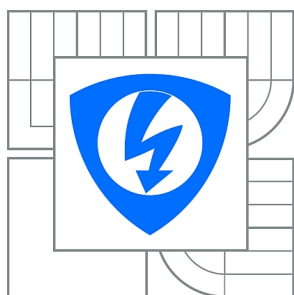


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

DIAGNOSTIKA VLASTNOSTÍ POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLŮ

DIAGNOSTICS OF SEMICONDUCTORS PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

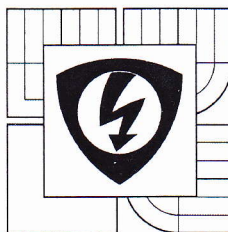
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LADISLAV ŠELIGA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Ladislav Šeliga

Ročník: 3

ID: 125654

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Diagnostika vlastností polovodičových materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte přehled polovodičových materiálů a popište jejich fyzikální vlastnosti. Prostudujte možné měřicí metody používané v diagnostice vlastností polovodičových materiálů.

Navrhněte a realizujte pracoviště pro sledování vybraných veličin charakterizujících chování polovodičových materiálů, vystavených účinkům napětí a teploty. Jeho funkci ověřte na vybraném vzorku polovodičového materiálu a získané výsledky matematicky interpretujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá popisem základních vlastností polovodičových materiálů a metodami měření vlastností polovodiče. V první části práce jsou rozebrány elementární polovodiče, polovodičové sloučeniny a pásová struktura. V další části je popsáno vedení proudu v polovodičích, metody měření rezistivity. Práce je zaměřena na měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje pomocí metody Haynes-Shockley pro křemíkový vzorek polovodiče, vytvoření automatizovaného pracoviště ve vývojovém prostředí VEE Pro a měření rezistivity křemíkových vzorků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polovodič, měřicí metody, pohyblivost, metoda Haynes-Shockley, konduktivita

ABSTRACT

This thesis describes the basic properties of semiconductor materials and methods of their measuring. In the first part of this work are discussed elemental semiconductors, semiconductor compounds and the band structure. The next section describes current conduction in semiconductors, methods for measuring resistivity. This work is focused on the measuring drift mobility of minority charge carriers using the Haynes-Shockley method for a sample of silicon semiconductor, the creation of automated workplace in the development environment VEE Pro and resistivity measurements of silicon samples.

KEYWORDS

Semiconductor, measurement methods, mobility, Haynes-Shockley method, conductivity

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Diagnostika vlastností polovodičových materiálů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	10
1 Polovodičové materiály	11
1.1 Typy vazeb v krystalu	11
1.2 Elementární polovodiče	12
1.3 Sloučeninové polovodiče	12
1.4 Pásová struktura polovodičů	13
1.4.1 Příměsový polovodič typu N	14
1.4.2 Příměsový polovodič typu P	15
1.5 Elektrony a díry v termodynamické rovnováze	16
2 Vedení proudu v polovodiči	17
2.1 Drift nosičů náboje	17
2.2 Difúze nosičů náboje	17
2.3 Rozptyl volných nosičů náboje	18
2.4 Teplotní závislost konduktivity	18
3 Metody měření rezistivity polovodiče	20
3.1 Přímá metoda	20
3.2 Měření dvouhrotovou sondou	20
3.3 Čtyřbodová metoda	21
3.4 Metoda Van der Pauwa	21
4 Měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů	23
5 Praktická část	25
5.1 Použité vybavení	25
5.2 Schéma zapojení pracoviště	26
5.3 Parametry pracoviště	26
5.4 Popis vyhodnocení naměřených dat	27
5.5 Agilent VEE Pro	27
5.6 Realizace programu ve VEE	28
5.7 Seznam příkazů pro ovládání měřicích přístrojů	30
5.8 Vyhodnocení výsledků	32
5.9 Měření teplotní závislosti rezistivity křemíkových vzorků	35
6 Závěr	38
Literatura	39

Seznam symbolů, veličin a zkratk	41
Seznam příloh	43
A Přehled vlastností polovodičů	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Mřížka kubická, plošně centrovaná diamantového typu [8]	12
1.2	Mřížka hexagonální prostorová wurtzitového typu [8]	13
1.3	Mřížka kubická, plošně centrovaná sfaleritového typu [18]	13
1.4	Redukovaný pásový model při teplotě 0 K	13
1.5	Schématické znázornění polovodiče typu N [10]	14
1.6	Redukovaný pásový model pro polovodič typu N	15
1.7	Schématické znázornění polovodiče typu P [10]	15
1.8	Redukovaný pásový model pro polovodič typu P	16
2.1	Teplotní závislost koncentrace nosičů, pohyblivosti a konduktivity	19
3.1	Měření dvouhrotovou sondou [14]	20
3.2	Měření čtyřbodovou sondou [20]	21
3.3	Měření metodou Van der Pauwa [14]	22
4.1	Uspořádání experimentu Haynes-Shockley pro měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje, převzato a upraveno z [6]	23
5.1	Schéma zapojení měřicího pracoviště	26
5.2	Teoretický průběh pulsu	27
5.3	Sestavený program ve vývojovém prostředí VEE	29
5.4	Význam jednotlivých parametrů pro přenos dat z osciloskopu [4]	31
5.5	Závislost driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje na intenzitě elek- trického pole pro vzdálenost hrotů $s = 3$ mm	32
5.6	Závislost driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje na intenzitě elek- trického pole pro vzdálenost hrotů $s = 4, 7$ mm	33
5.7	Závislost rezistivity na teplotě pro křemíkový vzorek č. 1	36
5.8	Závislost rezistivity na teplotě pro křemíkový vzorek č. 2	36
5.9	Pracoviště pro měření rezistivity polovodičových vzorků	37

SEZNAM TABULEK

5.1	Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzdálenost hrotů $s = 3$ mm	32
5.2	Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzdálenost hrotů $s = 4,7$ mm	33
5.3	Naměřené a vypočítané hodnoty	35
A.1	Vybrané fyzikální vlastnosti Si a Ge, parametry závisující na teplotě jsou udávány při 300 K [16]	44
A.2	Vybrané parametry polovodičových sloučenin, parametry závisující na tep- lotě jsou udávány při teplotě 300 K [16]	45

ÚVOD

Polovodičové materiály jsou specifickou skupinou látek, které se chovají za nízkých teplot jako izolanty, v oblasti vyšších teplot se chovají jako vodivé materiály. Rozmach polovodičů byl zahájen ve 40. letech 20. století a převrat v používání polovodičů nastal v roce 1948, kdy byl objeven první hrotový tranzistor.

Polovodičové materiály mají širokou oblast využití, neboť elektrickou vodivost lze reprodukovatelně ovlivňovat ve velkém rozsahu malým množstvím příměsí. Přitom nezáleží jakým způsobem se tyto příměsi zabudovaly do krystalické mřížky, ať už při epitaxním růstu, iontovou implementací nebo difúzní technikou. Průchodem elektrického proudu se nemění složení polovodiče, nedochází tak dlouhodobým provozem k degradaci polovodičového materiálu.

K nejpoužívanějším polovodičům při výrobě elektronických součástek patří arzenid galia, germanium a křemík. Právě posledně jmenovaný křemík se stal základním prvkem při výrobě integrovaných obvodů pro své optimální vlastnosti, jednoduchou strukturu a dostupnost.

Práce je věnována popisu vlastností anorganických polovodičových materiálů s důrazem na křemík a metodami měření základních vlastností polovodičů. Praktická část práce je věnována návrhu měřicího pracoviště pro určení driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje v prostředí VEE a sestavení pracoviště pro měření teplotní závislosti rezistivity polovodičových vzorků.

1 POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY

Polovodiče jsou materiály, které se vyznačují elektronovou nebo děrovou vodivostí, a jejich konduktivita s rostoucí teplotou ve většině teplotního rozsahu roste. Polovodič se v blízkosti absolutní nuly (0 K) chová jako izolant, při zvyšování teploty dochází k předávání energie elektronům a dochází k přeskoku elektronu do vodivostního pásu, tj. polovodič se stává vodivým.

Polovodiče se ve většině případů vyznačují následujícími vlastnostmi [7]:

- Úroveň elektrické vodivosti dosahuje vyšších hodnot než u izolantů a menších hodnot než u kovů.
- Elektrická vodivost je značně závislá na teplotě a zvyšuje se obvykle exponenciálně. Existuje však teplotní oblast, kde tento předpoklad neplatí (příměsový polovodič se při pokojové teplotě nachází v oblasti plné ionizace příměsí, vodivost závisí pouze na tepelné závislosti pohyblivosti).
- Elektrická vodivost je způsobována současnou přítomností kladných i záporných volných nosičů elektrického náboje.
- Fyzikální veličiny jako vodivost, pohyblivost a doba života nosičů elektrického náboje závisí na koncentraci příměsových atomů a mřížkových defektů.
- Působením elektromagnetického záření vhodné vlnové délky vzniká vnitřní fotoelektrický jev.
- Fázové hranice (PN přechod) vyvolávají nelineární voltampérovou charakteristiku.
- Vnější síly (teplota, tlak, elektrické a magnetické pole) ovlivňují elektrické parametry polovodiče.

1.1 Typy vazeb v krystalu

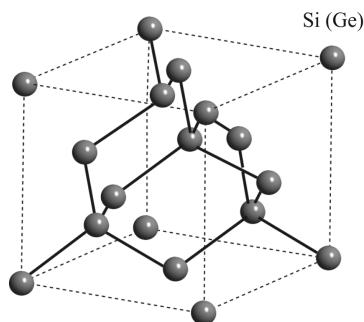
Krystalografická soustava, ve které daný polovodič vytváří krystaly, je dána důsledkem rovnováhy mezi přitažlivými a odpudivými silami, které mezi atomy či molekulami působí, a vzniká tak energeticky stabilní konfigurace. Ze znalosti elektrostatického působení mezi vazebními elektrony a kladnými ionty rozeznáváme 4 druhy vazeb [19]:

1. Iontová vazba – vyskytuje se u binárních sloučenin, ve kterých je stejný počet kladných a záporných iontů. Tyto ionty se v krystalové mřížce pravidelně střídají. Přitažlivé síly převládají (působení mezi kladnými a zápornými ionty) nad odpudivými silami mezi ionty stejného druhu. Vedení proudu za působení vnějšího elektrického pole je vázáno na přenos hmoty, mluvíme o iontové vodivosti.
2. Kovová vazba – atomy kovu tvoří mřížku kladně nabitých iontů, valenční elektrony nejsou nijak vázané a tvoří elektronový plyn, který kompenzuje kladný náboj iontů. Existence volných elektronů vysvětluje výbornou elektrickou vodivost.

3. Kovalentní vazba – valenční elektrony jsou vzájemně sdíleny mezi sousedními atomy. Nejedná se ovšem o tvoření iontů, neboť atomy zůstávají elektricky neutrální. K čisté kovalentní vazbě může dojít jen tehdy, pokud mají atomy stejnou elektronegativitu.
4. Van der Waalsová vazba – podstatou je vzájemné působení molekulových dipólů permanentních nebo indukovaných. Energie vazeb je 100krát slabší než u vazeb kovalentních [13].

1.2 Elementární polovodiče

Elementární skupinu polovodičů tvoří materiály ze čtvrté skupiny periodické tabulky prvků. Tyto prvky mají čtyři valenční elektrony, jednotlivé atomy jsou v mřížce vázány kovalentní vazbou a krystalizují v kubické, plošně centrované mřížce diamantového typu [11]. Nejvýznamnější představitelé jsou křemík a germanium, jejich základní fyzikální vlastnosti jsou shrnuty do Tab. A.1 v příloze A. Pokud krystal obsahuje pouze atomy daného prvku, jedná se o vlastní (intrinzičtý) polovodič, jestliže jsou v krystalu přítomny atomy s jiným počtem valenčních elektronů, jedná se o příměsový polovodič. Tyto příměsi významně ovlivňují míru elektrické vodivosti polovodiče a používají se především atomy z III. a V. skupiny periodické soustavy prvků.

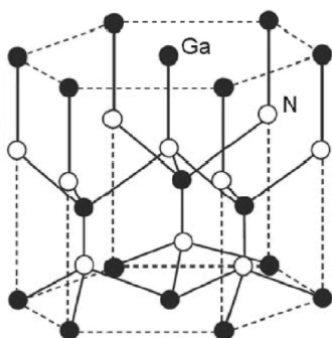


Obr. 1.1: Mřížka kubická, plošně centrovaná diamantového typu [8]

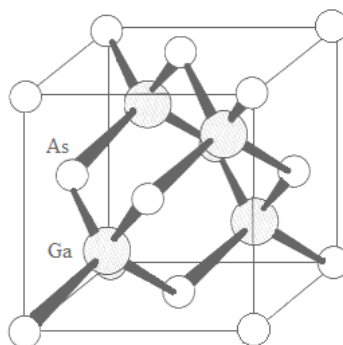
1.3 Sloučeninové polovodiče

Sloučeninové polovodiče jsou sloučeniny obecným vzorcem $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ a $A^I B^{VII}$, kde čísla označují skupinu v periodické tabulce prvků. Tato skupina polovodičů nejčastěji krystalizuje v mřížce kubické plošně centrované, sfaleritového typu (Obr. 1.3) nebo v mřížce hexagonální prostorové wurtzitového typu (Obr. 1.2). Jelikož počet valenčních elektronů jednotlivých atomů je různý, nejsou valenční elektrony přesně symetricky uspořádány a vzniká nevykompenzovaný kladný náboj, který zavádí iontovou vazbu. Podíl iontové vazby se zvyšuje u sloučenin, které mají velký rozdíl v počtu valenčních elektronů ($A^I B^{VII}$) [7]. Nejznámějším zástupcem sloučeninových polovodičů je GaAs, jehož základní fyzikální

vlastnosti jsou uvedeny v Tab. A.2 v příloze A. Polovodič GaN může krystalizovat v struktuře sfaleritové nebo wurtzitové, parametry pro wurtzitový typ krystalické struktury jsou uvedeny v Tab. A.2.



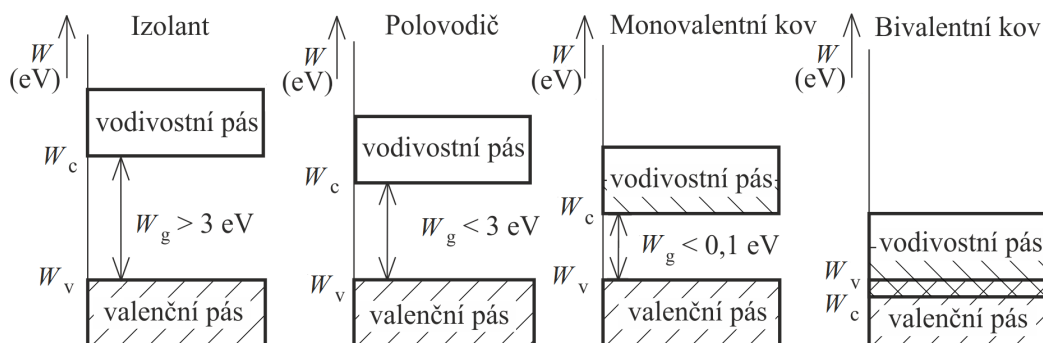
Obr. 1.2: Mřížka hexagonální prostorová wurtzitového typu [8]



Obr. 1.3: Mřížka kubická, plošně centrovaná sfaleritového typu [18]

1.4 Pásová struktura polovodičů

Izolovaný atom má čárový energetický model s diskrétními energetickými hladinami. Při přiblížení dvou atomů dochází ke štěpení energetických hladin, které byly původně v obou atomech na stejné úrovni. Při velkém počtu atomů v objemu krystalu je možno hovořit o spojitých energetických dovolených hladinách [15]. Většinou se používá redukovaný pásový model, kdy se jedná o znázornění vodivostního W_c , zakázaného W_g a valenčního pásu W_v .



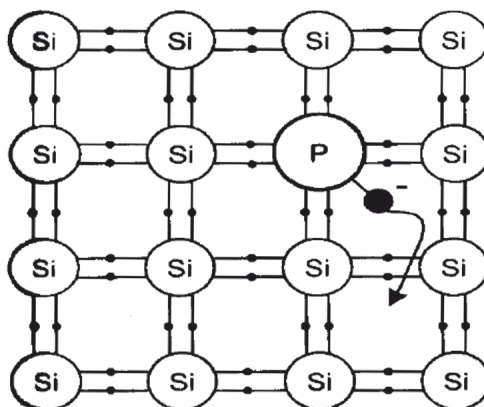
Obr. 1.4: Redukovaný pásový model při teplotě 0 K

Na Obr. 1.4 jsou znázorněny redukované pásové modely pro izolant, polovodič a kov. U izolantů je valenční pás obsazen, šířka zakázaného pásu je širší než 3 eV. Izolanty vedou elektrický proud jen velmi obtížně, protože široký zakázaný pás nedovoluje elektronům přímý přechod z valenčního do vodivostního pásu. U kovů mohou nastat dva případy. Buď je šířka zakázaného pásu velmi malá ($W_g \leq 0.1$ eV) a vodivostní pás není plně obsazen, nebo se plně obsazený valenční pás překrývá s pásem vodivostním. U polovodičových

materiálů je redukovaný pásový model shodný s izolanty, liší se šířkou zakázaného pásu ($W_g \leq 3$ eV). Při teplotě 0 K není vodivostní pás obsazen, při zvyšování teploty dochází k přeskoku elektronů do pásu vodivostního. Ve valenčním pásu vzniká nezaplněné místo, díra, která má stejně velký náboj, ale s opačnou polaritou jako elektron. Tento jev se nazývá generace elektrického nosiče a je spojena s dodáním energie. Opačný proces tj. neutralizace páru elektron-díra se nazývá rekombinace a při tomto procesu se energie uvolňuje. Uvedený princip vodivosti se nazývá vlastní vodivost a je vyvolána vnější energií (teplo, světlo).

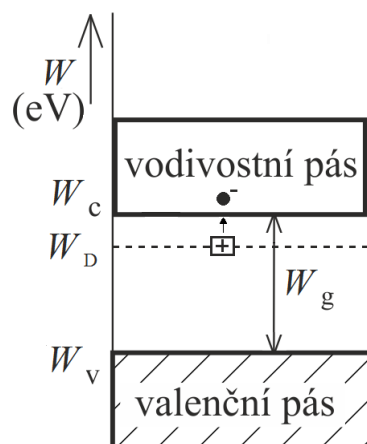
1.4.1 Příměsový polovodič typu N

U příměsového polovodiče jsou do krystalové mřížky zabudovány cizí atomy v substitučních polohách vlastního polovodiče (např. Si). U polovodiče typu N se jedná o příměsi z V. skupiny periodické tabulky prvků (P, As, Sb). Čtyři valenční elektrony tohoto prvku vytvoří vazby se sousedními atomy, pátý elektron je vázán jen velmi slabě. Pětimocné příměsi dodávají elektrony do vodivostního pásu, proto se nazývají donory. Schematické znázornění krystalické mřížky je na Obr. 1.5.



Obr. 1.5: Schématické znázornění polovodiče typu N [10]

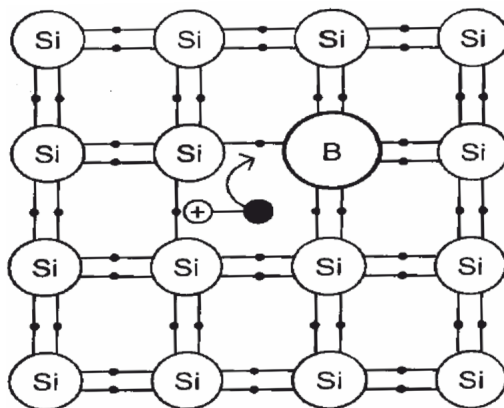
Při dodání energie (aktivační energie je obvykle 0,05 eV) se tento elektron uvolní a podílí se na vedení elektrického proudu. V pásovém diagramu vytvářejí příměsové atomy donorovou hladinu, která se nachází v blízkosti spodního konce vodivostního pásu. Po dodání aktivační energie dojde k přestupu elektronu do vodivostního pásu, ionizovaný příměsový atom má kladný náboj. Elektrony jsou většinovým nosičem elektrického náboje, jedná se o majoritní nosiče náboje. Příslušný redukovaný pásový model s donorovou hladinou je zobrazen na Obr. 1.6.



Obr. 1.6: Redukovaný pásový model pro polovodič typu N

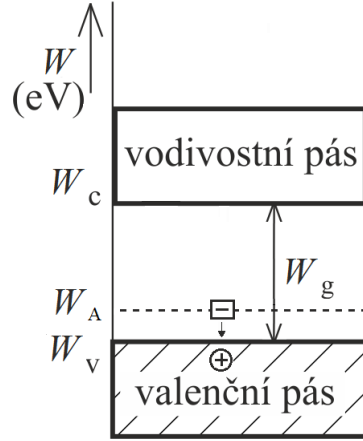
1.4.2 Příměsový polovodič typu P

U polovodiče typu P jsou atomy polovodiče nahrazeny atomy prvků z III. skupiny periodické tabulky prvků (B, Ga, In). Atomu příměsi chybí jeden valenční elektron k nasycení okolních vazeb s čtyřmi sousedními atomy. K nasycení vazby dojde přeskokem elektronu z okolních atomů, což způsobí vznik kladné díry. Kladné díry jsou většinovými nosiči elektrického náboje, proto se nazývají majoritními nosiči náboje. Schematické znázornění polovodiče typu P je zobrazeno na Obr. 1.7.



Obr. 1.7: Schématické znázornění polovodiče typu P [10]

Redukovaný pásový model s akceptorovou hladinou je zobrazen na Obr. 1.8. Akceptorová hladina se nachází poblíž horního konce valenčního pásu v zakázaném pásu. Při dodání energie (aktivační energie je obvykle 0,05 eV) dojde k přeskoku elektronu z valenčního pásu, čímž vznikne ve valenčním pásu volná díra a akceptor získá záporný náboj.



Obr. 1.8: Redukovaný pásový model pro polovodič typu P

1.5 Elektrony a díry v termodynamické rovnováze

S rostoucí teplotou získá malé množství vázaných elektronů v důsledku tepelných kmitů mřížky dostatečnou energii k tomu, aby došlo k přeskoku z valenčního do vodivostního pásu. Ve valenčním pásu zůstane po elektronu nezaplňené místo - díra. Při konstantní teplotě a v termodynamické rovnováze neustále probíhá generace G nosičů. Velikost generace není závislá na počtu uvolněných elektronů [7]. Rychlost generace nosičů náboje g ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) vyjadřuje koncentraci nosičů vzniklých za jednotku času, platí vztah $G = g$. Současně probíhá i děj opačný, rekombinace R . Tento děj je závislý na koncentraci volných elektronů n , na koncentraci volných děr p a na pravděpodobnosti rekombinace r [7]

$$R = n \cdot p \cdot r. \quad (1.1)$$

Rovnovážný stav je dosažen tehdy, pokud rekombinace kompenzuje generaci $G = R$, tedy platí [11]

$$g = n \cdot p \cdot r. \quad (1.2)$$

Po dosazení a úpravách lze napsat vztah

$$\frac{g}{r} = n \cdot p = n_i^2, \quad (1.3)$$

kde n_i je intrinzická koncentrace nosičů náboje, která závisí na teplotě a šířce zakázaného pásu polovodiče W_g .

2 VEDENÍ PROUDU V POLOVODIČI

Vedení proudu v polovodiči je zprostředkováno driftovým pohybem nosičů náboje a difúzí nosičů náboje.

2.1 Drift nosičů náboje

Bez přítomnosti vnějšího elektrického pole se elektrony a díry pohybují chaotickým pohybem díky tepelné energii předané mřížkou. Po přiložení vnějšího elektrického pole o intenzitě E se kladné díry pohybují ve směru účinků elektrického pole, záporné elektrony se pohybují proti směru pole. Uvedený pohyb nosičů elektrického náboje se nazývá driftový. Driftový pohyb není přímočarý, ale je superponován na tepelný pohyb nosičů náboje [11]. Střední hodnota rychlosti v elektrickém poli se nazývá driftová rychlost v_D , pro elektronovou driftovou rychlost lze napsat [12]

$$v_{Dn} = \mu_n \cdot E, \quad (2.1)$$

kde μ_n je pohyblivost elektronů a můžeme ji vyjádřit pomocí vztahu [12]

$$\mu_n = \frac{q \cdot \tau_n}{m_n^*}, \quad (2.2)$$

kde τ_n je střední doba mezi srážkami a m_n^* je efektivní hmotnost elektronů. Obdobně lze vyjádřit vztah pro pohyblivost děr [9]

$$\mu_p = \frac{q \cdot \tau_p}{m_p^*}, \quad (2.3)$$

kde τ_p je střední doba mezi srážkami a m_p^* je efektivní hmotnost děr. Vzhledem k různým efektivním hmotnostem děr a elektronů se podle konkrétního polovodiče liší i pohyblivost. Proudovou hustotu pro driftový pohyb nosičů náboje lze psát ve tvaru [11]

$$\mathbf{J}_{n, \text{drift}} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \mathbf{E}. \quad (2.4)$$

Obdobně lze vyjádřit vztah pro proudovou hustotu děr ve tvaru [11]

$$\mathbf{J}_{p, \text{drift}} = q \cdot \mu_p \cdot n \cdot \mathbf{E}. \quad (2.5)$$

2.2 Difúze nosičů náboje

Z makroskopického hlediska se jedná o migraci částic z oblasti s vysokou koncentrací do oblasti s nízkou koncentrací částic. Tento proces pokračuje tak dlouho, dokud se koncentrace částic v celém objemu nevyrovnejí. V případě elektronů a děr, které mají elektrický náboj, dochází k průchodu elektrického proudu. Difúzní tok lze vyjádřit pomocí I. Fickova zákona, pro difúzní složku proudové hustoty elektronů a děr platí [11]

$$\mathbf{J}_{n, \text{dif}} = q \cdot D_n \cdot \text{grad } n, \quad (2.6)$$

$$\mathbf{J}_{p, \text{dif}} = -q \cdot D_p \cdot \text{grad } p, \quad (2.7)$$

kde D_p , D_n jsou difúzní koeficienty elektronů a děr. Celkový proud polovodičem je součtem driftového a difúzního proudu, tedy součtem rovnic (2.4), (2.5), (2.6), (2.7)

$$\mathbf{J} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \mathbf{E} + q \cdot \mu_p \cdot n \cdot \mathbf{E} + q \cdot D_n \cdot \text{grad } n - q \cdot D_p \cdot \text{grad } p. \quad (2.8)$$

2.3 Rozptyl volných nosičů náboje

Velikost pohyblivosti je ovlivněna srážkami pohybujících se nosičů elektrického náboje s tepelnými kmity mřížky, s ionizovanými příměsemi, rozptyl na neionizovaných příměsích a poruchami krystalové mřížky.

1. Mřížkový rozptyl – jedná se o pružné srážky elektronů s fonony, které reprezentují tepelné kmity atomů v mřížce. Jedná se o izotropní typ rozptylu a uplatňuje se při vyšších teplotách. Pro teplotní závislost pohyblivosti při mřížkovém rozptylu platí vztah

$$\mu_L \approx T^{-\frac{3}{2}} \quad (2.9)$$

2. Rozptyl na ionizovaných příměsích – změna směru nosičů náboje je vyvolána silovým působením Coulombovského pole ionizované příměsi. Tento typ rozptylu je silně anizotropní a uplatňuje se v oblasti nízkých teplot. Teplotní závislost lze vyjádřit vztahem [7]

$$\mu_I \approx \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_I}, \quad (2.10)$$

kde n_I je koncentrace ionizovaných příměsí.

3. Rozptyl na neionizovaných příměsích a strukturálních poruchách – silová interakce mezi elektronem a neutrálním atomem či poruchou je velmi slabá a u běžných polovodičů zanedbatelná.
4. Jiné druhy rozptylů – u polovodivých sloučenin se projevují další typy rozptylu jako piezoelektrický rozptyl, slitinový rozptyl a rozptyl na tenkých vrstvách [7].

Výslednou pohyblivost získáme pomocí Matthiessenova pravidla [19]

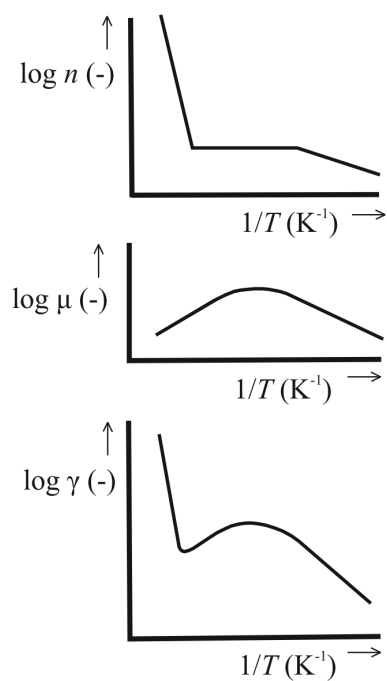
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}. \quad (2.11)$$

2.4 Teplotní závislost konduktivity

Na Obr. 2.1 je znázorněna teplotní závislost koncentrace volných nosičů n , jejich pohyblivosti μ a konduktivity γ .

Teplotní závislost konduktivity je dána jak teplotní závislostí koncentrace příměsí, tak i pohyblivostí. Při nízkých teplotách roste konduktivita vlivem zvyšování koncentrace volných nosičů náboje (ionizace příměsí). V této oblasti roste také pohyblivost nosičů.

V oblasti plné ionizace příměsí závisí vodivost na pouze na tepelné závislosti pohyblivosti, která v této části klesá vlivem rozptylu na tepelných kmitech mřížky. Při dalším zvyšování teploty se projeví vlastní vodivost polovodiče.



Obr. 2.1: Teplotní závislost koncentrace nosičů, pohyblivosti a konduktivity

3 METODY MĚŘENÍ REZISTIVITY POLOVODIČE

Uvedená kapitola obsahuje popis základních metod používaných pro měření rezistivity polovodičových materiálů.

3.1 Přímá metoda

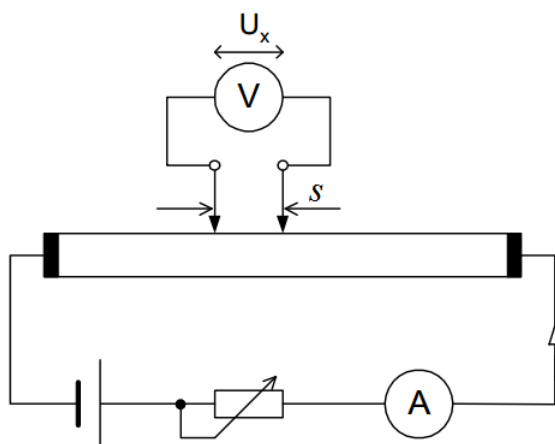
Pro nízké hodnoty intenzity elektrického pole a malou proudovou hustotu platí Ohmův zákon uvnitř homogenního polovodiče. Měřený vzorek je v sérii s ampérmetrem připojen ke zdroji stejnosměrného napětí. Tato metoda je použitelná jen u vzorků, které mají jednoduchý tvar a jasně definované rozměry [14]. Rezistivitu lze vypočítat ze změřeného odporu a rozměrů vzorku. Kontakty představují přídatný odpor, který se započítává do měřeného odporu.

3.2 Měření dvouhrotovou sondou

Vzorek s konstantním průřezem je zapojen do obvodu pomocí dvou odporových proudových kontaktů. Dva hrotové kontakty ve formě břitů se přitlačí k povrchu polovodiče ve vzdálenost s . Při známém průřezu S , vzdálenosti hrotů s , procházejícím proudem I a napětím U_x mezi hroty se rezistivita vypočítá pomocí vztahu [14]

$$\rho = \frac{U_x}{I} \cdot \frac{S}{s}. \quad (3.1)$$

Schematické znázornění popsané metody je na Obr. 3.1.



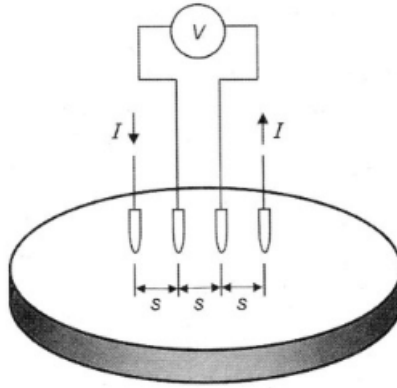
Obr. 3.1: Měření dvouhrotovou sondou [14]

3.3 Čtyřbodová metoda

Měří se obvykle na plochých vzorcích tloušťky w , přičemž proudové a napěťové kontakty jsou uspořádány do řady s konstantní vzdáleností s , nebo jsou hroty umístěny v rozích čtverce. Pro vzorky silnější tloušťky, tj. $w/s > 3$ a průměru $d > 10 \cdot s$ platí vztah [7]

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot \frac{U}{I} \quad (3.2)$$

Pokud vzorek nesplňuje uvedená kritéria, je nutné do výpočtu zahrnout korekční faktory. Schématické znázornění metody pro lineární uspořádání hrotu je na Obr. 3.2.



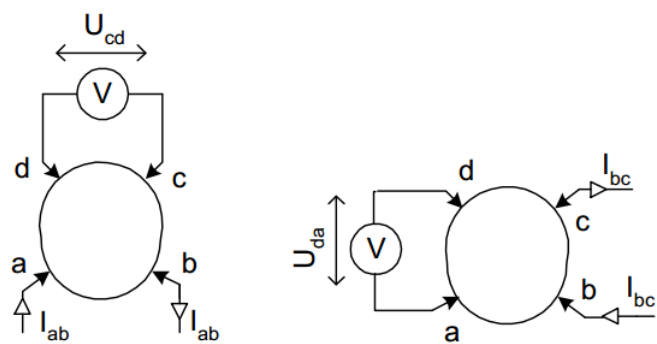
Obr. 3.2: Měření čtyřbodovou sondou [20]

3.4 Metoda Van der Pauwa

Tato metoda je vhodná pro ploché polovodičové vzorky s konstantní tloušťkou w a nepravidelného tvaru. Bodové kontakty jsou uspořádány s libovolnou vzdáleností po obvodu vzorku. Měření se skládá ze dvou kroků, jak je znázorněno na Obr. 3.3. V prvním kroku se změří odpor $R_1 = \frac{U_{cd}}{I_{bc}}$, v druhém kroku se změří odpor $R_2 = \frac{U_{da}}{I_{bc}}$ [14]. Výsledná rezistivita se vypočítá pomocí těchto údajů a tloušťky w pomocí vztahu [14]

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot F, \quad (3.3)$$

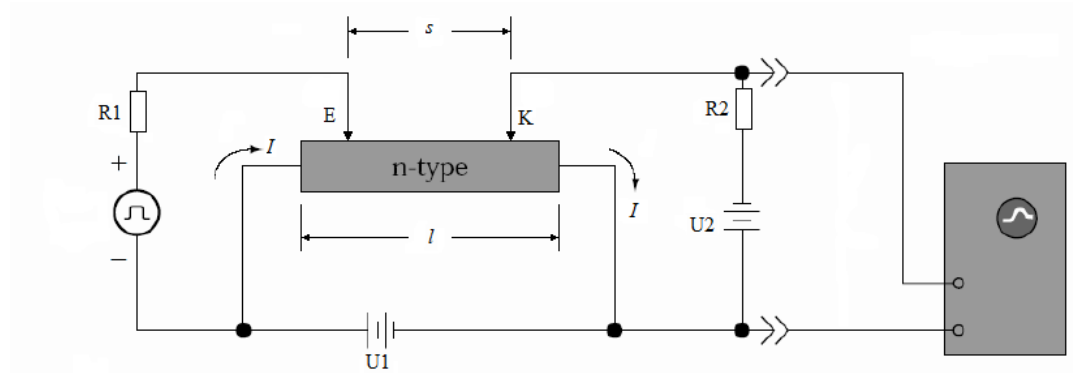
kde F je korekční faktor, který závisí na poměru $\frac{R_1}{R_2}$.



Obr. 3.3: Měření metodou Van der Pauwa [14]

4 MĚŘENÍ DRIFTOVÉ POHYBLIVOSTI MINORITNÍCH NOSIČŮ

Pro měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje se využívá metoda Haynes-Shockley [6], [7], [17], [20]. Ke generaci nadbytečných minoritních nosičů náboje se využívá optická generace páru elektron-díra přerušovaným světelným paprskem v malé oblasti polovodiče. Dalším způsobem generace nosičů náboje je injekce nosičů kovovým hrotem. Schematické uspořádání Haynes-Shockley experimentu pro měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje polovodičového vzorku N je zobrazeno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Uspořádání experimentu Haynes-Shockley pro měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje, převzato a upraveno z [6]

Polovodič typu N, který má oleptaný povrch z důvodu snížení povrchové rekombinace, má dva ohmické kontakty připájené na koncích vzorku. Těmito kontakty prochází stejnosměrný proud I , který vytvoří podél vzorku elektrické pole o intenzitě E . Na emitor je přiveden kladný impuls z generátoru. Ve vzdálenosti s se nachází druhý hrotový kontakt, který dostává záporné předpětí přes rezistor R_2 , vytvoří se hrotová dioda, která má pracovní bod v závěrné oblasti charakteristiky [7]. Proud procházející tímto kontaktem je způsoben minoritními nosiči náboje a obvykle je tento proud velmi malý.

Na emitor je přiveden pravoúhlý puls o šířce přibližně $1 \mu\text{s}$. Na obrazovce se objeví první impuls, který má srovnatelnou amplitudu a šířku jako impuls přivedený na emitor. Tento puls se pohybuje rychlostí srovnatelnou s rychlostí světla a tedy zanedbatelným zpožděním [17]. Po čase t_0 se objeví druhý impuls, který představuje odezvu na primární impuls a je přenesen minoritními nosiči náboje. Tento impuls je mnohem menší a deformovaný vlivem rekombinace a difúzních procesů. Driftová rychlost se získá jako [17]

$$v_D = \frac{s}{t_0}. \quad (4.1)$$

Pohyblivost minoritních nosičů se vypočítá pomocí [17]

$$\mu = \frac{v_D}{E}, \quad (4.2)$$

kde E se vypočítá podle vztahu

$$E = \frac{U}{l} = \frac{R \cdot I}{l} = \frac{\rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I}{l} = \frac{\rho \cdot I}{S}. \quad (4.3)$$

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části bylo sestavení pracoviště pro měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje metodou Haynes-Shockley, vytvoření měřicího pracoviště v prostředí Agilent VEE Pro a sestavení pracoviště pro měření teplotní závislosti rezistivity polovodičových vzorků.

5.1 Použité vybavení

Osciloskop, generátor a multimetr jsou vybaveny rozhraním LAN, které umožňuje připojení k počítačové síti. Tímto rozhraním se lze připojit k měřicím přístrojům pomocí vzdáleného přístupu, měřicí přístroje již nejsou propojeny pouze s jedním PC. Laboratorní zdroj je vybaven rozhraním GPIB, připojení do sítě LAN je realizováno pomocí externího LAN/GPIB rozhraní.

Osciloskop Agilent DSOX2012A 100MHz [5]

- šířka pásma 100 MHz
- 2 analogové kanály
- vzorkování 1 GSa/s pro všechny kanály, 2 GSa/s pro polovinu kanálů
- rozhraní LAN, USB a VGA

Generátor Agilent 33521A 30MHz Function/Arbitrary Waveform [1]

- kmitočtové pásmo 1 μ Hz až 30 MHz
- 1 analogový kanál
- generované funkce: sinus, obdélník, trojúhelník, impuls
- vzorkování 250 MS/s
- rozhraní LAN, USB a GPIB

Digitální multimetr Agilent 34410A [2]

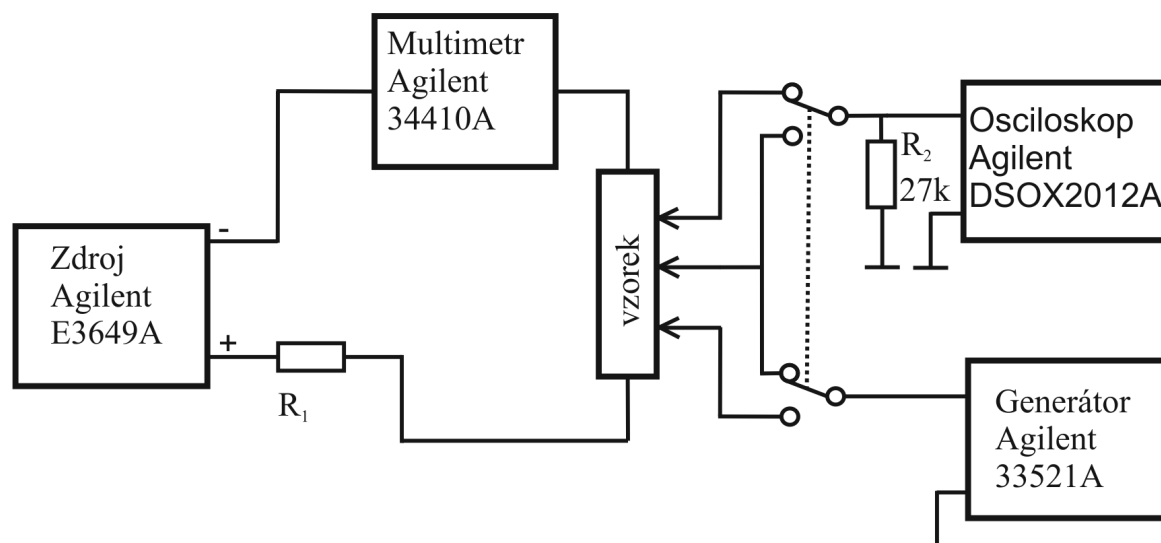
- 6 1/2 místní digitální display
- měření stejnosměrného I , U , střídavého I , U , odporu, frekvence, periody
- interní paměť pro 512 měření
- rychlost čtení přes 1000 čtení/s
- rozhraní LAN, USB a GPIB

Laboratorní zdroj Agilent E3649A [3]

- duální napájecí zdroj
- rozsah výstupního napětí 0 – 35 V
- rozsah výstupního proudu 0 – 1,4 A
- rozhraní GPIB

5.2 Schéma zapojení pracoviště

Zapojení pracoviště vychází z metody Haynes-Shockley popsané v kapitole 4. Schéma zapojení pracoviště je uvedeno na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Schéma zapojení měřicího pracoviště

Rezistor R_1 slouží jako ochranný odpor, který má omezit proud protékající vzorkem na bezpečnou mez. Velikost procházející proudu vzorkem indikuje ampérmetr zapojený do série s měřeným vzorkem polovodiče. Pracoviště obsahuje přepínač, který umožňuje změnu pracovních hrotů, a tím i změnu vzájemné vzdálenosti hrotů.

5.3 Parametry pracoviště

Sestavené pracoviště pro měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů má následující parametry:

Stejnoseměrný proud procházející vzorkem $I = (10 - 15) \text{ mA}$,

průřez vzorku $S = (1,5 \cdot 5) \text{ mm}^2$,

rezistivita vzorku polovodiče $\rho = 0,464 \Omega \cdot \text{m}$,

napájecí napětí $U_n = 17 \text{ V}$.

Puls přiložený na emitor má tyto parametry:

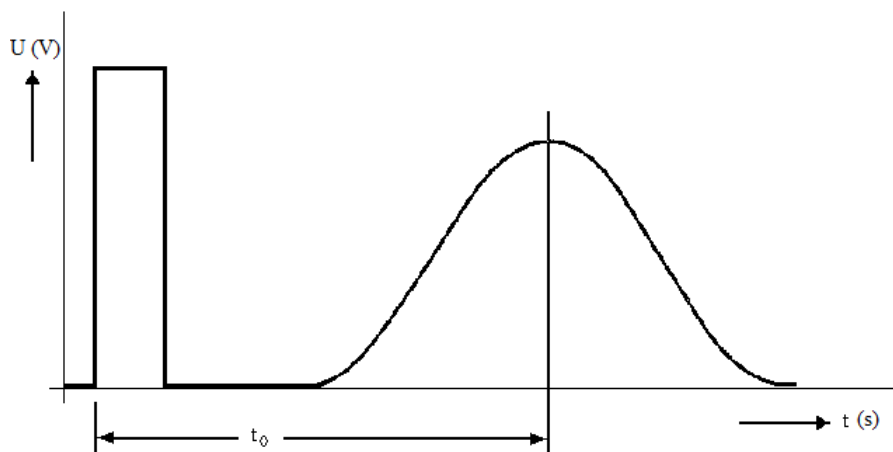
Šířka pulsu $t_p = 10 \mu\text{s}$,

frekvence $f = 10 \text{ kHz}$,

amplituda $U = 14,5 \text{ V}$.

5.4 Popis vyhodnocení naměřených dat

Pokud je na emitor přiveden pravoúhlý puls a výstup z kolektoru je přiveden na vstup osciloskopu, na obrazovce se objeví obraz pravoúhlého pulsu se zpožděním daným rychlostí světla. Po době t_0 se objeví druhý puls přenesený minoritními nosiči. Ideální případ je zobrazen na Obr. 5.2. Jako časový úsek t_0 se bere čas od začátku injekce nosičů náboje do doby maxima na druhém pulsu.



Obr. 5.2: Teoretický průběh pulsu

Ze znalosti doby t_0 , vzájemné vzdálenosti hrotů a proudu procházejícího vzorkem se pohyblivost vypočítá dle vztahů (4.1), (4.2), (4.3).

5.5 Agilent VEE Pro

Program VEE (Visual Engineering Environment) je grafické prostředí od společnosti Agilent, které umožňuje programování měřicích, testovacích, řídicích systémů a vytváření automatizovaných měřicích pracovišť. Připojení měřicích přístrojů je realizováno přes různá rozhraní, nejpoužívanější jsou LAN, USB, GPIB. Program, který uživatel vytvoří, je sestavován pomocí bloků, které se propojují podle časové posloupnosti jednotlivých bloků. Jedna skupina bloků, které jsou pro uživatele přístupné, představují měřicí přístroje, kde uživatel zadává jednotlivé příkazy, které se mají vykonat. Druhá skupina bloků představuje matematické prostředí, které mohou realizovat nejrůznější matematické operace a výpočty. Další skupina bloků umožňuje realizovat logické operace, podmínky a cykly. VEE od verze 6.0 obsahuje doplněk „MATLAB Script“ od společnosti MathWorks zahrnující funkce, které umožňují numerické výpočty, práci s grafikou, zpracování signálu, maticové výpočty a mnoho dalších operací. Program dále podporuje komunikaci s aplikacemi firmy Microsoft jako je Excel pro export naměřených dat.

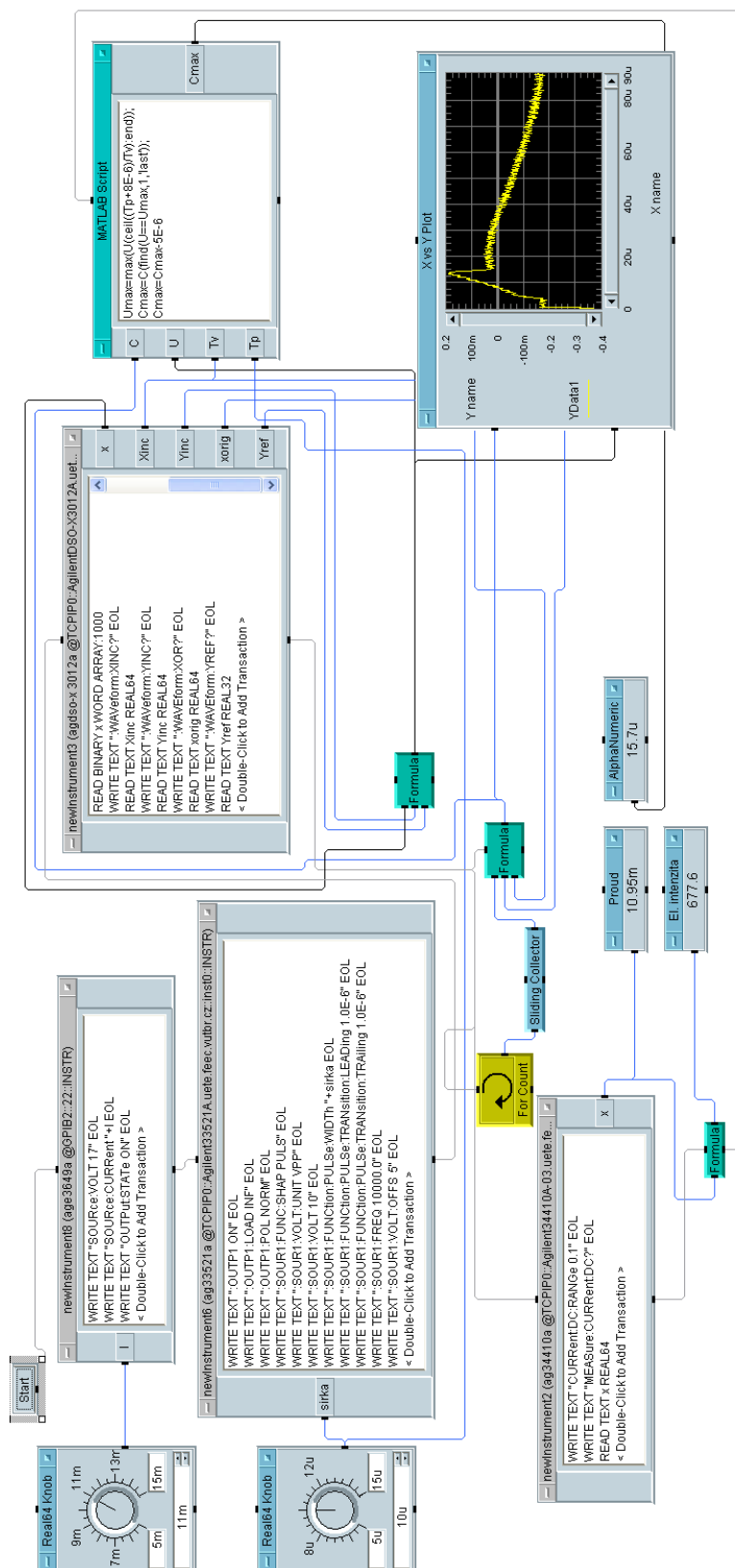
5.6 Realizace programu ve VEE

Program byl vytvořen v prostředí Agilent VEE Pro 9.0, který byl v laboratoři k dispozici. Sestavený program je zobrazen na Obr. 5.3. Po spuštění programu tlačítkem *Start* následuje blok pro nastavení požadovaných parametrů napájecího zdroje. Význam jednotlivých příkazů pro použité měřicí přístroje je uveden v kapitole 5.7. Velikost proudu, při kterém dochází k proudovému omezení, je volitelná v rozmezí $I = (5 - 15)$ mA. Tímto způsobem lze měnit proud procházející obvodem a také velikost elektrické intenzity podél měřeného vzorku. Následuje blok pro nastavení parametrů generátoru, který je nastaven v režimu generování impulsního průběhu. Šířka pulsu je nastavitelná v rozsahu $t_p = (5 - 15)$ μ s. Dalším krokem v programu je nastavení a sběr dat z osciloskopu. Tento blok nastaví osciloskop do jednokanálového režimu a definuje horizontální a vertikální citlivost. Následují příkazy pro přenos dat zobrazovaného průběhu. Formát přenášených dat podává informaci o velikosti napětí v daném bodě, ale časový údaj již data neobsahují. Časový údaj se určí podle pořadí vzorku dat a časovou vzdáleností dvou vedlejších vzorků.

Z tohoto důvodu obsahuje program cyklus, který se opakuje 1000krát a výstupem je číslo prováděného cyklu. Data z cyklu jsou spojena do jednorozměrného pole pomocí *Sliding collector*. Poloha bodu na časové ose se vypočítá jako násobek čísla vzorku a časové vzdálenosti dvou bodů pomocí matematického prvku *Formula*. Obdobným způsobem se vypočítá hodnota napětí daného bodu jako součin napětového kroku a informace o hodnotě bodu. Vytvořená pole hodnot, reprezentující čas a hodnotu napětí, jsou přivedeny na prvek *X vs Y Plot*, pomocí kterého se vykreslí průběh zobrazený na osciloskopu.

Dalším krokem je sada příkazů pro digitální multimetr, který je nastaven do režimu měření proudu s rozsahem 0,1 A. Aktuální hodnota proudu je zobrazena pomocí prvku *AlfaNumeric*. Ze známých rozměrů vzorku, rezistivity a procházejícího proudu je také vypočítána velikost intenzity elektrického pole podle vztahu (4.3), která je rovněž zobrazena.

Pro určení časové vzdálenosti maxima na sekundárním pulsu a začátkem primárního pulsu je využit blok *MATLAB Script*. Funkce *Max* hledá maximální napětovou hodnotu průběhu, která se nachází za primárním pulsem (funkce pracuje s pořadovým číslem vzorku, nikoliv s časem). Začátek oblasti, kde probíhá hledání, je určeno šířkou pulsu, časovým posunutím na osciloskopu a je připočítána také doba náběžné a sestupné hrany. Funkce *Find* přiřadí pořadovému číslu vzorku s maximální napětovou úrovní jeho časový údaj. Hledaná doba t_0 se získá odečtením časového posunutí zobrazeného průběhu na osciloskopu od doby získané pomocí funkce *Find*.



Obr. 5.3: Sestavený program ve vývojovém prostředí VEE

5.7 Seznam příkazů pro ovládání měřicích přístrojů

Uvedená kapitola obsahuje popis jednotlivých příkazů pro použité měřicí přístroje, které jsou využity v sestaveném programu v prostředí VEE Pro.

Příkazy pro laboratorní zdroj E3649A:

SOUR:VOLT 17 výstupní napětí zdroje je nastaveno na hodnotu 17 V,
SOUR:CURREN +I nastavení maximálního výstupního proudu zdroje na hodnotu
uloženou v proměnné *I*,
SOUR:OUT:STAT ON výstup zdroje je připojen k výstupním svorkám.

Příkazy pro digitální multimetr 34410A:

CURR:DC:RANG 0.1 nastavení proudového rozsahu 0,1 A,
MEAS:CURREN:DC? dotaz vrátí hodnotu měřeného proudu.

Příkazy pro generátor 33521A:

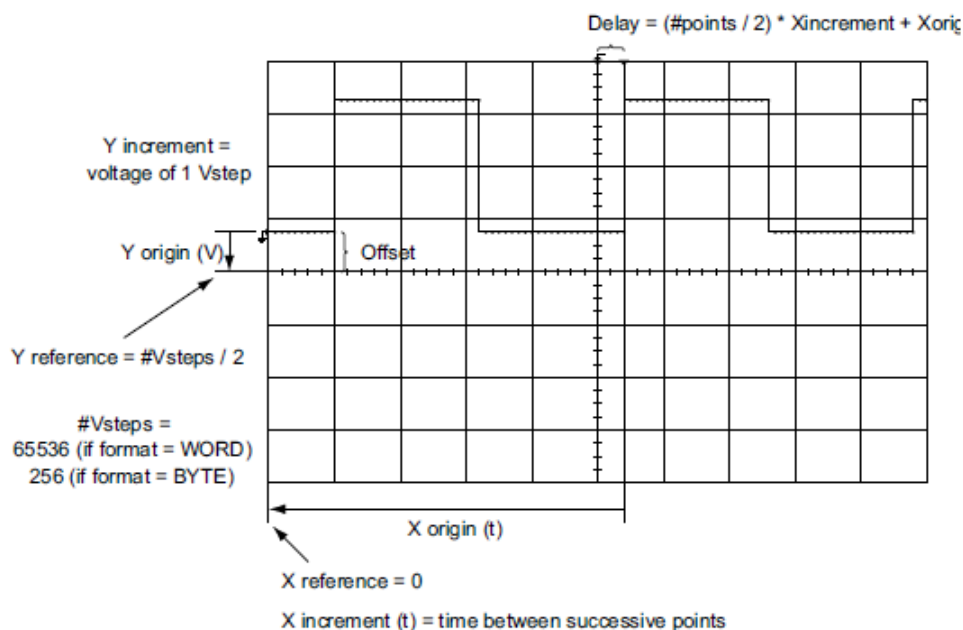
OUTP1 ON připojení výstupu generátoru ke konektoru na předním
panelu,
OUTP1:LOAD INF nastavení výstupní impedance na hodnotu nekonečno,
OUTP1:POL NORMAL neinvertovaný výstupní signál,
SOUR1:FUNC:SHAP PULS určuje tvar výstupního signálu, v tomto případě se jedná
o pulsní průběh,
SOUR1:VOLT:UNIT VPP velikost amplitudy je zadávána v jednotkách *Vpp*,
SOUR1:VOLT 10 amplituda pulsu je 10 V,
PULS:WIDT +sirka šířka pulsu výstupního signálu je určena hodnotou ulo-
ženou v proměnné *sirka*,
PULS:TRAN:LEAD 1.0E-6 doba náběžné hrany je 1 μ s,
PULS:TRAN:TRA 1.0E-6 doba sestupné hrany je 1 μ s,
SOUR1:FREQ 10000 frekvence generovaného průběhu je 10 kHz,
SOUR1:VOLT:OFFS 5 stejnosměrné posunutí signálu je 5 V.

Příkazy pro osciloskop DSOX2012A:

CHA1:OFFS 0,45 stejnosměrné posunutí zobrazovaného průběhu je 0,45 V,
CHA1:SCAL 100 mV nastavení vertikální citlivosti na 100mV/dílek,
TIM:SCAL 9u nastavení horizontální citlivosti na 9 μ s/dílek,
TIM:DEL 35u časové posunutí zobrazovaného signálu je 35 μ s,
WAV:SOUR CHAN1 sběr dat se provádí na kanálu 1,
WAV:POIN 1000 počet bodů pro přenos dat je nastaven na hodnotu 1000,
WAV:FORMAT WORD formát přenášených dat je typu WORD,

WAV:DATA?	dotaz vrátí pole bodů, které představují přenášený průběh,
WAV:XINC?	dotaz vrátí časový přírůstek v ose x, tato hodnota je rovna časovému rozdílu dvou po sobě následujících datových bodů,
WAV:YINC?	dotaz vrátí hodnotu napětí pro napěťový krok mezi dvěma napěťovými úrovněmi,
WAV:YREF?	dotaz vrátí hodnotu na ose y, která představuje polovinu zvoleného rozsahu.

Na Obr. 5.4 je zobrazen význam jednotlivých parametrů pro přenos dat z osciloskopu, které určují vlastnosti průběhu.



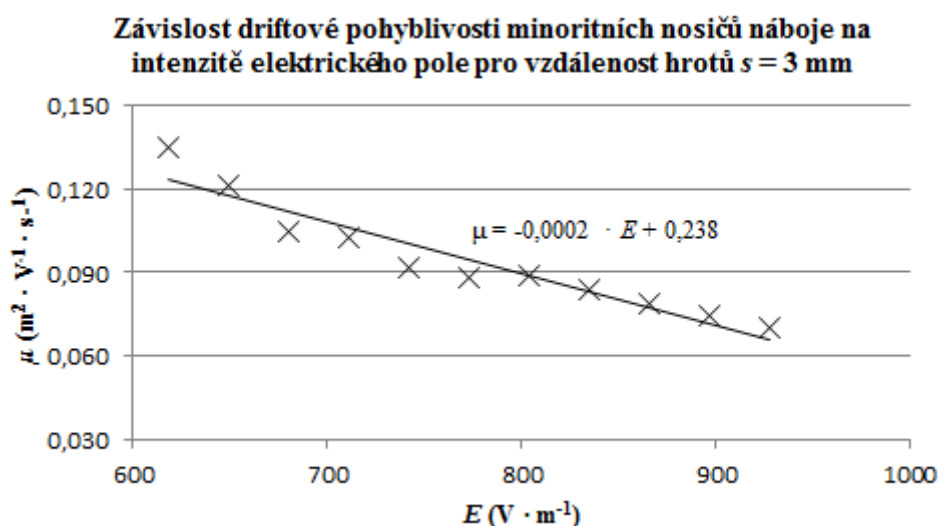
Obr. 5.4: Význam jednotlivých parametrů pro přenos dat z osciloskopu [4]

5.8 Vyhodnocení výsledků

Měření probíhalo ve vzájemné vzdálenosti hrotů 3 mm a 4,7 mm, stejnosměrný proud protékající vzorkem se pohyboval v rozmezí (10 – 15) mA. Časová vzdálenost t_0 je přímo odečtena z vytvořeného programu. Naměřené a vypočítané hodnoty pro různé vzdálenosti hrotů jsou uvedeny v Tab. 5.1 a Tab. 5.2.

Tab. 5.1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzdálenost hrotů $s = 3$ mm

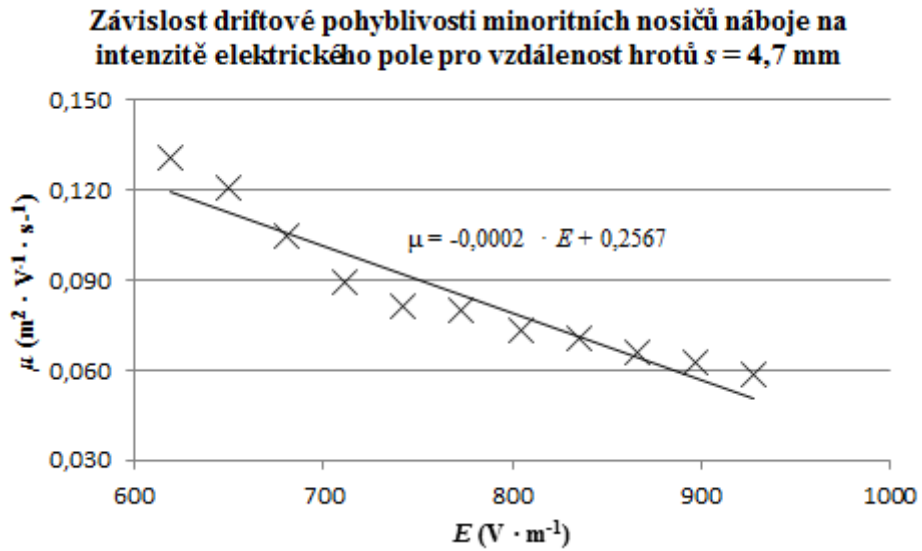
I (mA)	t_0 (μ s)	E ($V \cdot m^{-1}$)	v_D ($m \cdot s^{-1}$)	μ ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)
10	36	618,667	83,333	0,135
10,5	38	649,600	78,947	0,122
11	42	680,533	71,429	0,105
11,5	41	711,467	73,171	0,103
12	44	742,400	68,182	0,092
12,5	44	773,333	68,182	0,088
13	42	804,267	71,429	0,089
13,5	43	835,200	69,767	0,084
14	44	866,133	68,182	0,079
14,5	45	897,067	66,667	0,074
15	46	928,000	65,217	0,070



Obr. 5.5: Závislost driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje na intenzitě elektrického pole pro vzdálenost hrotů $s = 3$ mm

Tab. 5.2: Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzdálenost hrotů $s = 4,7$ mm

I (mA)	t_0 (μ s)	E ($V \cdot m^{-1}$)	v_D ($m \cdot s^{-1}$)	μ ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)
10	58	618,667	81,034	0,131
10,5	60	649,600	78,333	0,121
11	66	680,533	71,212	0,105
11,5	74	711,467	63,514	0,089
12	78	742,400	60,256	0,081
12,5	76	773,333	61,842	0,080
13	80	804,267	58,750	0,073
13,5	80	735,200	58,750	0,070
14	82	866,133	57,317	0,066
14,5	84	897,067	55,952	0,062
15	86	928,000	54,651	0,059



Obr. 5.6: Závislost driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje na intenzitě elektrického pole pro vzdálenost hrotů $s = 4,7$ mm

Velikost elektrické intenzity se vypočítá ze známé rezistivity a rozměrů vzorku podle vztahu (4.3)

$$E = \frac{\rho \cdot I}{S} = \frac{0,464 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{7,5 \cdot 10^{-6}} = 618,667 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}, \quad (5.1)$$

driftová rychlost minoritních nosičů se určí ze vzájemné vzdálenosti hrotů a časové vzdálenosti t_0 pomocí rovnice (4.1)

$$v_D = \frac{s}{t_0} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-6}} = 83,333 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (5.2)$$

Pohyblivost minoritních nosičů se určí podle vztahu (4.2)

$$\mu = \frac{v_D}{E} = \frac{83,333}{618,667} = 0,133 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (5.3)$$

Na Obr. 5.5 a Obr. 5.6 jsou graficky znázorněny závislosti driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje na intenzitě elektrického pole pro různé vzdálenosti hrotů. Ve zkoumané velikosti elektrické intenzity 620 až 930 V · m⁻¹ se pohyblivost minoritních nosičů náboje lineárně snižuje s rostoucí hodnotou elektrické intenzity. Rovnice regrese pro závislost na Obr. 5.5 má tvar $\mu = -0,0002 \cdot E + 0,238$, rovnice regrese pro závislost zobrazenou na Obr. 5.6 má tvar $\mu = -0,0002 \cdot E + 0,2567$.

Při srovnání vypočítané pohyblivosti minoritních nosičů s hodnotami uvedenými v Tab. A.1 vychází, že se vypočítaná hodnota pohyblivosti blíží k hodnotě pro elektronovou pohyblivost, tudíž použitý křemíkový vzorek je typu P.

5.9 Měření teplotní závislosti rezistivity křemíkových vzorků

Měření probíhalo na dvou křemíkových vzorcích typu N ve tvaru kvádrů o rozměrech $1,5 \cdot 4,5 \cdot 16$ mm. Vzorky mají známé rozměry, z tohoto důvodu byla použita přímá metoda měření rezistivity. Měření probíhalo při konstantním proudu vzorkem $I = 500 \mu\text{A}$ a v teplotním rozsahu $26 - 110^\circ\text{C}$. Po každé změně teploty se musí nechat vzorky dostatečně prohřát, aby nedocházelo k chybám měření. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5.3.

Tab. 5.3: Naměřené a vypočítané hodnoty

Křemíkový vzorek č. 1				Křemíkový vzorek č. 2			
ϑ ($^\circ\text{C}$)	U_1 (mV)	R_1 (Ω)	ρ_1 ($\Omega \cdot \text{m}$)	ϑ ($^\circ\text{C}$)	U_2 (mV)	R_2 (Ω)	ρ_2 ($\Omega \cdot \text{m}$)
26	122	244	0,1029	26	119	238	0,1004
30	126,5	253	0,1067	30	121,5	243	0,1025
35	130	260	0,1097	35	127,5	255	0,1076
40	135	270	0,1139	40	131,5	263	0,1110
45	139	278	0,1173	45	136	272	0,1148
50	144,5	289	0,1219	50	141	282	0,1190
55	150,5	301	0,1270	55	145,5	291	0,1228
60	154	308	0,1299	60	151	302	0,1274
65	158,5	317	0,1337	65	150,5	311	0,1312
70	163,5	327	0,1380	70	161	322	0,1358
75	167,5	335	0,1413	75	165	330	0,1392
80	172,5	345	0,1455	80	171	342	0,1443
85	176,5	353	0,1489	85	176,5	353	0,1489
90	181,5	363	0,1531	90	180,5	361	0,1523
95	186,5	373	0,1574	95	186	372	0,1569
100	191	382	0,1612	100	191	382	0,1612
105	196,5	393	0,1658	105	195,5	391	0,1650
110	200,5	401	0,1692	110	201,5	403	0,1700

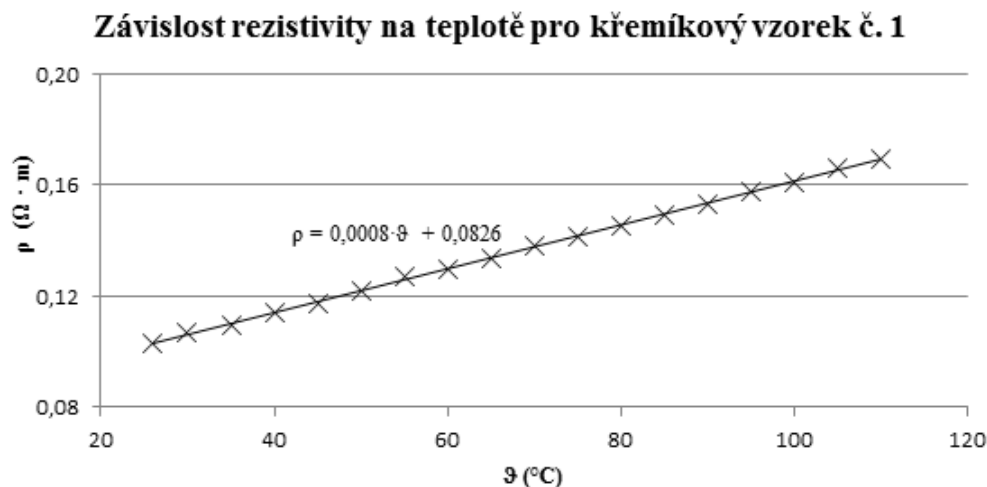
Elektrický odpor vzorku se vypočítá pomocí Ohmova zákona

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{122 \cdot 10^{-3}}{500 \cdot 10^{-6}} = 244 \Omega, \quad (5.4)$$

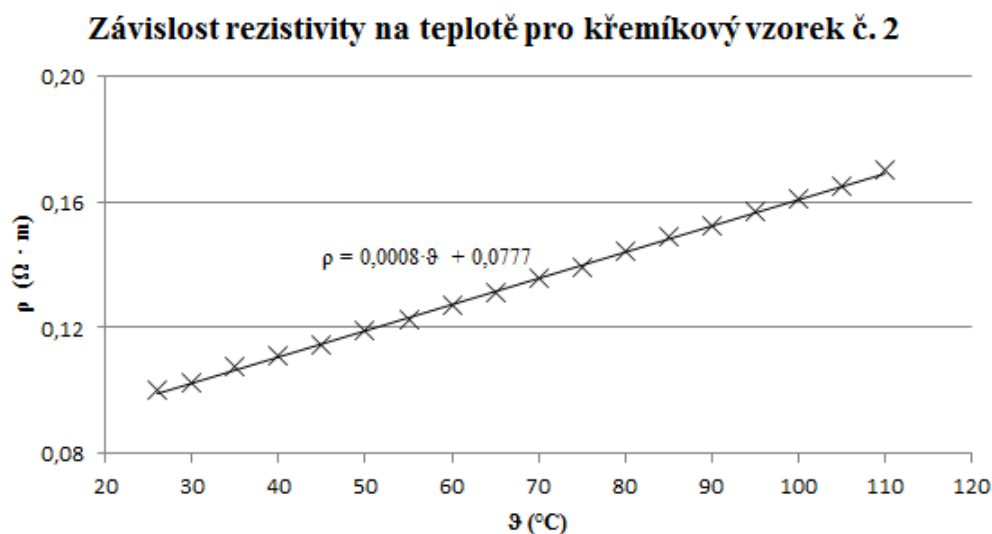
rezistivita se stanoví z vypočítaného elektrického odporu a z rozměrů vzorku

$$\rho_1 = R_1 \cdot \frac{w \cdot t}{l} = 244 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 10^{-3}} = 0,1029 \Omega \cdot \text{m}. \quad (5.5)$$

Na Obr. 5.7 a Obr. 5.8 jsou graficky znázorněny závislosti rezistivity měřených křemíkových vzorků na teplotě.

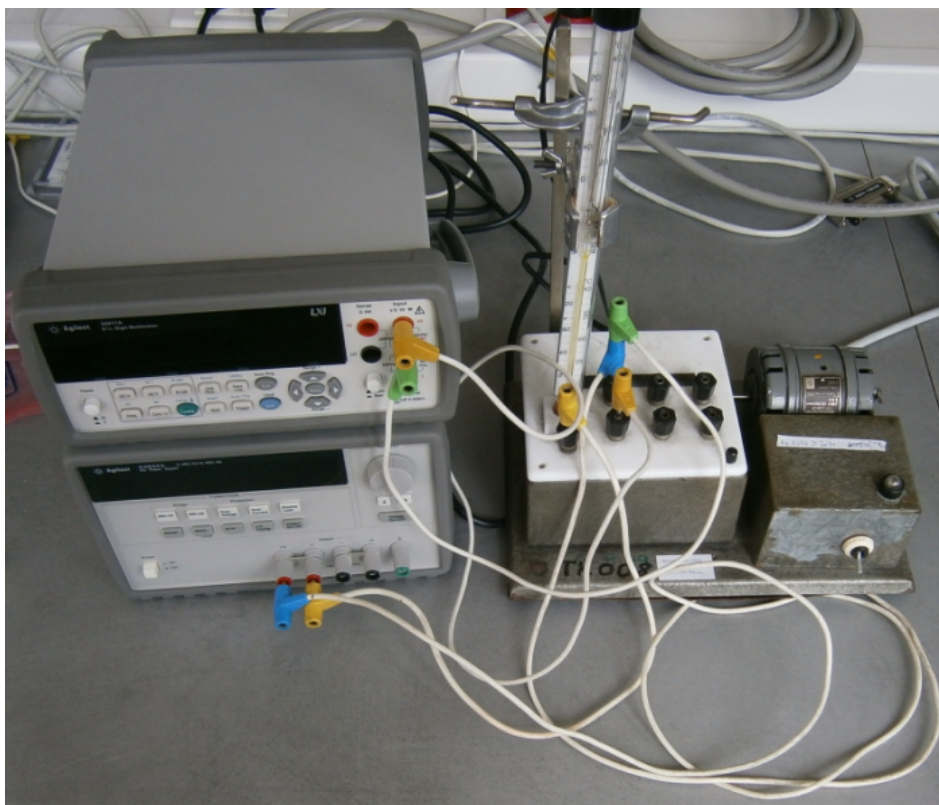


Obr. 5.7: Závislost rezistivity na teplotě pro křemíkový vzorek č. 1



Obr. 5.8: Závislost rezistivity na teplotě pro křemíkový vzorek č. 2

Rezistivita zkoumaných křemíkových vzorků se v měřeném teplotním rozsahu zvyšuje přímo úměrně s teplotou. Rovnice regrese pro vzorek č. 1 je $\rho = 0.0008 \cdot \vartheta + 0.0826$, pro vzorek č. 2 má rovnice regrese tvar $\rho = 0.0008 \cdot \vartheta + 0.0777$. Měřené vzorky nevlastního polovodiče typu N se ve zkoumaném teplotním rozsahu nacházejí v oblasti plné ionizace příměsí a uplatňuje se především mřížkový rozptyl nosičů elektrického náboje, kdy dochází k poklesu pohyblivosti volných nosičů náboje podle vztahu (2.9). Sestavené pracoviště pro měření rezistivity polovodičových vzorků je zobrazeno na Obr. 5.9.



Obr. 5.9: Pracoviště pro měření rezistivity polovodičových vzorků

6 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá popisem základních vlastností polovodičových materiálů. V teoretické části jsou popsány základní fyzikální mechanismy v polovodičích a popis měřicích metod využívaných v diagnostice polovodičových materiálů. Dále byl vypracován přehled fyzikálních vlastností vybraných zástupců elementárních a sloučeninových polovodičů.

V experimentální části bylo sestaveno pracoviště pro měření driftové pohyblivosti minoritních nosičů náboje pomocí metody Haynes-Schockley a pracoviště pro měření teplotní závislosti rezistivity polovodičových vzorků. Pracoviště pro měření pohyblivosti minoritních nosičů náboje je automatizováno pomocí prostředí Agilent VEE Pro. Ve vytvořeném programu lze měnit proud protékající vzorkem a šířku impulsu, získaná data jsou zpracovávána, vykreslena do grafu a je vypočítána doba t_0 , ze které se určí pohyblivost minoritních nosičů náboje. Funkce sestaveného pracoviště byla ověřena pro různé vzdálenosti hrotů, výsledky měření se nacházejí v Tab. 5.1 a Tab. 5.2. Z naměřených dat vyplývá, že pohyblivost minoritních nosičů náboje s rostoucí velikostí intenzity elektrického pole lineárně klesá.

V druhé části experimentální části bylo sestaveno pracoviště pro měření teplotní závislosti rezistivity polovodičových vzorků. Měření probíhalo na dvou křemíkových vzorcích příměsového polovodiče typu N. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5.3. V měřeném teplotním rozsahu se rezistivita vzorků s teplotou zvyšuje lineárně, v této oblasti teplot převládá mřížkový rozptyl nosičů náboje.

LITERATURA

- [1] Agilent 30 MHz Function/Arbitrary Waveform Generators Data Sheet. *Agilent Technologies* [online]. June 3, 2011 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z URL: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-5914EN.pdf>>.
- [2] Agilent 34410A/11A 6 1/2 Digit Multimeter User's Guide. *Agilent Technologies* [online]. March 2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z URL: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/34410-90001.pdf>>.
- [3] Agilent E3640A – E3649A Programmable DC Power Supplies Data Sheet. *Agilent Technologies* [online]. July 29, 2009 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z URL: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-7355EN.pdf>>.
- [4] Agilent InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes Programmer's Guide. *Agilent Technologies* [online]. © 2005-2012 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z URL: <http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/2000_series_prog_guide.pdf>.
- [5] Agilent InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes User's Guide. *Agilent Technologies* [online]. 4. vyd. © 2005-2012 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z URL: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/75015-97023.pdf>>.
- [6] *Birla Institute of Technology and Science* [online]. 2010 [cit. 2012-02-15]. Electronic devices and integrated circuits. Dostupné z URL: <[http://discovery.bits-pilani.ac.in/Homepage/faculty/eee/rajs/Lecture%20sessions/EDIC/Lecture%20slides/EDIC%20Lecture%2011\(260805\).pdf](http://discovery.bits-pilani.ac.in/Homepage/faculty/eee/rajs/Lecture%20sessions/EDIC/Lecture%20slides/EDIC%20Lecture%2011(260805).pdf)>.
- [7] FRANK, H. *Fyzika a technika polovodičů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 283 s. ISBN 80-030-0401-2.
- [8] HOFMANN, P. Physics figures. *Institut for Fysik of Astronomi* [online]. 2009 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z URL: <<http://users-physics.au.dk/philip/pictures/physicsfigures/physicsfigures.html>>.
- [9] HRZINA, P. Fyzika polovodičů - základy. *Komponenty výkonové elektrotechniky* [online]. ©2005 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z URL: <http://hrzinap.wz.cz/vyuka/X13KVE/vlastnosti_polovodicu.pdf>.
- [10] JANOUD, J. Technika elektrotechnických materiálů. *Pomocné texty předmětu ELEKTROTECHNOLOGIE* [online]. 2008 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z URL: <http://www.janoud.cz/sub/jcuele/12_Materialy.pdf>.
- [11] JIRÁK, J, et al. *Materiály a technická dokumentace* [online]. Brno, 2009 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=22761>.

- [12] JÜNGEL, A. Basic Semiconductor Physics. *Transport equations for semiconductors*. Berlin: Springer, ©2009, Volume 773, s. 1-42. ISSN 978-3-540-89525-1.
- [13] KLUČÁKOVÁ, M. Chemická vazba. *Fakulta chemická VUT v Brně* [online]. 2009 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z URL: <<http://www.fch.vutbr.cz/~klucakova/web5.doc>>.
- [14] KOBLÍŽEK, V. Vlastnosti polovodičového křemíku *Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze* [online]. 2003 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z URL: <http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_2.pdf>.
- [15] MUSIL, V. et al. *Elektronické součástky* 4. vyd. Brno: VUTIUM, 2005, 187 s. ISBN 80-214-2627-6.
- [16] *New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties* [online]. 2001 [cit. 2011-12-01]. Dostupné z URL: <<http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/>>.
- [17] SCONZA, A. a TORZO, G. A simple and instructive version of the Haynes- Shockley experiment. *European Journal of Physics*. Bristol: Institute of Physics, 1986, Volume 8, Number 1, s. 34-40. ISSN 0143-0807.
- [18] TIMMERS, T. Functionality from Electronic Materials. *School of Physical, Environmental and Mathematical Sciences (PEMS) - UNSW Canberra* [online]. 2002 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z URL: <<http://www.pems.adfa.edu.au/~s9471553/level1/Teaching/ElectronicProperties/Functionality.html>>.
- [19] VOVES, J. *Fyzika polovodičových součástek*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1997, 163 s. ISBN 80-010-1684-6.
- [20] YACOBI, B.G. *Semiconductor materials an introduction to basic principles*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003, s. 171-215. ISBN 978-0-306-47942-7.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

d	průměr (m)
D_n, D_p	difúzní koeficient elektronů, děr ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
$E, \mathbf{E}$	intenzita elektrického pole, vektor intenzity elektrického pole ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
f	frekvence (Hz)
G	generace ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
g	součinitel generace nosičů náboje ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
I	elektrický proud (A)
$\mathbf{J}$	vektor proudové hustoty ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
$\mathbf{J}_{n, \text{dif}}, \mathbf{J}_{p, \text{dif}}$	vektor difúzní složky proudové hustoty elektronů, děr ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
$\mathbf{J}_{n, \text{drif}}, \mathbf{J}_{p, \text{drif}}$	vektor driftové složky proudové hustoty elektronů, děr ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
l	délka (m)
LAN	Local Area Network, lokální síť
m_n^*, m_p^*	efektivní hmotnost elektronů, děr (kg)
n	koncentrace elektronů (m^{-3})
n_i	intrinzická koncentrace (m^{-3})
n_I	koncentrace ionizovaných příměsí (m^{-3})
p	koncentrace děr (m^{-3})
q	elementární náboj (C)
R	rekombinace ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
r	součinitel rekombinace nosičů náboje ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
S	plocha (m^2)
s	vzdálenost hrotů (m)
T	absolutní teplota (K)
t_p	šířka pulsu (s)
t_0	časová vzdálenost pulsů (s)

U, U_x, U_N	elektrické napětí, napětí mezi hroty, napájecí napětí (V)
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
v_D, v_{Dn}	driftová rychlost, driftová rychlost elektronů ($m \cdot s^{-1}$)
w	tloušťka (m)
W_c, W_v	energie pásu vodivostního, valenčního (eV)
W_g	šířka zakázaného pásu (eV)
γ	konduktivita ($S \cdot m^{-1}$)
ϑ	teplota ($^{\circ}C$)
ρ	rezistivita ($\Omega \cdot m$)
μ, μ_n, μ_p	pohyblivost, pohyblivost elektronů, děr ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)
μ_L	pohyblivost při mřížkovém rozptylu ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)
μ_I	pohyblivost při rozptylu na ionizovaných příměsích ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)
τ_n, τ_p	střední doba mezi srážkami elektronů, děr (s)

SEZNAM PŘÍLOH

A Přehled vlastností polovodičů

44

A PŘEHLED VLASTNOSTÍ POLOVODIČŮ

Tab. A.1: Vybrané fyzikální vlastnosti Si a Ge, parametry závislé na teplotě jsou udávány při 300 K [16]

Parametr	Si	Ge
Počet atomů v 1 cm ³ (cm ⁻³)	$5 \cdot 10^{22}$	$4,4 \cdot 10^{22}$
Hustota (g · cm ³)	2,329	5,3234
Relativní permitivita (-)	11,7	16,2
Elektronová afinita (eV)	4,05	4
Energie optických fononů (eV)	0,063	0,037
Šířka zakázaného pásu (eV)	1,12	0,661
Výstupní práce (eV)	4,3	0,8
Efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu (cm ⁻³)	$3,2 \cdot 10^{19}$	$1,0 \cdot 10^{19}$
Efektivní hustota stavů ve valenčním pásu (cm ⁻³)	$1,8 \cdot 10^{19}$	$5,0 \cdot 10^{19}$
Bod tání (°C)	1412	937
Součinitel teplotní vodivosti (W · cm ⁻¹ · K ⁻¹)	1,3	0,58
Součinitel tepelné roztažnosti (K ⁻¹)	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Průrazné elektrické pole (V · cm ⁻¹)	$\approx 3 \cdot 10^5$	$\approx 1 \cdot 10^5$
Pohyblivost elektronů (cm ² · V ⁻¹ · s ⁻¹)	≤ 1400	≤ 3900
Pohyblivost děr (cm ² · V ⁻¹ · s ⁻¹)	≤ 450	≤ 1900
Difúzní koeficient elektronů (cm ² · s ⁻¹)	≤ 36	≤ 100
Difúzní koeficient děr (cm ² · s ⁻¹)	≤ 12	≤ 50
Tepelná rychlost elektronů (m · s ⁻¹)	$2,3 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^5$
Tepelná rychlost děr (m · s ⁻¹)	$1,65 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^5$
Intrinzická rezistivita (Ω · cm)	$3,2 \cdot 10^5$	45
Mřížková konstanta (nm)	0,5431	0,5658

Tab. A.2: Vybrané parametry polovodičových sloučenin, parametry závisující na teplotě jsou udávány při teplotě 300 K [16]

Parametr	GaP	InAs	GaAs	GaSb	InSb	InP	GaN
Počet atomů v 1 cm^3 (cm^{-3})	$4,94 \cdot 10^{22}$	$3,59 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$	$3,53 \cdot 10^{22}$	$2,94 \cdot 10^{22}$	$3,96 \cdot 10^{22}$	$8,9 \cdot 10^{22}$
Hustota ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	4,14	5,68	5,32	5,61	5,77	4,81	6,15
Relativní permitivita statická (-)	11,1	15,15	12,9	15,7	16,8	12,5	8,9
Elektronová afinita (eV)	3,8	4,9	4,07	4,06	4,59	4,38	4,1
Krystalová struktura	sfaleritová	sfaleritová	sfaleritová	sfaleritová	sfaleritová	sfaleritová	wurtzitová
Šířka zakázaného pásu (eV)	2,26	0,354	1,424	0,726	0,17	1,344	3,39
Efektivní hustota stavů ve W_c (cm^{-3})	$1,8 \cdot 10^{19}$	$8,7 \cdot 10^{16}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$2,1 \cdot 10^{17}$	$4,2 \cdot 10^{16}$	$5,7 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{18}$
Efektivní hustota stavů ve W_v (cm^{-3})	$1,9 \cdot 10^{19}$	$6,6 \cdot 10^{18}$	$9,0 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$7,3 \cdot 10^{18}$	$1,1 \cdot 10^{18}$	$4,6 \cdot 10^{19}$
Bod tání ($^{\circ}\text{C}$)	1457	942	1240	712	527	1060	2500
Součinitel teplotní vodivosti ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1,1	0,27	0,55	0,32	0,18	0,68	1,3
Součinitel tepelné roztažnosti (K^{-1})	$4,65 \cdot 10^{-6}$	$4,52 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$	$7,75 \cdot 10^{-6}$	$5,37 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$3,17 \cdot 10^{-6}$
Průrazné elektrické pole ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\approx 1 \cdot 10^6$	$\approx 4 \cdot 10^4$	$\approx 4 \cdot 10^5$	$\approx 5 \cdot 10^4$	$\approx 1 \cdot 10^3$	$\approx 5 \cdot 10^5$	$\approx 5 \cdot 10^6$
Pohyblivost elektronů ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	≤ 250	$\leq 4 \cdot 10^4$	≤ 8500	≤ 3000	$\leq 7,7 \cdot 10^4$	≤ 5400	≤ 1000
Pohyblivost děr ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	≤ 150	$\leq 5 \cdot 10^2$	≤ 400	≤ 1000	≤ 850	≤ 200	≤ 350
Difúzní koeficient elektronů ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\leq 6,5$	$\leq 1 \cdot 10^3$	≤ 200	≤ 75	$\leq 2 \cdot 10^3$	≤ 130	≤ 25
Difúzní koeficient děr ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	≤ 4	≤ 13	≤ 10	≤ 25	≤ 22	≤ 5	≤ 9
Tepelná rychlost elektronů ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$2 \cdot 10^5$	$7,7 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^5$	$9,8 \cdot 10^5$	$3,9 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$
Tepelná rychlost děr ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$1,3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^4$