



**Masarykova univerzita**

Přírodovědecká fakulta

Ústav fyziky kondenzovaných látek



**Bakalářská práce**

# **Doba života nadbytečných nositelů v křemíku**

**Carrier lifetime in silicon**

**Vedoucí práce: RNDr. Luděk Bočánek, CSc.**

**Brno, 2008**

**Michal Truhlář**

Prohlašuji, že jsem při zpracování bakalářské práce pracoval samostatně a vycházel jsem pouze z uvedené literatury.

V Brně dne 15. května 2008

Michal Truhlář

Děkuji vedoucímu bakalářské práce RNDr. Luďku Bočánkovi, CSc. za jeho odborné vedení, ochotu a přátelské jednání, které mi poskytoval po celou dobu práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Stanislavu Valendovi za pomoc při přípravě vzorků a za seznámení s technikou zbrušování vzorků.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval Ing. Jiřímu Truhlářovi, CSc. za pomoc při korekturách a stylistických úpravách této práce.

**Anotace:**

Hlavním cílem této práce bylo určení rekombinační doby života nadbytečných nositelů v křemíku pomocí sledování časového poklesu fotovodivosti (PCD). Zpracovány jsou kontaktní metody měření doby života. Součástí práce je i měření vlastností jednotlivých vzorků, na kterých bylo prováděno vlastní měření doby života. Samotné měření doby života bylo provedeno na sérii tenkých vzorků, u kterých byly následně ověřeny závislosti na povrchu a na vlivu injekce. Dále pak série měření na jednom vybraném tlustém vzorku, u kterého byla ověřována závislost doby života na tloušťce.

**Annotation:**

The main aim of this work was to determine an recombination excess carrier lifetime in silicon by means of monitoring the photoconductivity time decline (PCD). Then the contact methods of measurement carrier lifetime are elaborated in this work. The part of the work is also the measurement of characteristics various samples on which the intrinsic measurement of carrier lifetime was used. The measurement of carrier lifetime was done on set of thin specimens by which the dependences on surface and on influence of injection were verified. Further then series of measurement on one choice bulky specimen, by which a dependence of carrier lifetime was checked on thickness, was done.

# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	6
<b>2. Fyzikální pozadí problému</b> .....	9
2.1. Rekombinační procesy .....	9
2.2. Přímá rekombinace .....	12
2.3. Odhad povrchové rekombinační rychlosti .....	16
2.4. Měření doby života .....	16
2.4.1. <i>Metoda fázové kompenzace</i> .....	17
2.4.2. <i>Metoda frekvenčního poklesu fotovodivosti</i> .....	18
2.4.3. <i>Metoda měření z difuzní délky</i> .....	19
2.4.4. <i>Metoda fotovodivostního poklesu (PCD)</i> .....	20
<b>3. Experimentální část</b> .....	21
3.1. Měření měrného odporu a dalších vlastností vzorků .....	22
3.2. Příprava vzorků.....	24
3.3. Měření doby života .....	25
3.3.1. <i>Uspořádání měření</i> .....	25
3.3.2. <i>Zdroje záření</i> .....	28
3.4. Doba života v závislosti na proudu a na vlnové délce záření.....	29
3.5. Doba života v závislosti na geometrii vzorku .....	32
<b>4. Závěr</b> .....	40
<b>5. Přílohy</b> .....	42
5.1. Teorie čtyř-sondy.....	42
5.2. Ukázka naměřených údajů z první sady měření .....	44
5.3. Ukázka naměřených údajů z druhé sady měření .....	44
5.4. Fotodokumentace měřicího přístroje .....	47
<b>6. Použité zdroje</b> .....	48

# 1. Úvod

Mezi polovodiče patří takové prvky jako křemík, germanium, selen a sloučeniny arsenid galia GaAs, sulfid olovnatý PbS, aj. Velký význam, především v oblasti výroby elektroniky či polovodičových součástek, má z polovodičů křemík (Si)

Z fyzikálního pohledu lze změnu elektrické vodivosti vysvětlit jako uvolňování elektronů z blízkosti jader (excitace). Právě takto vyražené elektrony, které se stávají volnými, způsobují tzv. elektronovou vodivost. Při tomto uvolňování současně vzniká prázdné, kladně nabitě místo na místě vyraženého elektronu, které je označováno jako díra. Pohyb děr je způsobený průběžnými přeskoky elektronů, které takto způsobují tzv. děrovou vodivost.

V případě, že je takovýto polovodič ochlazen na teplotu absolutní nuly, jsou valenční elektrony pevně vázány ve valenční vrstvě, a tedy mají i nulovou elektrickou vodivost. Takovýmto polovodičům se říká vlastní polovodiče. Nejjednodušším vlastním polovodičem je čistý polovodič.

Druhou skupinou jsou pak polovodiče nevládní – příměsové. Elektronovou (popř. děrovou) vodivost můžeme totiž ovlivnit přidáním příměsí do polovodiče. Přidáním prvků z III. či V. skupiny získáme větší počet volných elektronů, popř. větší počet děr. I velmi malé procento příměsí (řádově již od  $10^{-5}$ ) může poměrně výrazně ovlivnit velikost elektrické vodivosti. Podle toho, ze které skupiny prvků pochází příměs, rozlišujeme: polovodiče typu N a polovodiče typu P.

Existuje-li elektron ve vyšším energetickém stavu ve vodivostním pásu, může se snadno stát, že např. při srážce s atomem v mřížce dojde k předání takové jeho energie a elektron *spadne* z vodivostního do valenčního pásu.

Během tohoto procesu elektron obsadí jednu z kladně nabitých děr, které se ve valenčním pásu nacházejí. V tomto případě hovoříme o rekombinaci páru elektron-díra.

Rekombinace nadbytečných nositelů se charakterizuje parametrem *doba života*.

Změnou koncentrace buď jednoho nebo druhého nebo obou druhů nosičů klesá nebo naopak roste pravděpodobnost rekombinačních procesů. V momentě, kdy se jedná o příměsové polovodiče (koncentrace majoritních nosičů je podstatně větší než koncentrace minoritních nosičů), bude z hlediska rekombinačního procesu hrát rozhodující roli právě koncentrace minoritních nosičů a ne obráceně.

Předmětem této bakalářské práce je stanovení doby života nadbytečných nositelů v křemíku, její měření i způsob měření a současně stanovení závislosti doby života na vlastnostech povrchu vzorku. Měřením je získána efektivní doba života. Vlastní dobu života pak dostaneme po odečtení povrchové doby života.

V první části této studie jsou uvedeny výsledky měření základních vlastností vzorků, které jsem obdržel pro vypracování zadaného úkolu. Jednou z těchto vlastností je i měrný odpor, který byl měřen pomocí čtyř-sondy. Při zpracování výsledků byl použit postup a způsob korekce získaných údajů v závislosti na tvaru a rozměru vzorku, který je uveden bakalářské práci F. PLAČKA – *Měrný odpor polovodičů* [2]. Podrobnější popisy a výpočty jsou uvedeny v příloze.

Druhá část obsahuje výsledky měření doby života vybraného vzorku ze sady proměřované v předchozí části. Tato část je zaměřena na porovnání doby života nosičů v závislosti na typu vodivosti vzorku a povrchu.

Pro třetí část byl vybrán a použit nový, *tlustý*, vzorek. Po základním proměření povrchového napětí pomocí čtyř-sondy a zkušebním měření doby života byl pro následující měření vybrán vzorek, který se svými vlastnostmi nejvíce blíží prvnímu referenčnímu vzorku N10/01. Cílem této části měření je zjištění závislosti doby života nosičů na povrchové rekombinaci a geometrii vzorku. Následně pak stanovení objemové doby života. Pro zjednodušení byly změny geometrie omezeny pouze na změnu tloušťky měřeného vzorku.

## 2. Fyzikální pozadí problému

### 2.1. Rekombinační procesy

Vložením atomu pětímocného prvku do krystalové mřížky křemíku umožníme, aby pátý valenční elektron obsažený v příměsi mohl být uvolněn. Je totiž vázán daleko slaběji a může tedy mnohem pravděpodobněji excitovat – delokalizovat. Takto odtržený elektron přispívá k vedení proudu. Obdobně také v místě původního atomu vznikne nadbytečný, kladný, jednou nabitý iont. Takto přispěje ke koncentraci volných nosičů každý atom příměsi vždy jedním elektronem. Bez příměsi je koncentrace nosičů v křemíku velmi malá. Proto i velmi malá koncentrace příměsí podstatně zvyšuje množství elektronů.

Obdobě dojde k podstatnému zvýšení koncentrace děr v případě, když vložíme do krystalové mřížky křemíku jako příměs atom třímocného prvku. Je to z důvodu toho, že tyto příměsi mají zvýšenou schopnost vázat na sebe jeden volný elektron. Pokud takto elektron přijme, uvolní tím jednu díru ve valenčním pásu. V místě původního atomu příměsi bude vázán nadbytečný, záporný, jednou nabitý iont. Stejně tak v případě pětímocného prvku dochází i malou příměsí ke značnému zvýšení množství děr.

V obou případech dochází pouze ke zvýšení koncentrace jednoho typu, tedy buď elektronů, nebo děr. Příměsi v prvním případě nazýváme příměsí typu *n* nebo také *donory*, protože odevzdávají (darují) elektron. Elektrony, které mají v prvním případě větší koncentraci, nazýváme *majoritními nosiči*, a naopak díry *minoritními nosiči*. Podle typu příměsi pak označujeme celý polovodič, ve kterém jsou obsaženy příměsi pětímocného prvku, jako polovodič typu *n*. Stejně tak v druhém případě nazýváme příměsí typu *p* nebo také *akceptory*, protože přijímají (akceptují) elektrony. Elektrony jsou pak v tomto typu *minoritními nosiči* a díry *majoritními*. Podle typu příměsí

pak tento typ polovodiče, tedy s příměsí třímocného prvku, označujeme jako polovodič typu  $p$ .

Pokud spočítáme součin koncentrací  $n \cdot p$ , zjistíme, že zůstává konstantní.

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (2.1)$$

$A$  je obecně nezávislý na koncentraci příměsi. Tedy pokud zvýšíme koncentraci elektronů, současně tím snížíme koncentraci děr. Toto zvýšení (snížení) je úměrné - tolikrát kolikrát zvýšíme (snížíme) koncentraci, tolikrát se sníží (zvýší) koncentrace druhého typu částic. Tato úměrnost je stejná v případě polovodiče typu  $p$  i  $n$ . Vysvětlením tohoto fyzikálního efektu je *proces rekombinace*.

Proces rekombinace lze vysvětlit následovně. Excitací elektronu ve vyšším energetickém stavu ve vodivostním pásu může dojít ke srážce s atomem v mřížce. Touto srážkou dojde k předání energie. Toto předání způsobí, že elektron *spadne* z vodivostního do valenčního pásu, kde obsadí díru – rekombinuje. Proto můžeme hovořit o tzv. rekombinaci páru elektron-díra. V případě kdy přidáme příměs, tedy kdy zvýšíme koncentraci jednoho nebo druhého typu nosičů, dojde k tomu, že roste i pravděpodobnost rekombinace.

K rekombinaci nositelů nedochází jen v objemu polovodiče, ale i na jeho povrchu. Na povrchu může být vysoká koncentrace rekombinačních center, a tedy může dojít i k tomu, že povrchová rekombinace převýší rekombinaci objemovou. Na povrchu je také jiné chování nadbytečných nositelů než v objemu.

Rekombinace můžeme rozdělit podle druhu přechodu elektronu z vodivostního do valenčního pásu na: zářivé rekombinace, Augerovy rekombinace a rekombinace prostřednictvím rekombinačních center. Nejčastějším druhem rekombinace je pak posledně jmenovaná – rekombinace prostřednictvím rekombinačních center.

Obecně současně s rekombinací probíhá v polovodiči i proces opačný – generace. Výsledná rekombinace je pak součtem generace a rekombinace. Pokud se v polovodiči uplatňuje více rekombinačních či generačních procesů, je výsledná rekombinace součtem všech těchto procesů.

U příměsových polovodičů je koncentrace majoritních nosičů větší než koncentrace minoritních nosičů. Z pohledu rekombinace bude hrát roli koncentrace minoritních nosičů, i když na první pohled by se mohlo toto zdát nelogické. Tento jev je způsoben tím, že rekombinace probíhá v párech elektron – díra. Logicky můžeme proto odvodit, že v případě kdy dojde k rekombinaci všech párů, zůstane v polovodiči ještě poměrně značná část majoritních nosičů. Takto jsem se alespoň kvalitativně pokusil vysvětlit, proč je koncentrace minoritních nosičů důležitá.

Pro popis, případně pro výpočet doby rekombinace a tedy i doby života vycházíme z rovnice kontinuity (zákona zachování náboje)

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Kde  $\rho = q(p - n + N_D - N_A)$  je celková hustota náboje,  $\vec{j} = \vec{j}_p + \vec{j}_n$  celková hustota proudu,  $N_D$  a  $N_A$  koncentrace ionizovaných donorů a akceptorů a  $p$  a  $n$  pak hustota donorů a akceptorů. Po dosazení do rovnice (2.2) pak získáme

$$\operatorname{div} \vec{j}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR \quad \text{pro } N_D, N_A \neq f(t). \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{j}_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR \quad (2.4)$$

$R > 0$  rychlost rekombinace,  $R < 0$  rychlost generace páru elektron – díra. Toto vyjádření v sobě zahrnuje všechny možné procesy generace a rekombinace. Tedy včetně rekombinace (generace) přímé, rekombinace

pomocí stavů v zakázaném pásu, rekombinace  $R_s$ , generace absorpcí fotonů  $G_L$ .

Hustotu proudu  $\vec{j}$  můžeme také vyjádřit jako součet difuzní a driftové složky. Po dosazení tak obdržíme rovnici kontinuity pro koncentraci minoritních nositelů v  $p$ -typu a v  $n$ -typu. Pokud můžeme zanedbat elektrické pole a slabou injekci, můžeme pak tyto dvě rovnice kontinuity zapsat pro případ v 1D ve tvaru

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_L - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \quad p\text{-typ} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_L - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \quad n\text{-typ} \quad (2.6)$$

kde  $\tau_n$  a  $\tau_p$  jsou doby života,  $D_p$  a  $D_n$  jsou difuzní koeficienty děr a elektronů.

## 2.2. Přímá rekombinace

Pro přesnější popis rekombinace můžeme vzít pro příklad polovodič typu  $n$ , který na krátký časový úsek ozáříme světlem (zářením) o vhodné vlnové délce tak, aby energie fotonů byla dostatečná na to, aby došlo k excitaci elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Tento postup bude použit následně i při vlastním měření. V tomto myšleném pokusu a následně i při vlastním měření budeme sledovat, co se bude dít s koncentrací nosičů (v myšleném pokusu se jedná o díry) v závislosti na čase.

V případě polovodiče s přímým zakázaným pásem, kdy do tohoto pásu spadají nadbytečné nosiče, je velká pravděpodobnost, že elektron a díra budou spolu rekombinovat přímo. Je to hlavně proto, že spodní část vodivostního pásu a vrchní část valenčního pásu jsou přímo nad sebou. Poměr přímé rekombinace  $R$  je pak úměrný množství elektronů ve vodivostním pásu a množství děr v pásu valenčním.

$$R = \beta np \quad (2.7)$$

kde  $\beta$  je konstanta úměrnosti. V případě tepelné rovnováhy je pak rekombinace v rovnováze s generací nositelů. Tato rovnost lze pak pro případ polovodiče typu  $n$  vyjádřit jako:

$$G_{th} = R_{th} = \beta n_{n0} p_{n0} \quad (2.8)$$

kde  $n_{n0}$  a  $p_{n0}$  jsou opět rovnovážné koncentrace jednotlivých typů nositelů.

Osvitem polovodiče světlem pak můžeme upravit podíl generovaných nositelů. Poměr rekombinace ke generaci přejde pak ze vztahu (2.7) na vztah

$$R = \beta np = \beta(n_{n0} + \Delta n)(p_{n0} + \Delta p) \quad (2.9)$$

$$G = G_L + G_{th} \quad (2.10)$$

$\Delta n$  a  $\Delta p$  jsou koncentrace nadbytečných nosičů, pro které platí

$$\Delta n = n_0 - n_{n0} \quad (2.11)$$

$$\Delta p = p_0 - p_{n0} \quad (2.12)$$

Změnu koncentrace pak můžeme vyjádřit ve tvaru

$$\frac{dp_n}{dt} = G - R = G_L + G_{th} - R \quad (2.13)$$

Pro ustálený stav, tedy pro případ že  $\frac{dp_n}{dt} = 0$  získáme

$$G_L = R - G_{th} = U \quad (2.14)$$

kde písmenem  $U$  jsme označily celkovou rekombinační rychlost, kterou můžeme pomocí dříve uvedených vztahů vyjádřit také jako

$$U \cong \beta(n_{n0} + p_{n0} + \Delta p) \cdot \Delta p \quad , \quad (2.15)$$

v případě, že se jedná o slabou injekci, tedy za předpokladu že  $p \ll n$ , neboli v momentě, kdy je koncentrace elektronů větší než koncentrace děr. Jinými slovy, že je dostatek elektronů, které mohou následně rekombinovat s děrami. Pak můžeme rovnici (2.15) přepsat do tvaru

$$U \cong \beta n_{n0} \Delta p = \frac{p_n - p_{n0}}{\frac{1}{\beta n_{n0}}} \quad (2.16)$$

konstantu  $\frac{1}{\beta n_{n0}}$  označujeme jako dobu života a značíme ji  $\tau_p$ . Tedy v případě termální rovnováhy máme:

$$U = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \quad (2.17)$$

Časovou závislost doby života můžeme pak již jednoduše získat ze vztahu (2.13) dosazením.

$$\frac{dp_n}{dt} = G_{th} - R = -U = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \quad (2.18)$$

Řešením této rovnice je pak

$$p_n(t) = p_{n0} + \tau_p \cdot G_L \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\tau_p}\right\} \quad (2.19)$$

V případě, že chceme určovat dobu života, jsou pro nás významné tři případy rovnice (2.6). Pro případ, kdy je generace absorpcí fotonů  $G_L$  konstantní v celém objemu, použijeme rovnici (2.6), která má pro tento případ řešení ve tvaru

$$p_n(t) = p_{n0} + \tau_p \cdot G_L \cdot \left(1 - \exp\left\{-\frac{t}{\tau_p}\right\}\right), \quad (2.20)$$

kde  $\Delta p_n = G_L \cdot \tau_p$  pro  $t \rightarrow \infty$ .

Druhým důležitým případem je pak moment, kdy dojde k ukončení generace absorpcí fotonů  $G_L$  v celém objemu v  $t = 0$ . Rovnice (2.6) pak má řešení ve tvaru rovnice (2.19)

$$p_n(t) = p_{n0} + \tau_p \cdot G_L \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\tau_p}\right\} \quad (2.21)$$

V obou případech nám z řešení vypadne závislost na  $x$ . Toto je způsobeno tím, že  $G_L$  je konstantní, tedy na  $x$  nezávisí.

Třetí významným případem je pak moment, kdy je generace absorpcí fotonů  $G_L$  konstantní v lokalizovaném místě, např. v  $x = 0$ . V ustáleném stavu je pak prostorová závislost rovna

$$p_n(x) = p_{n0} + \tau_p \cdot G_L \cdot \exp\left\{-\frac{x}{L_p}\right\}, \quad (2.22)$$

kde  $L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$  je difuzní délka děr.

### **2.3. Odhad povrchové rekombinační rychlosti**

Při rekombinaci dochází k tomu, že se projevuje vliv povrchu. Tento vliv je silnější se zmenšujícími se rozměry vzorku. Při měření doby života pak měříme vlastně efektivní dobu života.

Tato efektivní doba života souvisí s rychlostí povrchové rekombinace  $R_S$  a s objemovou dobou života  $\tau_0$  takto <sup>[10]</sup>:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_B} + R_S \quad (2.23)$$

Pro vzorky ve tvaru hranolu lze pak rychlost povrchové rekombinace ( $R_S$ ) vyjádřit ve tvaru <sup>[10]</sup>

$$R_S = \pi^2 \cdot D \cdot (l^{-2} + w^{-2} + t^{-2}), \quad (2.24)$$

kde  $D$  je koeficient difuze minoritních nosičů,  $l$  je délka vzorku,  $t$  šířka vzorku a  $w$  jeho tloušťka.

Jak již bylo řečeno, má proces rekombinace ve vzorku dvě složky: objemovou a povrchovou. Závislost doby života na těchto procesech je vyjádřena ve vztahu (2.23). Pro objemovou dobu života pak dostáváme výraz

$$\tau_B = \left( \frac{1}{\tau_{ef}} - R_S \right)^{-1} \quad (2.25)$$

### **2.4. Měření doby života**

Využití znalosti doby života v polovodiči je důležitá například při posuzování čistoty polovodičových materiálů (vyšší čistota = větší doba života), nebo pro posouzení poruch v krystalu (poruchy vedou ke snížení doby života), aj. Doba života má význam střední doby existence nadbytečných nositelů (pár elektron-díra).

Samotné měření doby života lze provádět několika metodami. Ty můžeme rozdělit podle druhu kontaktu na: bezkontaktní měření doby života a kontaktní měření doby života.

V této práci se omezíme na kontaktní metody měření. Tato kontaktní měření neumožňují měřit přímo koncentraci nosičů. Ve většině případů se měří změna vodivosti prostřednictvím napětí  $\Delta U$ . Způsob jakým je měření prováděno nám umožňuje ztotožnit změnu napětí se změnou měrného odporu. Změna měrného odporu pak představuje zápornou změnu fotovodivosti, a tu lze již ztotožnit se změnou koncentrace. Neboli

$$\Delta n \sim \Delta \sigma \sim -\Delta \rho \sim -\Delta U \quad (2.26)$$

Tedy ve finále měříme změnu koncentrace nosičů pouze zprostředkovaně přes veličiny, které jsou měřitelné.

Do kategorie kontaktních měření můžeme zařadit: metodu fázové kompenzace, metodu frekvenčního poklesu fotovodivosti, metodu měření z difuzní délky a metodu fotovodivostního poklesu (PCD).

#### **2.4.1. Metoda fázové kompenzace** <sup>[7]</sup>

Tato metoda spočívá v ozařování vzorku zářením, jehož intenzita je modulována s frekvencí  $\omega$ . Nejčastěji sinusově nebo obdélníkově, ale použit může být i jiný průběh.

V případě sinusové modulace můžeme zapsat rovnici kontinuity ve tvaru

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \beta \cdot k \cdot g_m \cdot (1 - \cos \omega t) - \frac{\Delta n}{\tau} \quad (2.27)$$

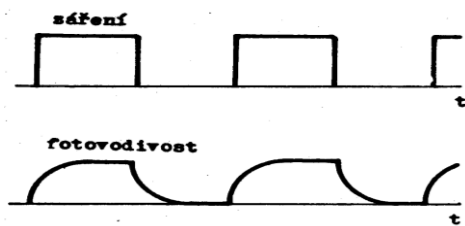
a její řešení v případě ustáleného stavu pak

$$\Delta n = \frac{\beta \cdot k \cdot g_m \cdot \tau}{\sqrt{1 + (\tau \cdot \omega)^2}} \cdot \cos\{\omega t - \arctg(\tau \cdot \omega)\} \quad (2.28)$$

kde  $g_m$  je největší hodnota intenzity záření,  $\beta$  je kvantový výtěžek,  $k$  je koeficient absorpce,  $\tau$  je doba života.

Ze vztahu (2.29) lze vyčíst, že koncentrace nadbytečných nositelů má sinusový průběh. Se změnou frekvence se mění amplituda i fáze. Právě závislosti fázového posunu můžeme využít pro stanovení doby života.

#### 2.4.2. Metoda frekvenčního poklesu fotovodivosti<sup>[7]</sup>



Obr. 01 Relaxace fotovodivosti při pulzní generaci nadbytečných nositelů.

Zdroj: J. HLÁVKA, L. BOČÁNEK<sup>[7]</sup>

I pro tuto metodu použijeme ozařování vzorku modulovaným zářením se sinusovým nebo obdélníkovým průběhem. V porovnání s předchozí metodou, kde byla  $\omega = konst.$ , se při této metodě mění. Pokud bude frekvence malá, bude průběh vypadat, tak jak je zobrazeno na obr. 01. Tedy

fotovodivost po ukončení pulzu má dostatek času na to, aby poklesla opět na nulu v každém cyklu. Pokud tento čas nemá, tedy v případě, že se další pulz objeví dříve, než fotovodivosti poklesne na nulu, pak se ustálí nový stav s menšími změnami fotovodivosti. Lze tedy říci, že s rostoucí frekvencí pulzů budeme pozorovat zmenšování fotovodivosti. Frekvenční závislost fotovodivosti pak může být výpočtem vyjádřena jako

$$\Delta\sigma(f) = \Delta\sigma_{st} \cdot th \frac{T}{4\tau} = \Delta\sigma_{st} \cdot th \frac{1}{4\tau \cdot f} \quad (2.29)$$

Díky tomuto můžeme pak vyjádřit dobu života ze závislosti střídavé složky fotovodivosti na frekvenci přerušování záření. Dobu života můžeme získat fitováním, nebo odečtením frekvence  $f$ , při které je  $th \frac{1}{4\tau f}$  roven 1, tj. při které je roven  $0,76\Delta\sigma_{st}$ . Pro dobu života tak získáme vztah

$$\tau = \frac{1}{4 \cdot f} \quad (2.30)$$

V případě, že použijeme sinusovou modulaci záření a hodnotu fotovodivosti  $0,71\Delta\sigma_{st}$  při frekvenci  $f$ , získáme pro dobu života vztah

$$\tau = \frac{1}{2\pi f} \quad (2.31)$$

který plyne z rovnice (2.28)

### 2.4.3. Metoda měření z difuzní délky <sup>[7]</sup>

Generujeme-li nadbytečné nositele v určitém místě polovodiče, pak nositelé z místa generace difundují. Nadbyteční nositelé však ve všech místech rekombinují. Prostorové rozložení koncentrace nadbytečných nositelů proto souvisí s jejich rekombinací. Metoda měření doby života z difuzní délky je založena právě na této skutečnosti.

Z dříve uvedené rovnice (2.22) lze navíc odvodit, že koncentrace nadbytečných nositelů závisí na vzdálenosti od místa  $x$  generace exponenciálně.

Princip samotné metody je postaven na tom, že zářením o malém absorpčním koeficientu generujeme v určité oblasti vzorku nadbytečné nositele. Změna koncentrace je pak sledována ve vzdálenosti  $x$  pomocí proudu, který protéká hrotovým kontaktem zapojeným v závěrném směru. Měříme tak odpovídající fotoproud, který závisí na koncentraci nadbytečných nositelů, a proto má naměřená závislost fotoproudu na vzdálenosti  $x$  vyjádření

$$I = I_0 \cdot \exp\left\{-\frac{x}{L}\right\} \quad (2.32)$$

Ze vztahu (2.32) již lze stanovit difuzní délku. Dobu života pak můžeme určit ze vztahu, který spojuje dobu života právě s difuzní délkou

$$L_n = \sqrt{D \cdot \tau_r} \quad (2.33)$$

#### 2.4.4. Metoda fotovodivostního poklesu (PCD) <sup>[7]</sup>

Měření je založeno na monitorování optických excitací a jejich poklesů jako funkcí času po zániku excitace (rekombinace). Vzorky při samotném měření mohou být okontaktovány, nebo bez kontaktů.

Přítomnost nadbytečných nosičů při PCD metodě může být detekována mnoha způsoby. Jedním z těchto způsobů je měření vodivosti jako funkcí času.

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.34)$$

Potom pro  $n = n_0 + \Delta n$  a  $p = p_0 + \Delta p$  a současně pro případ že  $\Delta n = \Delta p$  získáváme pro nadbytečné nosiče vztah

$$\Delta n = \frac{\Delta \sigma}{q(\mu_n + \mu_p)} \quad (2.35)$$

Z tohoto vyplývá, že v případě kdy měříme  $\Delta \sigma$ , měříme v podstatě  $\Delta n$ . Pokles hustoty nadbytečných nosičů v případě slabé injekce je pak dána

$\Delta n(t) = \Delta n(0) \exp\left\{\frac{-t}{\tau_{ef}}\right\}$ , kde pro  $\tau_{ef}$  pak platí

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_s} \quad (2.36)$$

kde  $\tau_s$  je doba života povrchové rekombinace. Pro tuto povrchovou dobu života můžeme stanovit závislost na rozměrech vzorku.

Pokud máme vzorek tvaru hranolku, pro který platí, že jeden nebo všechny rozměry jsou velké, může být rovnice (2.36) přepsána do tvaru

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_B} + \pi^2 D \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right) \quad (2.37)$$

kde  $a$ ,  $b$ , a  $c$  jsou rozměry vzorku.

### 3. Experimentální část

První část obsahuje informace o měrném odporu několika vzorků *Ge* a *Si*, a to jak p-typu tak n-typu. Měření probíhalo pomocí lineární čtyř-sondy.

Cílem měření v druhé části je určit dobu života na tenkých vzorcích vyříznutých z kruhových *Si* desek dodaných ON-Semiconductor. Tato část zahrnuje tedy postup přípravy vzorku pro měření a následného měření doby života minoritních nosičů ve vzorcích dříve proměřených pomocí čtyř-sondy. Po úvodním měření byl vybrán jeden referenční vzorek, dále označován jako N10/01. Na něm byla provedena celá série měření o rozličných vlnových délkách světla a také různé postupy zpracování výsledků. Pro samotné měření byla použita metoda sledování poklesu fotovodivosti. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 04.

V posledním měření byla opět proměřována doba života minoritních nosičů ve vzorcích křemíku. Zde byly použity nové, *tlusté*, vzorky. Za tlustý vzorek je považován takový, jehož tloušťka je větší než tloušťka křemíkových desek, ze kterých byly *tenké* vzorky vyřezány. Cílem této části měření je zjištění závislosti doby života nosičů na tloušťce vzorku. Po proměření měrného odporu a zkušebním měření doby života byl pro následující měření vybrán vzorek, který se svými vlastnostmi nejvíce blíží prvnímu referenčnímu vzorku N10/01.

Pro měření byly v případě první části měření použity jako zdroj záření tři LED vydávající záření o vlnové délce  $\lambda_1 = 940nm$ ,  $\lambda_2 = 950nm$  a  $\lambda_3 = 1050nm$ . Měření pak bylo provedeno při zapojení jak jedné diody, tak i při zapojení všech tří LED zapojených sériově (toto zapojení je nadále označeno jako  $3x$ ). V druhém případě pak byl použit LASER s vlnovou délkou  $\lambda_L = 1064nm$ , jehož záření bylo utlumené pomocí filtrů.

### 3.1. Měření měrného odporu a dalších vlastností vzorků

Jednou ze základních vlastností polovodiče je i měrný odpor. Pro měření měrného odporu lze úspěšně využít čtyř-sondu. Pro možnost měření pomocí čtyř-sondy bylo třeba nejdříve proměřit vzdálenosti jednotlivých hrotů sondy. Efektivní vzdálenost hrotů byla stanovena na  $s_{ef} = (1,60 \pm 0,01)mm$ .

Pro samotné určení měrného odporu lze použít vztah

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I} \cdot w \approx 4,532 \cdot \frac{U}{I} \cdot w \quad (3.1)$$

Pozn.: Tento vztah je odvozen v kapitole 5.1. *Teorie čtyř-sondy*.

Tento vztah lze ale použít jen pro případ, kdy je  $w \ll s$ , tedy pro případ kdy je tloušťka vzorku menší než vzdálenost hrotů sondy. V případě, že toto neplatí, tedy když je tloušťka vzorku větší než vzdálenost hrotů, musíme uplatnit korekci na tloušťku. Potom získáme pro měrný odpor vztah

$$\rho = \frac{\rho_0}{G_7}, \text{ kde korekce } G_7 \text{ je převzata z bakalářské práce F. PLAČKA [2].}$$

Při samotném měření byly k dispozici následující vzorky křemíku označené jako

*N9/01, N9/02, N10/01, N10/02 a N11/01*

Na těchto vzorcích byly měření ověřeny údaje dodané výrobcem. Následně byl proměřen měrný odpor. Pro přesnější stanovení měrného odporu bylo nutné provést korekce na rozměry vzorku.

Naměřený měrný odpor se liší od hodnot dodaných výrobcem průměrně o  $0,171 \Omega cm$ . Tato odchylka může být způsobena rozličným postupem při měření i použitím méně přesných korekcí na rozměry vzorků.

Součástí měření vlastností vzorků bylo i stanovení typu vodivosti. Ten byl u všech dodaných vzorků ověřen a určen jako typ N. Typ vodivosti byl určen z polarizace termoelektrického napětí.

Naměřené hodnoty měrného odporu i dalších vlastností vzorků jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 01).

Tab. 01 Vlastnosti vzorků N9/01, N9/02, N10/01, N10/02 a N11/01

Naměřené údaje					
vzorek	N9/01	N9/02	N10/01	N10/02	N11/01
šířka (mm)	14,90	15,08	15,09	15,03	14,86
délka (mm)	43,51	25,05	43,75	17,91	43,89
tloušťka ( $\mu\text{m}$ )	412	411	388	389	386
$\rho_0 (\Omega\text{mm})$	26,33	25,88	54,11	53,83	132,24
$\rho (\Omega\text{cm})$	$0,48 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,01$	$0,92 \pm 0,01$	$0,92 \pm 0,01$	$2,24 \pm 0,01$
Údaje dodané výrobcem					
vzorek	T52Pxx	T52Pxx	T52Pxx	T52Pxx	T52Pxx
$t (\mu\text{m})$	400,88	400,88	380,52	380,52	379,74
$\rho (\Omega\text{cm})$	0,378	0,378	0,759	0,759	1,900
$N (\text{cm}^{-3})$	$1,43\text{E}+16$	$1,43\text{E}+16$	$6,55\text{E}+15$	$6,55\text{E}+15$	$2,47\text{E}+15$

Údaje od výrobce: *Si* desky jednostranně leštěné,  
legované fosforem,  
(N-typ),  
orientace (111),  
žihání 620°C/20 min.

Teorie měření pomocí čtyř-sondy je uvedena v příloze (kapitola 5.1. Teorie čtyř-sondy).

Pro následující měření závislosti na geometrii byly pak použity vzorky označené jako

*NSi T01, NSi T02, NSi T03, NSi T04, NSi T05, NSi T06, NSi T0 a NSi T08*

Tab. 02 Vlastnosti vzorků NSi T01, NSi T02, NSi T03, NSi T04, NSi T05, NSi T06, NSi T07, NSi T08

Naměřené údaje			
vzorek	typ vodivosti	Tloušťka [mm]	měrný odpor [ $\Omega\text{cm}$ ]
NSi T01	p	1,16	11,414
NSi T02	n	2,03	53,605
NSi T03	p	1,83	19,095
NSi T04	p	2,33	5,820
NSi T05	p	2,82	5,552
NSi T06	p	2,35	4,176
NSi T07	p	1,94	3,846
NSi T08	n	1,01	8,743

### 3.2. Příprava vzorků

Pro možnost měření doby života v dostupném zařízení musely být vzorky upraveny do tvaru tenkých hranolků a okontaktovány.

Vzorky ve tvaru obdélníku s kontakty na koncích byly vyříznuty z větších křemíkových desek. Vlastnosti jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 01 a v tabulce 02.

Jednou z úprav je okontaktování vzorku pomocí roztoku *Ga*. Toto se provádí prvotním zbrúšením vzorku v místě, kde bude následně nanesen *Ga*. Zbrúšení vzorku se provádělo pomocí smirkového papíru. Následné nanášení kontaktu se provádělo vtíráním galia pomocí india.

V další části měření (závislost na tloušťce vzorku) bylo také třeba tlustý vzorek zbrúsit na požadovanou tloušťku. Toto zbrúšení se provádělo pomocí brusiva, následné očištění a doleštění vzorku pomocí smirkového papíru.

Připravený vzorek se pak následně přiložil na teflonový blok s mechanickými kontakty (viz. Příloha 5. 4., obr. 08) a spolu s ní vložen do přístroje.

### **3.3. Měření doby života**

Pro vlastní měření doby života byla použita metoda frekvenčního poklesu fotovodivosti. Bližší popis této metody byl již proveden v kapitole 2.4.4. *Metoda fotovodivostního poklesu (PCD).*

Samotné měření lze provést dvěma způsoby. A to měřením na sériovém odporu  $R$ , nebo na vzorku při konstantním proudu. Obě tyto možnosti zachovávají úměru mezi  $\Delta V \sim \Delta p$  za určitých předpokladů. Zejména musí platit

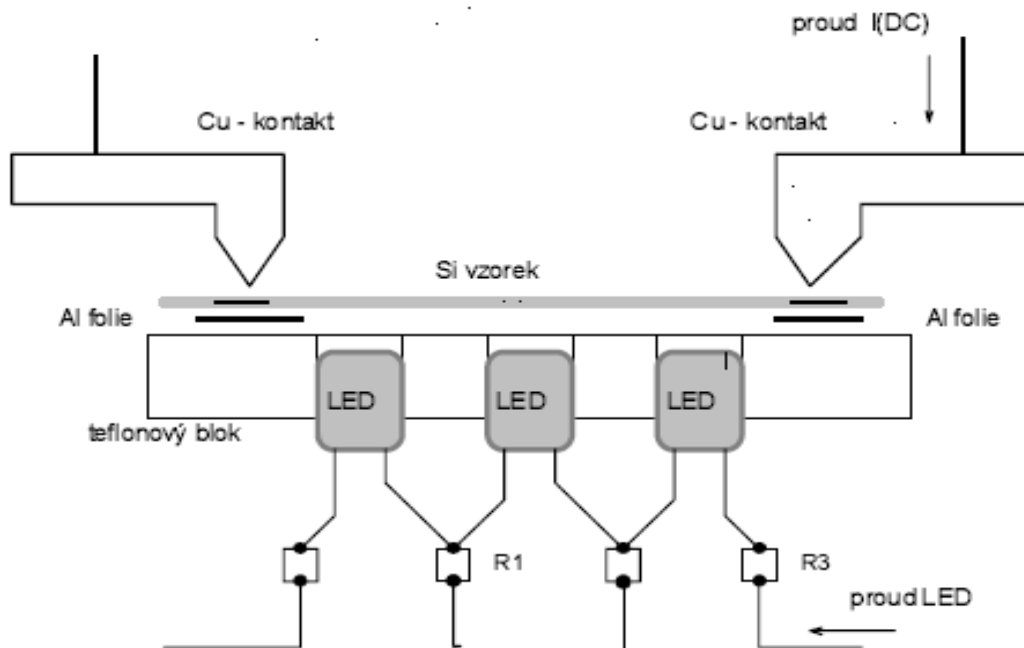
$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta p}{p} \quad (3.2)$$

Pozn.: Pouze pro případ slabé injekce, tedy pro případ, kdy  $\frac{\Delta p}{p} \ll 1$

Pro následující měření bylo použito měření při konstantním proudu.

#### **3.3.1. Uspořádání měření**

Při samotném měření byl vzorek umístěn na teflonový blok, ve kterém byly vyvrtány otvory pro umístění LED. Celá podložka se vzorkem byla pak vložena pod měděné kontakty. Aby nedocházelo ke zkreslení měření tím, že by diody osvítily přímo kontakt, byl vzorek v místě kontaktu podložen hliníkovou fólií, která je schopná toto případné záření odstínit. Pro lepší představu je vložen následující obrázek 02. Reálné zapojení lze pak nalézt v příloze 5.4., kde je umístěna fotodokumentace zapojení.



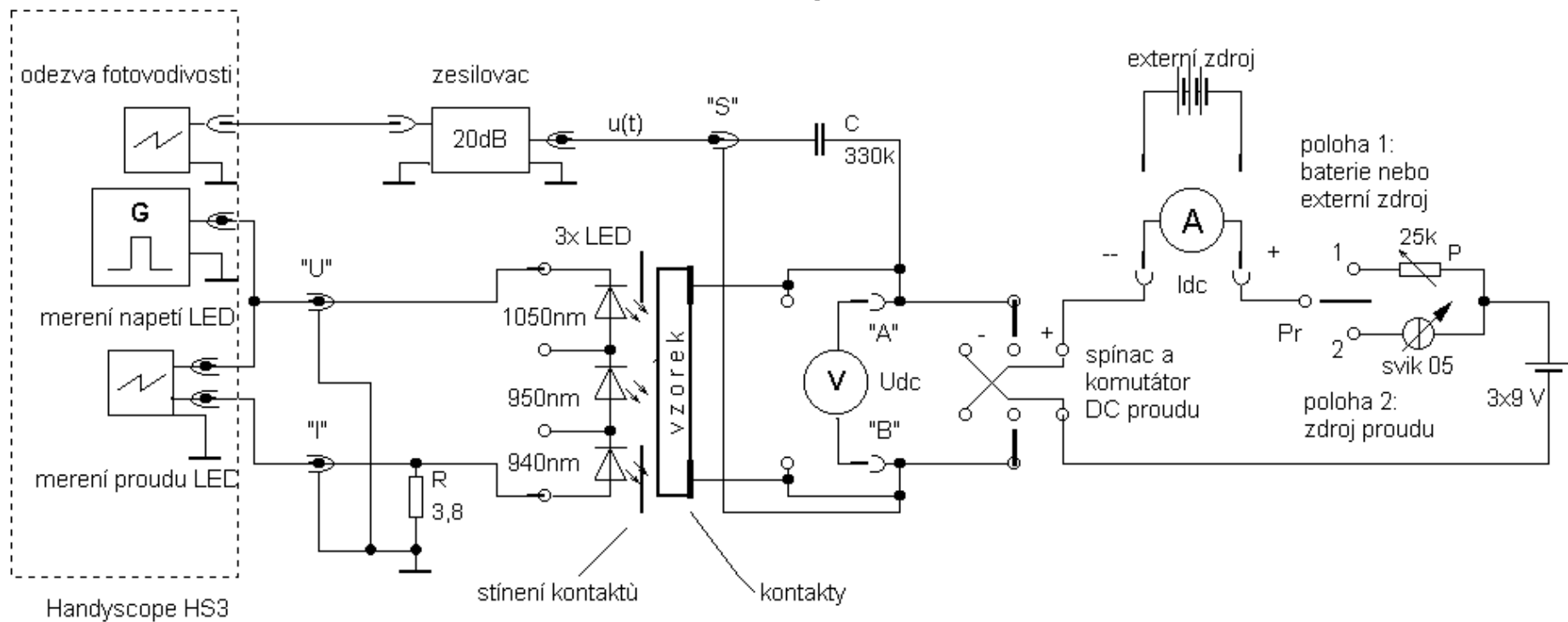
Obr. 02 Uspořádání držáku Si vzorku se třemi LED pro měření PCD

Tato část aparatury je umístěna a uzavřena v tzv. černé skřínce. Ta slouží jednak pro upevnění a jednak pro případné odstínění nechtěného osvětlení denním či umělým světlem v laboratoři.

Tato skříňka je pak připojena k osciloskopu a dalším přístrojům. Zapojení celé aparatury je zobrazeno na obr. 03.

Při některých měřeních byly místo jednoho zobrazeného zesilovače použity dva zesilovače o stejném zesílení. Tato změna sloužila pro potřebu zesílení výstupního signálu. Zesílení s sebou bohužel přineslo i zesílení šumu. V části mé práce, kdy probíhalo měření doby života na oxidovaných vzorcích, byl pak tento šum větší než měřená hodnota doby života. Proto byla tato měření nepoužitelná a následně z této práce vyřazena.

## Pulsní měření odezvy fotovodivosti



Obr. 03 Schéma aparatury ke kontaktnímu měření časové odezvy fotovodivosti

### 3.3.2. Zdroje záření

Pro buzení nadbytečných nositelů byly použity luminiscenční diody a LASER, jejichž vlastnosti jsou:

Při první sadě měření byly použity tři LED:

Tab. 03 Vlastnosti LED

LED	$\lambda$ [nm]	$\alpha$ [1/cm]	$1/\alpha$ [ $\mu\text{m}$ ]	$I_{\text{LED}}$ [mA]	P [mW]
LED940	940	185	54	100	13
LED950	950	160	62	100	15
LED1050	1050	18,7	535	100	5

\*  $\alpha$  je převrácená hodnota hloubky vniku,  $I$  proud a  $p$  výkon

V případě zapojení všech tří LED je pak  $p_{\text{max}} = 35 \text{ mW}$

Při druhé sadě měření byly použity tři stejné LED:

$$\lambda = 1050 \text{ nm}, p_{\text{max}} = 5 \text{ mW}$$

Plocha, která je ozářena jednou LED je rovna  $s = 3,61 \text{ mm}^2$ . Při zapojení všech tří LED v sérii je pak ozářena plocha rovna  $3s$ .

Jako dalším zdroj záření byl použit LASER  $\lambda = 1064 \text{ nm}$   $p_{\text{max}} = 100 \text{ mW}$ . Proč byl použit LASER a ne opět LED? LED má malý výkon, který nestačí vybudit nositele, proto byl použit LASER, který má silný výkon. Pro většinu měření byl tento výkon příliš velký a porušoval tak podmínku slabé injekce, proto byl snižován pomocí filtrů. A to jednak pomocí PVC folie, která snižovala výkon asi o polovinu a pak šedý filtr, který snížil výkon LASERu řádově na miliwatty.

Hloubka vniku záření do vzorku je přibližně rovna převrácené hodnotě koeficientu absorpce, který můžeme určit ze vztahu<sup>[10]</sup>

$$\alpha = \left( \frac{83,15}{\lambda} - 74,87 \right)^2 \quad (3.3)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka záření udávaná v  $\mu m$  a  $\alpha$  koeficient absorpce udávaný v  $cm^{-1}$ . Vztah (3.3) je platný pouze pro vlnovou délku  $(0,7 < \lambda < 1,1)\mu m$ .

### ***3.4. Doba života v závislosti na proudu a na vlnové délce záření***

Samotné měření doby života minoritních nosičů probíhá pomocí digitálního osciloskopu a následným vyhodnocením naměřených údajů. Tyto naměřené údaje se vynesou do grafu a pomocí exponenciální regrese, popř. lineární regrese v logaritmickém grafu, zjistíme hledanou dobu života. Naměřené údaje jsou v následující tabulce 04.

Z tabulky lze poměrně dobře odvodit, že doba života minoritních nosičů obecně nezávisí na proudu protékajícím vzorkem a že přesnější hodnoty vycházejí pomocí přímé, exponenciální regrese.

Nadále tedy budou naměřené hodnoty zpracovávány pouze touto metodou.

Tab. 04 Doba života minoritních nosičů v závislosti na typu vzorku a povrchu

Vzorek	Dioda $\lambda/nm$	Proud $I_{DC}/mA$	Doba života minoritních nosičů			
			lineární regrese		exponenciální regrese	
			rozsah	efektivní doba života	rozsah	efektivní doba života
N10/01	1050	10.0	<10; 60>	$\tau = 1.51 \mu s$	<0;512>	$\tau = 1.68 \mu s$
N10/01	1050	9.90	<20;100>	$\tau = 1.27 \mu s$	<0;512>	$\tau = 1.40 \mu s$
N10/01	950	10.0	< 6; 56>	$\tau = 1.27 \mu s$	<0;512>	$\tau = 1.50 \mu s$
N10/01	950	9.90	< 4; 64>	$\tau = 1.14 \mu s$	<0;512>	$\tau = 0.70 \mu s$
N10/01	950	5.00	<10;512>	$\tau = 3.53 \mu s$	< 0;512>	$\tau = 1.62 \mu s$
			<10; 60>	$\tau = 1.25 \mu s$		
			<10; 40>	$\tau = 1.00 \mu s$		
N10/01	950	2.50	< 3; 36>	$\tau = 0.62 \mu s$	<0;512>	$\tau = 1.71 \mu s$
			< 6; 56>	$\tau = 1.28 \mu s$	<6;512>	$\tau = 1.61 \mu s$
N10/01	940	10.0	<10; 60>	$\tau = 1.26 \mu s$	< 0;512>	$\tau = 1.70 \mu s$
					<10;512>	$\tau = 1.69 \mu s$
N10/01	940	9.90	<15;165>	$\tau = 2.24 \mu s$	<0;512>	$\tau = 1.60 \mu s$
N10/01	3x	9.90	<10;512>	$\tau = 2.30 \mu s$	<0;512>	$\tau = 35,75 \mu s$
			<10;250>	$\tau = 1.60 \mu s$		

\*pozn.: Rozsahem se myslí rozsah vstupních dat. Při každém měření bylo naměřeno 512 hodnot.

V této části měření byl také učiněn pokus změřit závislost doby života na oxidaci vzorku. Referenční vzorek N10/01 byl rozřezán a následně oxidován. Údaje o oxidaci jsou uvedeny v tabulce 05.

Tab. 05 Oxidace vzorku N10/01

<b>N10.01</b>	<b>N10.02</b>
d = 390 $\mu\text{m}$	d = 391 $\mu\text{m}$
a = 17,48 mm	a = 24,56 mm
b <sub>1</sub> = 8,41 mm	b <sub>1</sub> = 7,80 mm
b <sub>2</sub> = 7,99 mm	b <sub>2</sub> = 8,30 mm
R = 62,66 $\Omega$ (při +0,130 V)	R = 146 $\Omega$ (při +0,330 V)
R = 61,7 $\Omega$ (při -0,130 V)	R = 151 $\Omega$ (při -0,330 V)
oxidace SiO <sub>2</sub> t = 4 hod	oxidace SiO <sub>2</sub> t = 2 hod
T = 900°C	T = 700°C
d <sub>SiO<sub>2</sub></sub> = 108 nm	d <sub>SiO<sub>2</sub></sub> = 15 nm < 20 nm

Bohužel ani přidáním dalšího zesilovače do obvodu se nepodařilo rozlišit měřený signál od šumu pozadí. Totéž se opakovalo i s druhým oxidovaným vzorkem. Z toho důvodu byly oba vzorky neměřitelné.

### 3.5. Doba života v závislosti na geometrii vzorku

V poslední části měření byl učiněn pokus ověření závislosti doby života na geometrii vzorku. Pro zjednodušení byl postupně pozměňován pouze jeden rozměr proměřovaného vzorku, a to jeho tloušťka. Pro měření byl vybrán jeden tlustý vzorek křemíku ze skupiny vzorků, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 02, který měl po zběžném proměření podobné vlastnosti jako dříve proměřovaný vzorek N10/01. Z tohoto vzorku byly vytvořeny dvě části o vhodných rozměrech. Rozměry obou vzorků jsou:  $(9,6\text{mm} \times 26,9\text{mm})$ . Počáteční tloušťka vzorků je  $w_0 = 1,88\text{mm}$ . Tloušťka referenčního vzorku je  $w = 1,74\text{mm}$ . Vzorky jsou nadále označovány pouze jako T03/01 a T03/02.

Jediným podstatnějším rozdílem oproti původním vzorkům je to, že tentokrát se jedná o P-typ polovodiče.

Vzorek T03/01 byl následně opakovaně zbrusován na tenčí rozměry a průběžně proměřován.

Pro buzení nositelů byl použit LASER  $\lambda = 1064\text{nm}$  s výkonem  $p_{max} = 100\text{mW}$ . Pro potřebu měření byl výkon snížen stíněním. A to PVC fólií na výkon zhruba  $p_{max} = 50\text{mW}$  a šedým klínem na výkon v rozmezí  $10 - 17\text{mW}$  podle úhlu. Z měření vychází přibližně  $10\text{mW}$  pro úhel šedého klínu  $225^\circ$ ,  $14\text{mW}$  pro úhel  $240^\circ$  a  $17\text{mW}$  pro úhel  $255^\circ$ .

Naměřené doby života na vzorcích:

1) Referenční vzorek ( $w = 1,74\text{mm}$ )

- LED 3x  $\rightarrow 57,11\ \mu\text{s}$  (54,05  $\mu\text{s}$ )
- LED 1x  $\rightarrow 58,23\ \mu\text{s}$  (56,68  $\mu\text{s}$ )
- LASER  $\rightarrow 77,33\ \mu\text{s}$  (stíněné PVC fólií)
- LASER  $\rightarrow 76,33\ \mu\text{s}$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $225^\circ$ )
- LASER  $\rightarrow 79,49\ \mu\text{s}$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $240^\circ$ )
- LASER  $\rightarrow 83,64\ \mu\text{s}$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $255^\circ$ )

2) První měřený vzorek ( $w = 1,88mm$ )

- LED 3x →  $66,11 \mu s$
- LED 1x →  $65,92 \mu s$
- LASER →  $94,02 \mu s$  (stínění PVC fólií)

3) Druhý měřený vzorek ( $w = 1,71mm$ )

- LED 3x →  $55,41 \mu s$
- LED 1x →  $54,27 \mu s$
- LASER →  $79,71 \mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER →  $75,51 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $225^\circ$ )
- LASER →  $83,01 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $240^\circ$ )
- LASER →  $81,96 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem)

4) Třetí měřený vzorek ( $w = 1,54mm$ )

- LED 3x →  $48,96 \mu s$
- LED 1x →  $50,11 \mu s$
- LASER →  $63,47 \mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER →  $62,91 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $225^\circ$ )
- LASER →  $68,61 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $240^\circ$ )

5) Čtvrtý měřený vzorek ( $w = 1,33mm$ )

- LED 3x →  $41,48 \mu s$
- LED 1x →  $43,25 \mu s$
- LASER →  $50,35 \mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER →  $50,79 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $225^\circ$ )
- LASER →  $54,30 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $240^\circ$ )

6) Pátý měřený vzorek ( $w = 1,13mm$ )

- LED 3x →  $31,23 \mu s$
- LED 1x →  $32,37 \mu s$
- LASER →  $35,81 \mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER →  $37,77 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $225^\circ$ )
- LASER →  $40,78 \mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel  $240^\circ$ )

7) Šestý měřený vzorek ( $w = 0,94mm$ )

- LED 3x → 21,76  $\mu s$
- LED 1x → 23,21  $\mu s$
- LASER → 24,52  $\mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER → 26,16  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 225°)
- LASER → 27,91  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 240°)

8) Sedmý měřený vzorek ( $w = 0,74mm$ )

- LED 3x → 15,45  $\mu s$
- LED 1x → 16,41  $\mu s$
- LASER → 15,69  $\mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER → 16,36  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 225°)
- LASER → 17,28  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 240°)

9) Osmý měřený vzorek ( $w = 0,50mm$ )

- LED 3x → 6,56  $\mu s$
- LED 1x → 6,82  $\mu s$
- LASER → 6,97  $\mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER → 7,14  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 225°)
- LASER → 7,52  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 240°)

10) Devátý měřený vzorek ( $w = 0,39mm$ )

- LED 3x → 3,53  $\mu s$
- LED 1x → 3,90  $\mu s$
- LASER → 4,01  $\mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER → 4,02  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 225°)
- LASER → 4,07  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 240°)
- LASER → 4,47  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 255°)

11) Desátý měřený vzorek ( $w = 0,29mm$ ) (285 – 295  $\mu m$ )

- LED 3x → 1,87  $\mu s$
- LED 1x → 1,31  $\mu s$  (1,59  $\mu s$ )
- LASER → 3,36  $\mu s$
- LASER → 2,51  $\mu s$  (stíněné PVC fólií)
- LASER → 2,48  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 225°)
- LASER → 2,51  $\mu s$  (stínění šedým klínovým filtrem - úhel 240°)

Vybrané výsledky jsou pak shrnuty v následující tabulce 06:

Tab. 06 Doba života minoritních nosičů v závislosti na tloušťce vzorku

Tloušťka [mm]	LED 950 [μs]	LED 3x [μs]	LASER (klín 225°)	LASER (klín 240°)	LASER (folie)	Průměrná doba života na dané tloušťce
1.88	65,9	66,1			94,0	75,4
1.74	58,2	57,1	76,3	79,5	77,3	69,7
1.71	54,3	55,4	75,5	83,0	79,7	69,6
1.54	50,1	49,0	62,9	68,6	63,5	58,8
1,33	43,3	41,5	50,8	54,3	50,4	48,0
1,13	32,4	31,2	37,8	40,8	35,8	35,6
0,94	23,2	21,8	26,2	27,9	24,5	24,7
0,74	16,4	15,5	16,4	17,3	15,7	16,2
0,50	6,8	6,6	7,1	7,5	7,0	7,0
0,39	3,9	3,5	4,0	4,1	4,0	3,9
0,29	1,6	1,9	2,5	2,5	2,5	2,2

Opakované měření ukazuje, že chyba měření je poměrně velká. Hrubým odhadem lze říci, že činí přibližně 5%.

Cílem je zjistit objemovou dobu života  $\tau_B$ . Měřena je ale efektivní doba života  $\tau_{ef}$ . Pro získání objemové doby života můžeme využít vzorce (2.23) až (2.25).

V našem případě máme:

$$D_p = 38 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$l = 26,9 \text{ mm}$$

$$d = 9,8 \text{ mm}$$

$$w = \text{proměnná}$$

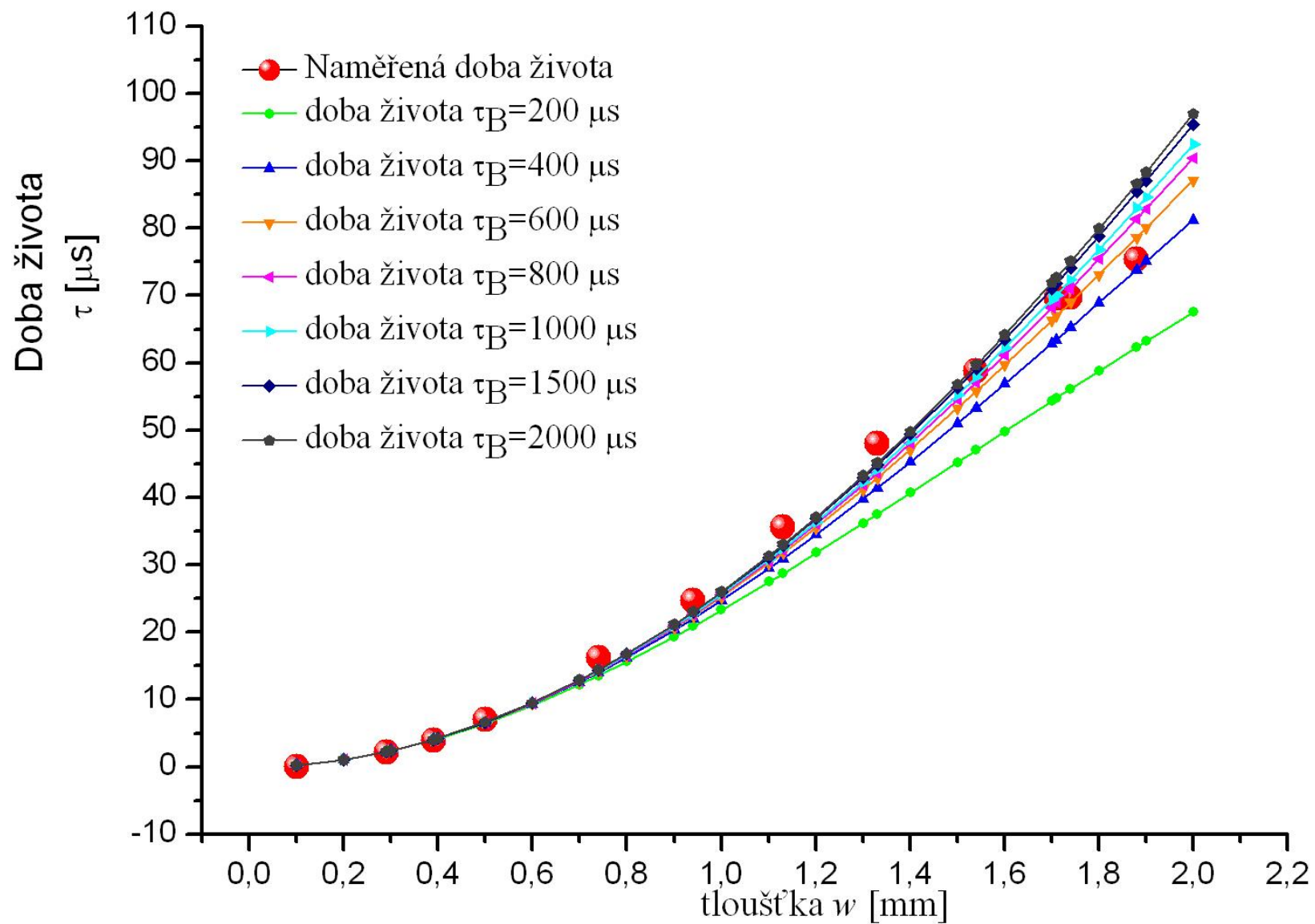
V případě, že ve vztahu (2.23) zvolíme  $\tau_B$  jako parametr, můžeme se pokusit takto zjistit, jakému  $\tau_B$  odpovídá průměrná naměřená hodnota efektivní doby života uvedená v tabulce 06.

Následující tabulce je uvedeno několik hodnot volby parametru  $\tau_B$ .

Tabulka nám také ukazuje, že při malých tloušťkách je efektivní doba života pro všechny zvolené hodnoty stejná. Naopak při velkých hodnotách tloušťky (větších, než je v tabulce použito) se pak bude efektivní doba života rovnat objemové době života. Tedy při velkých tloušťkách lze zanedbat povrchovou dobu života. Její efekt se bude projevovat tím více, čím budeme tloušťku zmenšovat. Je to způsobeno změnou poměru objemu vzorku k jeho povrchu.

Tab. 07 Efektivní doba života v závislosti na tloušťce a volbě  $\tau_B$

Tloušťka [mm]	Měřená $\tau_{ef}$	Spočítaná efektivní doba života $\tau_{ef}$ pro zvolenou hodnotu parametru $\tau_B$						
		200 $\mu s$	400 $\mu s$	600 $\mu s$	800 $\mu s$	1000 $\mu s$	1500 $\mu s$	2000 $\mu s$
2,00		67,4	81,1	86,9	90,2	92,3	95,2	96,8
1,90		63,1	74,9	79,9	82,7	84,4	86,8	88,1
1,88	75,4	62,2	73,7	78,5	81,2	82,8	85,2	86,4
1,80		58,7	68,8	73,0	75,3	76,7	78,7	79,8
1,74	69,7	56,0	65,2	68,9	70,9	72,2	74,0	74,9
1,71	69,6	54,7	63,4	66,9	68,8	70,0	71,7	72,5
1,70		54,2	62,8	66,2	68,1	69,3	70,9	71,8
1,60		49,7	56,8	59,6	61,1	62,1	63,4	64,1
1,54	58,8	47,0	53,3	55,7	57,1	57,9	59,0	59,6
1,50		45,2	50,9	53,2	54,4	55,2	56,2	56,7
1,40		40,7	45,3	47,0	48,0	48,6	49,4	49,8
1,33	48,0	37,5	41,4	42,9	43,6	44,1	44,8	45,1
1,30		36,2	39,8	41,1	41,8	42,3	42,9	43,2
1,20		31,7	34,5	35,5	36,0	36,4	36,8	37,0
1,13	35,6	28,7	30,9	31,7	32,2	32,4	32,8	33,0
1,10		27,4	29,5	30,2	30,6	30,8	31,1	31,3
1,00		23,3	24,7	25,2	25,5	25,7	25,9	26,0
0,94	24,7	20,9	22,0	22,4	22,6	22,8	23,0	23,0
0,90		19,3	20,3	20,6	20,8	20,9	21,1	21,2
0,80		15,6	16,2	16,5	16,6	16,7	16,7	16,8
0,74	16,2	13,5	14,0	14,2	14,2	14,3	14,4	14,4
0,70		12,2	12,6	12,7	12,8	12,8	12,9	12,9
0,60		9,1	9,3	9,4	9,4	9,5	9,5	9,5
0,50	7	6,4	6,5	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
0,40		4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
0,39	3,91	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
0,30		2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
0,29	2,19	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
0,20		1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,10		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3



Graf 01: Efektivní doba života v závislosti na tloušťce a volbě  $\tau_B$

Pokud vezmeme v potaz ASTM Standart <sup>[6]</sup> a ztotožníme použitý vzorek se vzorkem typu C z ASTM, pak můžeme volit hodnotu pro objemovou dobu života  $\tau_B$  pouze do hodnoty  $1300 \mu s$  pro p-typ.

Z tabulky a grafu je patrné, že dobrou aproximací  $\tau_B$  pro měřený vzorek je hodnota  $(400 \pm 200) \mu s$ .

Tedy lze říci, že tento model dává experimentální data, která jsou v dobré shodě s použitou metodou měření.

## 4. Závěr

V první části měření byly ověřovány parametry dodaných vzorků. Ověřeny byly geometrické vlastnosti vzorků a dále byl také ověřen typ vodivosti. Tyto vlastnosti se neliší od údajů dodaných výrobcem. Při měření měrného odporu byly naměřeny poněkud jiné hodnoty, než udává výrobce. Tyto nově naměřené hodnoty se liší zhruba o stejné odchylky. Tyto odchylky mohou být způsobeny různými měřicími přístroji a postupy.

V dalších měřeních byla proměřována efektivní doba života. Aby bylo možné stanovit objemovou dobu života, bylo třeba provést opravu na povrchovou rekombinaci a pokusit se aproximovat naměřené hodnoty volbou parametru  $\tau_B$  ve vztahu (2.23). Touto volbou získáme hodnoty efektivní doby života, které již lze porovnat s naměřenými hodnotami. Tento model dává experimentální data, která jsou v dobré shodě s použitou metodou měření.

Opakované měření nám navíc ukazuje, že chyba takto prováděného měření efektivní doby života je poměrně velká. Hrubým odhadem lze říci, že chyba měření činí přibližně 5%.

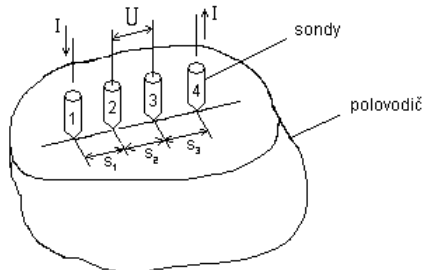
V druhé části byla měřena závislost doby života minoritních nosičů v závislosti na vlnové délce dopadajícího světla a proudu procházejícím vzorkem. Porovnáním naměřených hodnot lze dospět k závěru, že změna doby života v závislosti na proudu  $I_{DC}$  v rozsahu  $(2,5 - 10,0) \text{ mA}$  činí  $(1,1 < \tau_{ef} < 1,7) \mu\text{s}$ . Dále pak porovnáním naměřených hodnot dospějeme k závěru, že doba života nezávisí na vlnové délce použitého záření. Změny, ke kterým dochází, jsou menší než odhadovaná chyba měření a proto lze tyto změny přisoudit právě této chybě.

Součástí této části bylo i prověření přesnosti dvou různých metod zpracování získaných dat. Z tabulky a ze zvolených rozsahů (rozsahy byly voleny tak, aby regrese co nejlépe vystihovala průběh měřených hodnot) lze odvodit, že pro další měření je výhodné volit exponenciální regrese.

V poslední části proběhlo měření závislosti doby života na geometrii, konkrétně na tloušťce vzorku. Naměřené hodnoty jsou uvedené v textu nebo shrnuté v tabulce 06. Jednoduchým odhadem pro objemovou dobu života, ke kterému můžeme dospět při porovnávání naměřených hodnot a hodnot teoretických, pak lze stanovit objemovou dobu života  $\tau_B \in (200; 600) \mu s$ .

## 5. Přílohy

### 5.1. Teorie čtyř-sondy



Obr. 04 Model měření pomocí čtyř-sondy  
Zdroj: F. PLAČEK<sup>[2]</sup>

Pro měření byla použita lineární čtyř-sonda. Schéma tohoto měření je zobrazeno na obr. 04

Vlastní princip čtyř-sondy je takový, že krajními hroty přístroje (na obrázku hrot 1 a 4) protéká námi nastavený proud  $I$ . Na hrotech 2 a 4 se pak měří napětí. Tato metoda má ale jisté omezení, proto v následujících úvahách nadále se předpokládá, že dotyková plocha je ve srovnání se vzdáleností hrotů malá a rekombinační schopnost povrchu vzorku je vysoká. Pro nás je důležitá závislost elektrické intenzity na vzdálenosti.

$$E = \rho \cdot J \quad (5.1)$$

kde  $J$  je hustota proudu, která může být vyjádřena jako

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi r_1^2} \quad (5.2)$$

kde  $S$  je plocha polokoule,  $r_1$  je vzdálenost od prvního kontaktu. Dosazením (5.2) do (5.1) získáme

$$E^+(r_1) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_1^2} \quad (5.3)$$

Z těchto vzorců pak můžeme určit vztah pro potenciál elektrického pole ve vzdálenosti  $r_1$ .

$$\varphi^+(r_1) = - \int E^+(r_1) dr_1 = - \int \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_1^2} dr_1 = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r_1} \quad (5.4)$$

Stejný vztah lze formulovat i pro čtvrtý hrot.

Nás ale zajímá napětí mezi kontakty 2 a 3. To můžeme vyjádřit právě ze znalostí vztahů pro potenciál

$$U = \varphi_2 - \varphi_3 = \frac{\rho \cdot I}{2} \cdot \left( \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_3} - \frac{1}{s_2+s_3} - \frac{1}{s_1+s_2} \right) \quad (5.5)$$

Odtud již můžeme přímo vyjádřit vztah pro měrný odpor

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_3} - \frac{1}{s_2+s_3} - \frac{1}{s_1+s_2} \right)} = 2\pi s_{ef} \frac{U}{I} \quad (5.6)$$

V případě, že by vzdálenosti  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  a  $s_4$  byly stejné o velikosti  $s$ , vzorec (5.6) se zredukuje na

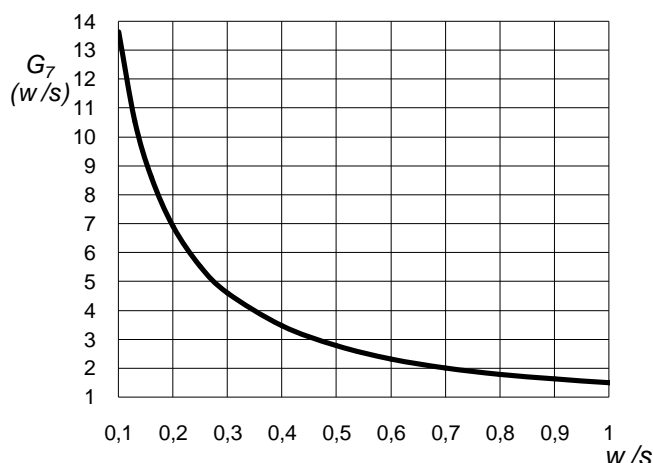
$$\rho = \frac{\rho_0}{G_7}, \quad \text{kde} \quad (5.7)$$

$$\rho_0 = 2\pi s_{ef} \frac{U}{I} = 2\pi s \frac{U}{I} \quad (5.8)$$

V případě, kdy použijí pouze korekci na tloušťku  $w$  vzorku vyjádřenou v bakalářské práci F. PLAČKA<sup>[2]</sup> jako korekce  $G_7(w)$ , získáme vztah pro měrný odpor ve tvaru

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I} \cdot w \approx 4,532 \cdot \frac{U}{I} \cdot w \quad (5.9)$$

Rovnice (5.9) pak navíc platí jen pro  $w \ll s$ .



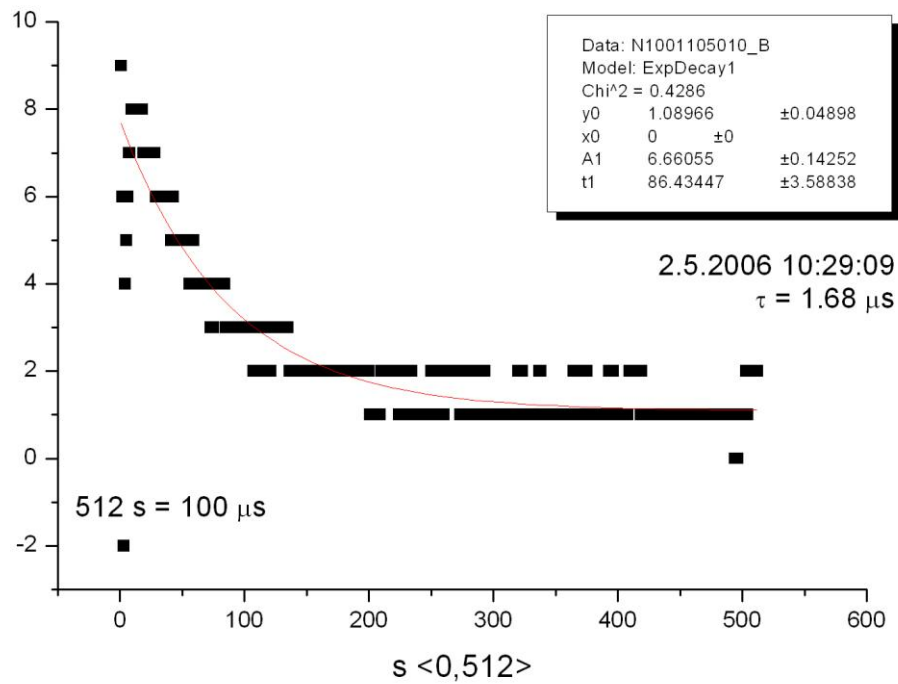
Korekční funkce  $G_7(w/s)$  pro čtyř-sondu přiloženou k tenkému vzorku, který hraničí s nevodivou podložkou pro  $w/s \in \langle 0,1;1 \rangle$

Zdroj: F. PLAČEK<sup>[2]</sup>

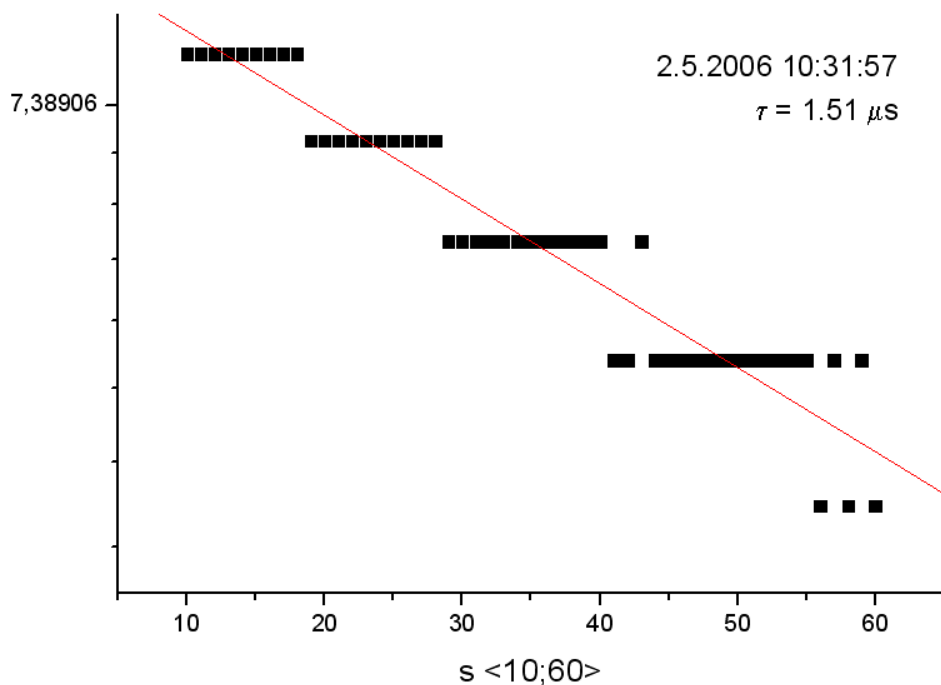
Pro možnost měření pomocí čtyř-sondy bylo tedy nejdříve třeba proměřit vzdálenosti jednotlivých hrotů sondy. Efektivní vzdálenost hrotů byla stanovena jako

$$s_{ef} = (1,60 \pm 0,01) \text{mm} .$$

## 5.2. Ukázka naměřených údajů z první sady měření



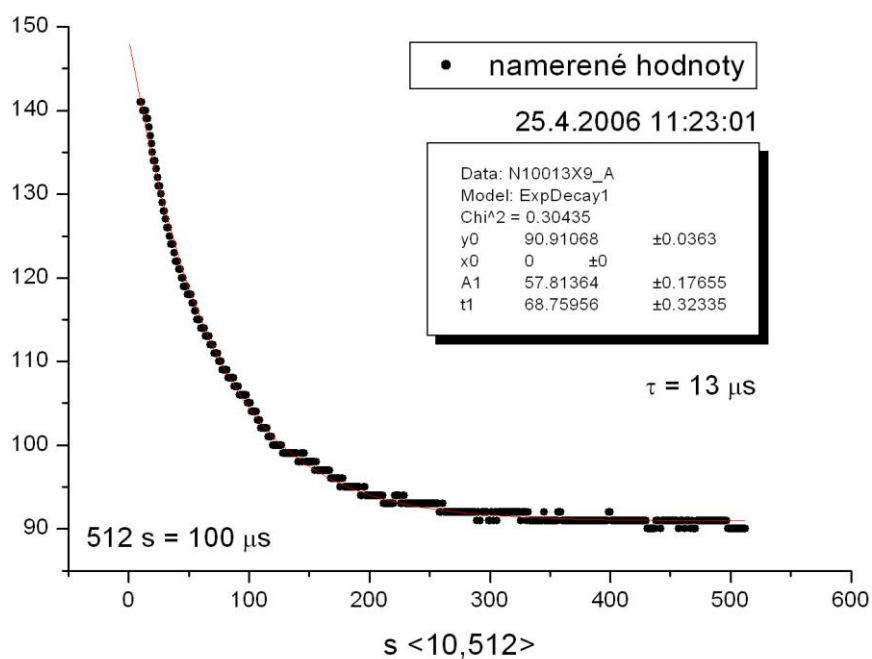
Obr. 05 Exponenciální regrese pro naměřené hodnoty



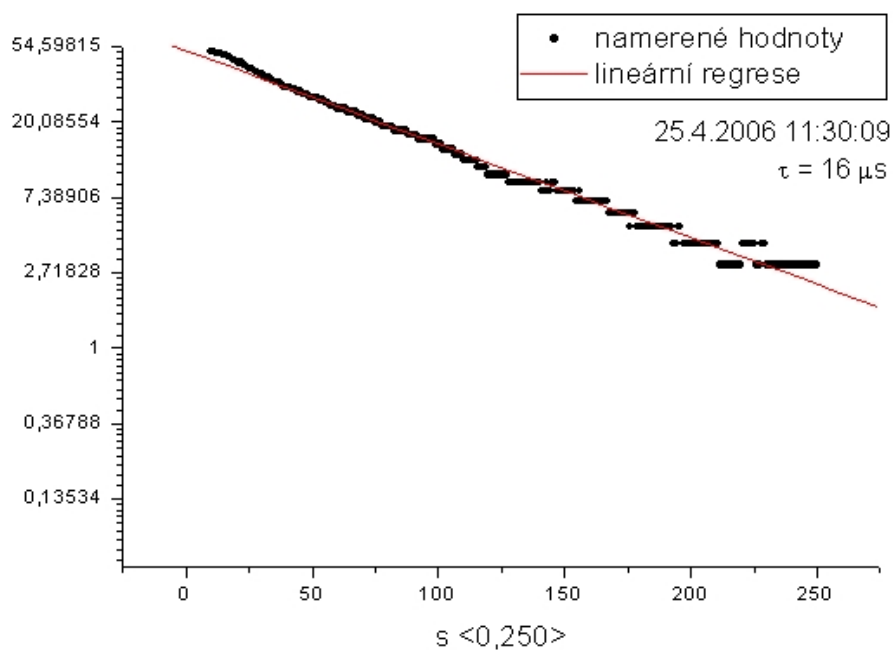
Obr. 06 Lineární regrese pro naměřené hodnoty

Pozn.: Naměřené údaje pro měření vzorku N10/01 při LED 1050 nm a proudu 10,0 mA.

### 5.3. Ukázka naměřených údajů z druhé sady měření

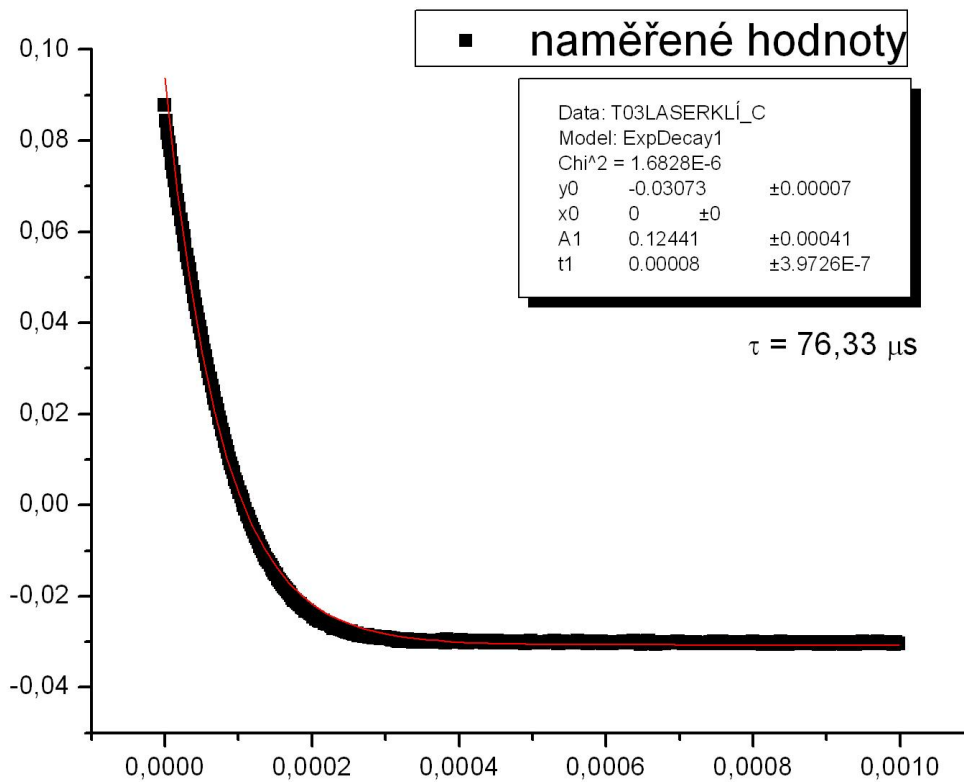


Obr. 07 Exponenciální regrese pro naměřené hodnoty



Obr. 08 Lineární regrese pro naměřené hodnoty

Pozn.: Naměřené údaje pro měření vzorku N10/01 při LED 1050 nm a proudu 10,0 mA.



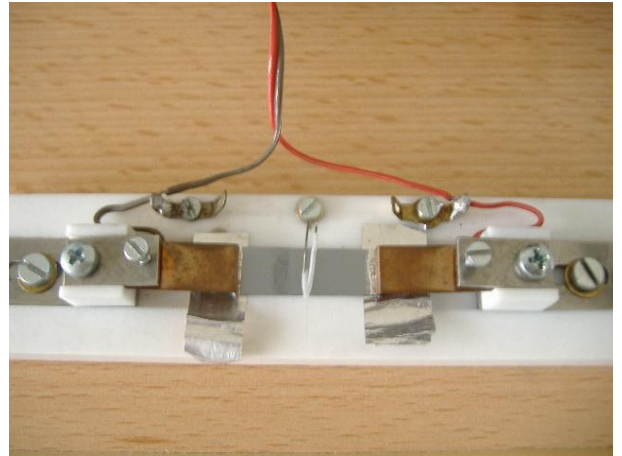
Obr. 09 Exponenciální regrese pro naměřené hodnoty při použití LASERu

Pozn.: Graf náleží k měření referenčního vzorku za použití stínění šedým klínovým filtrem při úhlu 225°

## 5.4. Fotodokumentace měřicího přístroje



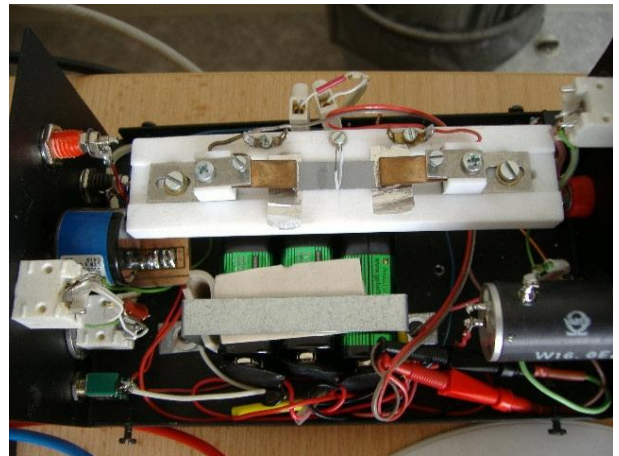
Obr. 10 Pracovní stanice



Obr. 11 Teflonová podložka



Obr. 12 Systém LED



Obr. 13 Detail černá skříňka

## 6. Použité zdroje

- [1] Prof. RNDr. M. ŠÍCHA, DrSc. a prof. RNDr. M. TICHÝ, DrSc.  
*Elektronické zpracování signálů*. Karolinum, nakladatelství UK, Praha 1998.  
elektronická verze - <http://www.sousezm.edu.sk/studium/elektronika>
- [2] F. PLAČEK. *Měrný odpor polovodičů*. Bakalářská práce,  
Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno, 2004. s. 8-15
- [3] Semiconductor Basics - <http://britneyspears.ac/lasers.htm>
- [4] Encyklopedie Navajo – Otevřená encyklopedie Navajo - <http://navajo.cz>
- [5] Wikipedia – The Free Encyclopedia Wikipedia – <http://wikipedia.org>
- [6] *Standard Test Methods for Minority-Carrier Lifetime in Bulk Germanium and Silicon by Measurement of Photoconductivity Decey*, ASTM, US 1997. s. 18-25
- [7] J. HLÁVKA, L. BOČÁNEK. *Praktikum z fyziky pevných látek*. Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1990. s. 44-55
- [8] J. HLÁVKA. *Základy fyziky povrchů pevných látek*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1988. 114 s.
- [9] P. PÁNEK. *Úvod do fyzikálních měření*. Vydavatelství MU, Brno 2001. 96 s.
- [10] D. K. SCHRODER. *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley & Sons, Inc. 1998. s. 420-503
- [11] S. M. SZE. *Semiconductor devices, Physics and Technology*. AT&T Bell Laboratories, John Wiley & Sons, Inc. 1985. s. 44-48