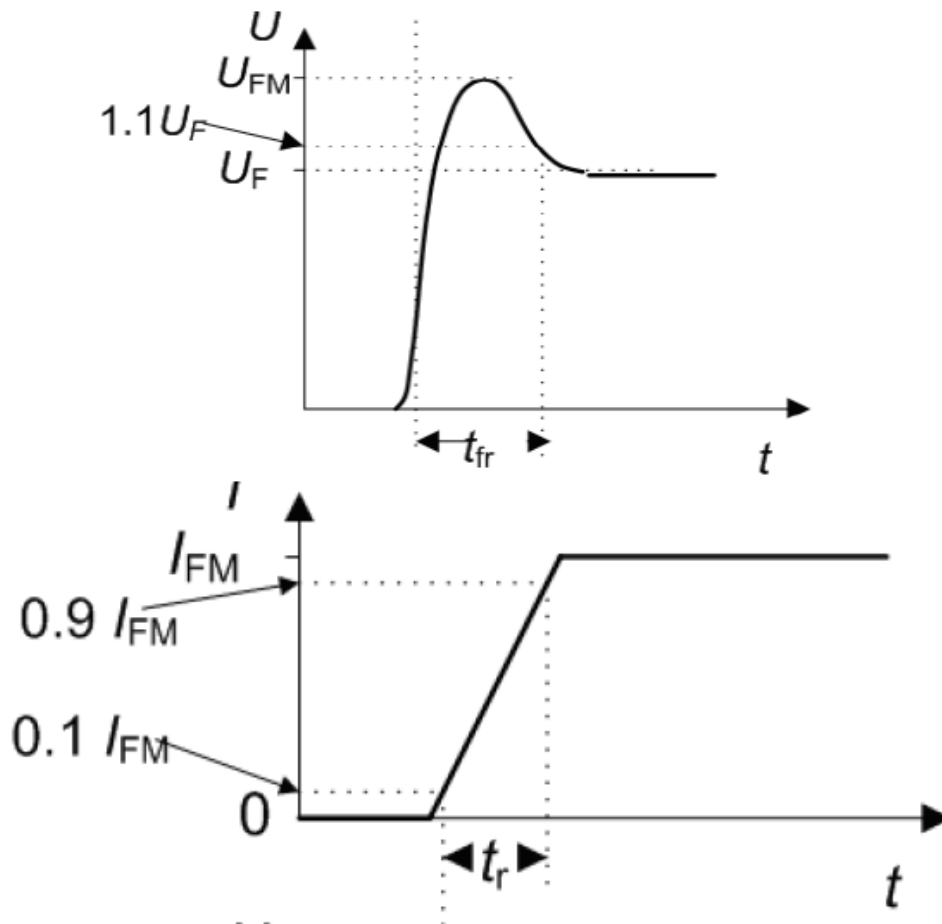
Obr. 7 Vliv teploty na V-A charakteristiku diody [8]

Z obr. 7 vidíme, že za tepla dioda vykazuje vyšší diferenciální odpor. V závěrné části charakteristiky se posunuje koleno charakteristiky dále v záporném směru osy x a tím se zvyšuje průrazné napětí diody. Současně s teplotou roste proud a tím posunuje celou charakteristiku v záporném směru osy y.

4.2 Dynamické vlastnosti diody

Dynamické charakteristiky diody vyjadřují proces její komutace (myšleno uvedení do propustného stavu a opačně). Průběh proudu a napětí jsou zobrazeny na obr. 8.

Na obr. 8 vidíme nejprve postupný nárůst napětí na diodě, které je zpočátku vyšší než U_F protože se PN přechod diody musí nejprve zaplavit nosiči náboje. Proud postupně roste s napětím rovnoměrně. Tento dynamický děj je charakterizován dobou napěťového propustného zotavení t_{fr} , která je časem od začátku nárůstu napětí až po pokles napětí za špičku na hodnotu $1,1 \times U_F$, a dobou proudového propustného zotavení t_{fi} , která je časem nárůstu proudu z $0,1 \times I_F$ na $0,9 \times I_F$.



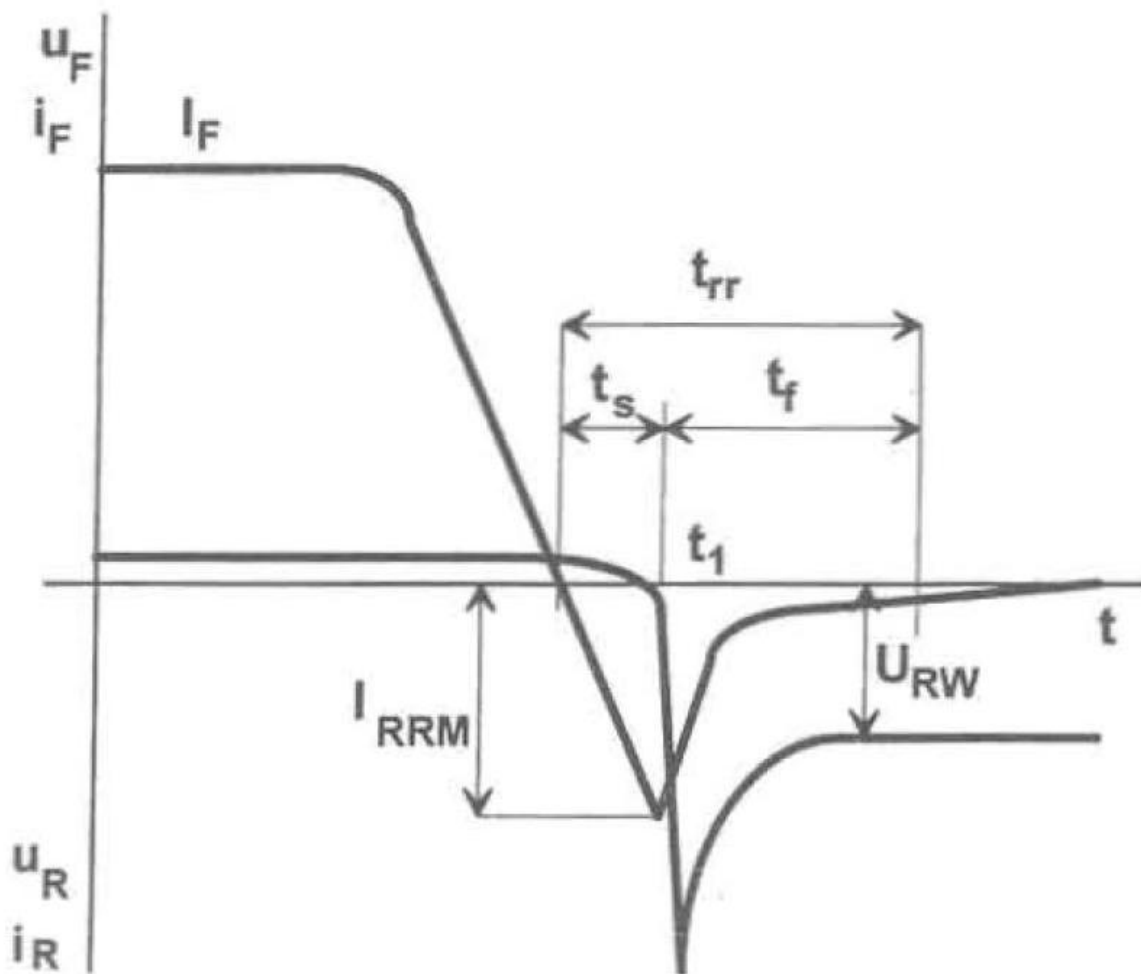
Obr. 8 Průběh napětí a proudu při spínání diody [8]

Při vypínání nastane proces opačný. Po průchodu propustného proudu nulou musí zrekombinovat komutační náboj Q_{tr} , nahromaděný v PN přechodu diody. Proto začne závěrné napětí na diodě růst, až po uplynutí doby zpoždění závěrného napětí t_s . Následně po dobu t_f klesá závěrný proud k nule. Jakmile se závěrný proud přiblíží k nule, proces vypínání je ukončen. Celý vypínací čas se nazývá doba závěrného zotavení t_{tr} , která se rovná součtu $t_s + t_f$ a je rozdělena bodem t_1 . Pokud je v připojeném obvodu indukčnost, způsobí při vypínání napěťovou špičku. Průběh celého děje je na obr. 9.

Velikost komutačního náboje je závislá na strmosti poklesu proudu $\frac{di}{dt}$ a přibližně dána vzorcem (8).

$$Q_{rr} = \frac{1}{2} \times I_{rrM} \times t_{rr} \quad (8)$$

Kde I_{rrM} je maximální hodnota komutačního proudu.



Obr. 9 Časový průběh vypínání diody [7]

4.3 Přehled použitých symbolů v kapitole 4

Zde je seznam symbolů použitých pro popis základních parametrů diod. Čerpáno bylo z literatury [7].

U_F ... propustné napětí	U_{FM} ... maximální propustné napětí
I_F ... propustný proud	I_{FM} ... maximální propustný proud
U_R ... závěrné napětí	U_{RRM} ... maximální vratné závěrné napětí
I_R ... závěrný proud	I_{RM} ... maximální závěrný proud
$U_{(T0)}$... prahové napětí	r_F ... diferenciální odpor
U_{RWM} ... maximální pracovní závěrné napětí	
U_{RSM} ... maximální špičkové závěrné napětí	
$U_{(BR)}$... průrazné napětí	
ϑ_j ... teplota přechodu diody	
t_{fru} ... doba napět'ového propustného zotavení	
t_{fri} ... doba proudového propustného zotavení	
Q_{IT} ... komutační náboj	
t_{IT} ... doba závěrného zotavení	
I_{IT} ... komutační proud	I_{ITM} ... maximální komutační proud
$\frac{di}{dt}$... strmost proudu	
t_s ... doba zpoždění závěrného napětí	
t_f ... doba poklesu závěrného proudu	
t_1 ... čas dosažení maxima komutačního proudu	

5 Experimentální část

Tato část práce se zabývá praktickým ověřením vlivu elektronového ozařování na dynamické vlastnosti výkonových diod. Sledované dynamické charakteristiky jsou měřeny vždy po určité dávce záření a zaznamenává se jejich změna. Cílem je získat přibližné závislosti měřených veličin na celkové ozařovací dávce.

Měření proběhlo na pracovišti společnosti ABB s.r.o., jednotka Polovodiče a měřené součástky byly poskytnuty touto společností.

Elektronové ozařování bylo prováděno na urychlovači elektronů provozovaném společností Tesla V. T. Mirkoel, s.r.o., umístěném v ÚJV Řež, s.a.

5.1 Princip lineárního urychlovače LINAC 4 - 1200

Nejdůležitější součásti lineárního urychlovače jsou katoda a pulzní magnetron. Napětí na katodě se pohybuje mezi hodnotami 48 – 51 kV v závislosti na technických podmínkách. Tímto napětím je regulován výkon urychlovače. Proud žhavení katody se pohybuje mezi hodnotami 5,5 A – 7,6 A. Katoda se nachází ve vakuu, takže při daném napětí urychlí elektrony na hodnotu 50 keV. Katoda urychluje elektrony po dobu trvání pulzu magnetronu, což jsou 3 μ s. Katoda i magnetron jsou napájeny společným pulzním zdrojem. Magnetron pracuje s frekvencí 2864,3 MHz a měl by ideálně vytvořit obdélníkový pulz, který je ale reálně ve tvaru V. Protože se magnetron zapíná současně s katodou, urychlí tento pulz elektrony na energii 4 MeV. Opakovací frekvence pulzu je 500 Hz. Dále prochází elektronový svazek hliníkovou deskou z vakua do normální atmosféry, kde je rozmítán pomocí elektromagnetu na ozařovaný materiál.

Střední proud elektronového svazku je 300 μ A. Při energii urychlených elektronů 4 MeV je výkon elektronového svazku 1,2 kW.

Lineární urychlovač se dále skládá z osmi fokusačních cívek pro udržení elektronového svazku v ose urychlovače, řídicí cívky a šesti chladících okruhů s průtokem vody 10 l/min. Dále urychlovač obsahuje dva vnitřní iontové vývěvy, jednu vnější vývěvu a jednu sublimační vývěvu pro udržení vakua.

Aby bylo možné začít proces ozařování, musí být splněny předepsané bezpečnostní podmínky, jinak urychlovač nelze spustit. Musí být zavřené dveře od místnosti urychlovače a zapnuté chlazení s odtahem. Dále musí být napětí na příslušné úrovni a dostatečné žhavení elektrody.

Pracoviště s lineárním urychlovačem podléhá dozoru SÚJB a musí být dostatečně chráněno před únikem rychlých elektronů. To je zajištěno silným betonovým stíněním. Obsluha zařízení musí být v průběhu ozařování mimo prostor s urychlovačem v dostatečně

odstíněném prostoru. Pro provoz urychlovače stačí dvě odstíněné místnosti. Jedna pro umístění urychlovače a druhá pro obsluhu zařízení. Lineární urychlovač je na obr. 10.



Obr. 10 Lineární urychlovač LINAC 4 - 1200 [11]

Elektronový urychlovač je provozován společností Tesla V. T. Mikroel s.r.o. a je umístěn v ÚJV v Řeži u Prahy.

Dávku, kterou ozařovaný materiál obdrží, určíme ze vztahu (9).

$$D = 32,3 \times \frac{\left(\frac{I}{s}\right)}{v} \quad (9)$$

Kde D je dávka v [kGy],

I/s je proud elektronového svazku na jednotku pojezdu transportéru v [$\mu\text{A}/\text{cm}$],

v je rychlost pojezdu transportéru v [mm/s].

Dávka může být na jeden průjezd transportéru až 6 kGy při $v = 10$ mm/s. Této dávce je pro případ tohoto urychlovače ekvivalentní prošlá fluence o velikosti 130 μA .

Při dopadu urychlených elektronů na materiál vzniká brzdné záření. Kvůli tomu musí být urychlovač v místnosti chráněné proti rentgenovému vyzařování.

5.2 Popis vzorků a předpokládaný výsledek měření

K dispozici máme dva různé typy svařovacích diod lišící se průměrem 2“ a 2,5“ (51 mm resp. 60 mm), u kterých budeme měřit změnu komutačního náboje Q_{tr} v závislosti na ozařovací dávce v relaci se změnami propustných ztrát.

Dále budeme měřit u dvou různých typů stejnosměrných vysokonapětových síťových diod vliv elektronového ozařování na jejich závěrná napětí.

Posledním měřením je zkoumání vlivu žíhání ozářených síťových diod na komutační náboj Q_{tr} , čas komutace t_{tr} a komutační proud I_{tr} .

Nejprve musí být změřen výchozí stav součástek před ozařováním. Následně budeme měřit po každém elektronovém ozařování a budeme předpokládat, že jsou dávky kumulativní. Tj. výsledná dávka se rovná lineárnímu součtu dávek předchozích. Základní parametry měřených diod jsou v tab. 1.

Tab. 1 Parametry měřených diod

Typ součástky	Rozměry, plocha	Popis, jmenovité hodnoty	Měřicí podmínky	Předpokládaná aktivita
666/2 10 ks	Ø 51 mm 2“ 2040 mm ²	Svařovací dioda 7110 A/400 V	2000 A 25°C-úbytky 160°C-komutace 20 kN	Q_{tr} by měl klesat s dávkou a současně by měly růst propustné ztráty
676/14 10 ks	Ø 63 mm 2,5“ 3120 mm ²	Svařovací dioda 13500 A/400 V	2000 A 25°C-úbytky 160°C-komutace 40 kN	Q_{tr} by měl klesat s dávkou a současně by měly růst propustné ztráty

653/13 30 ks	Ø 28 mm 615 mm ²	Síťová VN dioda 3000 V/250 A	2000 A 140°C	S dávkou by mělo klesat maximální závěrné obnovitelné napětí U_{rrM}
667/6 10 ks	Ø 51 mm 2“ 2040 mm ²	6 kV síťová dioda 1000 A/6000 V	2000 A 25°C	S dávkou by mělo klesat maximální závěrné obnovitelné napětí U_{rrM}
670/32 10 ks	Ø 76 mm 3“ 4540 mm ²	Síťová dioda 4800 A/3200 V	2000 A 160°C-komutace 40 kN	Žihání by mělo vracet ozářením snížené Q_{rr} směrem k původním hodnotám

Tab.1 Parametry měřených diod

5.3 Výsledky měření

V této kapitole jsou statisticky a graficky zpracovaná data.

5.3.1 Svařovací dioda 666 / 2

Naměřená data jsou zprůměrována vždy z měření více kusů diod. Pro popis V-A charakteristiky byla použita zjednodušená Schockleyho rovnice pro vysoké proudové hustoty (10).

$$I = I_0 \times e^{\frac{e \times U}{k \times T}} \quad (10)$$

Tato rovnice byla použita pro tvorbu grafů popisujících změnu V-A charakteristiky po ozáření. Naměřená data včetně konstant pro Schockleyho rovnici jsou v tab. 2 a graf s proloženými hodnotami je na obr 11.

Pro popis změny komutačního náboje Q_{rr} byla použita obecná exponenciální závislost (11)

$$Y = k \times e^{-A \times U} + C \quad (11)$$

Kde A, k, C jsou neznámé koeficienty, které byly hledány metodou nejmenších čtverců, která byla realizována využitím nástroje „řešitel“ v programu MS Excel. Naměřená data včetně konstant pro obecnou exponenciální závislost jsou v tab. 3 a graf s proloženými hodnotami je na obr 12.

Tab. 2 Propustné V-A charakteristiky diody typu 666/2 pro různé dávky ozáření

Dávka = 0 µA		Dávka = 100 µA	
I (kA)	U (V)	I (kA)	U (V)
3,89	0,98	3,27	0,95
4,93	1,01	5,23	1,03
6,00	1,05	6,76	1,08

7,18	1,09	8,41	1,13
8,04	1,11	9,95	1,17
8,97	1,13	11,30	1,20
10,83	1,19	13,13	1,27
13,44	1,25	15,60	1,32
15,59	1,30		

Proměnné modelu	<i>Dávka</i> = 0 μA	<i>Dávka</i> = 100 μA
$\frac{e}{k \times T}$	3,77	3,59
i_0 (kA)	0,12	0,14

<i>Dávka</i> = 200 μA		<i>Dávka</i> = 300 μA	
<i>I</i> (kA)	<i>U</i> (V)	<i>I</i> (kA)	<i>U</i> (V)
2,81	0,93	2,52	0,94
4,72	1,02	4,59	1,08
6,23	1,07	6,36	1,15
7,72	1,11	8,19	1,23
9,35	1,16	9,92	1,30
10,96	1,21	11,56	1,35
12,92	1,26	13,57	1,40
15,68	1,34	15,59	1,45

Proměnné modelu	<i>Dávka</i> = 200 μA	<i>Dávka</i> = 300 μA
$\frac{e}{k \times T}$	3,57	3,15
i_0 (kA)	0,14	0,16

Tab. 3 komutační náboj diody typu 666/2 pro různé rychlosti poklesu proudu

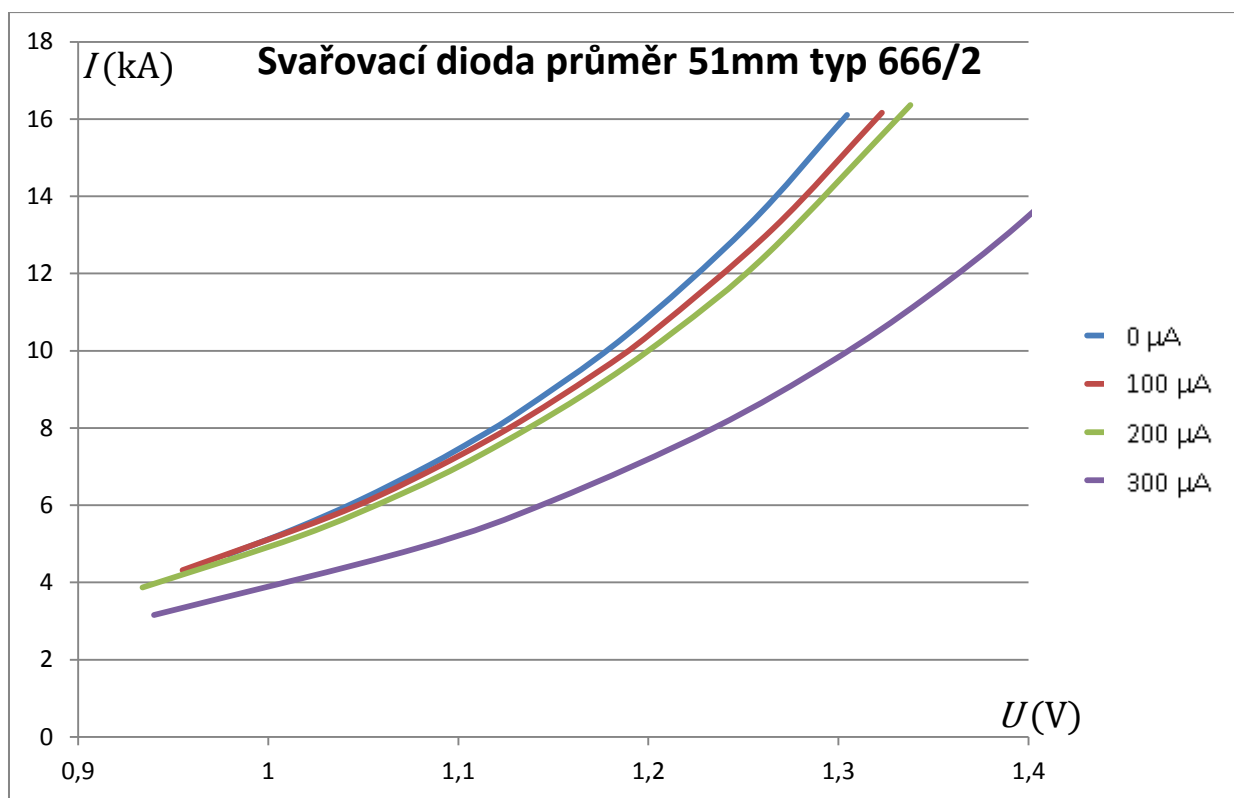
$\frac{dI}{dt} = 10 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$		$\frac{dI}{dt} = 40 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$	
<i>Dávka</i> (μA)	Q_{rr} (μA)	<i>Dávka</i> (μA)	Q_{rr} (μA)
0	59,2	0	159,1
100	36,5	100	85,3
200	27,9	200	78,2
300	22,1	300	60,9

Proměnné modelu	$\frac{dI}{dt} = 10 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$	$\frac{dI}{dt} = 40 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$
<i>k</i>	40,23	94,23
<i>A</i>	0,01	0,01

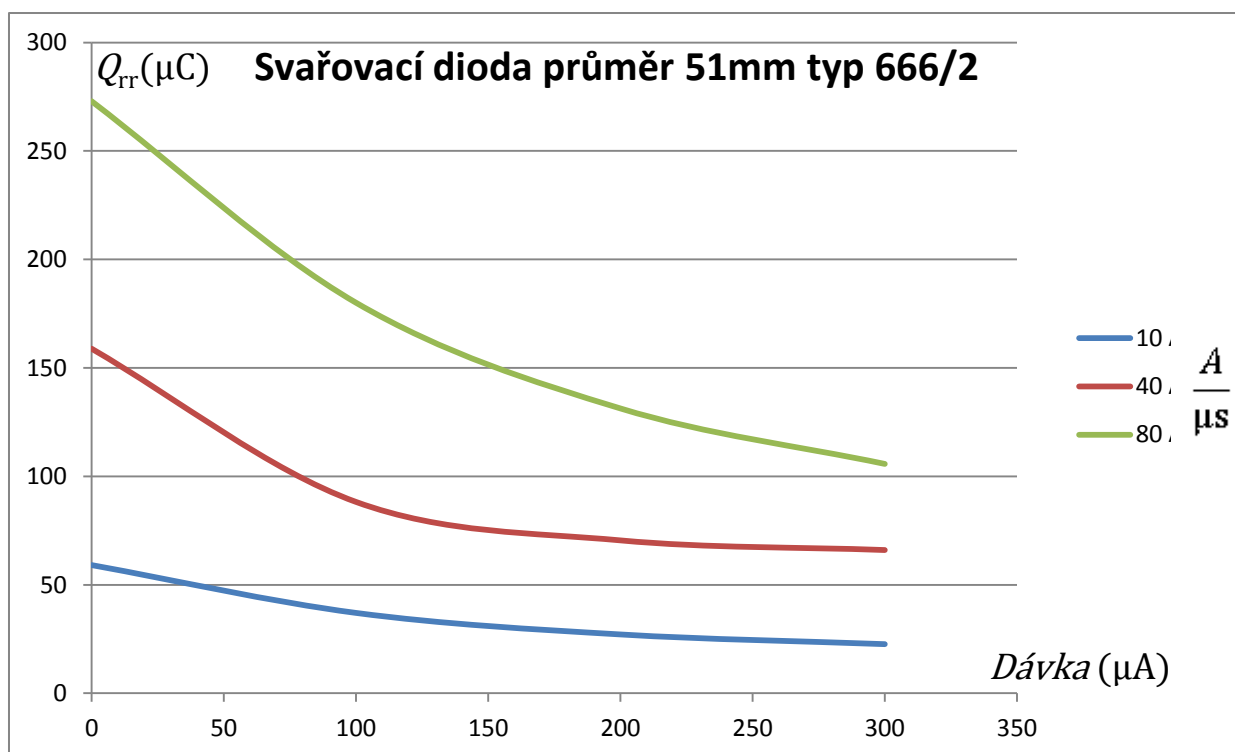
<i>C</i>	18,87	64,55
----------	-------	-------

$\frac{dI}{dt} = 80 \frac{A}{\mu s}$	
<i>Dávka</i> (μA)	Q_{tr} (μA)
0	273,1
100	179,1
200	132,7
300	105

Proměnné modelu	$\frac{dI}{dt} = 80 \frac{A}{\mu s}$
<i>k</i>	195,46
<i>A</i>	0,01
<i>C</i>	77,44



Obr. 11 V-A charakteristiky diody typu 666/2 pro různé dávky ozáření



Obr. 12 Změna komutačního náboje diody typu 666/2 pro různé dávky ozáření

5.3.2 Svařovací dioda 676 / 14

Naměřená data jsou zprůměrována vždy z měření více kusů diod. Pro popis V-A charakteristiky byla použita zjednodušená Schockleyho rovnice pro vysoké proudové hustoty (10). Naměřená data včetně konstant pro Schockleyho rovnici jsou v tab. 4 a graf s proloženými hodnotami je na obr 13.

Tato rovnice byla použita pro tvorbu grafů popisujících změnu V-A charakteristiky po ozáření.

Pro popis změny komutačního náboje Q_{rr} bylo použito grafické proložení dat přímkou. Naměřená data jsou v tab. 5 a graf s proloženými hodnotami je na obr 14.

Tab. 4 Propustné V-A charakteristiky diody typu 676/14 pro různé dávky ozáření

$Dávka = 0 \mu A$		$Dávka = 100 \mu A$	
I (kA)	U (V)	I (kA)	U (V)
2,75	0,87	2,85	0,89
3,83	0,92	4,63	0,98
4,62	0,95	5,83	1,04
5,57	0,99	7,61	1,11
6,56	1,03	9,02	1,16
7,42	1,06	10,46	1,22
8,24	1,09	12,13	1,27
10,00	1,15	14,30	1,33

11,90	1,21		
14,05	1,26		

Proměnné modelu	<i>Dávka</i> = 0 μA	<i>Dávka</i> = 100 μA
$\frac{e}{k \times T}$	3,57	3,14
i_0 (kA)	0,16	0,22

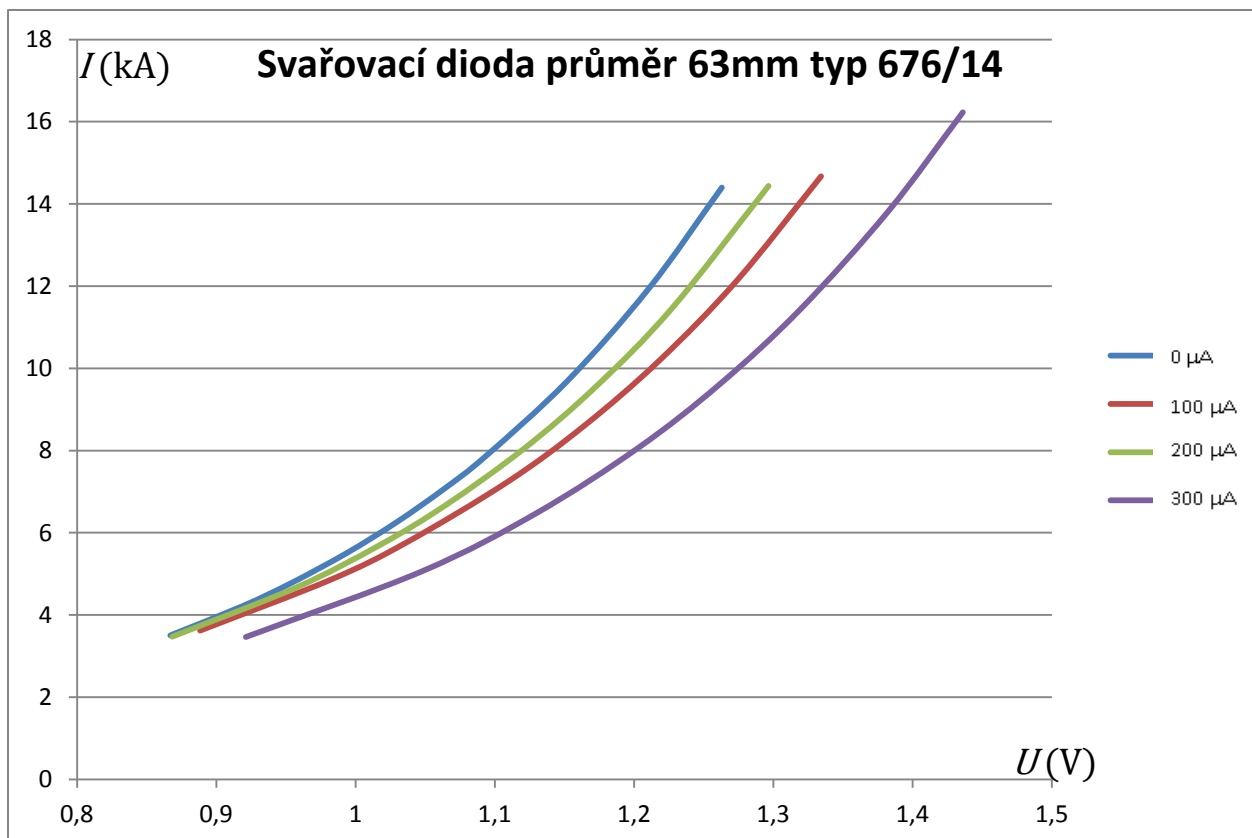
<i>Dávka</i> = 200 μA		<i>Dávka</i> = 300 μA	
<i>I</i> (kA)	<i>U</i> (V)	<i>I</i> (kA)	<i>U</i> (V)
2,51	0,87	2,66	0,92
4,27	0,96	4,73	1,05
5,76	1,02	6,60	1,13
7,06	1,06	8,43	1,20
8,52	1,12	10,02	1,26
9,98	1,17	11,88	1,32
11,70	1,23	13,85	1,38
13,86	1,30	15,71	1,44

Proměnné modelu	<i>Dávka</i> = 200 μA	<i>Dávka</i> = 300 μA
$\frac{e}{k \times T}$	3,33	3,00
i_0 (kA)	0,19	0,22

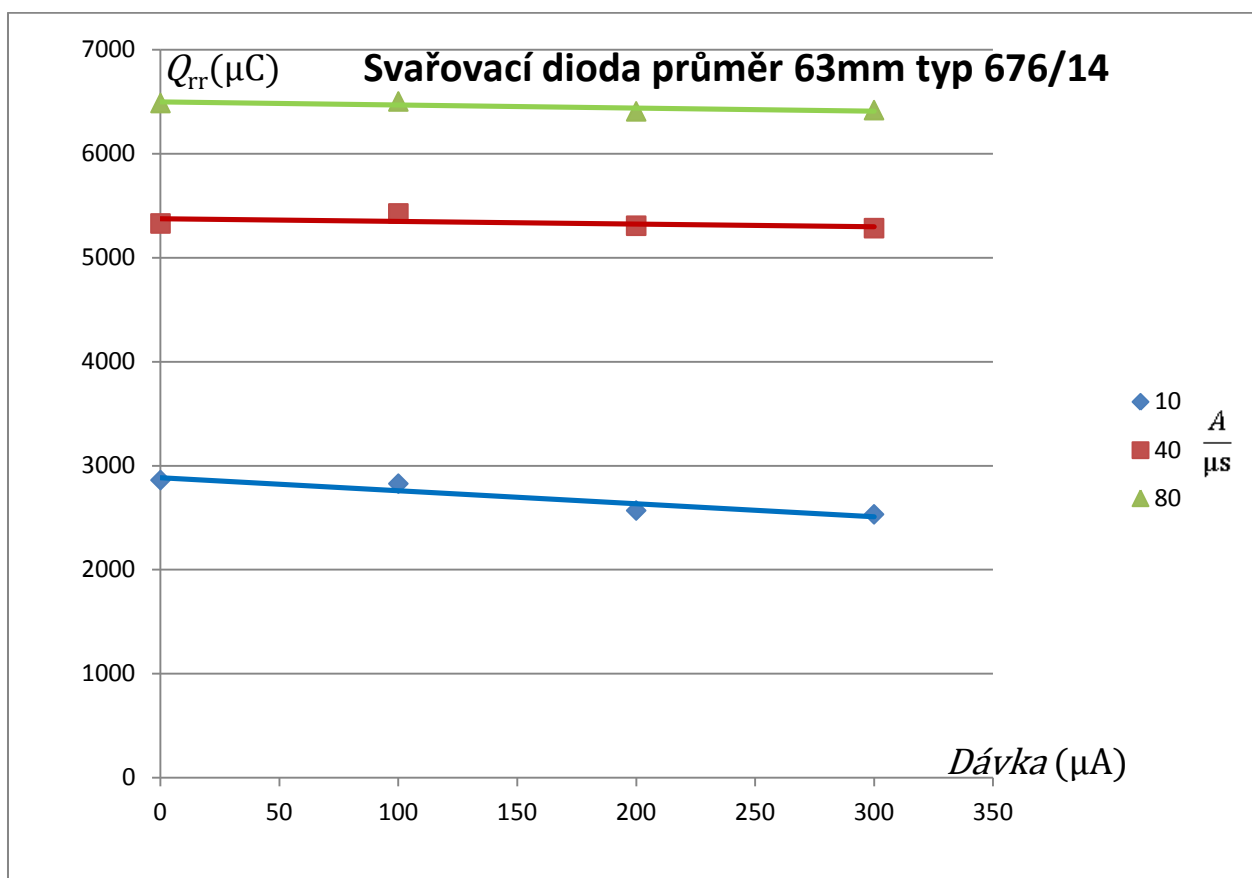
Tab. 5 komutační náboj diody typu 676/14 pro různé rychlosti poklesu proudu

$\frac{dI}{dt} = 10 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$		$\frac{dI}{dt} = 40 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$	
<i>Dávka</i> (μA)	Q_{rr} (μA)	<i>Dávka</i> (μA)	Q_{rr} (μA)
0	2861	0	5328
100	2827	100	5425
200	2568	200	5307
300	2532	300	5283

$\frac{dI}{dt} = 80 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$	
<i>Dávka</i> (μA)	Q_{rr} (μA)
0	6487
100	6502
200	6407
300	6418



Obr. 13 V-A charakteristiky diody typu 676/14 pro různé dávky ozáření



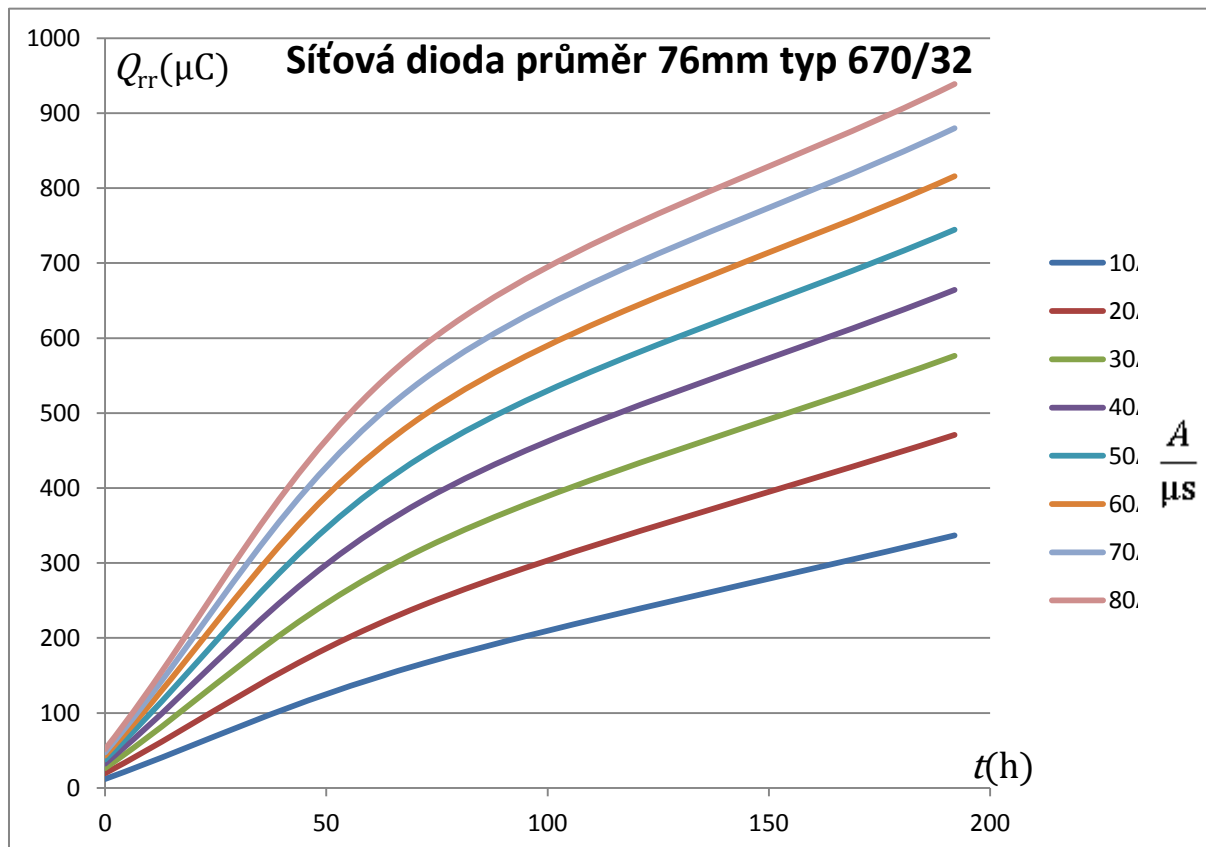
Obr. 14 Změna komutačního náboje diody typu 676/14 pro různé dávky ozáření

5.3.3 Síťová dioda 670 / 32

Naměřená data jsou zprůměrována vždy z měření více kusů pro každou rychlost spádu proudu. Diody jsou po elektronovém ozáření dávkou 360 μC . Závislost komutačního náboje na době žihání je v tab. 6 a na obr. 15, závislost komutačního proudu na době žihání je v tab. 7 a na obr. 16 a závislost času komutace na době žihání je v tab. 8 a na obr. 17.

Tab. 6 komutační náboj diody typu 670/32 pro různé doby žihání

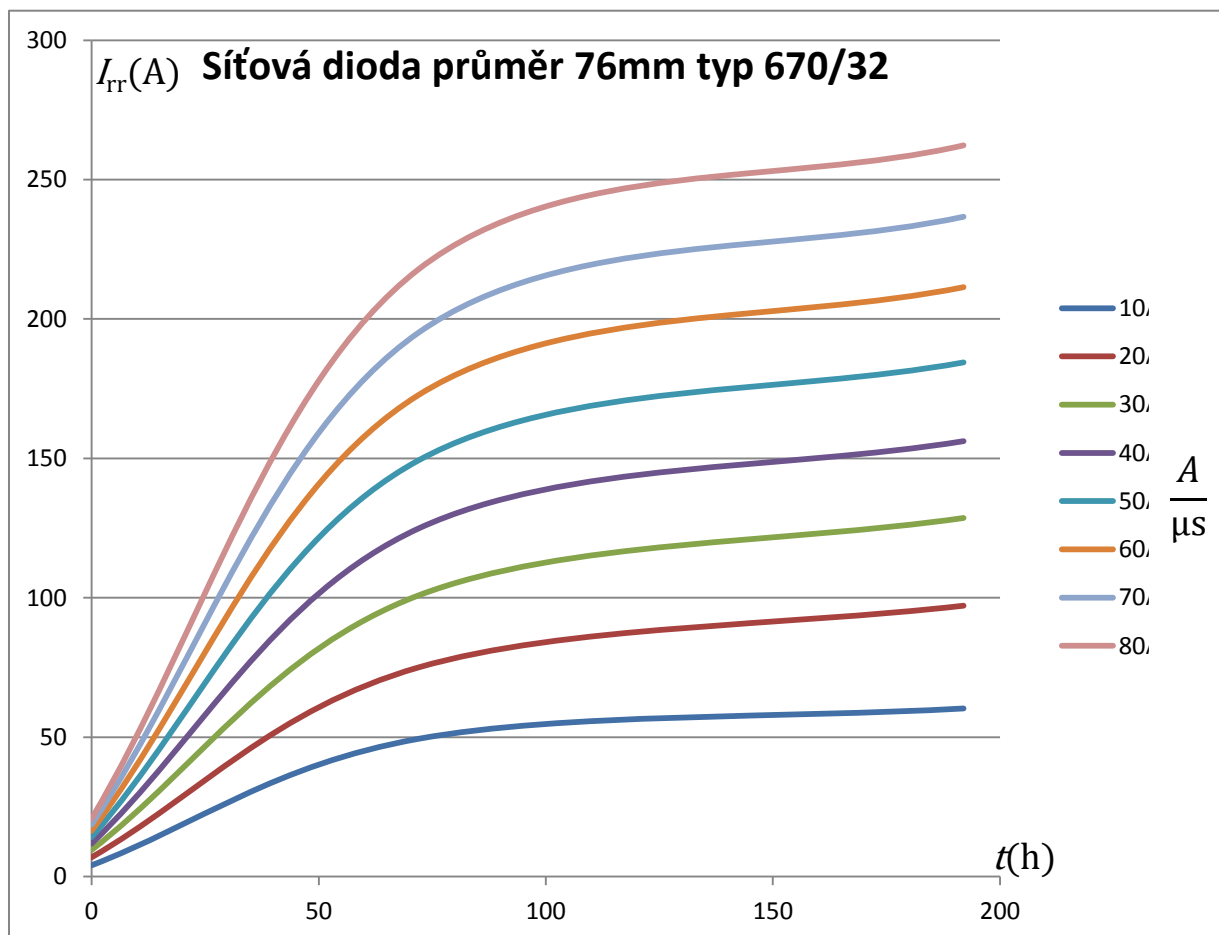
$\frac{dI}{dt} \left(\frac{\text{A}}{\mu\text{s}} \right)$	$Q_{rr} (\mu\text{C})$			
	$t = 0 \text{ h}$	$t = 72 \text{ h}$	$t = 192 \text{ h}$	před ozářením
10	12	166	337	2730
20	20	244	471	4419
30	26	319	576	5103
40	32	384	664	5580
50	38	444	745	5952
60	43	497	816	6281
70	48	545	880	6554
80	52	590	939	6810



Obr. 15 komutační náboj diody typu 670/32 pro různé doby žihání

Tab. 7 komutační proud diody typu 670/32 pro různé doby žihání

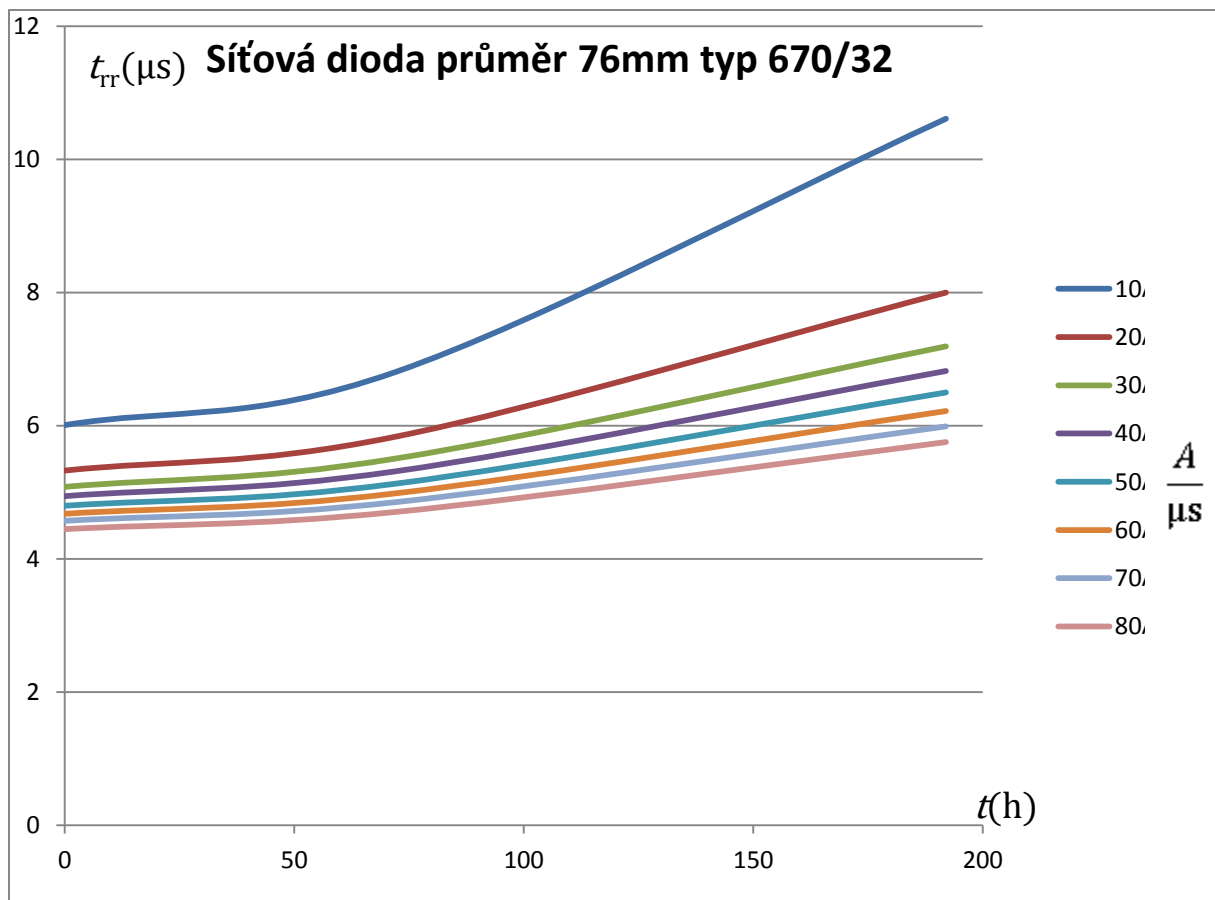
$\frac{dI}{dt} \left(\frac{A}{\mu s} \right)$	$I_{rr}(A)$			
	$t = 0 \text{ h}$	$t = 72 \text{ h}$	$t = 192 \text{ h}$	před ozářením
10	4	49	60	174
20	7	75	97	234
30	10	101	129	292
40	12	125	156	358
50	14	149	184	413
60	16	173	211	455
70	19	195	237	484
80	21	218	262	507



Obr. 16 komutační proud diody typu 670/32 pro různé doby žihání

Tab. 8 doba komutace diody typu 670/32 pro různé doby žihání

$\frac{dI}{dt} \left(\frac{A}{\mu s} \right)$	$t_{rr}(\mu s)$			
	$t = 0 \text{ h}$	$t = 72 \text{ h}$	$t = 192 \text{ h}$	před ozářením
10	6	7	11	35
20	5	6	8	38
30	5	6	7	37
40	5	5	7	36
50	5	5	7	34
60	5	5	6	33
70	5	5	6	32
80	4	5	6	32



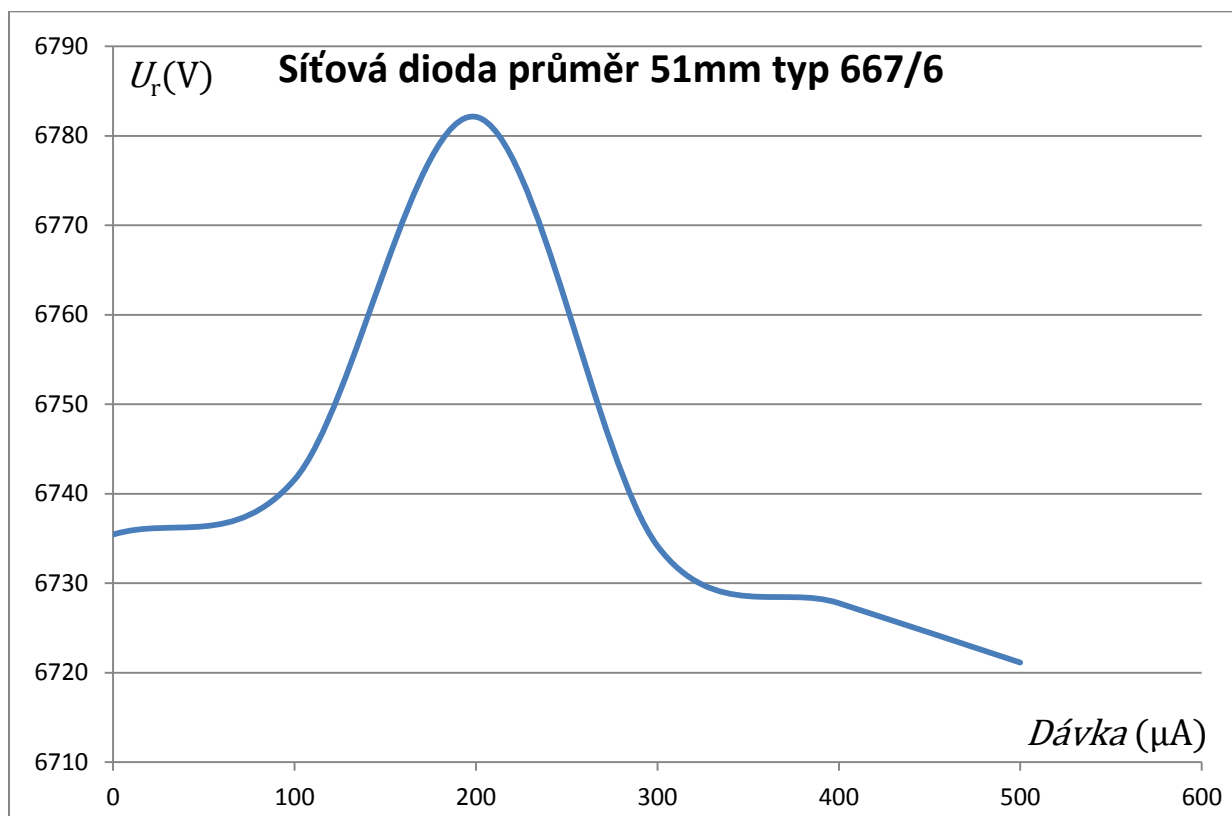
Obr. 17 doba komutace diody typu 670/32 pro různé doby žihání

5.3.4 Síťová dioda 667 / 6

Naměřená data jsou zprůměrována vždy z měření více kusů. Závislost závěrného napětí za „kolenem“ závěrné charakteristiky je v tab. 9 a na obr. 18

Tab. 9 závěrné napětí diody typu 667/6 pro různé dávky ozáření

$I_r = 2000 \mu\text{A}$	
$Dávka (\mu\text{A})$	$U_r(\text{V})$
0	6735
100	6742
200	6782
300	6734
400	6728
500	6721



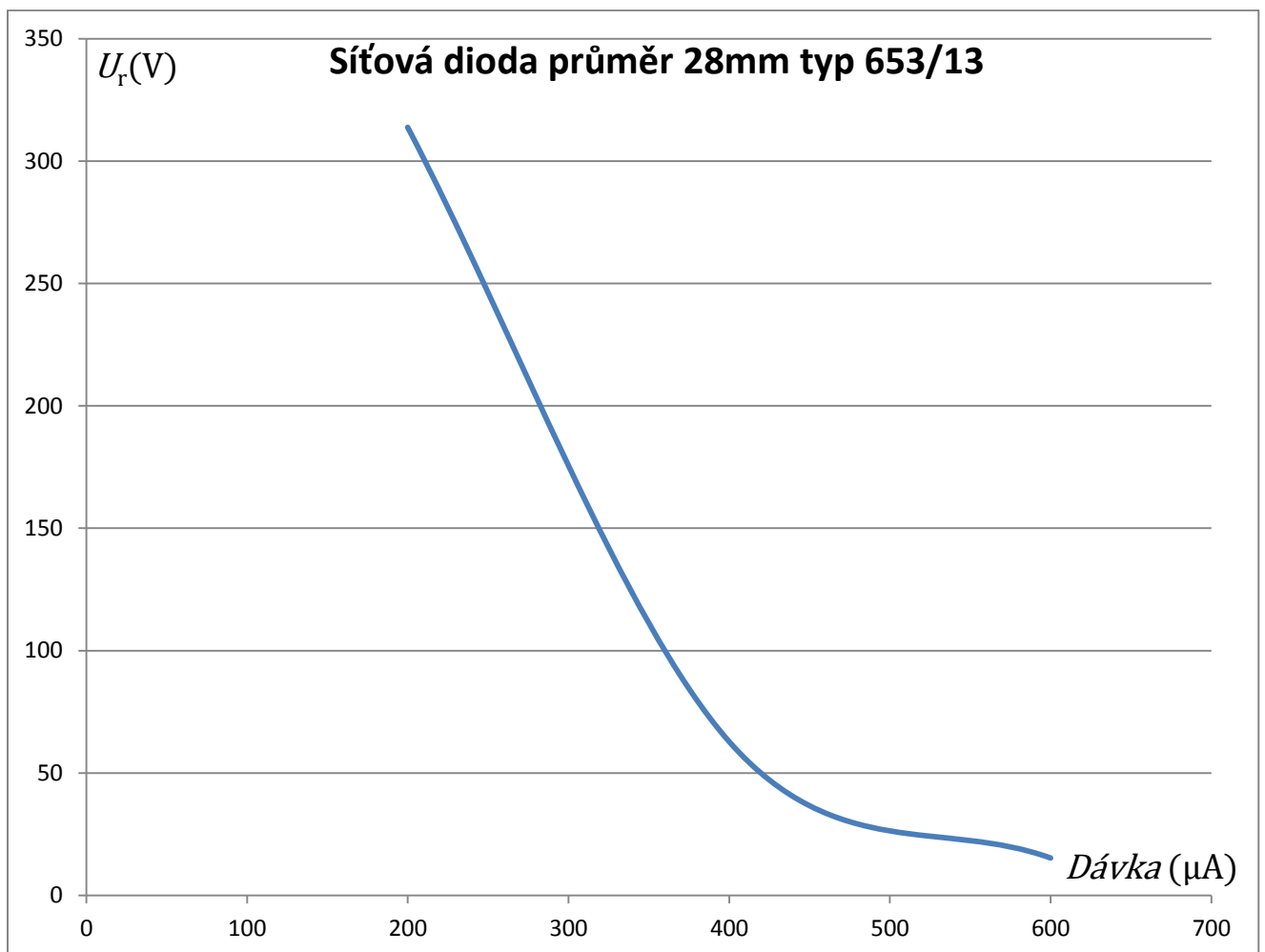
Obr. 18 závěrné napětí diody typu 667/6 pro různé dávky ozáření

5.3.5 Síťová dioda 653 / 13

Naměřená data jsou zprůměrována vždy z měření více kusů. Závislost závěrného napětí za „kolenem“ závěrné charakteristiky je v tab. 10 a na obr. 19

Tab. 10 závěrné napětí diody typu 653/13 pro různé dávky ozáření

$I_r = 2000 \text{ uA}$	
Dávka (μA)	$U_r(\text{V})$
0	1918
200	314
400	63
600	15



Obr. 19 závěrné napětí diody typu 653/13 pro různé dávky ozáření

6 Závěr

Ozařování svářecích diod typu 666/2 potvrdilo teoretické předpoklady. Komutační náboj Q_{tr} s ozařovací dávkou exponenciálně klesá a současně s tímto poklesem exponenciálně rostou propustné ztráty (pokládá se propustná V-A charakteristika). U svařovacích diod typu 676/14 propustné ztráty také rostou (ztráty pro dávku 100 μA jsou větší než pro dávku 200 μA protože byl při měření nedopatřením nastaven nižší přitlak), ale komutační náboj Q_{tr} klesá jen nepatrně.

Žihání ozářených síťových diod typu 670/32 ukázalo, že se zvyšující se dobou žihání se komutační náboj Q_{tr} , čas komutace t_{tr} a komutační proud I_{tr} exponenciálně zvyšuje. Z naměřeného trendu vyplývá, že kdyby žihání probíhalo dále, přiblíží se tyto hodnoty hodnotám před ozařováním.

Ozařováním stejnosměrných síťových diod se s dávkou snížilo závěrné napětí, které může být na diodu přiloženo.

7 Použité zdroje

- [1] Kuba, J., Mach, P.: Technologické procesy. Skripta ČVUT, Praha, 1995.
- [2] Bouda, V. a kol.: Vlastnosti a technologie materiálů. Skripta ČVUT, Praha, 1993.
- [4] interní dokumentace spol. ABB, s.r.o., jednotka Polovodiče.
- [5] Mach, P.: Technologie elektronového svazku. Přednáška k předmětu A1B13VST, Praha, 2013
- [6] Voves, J.: Litografie. Přednáška k předmětu A1B13NNT, Praha, 2013
- [7] Pavelka, J., Čeřovský, Z.: Výkonová elektronika. Skripta ČVUT, Praha, 2000
- [8] Papež, V.: Polovodičové diody. Přednáška k předmětu A1B13VST, Praha, 2013
- [9] Jednotky , [online], <http://www.radioaktivita.cz/jednotky.html>
- [10] Lineární urychlovače,[online], <http://www.tesla-mikroel.cz/13-linearni-urychlovace.html>
- [11] Lineární urychlovač, [online], http://www.jaderna-chemie.cz/?vv=lab_ue
- [12] PCIM: 12-337/506, POWER SEMICONDUCTORS, strana 35, www.proton-electrotex.com , [online],
- [13]Klimatizace, [online], <http://www.laka.cz/klimatizace-pro-ciste-prostory>