

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav fyziky

Ing. Lubomír GRMELA, CSc.

**EXPERIMENTÁLNÍ METODY
NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ
ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK A MATERIÁLŮ**

**EXPERIMENTAL METHODS
OF NON-DESTRUCTIVE TESTING
OF ELECTRONIC DEVICES AND MATERIALS**

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



Brno 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

šum, spolehlivost, degradace, nanometrologie, fotoproud

KEYWORDS

noise, reliability, degradation, nanometrology, photocurrent

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

FEKT VUT v Brně

© Lubomír Grmela 2002

ISBN 80-214-2133-9

ISSN 1213-418X

OBSAH

Obsah.....	3
1 ÚVOD	5
2 STOCHASTICKÉ A TRANSPORTNÍ PROCESY V PEVNÝCH LÁTKÁCH.....	6
2.1 STANOVENÍ RELEVANTNÍCH PARAMETRŮ PRO ODHAD DEGRADACE	9
2.2 Parametry popisující transportní charakteristiky	10
2.3 Závislost šumového napětí U_N Na napětí v propustném směru U_F	12
2.4 Šumové charakteristiky při kvazistacionárním režimu.....	14
2.5 Stanovení parametrů pracovníCH charakteristik.....	17
2.6 degradace luminiscence	18
2.7 Tester luminiscenčních diod	20
3 LOKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY - NANOMETROLOGIE.....	22
3.1 Výsledky a diskuse	25
4 ZÁVĚR.....	29
LITERATURA.....	31
SUMMARY	34



Ing. Lubomír Grmela, CSc. je zaměstnán na Ústavu fyziky FEKT VUT v Brně od roku 1985. Narodil se 16. května 1958 v Prostějově. V roce 1982 ukončil vysokoškolské studium na Elektrotechnické fakultě Vysokého učení technického v Brně v oboru sdělovací technika, specializaci přístrojová elektronika.

V roce 1983 nastoupil ke studiu interní vědecké aspirantury na katedře fyziky FE VUT v Brně. V roce 1986 se stal odborným asistentem na tomto ústavu a do této doby vyučuje v předmětech Fyzika 1 - základní kurz fyziky a v předmětu Fyzika 2 pro obor Informační a výpočetní technika. Kromě toho je garantem doporučených předmětů Základy experimentální práce a Počítače ve fyzice. Pro studenty vyšších ročníků se spolupodílí na otevření nového kurzu Nedeštruktivní diagnostika elektronických součástek a fyzika dielektrik. Je autorem nebo spoluautorem několika titulů skript zejména pro laboratorní cvičení a doporučené předměty. V roce 1988 obhájil kandidátskou disertační práci „Stochastické jevy v diodách GaAlAs“ v oboru Aplikovaná fyzika. V letech 1989 – 90 absolvoval odbornou stáž na ÚPT ČSAV v Brně. Kromě toho absolvoval řadu krátkodobých studijních pobytů ve Francii, Anglii a Rusku v rámci projektů Tempus a Socrates a jiných.

Dlouhodobě se zabývá experimentálním výzkumem stochastických a transportních jevů v polovodičových materiálech a součástkách s cílem vypracovat nedeštruktivní metodiku vhodnou pro vytvoření diagnostických testů a spolehlivostních prognóz. V souvislosti se studiem defektů v polovodičových diodách, polovodičových laserech a tenkých vrstvách se zabývá využitím optického blízkého pole pro nanotechnologii. Jedná se o konstrukci optického řádkovacího tunelového mikroskopu s lokální sondou a realizaci spektroskopických měření indukovaných fotoproudů v blízkém poli na heterostukturách. Během zaměstnání na elektrotechnické fakultě VUT v Brně byl řešitelem nebo spoluřešitelem řady projektů. Např. 9 grantů GAČR, FRVŠ, NATO, MŠMT – Barrande, projektů NODITO, ELEN a COST majících vztah k problematice šumové a dielektrické spektroskopii a nanotechnologii. V současné době je také spoluřešitelem výzkumného záměru na FEKT VUT v Brně MSM 262200022 „Výzkum mikroelektronických systémů a technologií“.

Dosažené původní vědecké poznatky byly předneseny na špičkových pracovištích v zahraničí – Universita Besancon, IMEC Leuven, University Nottingham, na několika zahraničních konferencích a workshopech. Je autorem celkem 42 článků v časopisech a ve sbornících konferencí, několika oponovaných výzkumných zpráv především k realizovaným měřicím zařízením a metodám, 5 zpráv k vyřešeným grantům a 3 zahraničních oponentních posudků.

Je členem České společnosti pro nedeštruktivní testování, členem výboru odborné sekce „Testování pomocí šumových a nelineárních procesů“. Mimo to byl členem několika výborů na mezinárodních konferencích a odborných seminářích.

1 ÚVOD

Předložená práce se věnuje studiu experimentálních metod nedestruktivního testování základních elektronických součástek a materiálů. Jejím cílem je shrnutí dosavadních poznatků ze šumové spektroskopie rozšířené o experimentální práce v oblasti optického blízkého pole. Habilitační práci předkládám jako komentovaný soubor uveřejněných vědeckých prací.

V průběhu posledních let bylo prokázáno, že zejména elektronické součástky na bázi polovodičů jsou zdroji proudových či napěťových fluktuací. Tento šum vzniká na nežádoucích defektech ve struktuře monokrystalu nebo technologickou nedokonalostí při přípravě přechodu PN. Oblasti přechodu PN i homogenní polovodiče jsou zdroji mnoha v literatuře popsanych typů šumu, z nichž dominantní, doposud teoreticky jednoznačně nevyřešený je šum typu $1/f$. Má název podle tvaru frekvenční závislosti spektrální hustoty na rozdíl od jiných typů šumu.

Výzkum stochastických a transportních procesů je v současné době prováděn ve slabém i silném elektrickém poli metodami, které určují střední hodnoty měřitelných veličin. Tyto procesy jsou v podstatě stochastické povahy a je proto vhodné sledovat co možná největší soubor jejich statistických charakteristik. Je známo, že řada informací o transportu náboje, parametrech lokalizovaných stavů, parametrech izolantu i přechodu kov-polovodič lze získat ze studia druhého momentu realizace náhodného procesu. Převážně se jedná o spektrální proudovou či napěťovou spektrální hustotu nebo korelační funkci.

Výzkum proudového šumu je obtížný problém, neboť hodnoty spektrální hustoty fluktuace proudu nebo napětí dosahují velmi nízkých hodnot.

V první části práce je pojednáno o metodách vhodných k prognóze spolehlivosti na základě velkého počtu prováděných experimentů. Dominantní práce, ve kterých jsou stanoveny relevantní spolehlivostní parametry včetně konkrétního návrhu testovacího zařízení jsou v kapitole 3. komentovány podrobně. Práce se týkají šumové spektroskopie u polovodičových luminiscenčních diod na bázi přechodu PN GaAlAs, či GaAsP. Diody vykazovaly v určitém rozsahu pracovních napětí statisticky významné hodnoty prvních momentů, tj. střední hodnoty fluktuací. Soubory vzorků těchto běžně vyráběných součástek byly podrobeny výzkumu, jehož cílem bylo stanovení nedestruktivních diagnostických indikátorů spolehlivosti. Na základě vyhodnocených experimentů byl navržen i prototyp testeru, pomocí něhož byly výsledky prací ověřovány na větších sériích výrobků.

V druhé části práce je pojednáno o poznacích z oblasti spektroskopie v blízkém optickém poli se snahou o začlenění do nedestruktivního testování zmíněných součástek. Tato oblast bezesporu patří mezi významné nástroje diagnostiky lokálních charakteristik povrchu součástky s velkou rozlišovací schopností.

Konvenční optické mikroskopy jsou nástrojem, který je používán v mnoha oborech. Jejich zobrazení je založeno na principu interference světelných vln. V interferenčních mikroskopech je možné mimo optických vln používat i vln materiálových, např. elektronových, s cílem dosažení vyšší rozlišovací schopnosti. Ta, jak víme, je limitována difrakcí, která doprovází všechny reálné interferenční jevy.

Je možné si všimnout, že dnes již difrakce světla nepředstavuje zásadní omezení. Např. rastrovací tunelový mikroskop používá interakci materiálových vln. V optickém poli se tento mikroskop nazývá NFOM (Near Field Optical Microscope - optický mikroskop pracující v blízkém poli). Ten mapuje velikost lokální elektromagnetické interakce mezi předmětem a hrotem rastrující sondy, čímž vznikne obraz nanometrického prostoru, který leží daleko pod difrakčními hranicemi. V analogii s tunelováním elektronů je možné popsat lokální interakci v optickém poli jako tunelování fotonů vrstvou dielektrika mezi vzorkem a sondou. Pojem optického blízkého pole je klíčový pro porozumění a popis fyzikálních jevů, které vznikají v této

nové oblasti optiky i technologie. Tato oblast se vyznačuje existencí nešířící se lokální elektromagnetické interakce spadající do kategorie “optických procesů limitovaných přístrojem”.

Pro interakční typ mikroskopu je nutné využít technik zpracování signálů a teoretických podkladů k tomu, aby bylo možné náležitě interpretovat vzniklé obrazy. To vše proto, že topografická informace o předmětu musí být vyvozena z interakce předmětu s hrotem sondy v blízkém poli, což zavádí “nedestruktivní měření” optického blízkého pole spojeného s osvětleným vzorkem. Topografické detaily předmětu nemusejí přitom přímo korelovat s velikostí interakce vzorek-sonda. K tomu, abychom vhodně interpretovali získané obrazy, je nutné mít dostatek znalostí o optických vlastnostech předmětu a hrotu sondy, stejně jako mít pojem o osvětlení předmětu, detekci a zpracování signálu.

Rozvoj znalostí o optickém blízkém poli a o technikách, které toto pole využívají, povede k tomu, že se sondové mikroskopy budou používat nejen jako analytický nástroj, ale bude možné je využít k aktivní kontrole a manipulaci s předměty o nano či atomových rozměrech.

Sklobením uvedených dvou metod, nedestruktivního šumové spektroskopie a testování s lokální mikroskopií je možné dosáhnout významného nástroje v oblasti stanovování prognóz spolehlivosti a délek bezporuchové činnosti jednotlivých komponentů. Šumová spektroskopie dává přehled o existenci poruchových mechanismů uvnitř aktivní oblasti. Optická mikroskopie, zejména v oblasti optického blízkého pole, pak umožňuje studium lokálních strukturních nedokonalostí materiálů včetně povrchového rastrování s velkým rozlišením. Výsledkem takového testu by pak mohl být až návrh úpravy technologické přípravy jednotlivých součástek a jejich selektivní výběr z hlediska významné vlastnosti.

2 STOCHASTICKÉ A TRANSPORTNÍ PROCESY V PEVNÝCH LÁTKÁCH

S rozvojem elektroniky a zejména informatiky se začal velký význam klást na zjišťování spolehlivosti jednotlivých komponentů a jejich dílčích funkcí. Na významu nabývá zejména směr, který se vzhledem ke spolehlivosti dynamicky rozvíjí hlavně v posledních letech, a to je nedestruktivní zjišťování parametrů používaných součástek v zařízeních, která jsou v plně funkčním nebo laboratorním provozu nebo je jejich funkčnost simulována. Na bezchybně provedených analýzách jednotlivých součástek lze stanovit indikátory spolehlivosti a posléze i definovat prognózu spolehlivosti. Význam při stanovování indikátorů spolehlivosti u všech elektronických součástek roste, neboť bez dokonale vyrobených a otestovaných komponentů si již nedovedeme představit činnost počítačů, kvalitní a bezchybný přenos informací, řízení či měření určitých parametrů prakticky ve všech technologických procesech.

Spolehlivost elektronického systému je ovlivněna v první řadě spolehlivostí jeho základních prvků, např. pasivními a aktivními elektronickými součástkami. Otázkami jejich spolehlivosti se zabývá fyzika spolehlivosti nebo fyzika poruch. Oblastí jejího studia jsou zejména strukturní nedokonalosti materiálů, stanovení dominantních poruchových mechanismů, modelování poruch elektronických součástek, určování základních fyzikálně chemických procesů vedoucích k degradaci parametrů materiálů a součástek a rozvoj a využití diagnostických metod pro zjišťování a studium poruch a degradace jejich parametrů.

Primární oblastí fyziky spolehlivosti se stává studium strukturních nedokonalostí materiálů. Oblasti tohoto studia jsou:

- teorie defektů, zahrnující jejich modely, generování, energetickou a termodynamickou stránku a korespondenci mikrostrukturních a makrostrukturních defektů,

- metodika detekce a lokalizace defektů,
- experimentální sledování vzájemného vlivu defektů, dynamika defektů,
- vliv dislokace a dalších defektů na fyzikální a chemické vlastnosti materiálů.

V oblasti diagnostiky materiálů a součástek existuje řada metod, mezi nimiž má v současné době už trvalé místo nedestruktivní šumová diagnostika. Dřívější elektrické metody sledování parametrů kvality a spolehlivosti vycházely z měření středních hodnot makroskopických veličin, jako je proud, napětí, odpor, svítivost a dalších. Z odchylky naměřených charakteristik od charakteristik ideálních se usuzuje na přítomnost poruch, které jsou v řadě případů příčinou degradace parametrů součástek.

Námi diskutované šumové diagnostické metody vycházejí ze skutečnosti, že transport nosičů náboje, vyzařování a pohlcování světla a další procesy, probíhající při vedení proudu v materiálech a součástkách jsou stochastické povahy a projevují se fluktuací proudu, napětí a dalších veličin. Statistické charakteristiky těchto fluktuací přináší další cenné informace o procesech, probíhajících ve sledovaných soustavách a doplňují tak střední hodnoty makroskopických veličin o další momenty, jako je např. korelační funkce nebo výkonová spektrální hustota a další statistické charakteristiky, jako je hustota rozdělení sledovaného náhodného procesu.

Experimentálně jsme zjistili, že proudové fluktuace se projevují ve vnějším obvodu jako proudový nebo napěťový šum, u elektroluminiscenčních součástek také jako šum záření. Typ zdroje šumu a jeho lokalizaci jsme určili z rozboru šumových a transportních charakteristik. Vedle základních typů šumu, jejichž zdroje nelze odstranit, jako je např. tepelný šum, generačně-rekombinační šum v polovodičích nebo výstřelový šum ve strukturách s PN přechody, existují také tzv. nadbytečné šumy. Předpokládáme, že technologické závady při výrobě materiálů a součástek se projevují jako zdroje nadbytečných proudů a nadbytečných šumů. V častých případech je potom proudový šum citlivějším indikátorem poruch než střední hodnota proudu.

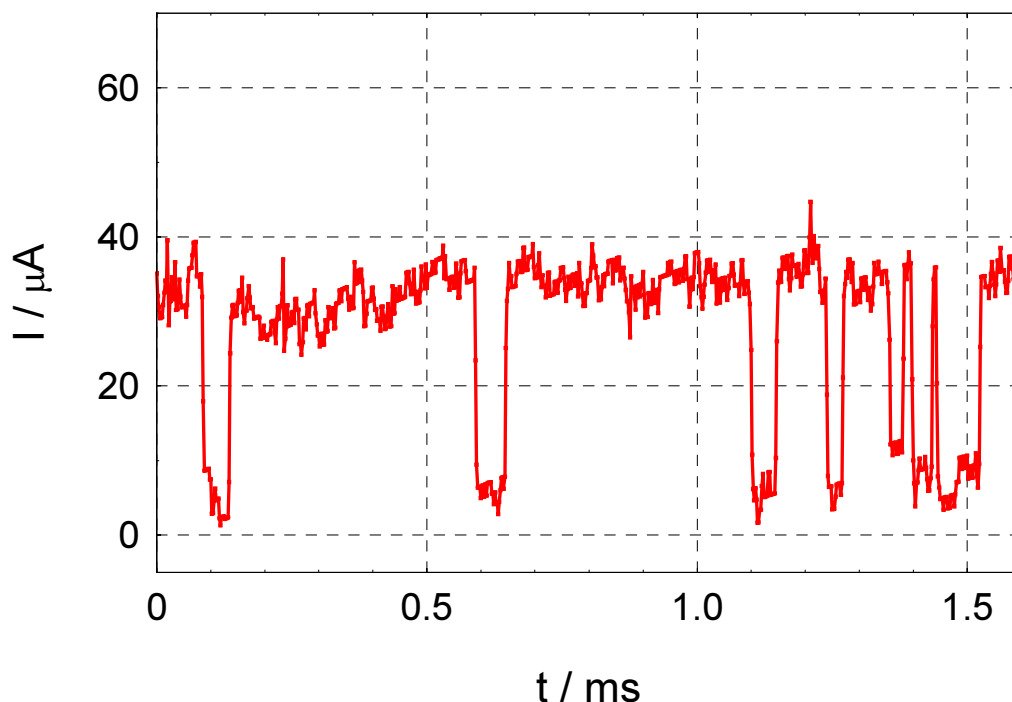
Vyjdeme-li ze skutečnosti, že poruchy ve struktuře, které jsou zdrojem nadbytečného šumu, vedou k degradaci fyzikálních a technických parametrů, můžeme podle hodnoty šumových charakteristik posuzovat kvalitu a životnost sledované soustavy a provádět třídění součástek.

Jedním z významných zdrojů šumu, který vypovídá o defektech ve struktuře PN přechodu, je zdroj impulzního šumu.

Impulzní šum se může objevit v určitém režimu provozu některých elektronických součástek, např. odporů, diod, tranzistorů, integrovaných obvodů aj., ve formě dvouhladinových nebo vícehladinových náhodných proudových impulzů. Jejich tvar bývá často obdélníkový, může být však v závislosti na parametrech vnějšího obvodu, v němž je součástka zapojena, i přibližně trojúhelníkový s exponenciálním týlem impulzu. Obdélníkové proudové impulzy se vyznačují konstantní amplitudou a náhodnou šířkou impulzů s náhodnou dobou vzniku impulzů. Příklad námi naměřeného průběhu impulzního šumu na LED diodě je uveden na obr. 2.1.

Tento typ impulzního šumu může být způsoben v přechodech PN v podstatě dvěma způsoby:

- Bistabilními fluktuacemi potenciálové bariéry defektu v oblasti prostorového náboje PN přechodu, která je řízena zachycováním, či emisí jednotlivého nosiče na pasti nebo G-R centru v blízkosti defektu (burst noise neboli RTS noise). Vícehladinový šum může vzniknout, existuje-li v přechodu více defektů tohoto typu nebo jestliže je poblíž defektů více G-R center.
- Lokálním lavinovým výbojem v malé oblasti přechodu v místech, kde dislokace protíná PN přechod, polarizovaný v závěrném směru. Tento šum se objevuje obvykle při dostatečně velkých závěrných napětích, ale nižších, než je napětí nutné pro lavinový výboj celé nedefektní oblasti přechodu. Lavinový výboj se může objevit ve dvou nebo více malých oblastech současně. Potom vzniká vícehladinový šum.



Obr. 2.1 Příklad časového průběhu proudového impulzního šumu LED, sejmutého z digitálního osciloskopu.

Jednou z významných metod zabývajících se prognózou spolehlivosti elektronických aktivních a pasivních součástek je šumová spektroskopie. Fluktuační a transport nosičů náboje jsou projevem statistické povahy interakce elektronů a děr s fotony a fonony náhodných procesů při jejich kvantových přechodech. Makroskopicky se projevují jako fluktuační proudů, napětí, odporu či kapacity a v případech laserů či luminiscenčních diod též jako fluktuační světelného toku.

Obecněji problematika šumu v oblasti teoretického a experimentálního studia polovodičů je motivována snahou o prohloubení znalostí o mikrofyzikálních procesech v polovodičových materiálech. Aplikace stochastických jevů v počátcích rozvoje tohoto oboru jsou zaměřeny zejména do experimentálního studia umožňujícího stanovování a měření parametrů pastí, na sledování generačně-rekombinačních procesů a na stanovení lepšího poměru užitečného signálu k šumu, a to jak u klasických elektronických součástek jako jsou diody, tranzistory, tak i u součástek podílejících se na generaci a detekci záření či složitých polovodičových struktur určených k převodu analogové veličiny na číslicovou podobu nebo naopak.

Skutečnost, že dokonalý přechod PN vykazuje pouze tepelný a výstřelový šum, se stala základem pro vypracování nedestruktivní diagnostické metody pro strukturu s přechodem PN. Poznatky o statistických charakteristikách jednotlivých zdrojů šumů umožňují rozhodnout o pravděpodobných nedostatcích v dílčích etapách technologických procesů přípravy jednotlivých komponentů.

Při experimentálním studiu makroskopických fyzikálních procesů v polovodičích se často měří pouze střední hodnota sledované veličiny, tj. první moment realizace náhodného procesu a informace o momentech vyššího řádu se pomocí obvodového uspořádání experimentu vymaže, ztratí se. Pokud se podaří experimentálně zjistit moment realizace vyššího řádu, pak z hlediska toho členění dává studium šumu informaci o náhodných procesech vyvolaných jak vratnými, tak i nevratnými jevy. Studium druhého momentu realizace náhodného procesu, korelační funkce a spektrální výkonové hustoty fluktuující veličiny dávají další možnosti k získávání informací

o fluktuacích a jejich návaznosti na definování kritérií pro tvorbu nedestruktivních diagnostických testů.

Fluktuačním a transportním procesům v pevných látkách je v posledních dvaceti letech věnována velká pozornost jak v zahraničí, tak i u nás. Na toto téma proběhla celá řada konferencí a sledovaná problematika už naznala rozšíření i do řady příbuzných oblastí. Patří sem samostatně prezentované příspěvky z oblasti jako fluktuace v biologických systémech, fluktuace a transportní charakteristiky v optoelektronických součástkách, zejména laserech, v plazmatu, v měřicí technice či supravodičích. Většinou samostatně bývá pojednáno o problematice studia fluktuací typu $1/f$, generačně – rekombinačním šumu, souvislostmi mezi degradačními procesy a šumem a konečně i významné postavení zaujímá studium metod experimentálního sledování fluktuací s cílem stanovení spolehlivostních parametrů a degradačních procesů.

Naše experimentální sledování spektrální hustoty šumu $1/f^\alpha$ je uspokojivě vystihováno nejméně pěti typy modelů, kde pozorujeme hodnotu exponentu α od 0,8 až do 1,3 v rozsahu frekvencí až několika řádů. I přes tuto nejednotnost a různorodost v modelových popisech se však domníváme, že experimentální zjišťování spektrální hustoty mající podobný tvar sehrává uspokojivou roli při zjišťování kvality a spolehlivostní analýzy. Dokazuje to fakt, že naměřené a prezentované výsledky prokazují korelaci mezi experimentálně naměřeným šumem v materiálech či součástkách a mezi jejich kvalitou a spolehlivostí. Tedy spektrální hustota šumu v polovodičích nebo i jiných materiálech má zásadní vliv na kvalitu a spolehlivost těchto součástek.

Metody analýzy degradace a spolehlivosti polovodičových elektronických součástek jsou založeny na velmi dobře propracovaných statistických metodách odhadů různých poruchových mechanismů vznikajících ve sledovaných součástkách. Obecný přehled je uveden v [1]. Problematikou vzniku stochastických procesů se intenzivně zabývá celá řada významných laboratoří. Spolehlivost unipolárních tranzistorů je rozebrána [2], vznik a objasnění šumových procesů na kontaktech kov-polovodič řeší [4] a dále o studiu izolačních vrstev na křemíku je pojednáno v [3].

2.1 STANOVENÍ RELEVANTNÍCH PARAMETRŮ PRO ODHAD DEGRADACE

Analýza zejména luminiscenčních diod a polovodičových laserů různých typů byly nejčastějším předmětem našeho výzkumu. Stanovení degradačních a spolehlivostních testů jsme založili na zjišťování a vyhodnocování transportních procesů, šumových a luminiscenčních charakteristik. Přechody PN nebo heteropřechody, které tvoří luminiscenční diody a polovodičové lasery vykazují v souvislosti s jejich funkcemi většinou nízkofrekvenční nadbytečný šum a při zkoumání transportu nosičů i nadbytečný proud. Bylo prokázáno, že míra degradace v závislosti na časové délce používání takových součástek v běžném provozu není vždy monotónní. Projevují se různé anomálie, které se čím dál více daří dávat do souvislostí s experimentálně zjištěným nadbytečným šumem.

Proces degradace pracovních charakteristik nebo jednotlivých parametrů je doprovázen během jejich funkčního využívání ireverzibilními změnami jak při transportu, tak i v optické oblasti charakteristik. Všechny tyto změny mají společný účinek, a to snížení spolehlivosti daného zařízení nebo součástky vzhledem k užitným vlastnostem, pro které jsou konstruovány při běžném provozu. Na základě této studie a za použití výsledků ostatních metod, přímo aplikovatelných na již z hlediska luminiscence nezářivých vzorcích jako je např. DLTS, povrchový scanning apod. nám pomohly vytvořit tři skupiny parametrů sloužících ke stanovení jednotlivých kroků spolehlivostní a degradační prognózy.

2.2 PARAMETRY POPISUJÍCÍ TRANSPORTNÍ CHARAKTERISTIKY

Zde bylo ukázáno, že se jedná zejména o napětí U_{F1} v propustném směru a jemu odpovídající propustný proud I_F . Napětí U_{F1} poskytuje informace o existenci tzv. nadbytečného proudu. Nadbytečný proud jsme pozorovali v oblasti nejnižších propustných napětí, která jsou obvykle pod hodnotou difusního napětí. Velikost nadbytečného proudu je závislá na preciznosti technologického postupu, s jakou byla daná součástka vyrobena. Dále jsme sem zařadili součinitel β , který se objevuje ve V-A charakteristice pro definici propustného proudu pomocí vztahu:

$$I_F = I_0 [\exp (\beta \cdot U_F) - 1] . \quad (2-1)$$

kde I_0 je saturační proud přechodem PN v závěrném směru.

Dalším parametrem je závěrný proud I_{R0} při závěrném napětí $U_R = 5$ V. S popisem závěrné části V-A charakteristiky, zejména její lavinové multiplikační části je exponent n , který vystupuje ve následujícím tvaru:

$$I_R = a U^n . \quad (2-2)$$

V námi navržených postupech je s výhodou zjišťována velikost závěrného napětí U_{RB} , které odpovídá hodnotě exponentu $n = 1$.

Jako poslední parametry, které jsme v souvislosti s analýzou spolehlivosti při zjišťování transportních charakteristik diskutovali byla směrnice C-V charakteristiky a intenzita elektrického pole E v přechodu PN.

Typická voltampérová charakteristika diody obecně se dá rozložit na tři oblasti. První oblast odpovídá výskytu nadbytečného proudu. Děje se tak při velmi malých hodnotách propustného proudu. Nadbytečný proud je spojen buď se svodovým odporem nebo existencí kovových precipitátů v některé oblasti přechodu P-N. Nadbytečný proud se vyjadřuje pomocí (2-1).

V druhé oblasti se voltampérová charakteristika přibližuje nejvíce teoretickému průběhu. Pro ni je charakteristická mocninná závislost proudu, podobně jak je uvedeno v (2-2), ale pro mocnitel α .

Poslední sledovaná oblast se nachází při nejvyšších hodnotách propustného proudu a tu se již projevuje odpor kontaktů, neboť proudy dosahují řádově hodnot 10^{-3} až 10^{-1} A.

Velikost propustného proudu u prvních dvou oblastí můžeme vyjádřit následovně:

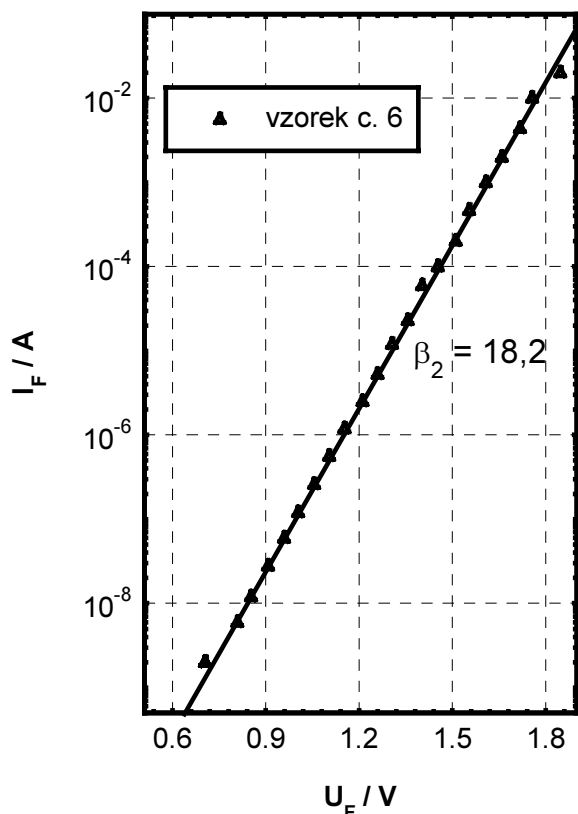
$$I_F = I_{10} [\exp (\beta_1 \cdot U_F) - 1] + I_{20} \exp (\beta_2 U_F) \quad (2-3)$$

První člen rovnice (2-3) odpovídá nadbytečnému proudu. Druhý člen charakterizovaný součinitelem

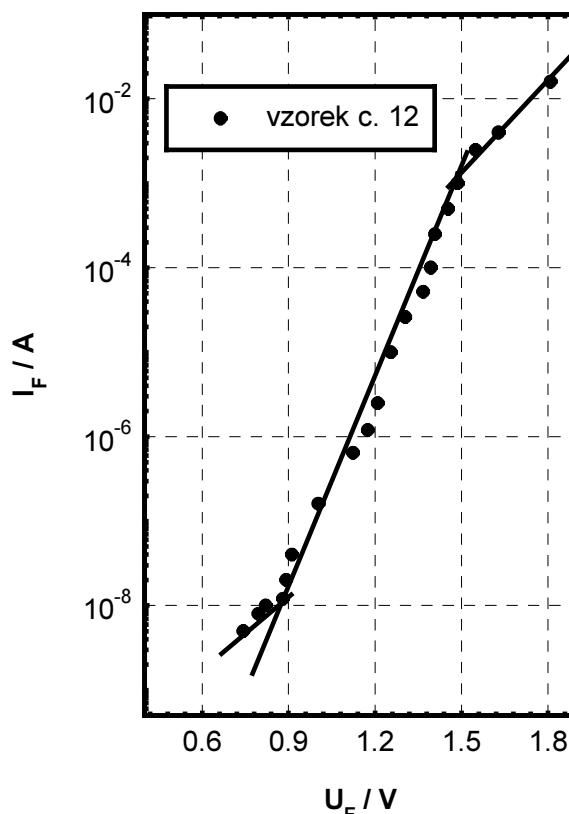
$$\beta_2 = e / n k T \quad (2-4)$$

pro n z intervalu (1; 2), nazývané součinitel ideálnosti, odpovídá charakteristice ideálního přechodu. V těchto dvou oblastech je proud přechodu tak malý, že vliv odporu kontaktů se neprojevuje.

Konkrétní měření voltampérových charakteristik luminiscenčních diod s heteropřechodem jsme provedli na sériových výrobcích, které zatím neměly žádné označení. Měření potřebných parametrů bylo provedeno na speciální aparatuře, kterou jsme navrhli a pro tento účel i realizovali.



Obr. 2.2 V-A charakteristika vzorku č. 6



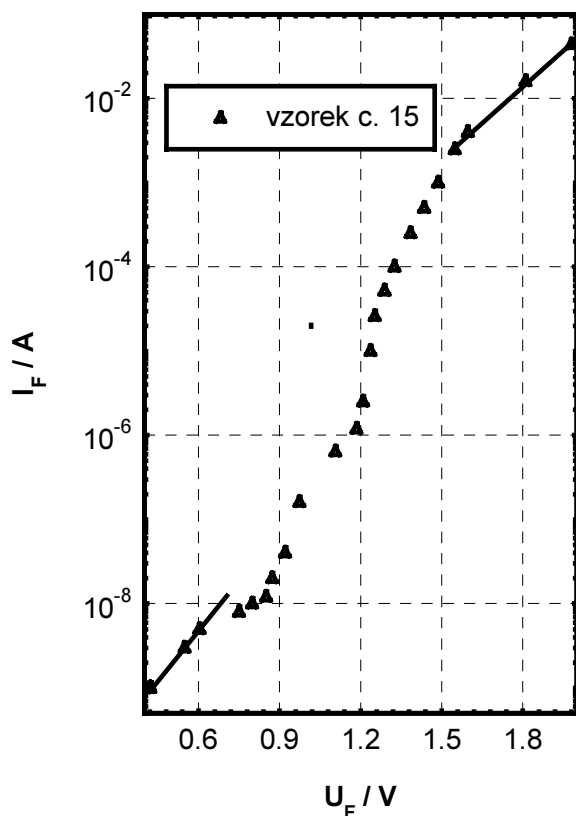
Obr. 2.3 V-A charakteristika vzorku č. 12

Experimentální pracoviště se stalo jádrem navrženého testeru pro testování velkého počtu diod. Na diodě se definovaným krokem nastavuje hodnota proudu z počítačem řízeného zdroje konstantního proudu od 10 nA do 20 mA a odečítá se hodnota propustného napětí na diodě. Všechna měření se prováděla při pokojové teplotě a 1kΩ zatěžovacím odporu. Charakteristické průběhy jsou uvedeny na obr. 2.2 až 2.4 a jsou pro vzorky diod s pracovním označením 6, 12 a 15.

Charakteristika na obr. 2.2 se vyznačuje tím, že má pouze oblast mocninné závislosti proudu. Voltampérová charakteristika se dá vyjádřit výrazem (2-3), ve kterém je pouze druhý člen se součinitelem $\beta_2 = 18,2 \text{ V}^{-1}$.

Na obr. 2.3 je uvedena charakteristika nejpočetnější podskupiny vzorků. Diody toho podsouboru vykazovaly kvantitativně stejnou závislost $U_N = f(U_F)$. Jejich V-A charakteristiky se vyznačují nižší směrnici v oblasti nadbytečného proudu ve srovnání s oblastí, kde je proud

vyjádřený mocninným koeficientem v závislosti na napětí. Ale i zde je směrnice nižší, dosahovala hodnoty $\beta_2 = 14,8 \text{ V}^{-1}$.



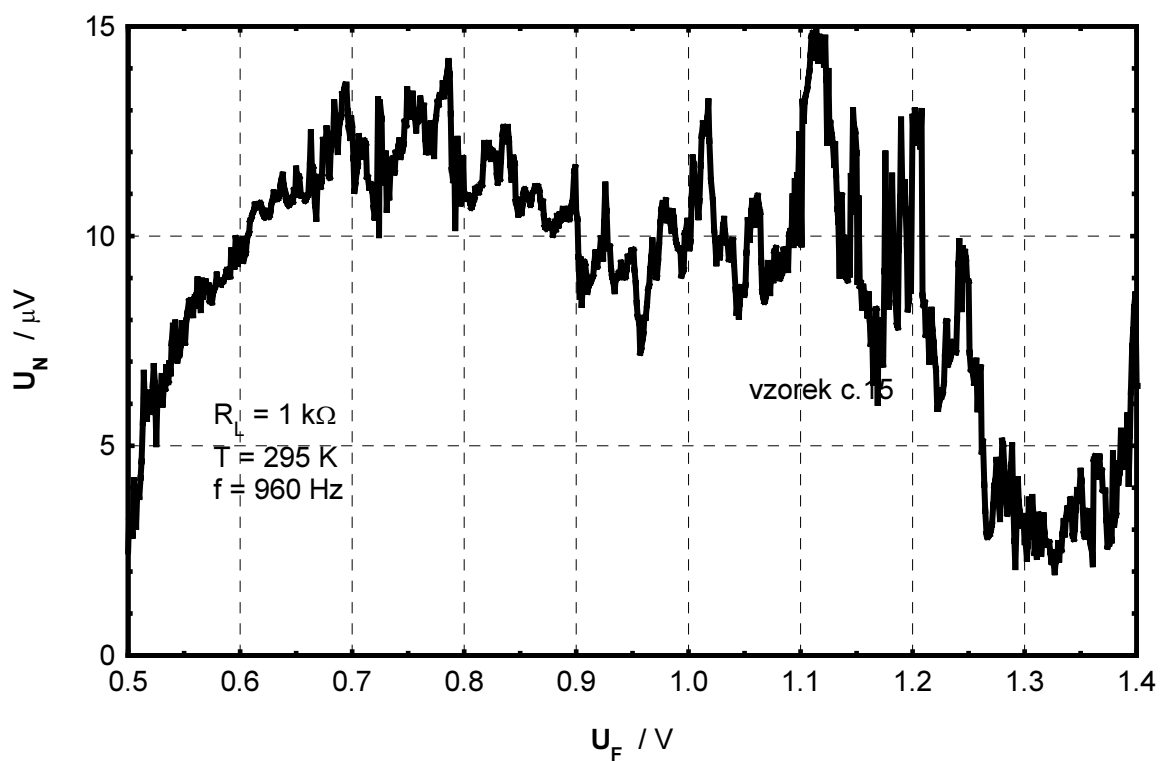
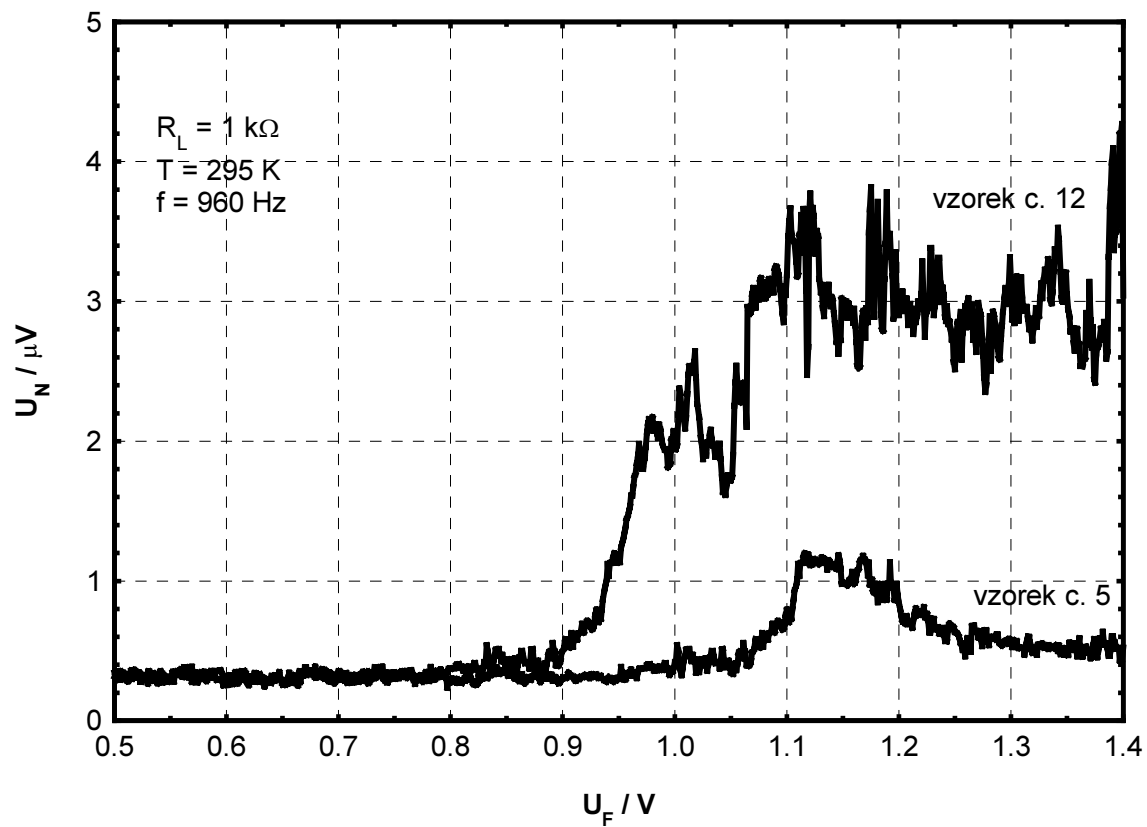
Obr. 2.4 V-A charakteristika vzorku č.15

2.3 ZÁVISLOST ŠUMOVÉHO NAPĚTÍ U_N NA NAPĚTÍ V PROPUSTNÉM SMĚRU U_F

Tato závislost byla měřena na všech testovaných vzorcích při pokojové teplotě ($T=295 \text{ K}$), pracovním kmitočtu 960 Hz a zatěžovacím odporu $1 \text{ k}\Omega$. Ze zdroje lineárně rostoucího napětí od $0,5 \text{ V}$ do $1,4 \text{ V}$ je přes rezistor R_L napájena měřená součástka. Šumový signál je vazebním kondenzátorem přiveden k pásmovému filtru 960 Hz . Kromě frekvenční selekce filtr i signál zesiluje tak, aby byl snadno použitelný ke vzorkování. Výstupní signál je zaveden k analogově digitálnímu převodníku, který převádí signál na osmibitová data a zapisuje je přímo do počítače. Každé hodnotě šumového napětí U_N je přiřazena hodnota propustného napětí U_F z číslicového voltmetru. Charakteristické průběhy naměřených závislostí jsou uvedeny na obr. 2.5.

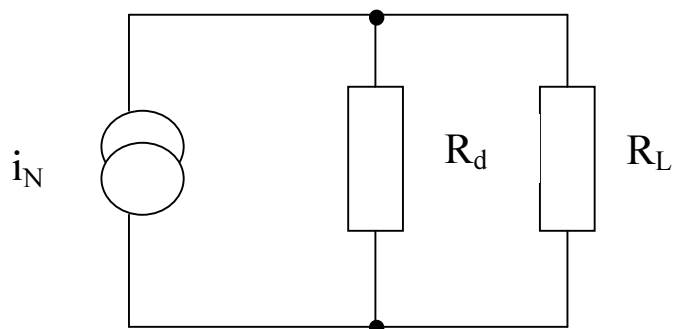
Výsledky experimentu potvrzují, že nadbytečný šum, pozorovaný u jednotlivých exemplářů souvisí s nadbytečným proudem z oblasti malých a středních proudů voltampérové charakteristiky. K rozboru šumových vlastností volíme náhradní obvod podle obr. 2.6.

Poslední podsoubor patří vzorkům, jejichž V-A charakteristika je podobná té, která je uvedena na obr. 2.4. Tyto diody prakticky neměly druhou oblast. Vyskytuje se u nich velký nadbytečný proud a dalším významným rysem je velký odpor kontaktů, který se projevuje už pro propustné proudy nad $0,5 \text{ mA}$. Dá se usuzovat, že velký nadbytečný proud je způsoben mechanismem povrchových svodů, a můžeme jej identifikovat prakticky v celé oblasti měřených hodnot. Z neexistence druhé oblasti V-A charakteristiky a přítomnosti velkého svodu je možné předpokládat, že výroba této podskupiny vzorků je zatížena značnou technologickou nekázní.



Obr. 2.5 Závislost šumového napětí U_N na propustném napětí diody U_F u vzorků 5, 12 a 15

Zdroj šumového proudu i_N je zapojen paralelně i ideálnímu přechodu o dynamickém odporu R_d . Šumové napětí je pak snímáno ze zatěžovacího odporu R_L .



Obr. 2.6 Náhradní elektrický obvod vzorku

Závislost $U_N = f(U_F)$ u vzorku č. 5 charakterizuje nejpočetnější podsoubor. Tato závislost má extrém, jehož poloha závisí na jednotlivých exemplářích diod. Pro vzorek č. 12 je charakteristický nárůst šumu v oblasti vyšších proudů, který je způsobem podle našich výpočtů zvýšenou hodnotou kontaktního ohmického odporu. Konečně vzorek č. 15 jehož šumová charakteristika je taktéž uvedena na obr. 2.5 se vyznačuje nárůstem hodnot šumového napětí již od malých hodnot propustného napětí. To svědčí o velké hodnotě nadbytečného šumu při malých propustných prouděch. Pokles šumového napětí při vyšších hodnotách U_F je způsoben snížením velikosti dynamického odporu R_d , který leží paralelně k zatěžovacímu odporu R_L , tedy celková hodnota této kombinace se snižuje.

U vzorků, které nevykazovaly žádný nadbytečný proud v V-A charakteristikách, bylo měření závislosti $U_N = f(U_F)$ velmi problematické, neboť úroveň generovaného šumové napětí se pohybovala na hranici pozadí aparatury, tedy byla prakticky neměřitelná.

2.4 ŠUMOVÉ CHARAKTERISTIKY PŘI KVAZISTACIONÁRNÍM REŽIMU

Vhodnějším parametrem pro posouzení existence a posléze i možného vzniku nadbytečného šumu je maximální hodnota spektrální napěťové šumové hustoty S_U měřená v propustném stavu luminiscenční diody nebo polovodičového laseru na zatěžovacím odporu, jehož hodnotu jsme po sérii provedených experimentů stanovili na 10 k Ω .

Podobně, po vyhodnocení provedených experimentů šumových parametrů, jsme do této skupiny zařadili i spektrální napěťovou šumovou hustotu S_U zjišťovanou v závěrném stavu na zatěžovacím odporu 100 k Ω . Všechny šumové charakteristiky jsme zjišťovali selektivně na vhodně zvolených kmitočtech z nízkofrekvenčního pásma, které nejsou žádnou harmonickou složkou odvozenou od kmitočtu sítě. Tímto opatřením jsme se vyhnuli největším úrovním rušení.

Naměřené průběhy spektrálních výkonových hustot napěťových fluktuací S_U v závislosti na kmitočtu při konstantním nastavení pracovního bodu a zatěžovacího odporu jsou uvedeny na obr. 2.7. Jelikož, závislost spektrální hustoty vzorku č.5 je kvalitativně shodná pro největší počet vzorků jsou vztahy pro náhradní obvod zapsány právě pro tento charakteristický průběh.

Dvě složky proudu, které se v oblasti I a II obecné voltampérové charakteristiky projevů, se i podílejí na šumu následovně:

První složka je dána nadbytečným proudem. Předpokládáme, že pro odpovídající hodnotu napěťových fluktuací lze psát vztah:

$$U_N = k \cdot I^{2\alpha} \quad (2-5)$$

kde exponent α je z intervalu (0;1)

Druhá složka proudu v rovnici (2-5) vede pouze ke vzniku výstřelového šumu. Pro šumové napětí na zatěžovacím odporu R_L můžeme psát:

$$u_N = i_N \cdot \frac{R_d \cdot R_L}{R_d + R_L} \quad (2-6)$$

Extrém závislosti $U_N(I)$ splňuje rovnici :

$$\frac{\partial U_N}{\partial I} = 0 \quad (2-7)$$

Odtud

$$I_N = \frac{\alpha}{R_L \cdot \beta(1-\alpha)} \quad (2-8)$$

Jak je vidět z poslední rovnice poloha extrému na grafu $U_N = f(U_F)$ závisí na velikosti R_L . Podmínkou extrému v tomto modelu je $0 < \alpha < 1$. Je-li $\alpha = 0,5$ pak :

$$I_m = \frac{1}{R_L \cdot \beta} \quad (2-9)$$

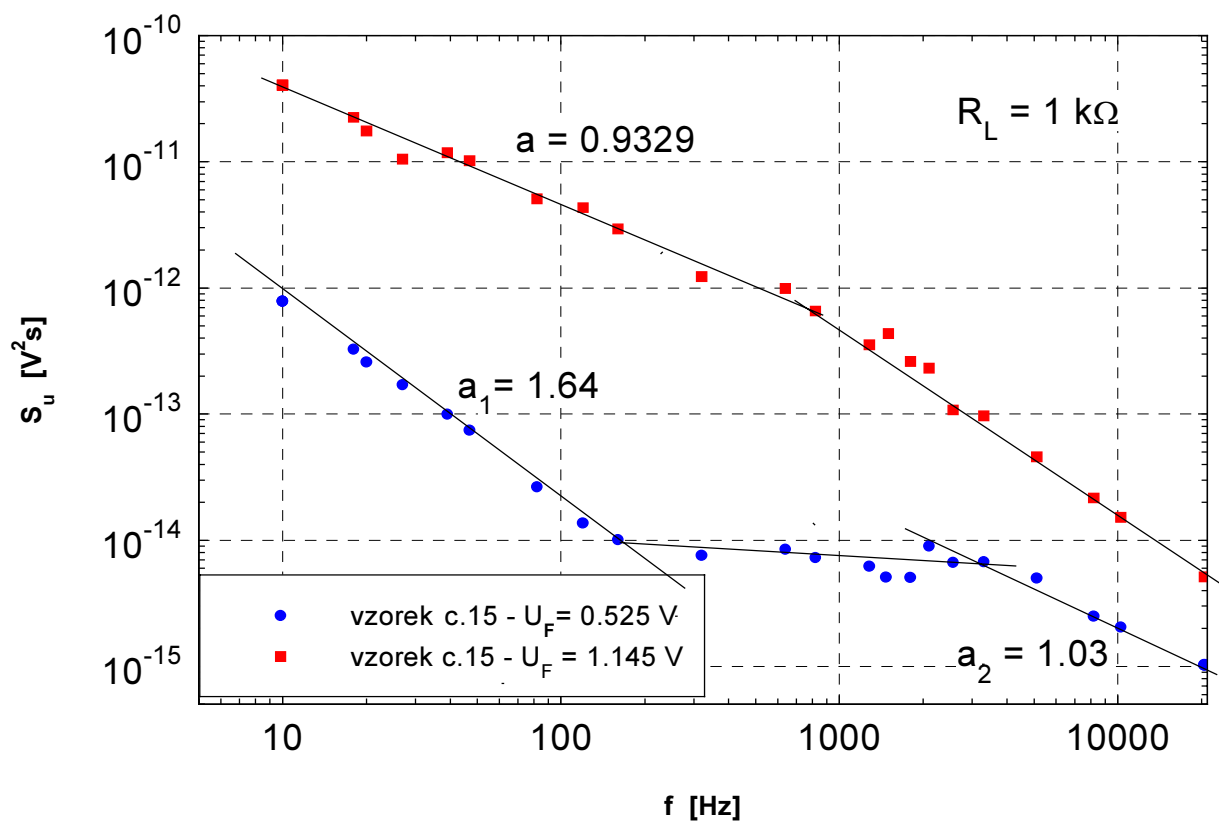
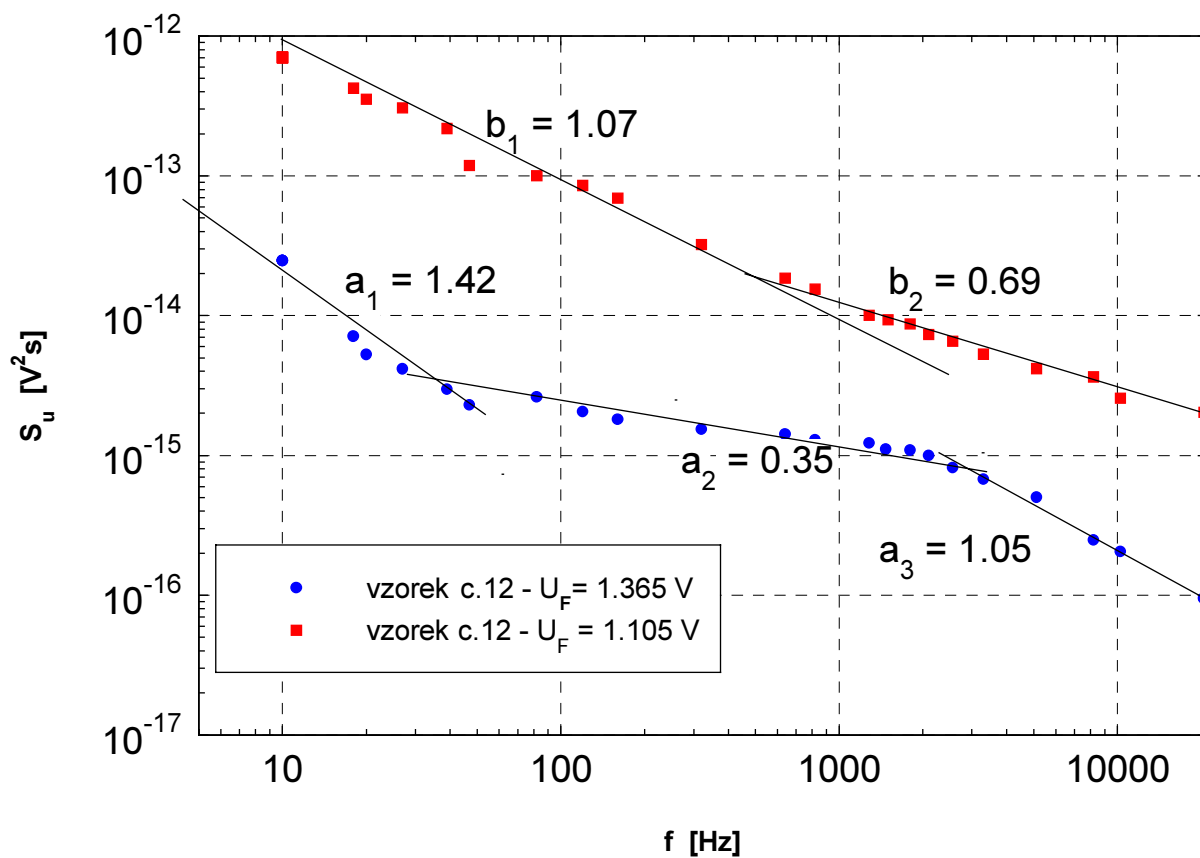
Srovnáním s voltampérovou charakteristikou pak umožňuje určit hodnotu exponentu β . Provedené srovnání vede k dobrému souhlasu získaných hodnot.

V kmítočtovém spektru se podle obr. 2.7 vyskytuje pouze složka šumu typu $1/f^\alpha$, kde $\alpha = 1,08$.

U vzorků, které vykazovaly nepatrnou hodnotu nadbytečného proudu bylo měření šumu v kvazistacionárním režimu velice obtížné, neboť spektrální výkonová hustota ležela těsně kolem úrovně šumu pozadí. Vzorky vykazovaly slabou složku šumu typu $1/f$ s exponentem zhruba 1.

Zajímavější je interpretace výsledků získaných na vzorku 12. Zde číselná hodnota S_U pro generačně rekombinační šum je vyšší pro nižší velikost propustného napětí ($U_F = 1,105$ V) ve srovnání s $U_F = 1,365$ V. Charakteristický pro tento vzorek je fakt, že složka generačně rekombinačního šumu se vyskytuje i při nejvyšších hodnotách propustného proudu. To je způsobeno pravděpodobně tím, že při tomto nastaveném pracovním bodě proud generátoru regeneračně rekombinačního šumu již protékal nízkou hodnotou výsledného odporu daného paralelní kombinací dynamického odporu R_d a zatěžovacího odporu R_L , zatímco vliv sériového odporu kontaktů se ještě neprojevoval dostatečně výrazně.

U posledního analyzovaného podsouboru (obr. 2.7) je S_U téměř o tři řády vyšší, což ukazuje na velice špatný vzorek. Předpokládáme, že tento šum je dán superpozicí asi generačně rekombinačních procesů s řádově odlišnými časovými konstantami.



Obr. 2.7 Frekvenční závislost šumové spektrální hustoty vzorků č. 12 a 15.

2.5 STANOVENÍ PARAMETRŮ PRACOVNÍCH CHARAKTERISTIK

Do této skupiny parametrů jsme zařadili relativní měření zářivého toku luminiscence, který jsme srovnávali při běžných pracovních podmínkách s odpovídající hodnotou zaručenou výrobcem. Tento parametr byl vyhodnocován před, během a po procesu stárnutí a průběžně hodnocen, zda je vhodnou predikcí pro určování spolehlivosti.

Zářivý přechod nosičů mezi energetickými pásy závisí na injekci minoritních nosičů. Při nízké injekci, koncentrace injektovaných minoritních nosičů závisí na velikosti přiloženého propustného napětí U_F . Každé změny v injekci nosičů mají za následek i změny ve V-A a C-V charakteristikách.

Účinnost luminiscenčního záření závisí na lokalizaci nezářivých rekombinačních center v aktivní části LED. Nárůst počtu nezářivých rekombinačních center vede jednak ke snížení úrovně zářivého luminiscenčního toku a jednak ke zvýšení rekombinačního proudu. Ten se významně projeví ve V-A charakteristikách pro propustné napětí U_F menší než je difusní napětí. Pro LED je hodnota U_F v řadě případů menší než 1,4 V. Nárůst koncentrace nezářivých rekombinačních center má za následek i zvýšení závěrného proudu přechodem I_R . Výpadky elektroluminiscence, které se objevují během jejího pracovního režimu mohou být způsobeny migrací iontů v oblasti přechodu nebo defekty spojenými s rekombinací nosičů či dalšími podobnými mechanismy.

Na základě provedených experimentů jsme zjistili, že podstatu vzniku těch defektů v přechodu PN během normálního pracovního režimu, které jsou původcem degradace LED. Nejpravděpodobnějším případem degradace je difúze nečistot a jejich zachycování na pastech a lokalizovaných stavech. Tyto defekty struktury se projevují tmavými proužky uvnitř segmentů oblastí, kde vzniká vlastní záření. S touto poruchou bývá spojený nárůst nadbytečného proudu, pokles závěrného napětí a zejména nárůst šumu součástky v závěrném směru přechodu PN.

Na základě analýz provedených na uvedených parametrech jsme definovali tzv. relevantní parametry, které mají nejvýznamnější opodstatnění při korelaci se spolehlivostí a zároveň jsou velice snadno měřitelné bez nároku na vytvoření zvláštních pracovních podmínek testované součástky. Mezi relevantní parametry jsme přiřadili hodnotu napětí v propustném směru U_{F1} , při dané hodnotě proudu obvykle 0,1 mA. Tento údaj poskytuje informaci o nadbytečném proudu způsobeným technologickou nedokonalostí.

Dalším stanoveným relevantním parametrem je maximální hodnota šumové spektrální hustoty S_{um} při přiloženém napětí v propustném směru U_{Fm} zjištěná na definované hodnotě zatěžovacího odporu. Pokud se na experimentálně zjištěné závislosti šumové spektrální hustoty S_{um} na propustném napětí U_F objeví více jak jedno lokální maximum, pak spektrální šumová hustota S_{um} charakterizuje nadbytečný šum v přechodu PN v propustném režimu. U uvedené závislosti se běžně předpokládá jedno lokální maximum závislé na velikosti zatěžovacího odporu a přiloženém napětí. Posledním relevantním parametrem je zářivý tok Φ změřený v doporučeném pracovním bodě.

Ostatní, dříve uvedené parametry vedou k nalezení degradačních mechanismů, které ovlivňují spolehlivost studovaných součástek také, ale jejich vypovídají o detailnějších fyzikálních vlastnostech.

Nadbytečný šum, který jsme pozorovali nad tepelným a výstřelovým šumem je podle rozborů uvedených na začátku většinou typu $1/f$. Zjišťování a vyhodnocování nadbytečného šumu z experimentálních údajů spektrální napěťové hustoty zjištěné na zatěžovacím odporu v propustném směru patří mezi základní metody degradace pomocí šumu. Důležité je znázornění napěťové spektrální hustoty v závislosti buď na propustném napětí nebo kmitočtu, zejména pro zjištění exponentu v závislosti $1/f$.

V dalších pracích jsme navrhli náhradní šumový obvod. Na mnoha vyhodnocovaných vzorcích, u nichž byla zjištěna přítomnost nadbytečného proudu, byla naměřena i významná hodnota

nadbytečného šumu. Na základě těchto poznatků jsme vytvořili náhradní elektrický obvod, v němž je nadbytečný proud představován proudovým generátorem, který je paralelně připojen ke zkoumanému přechodu. Tento proudový generátor představuje tzv. nadbytečný proud I_e a koresponduje s rezistancí R_e . Pak výsledný proud přechodem $I_F = I_0 + I_e$, kde I_e se určí podle vztahu :

$$I_e = I_{es} \exp [\beta \cdot (U_F - R_e I_e)] \quad (2-3)$$

Šum způsobený nadbytečným proudem je reprezentován šumový generátorem, který generuje spektrální proudovou hustotu fluktuací S_{ie} . Při nízkých hodnotách propustného napětí na analyzované součástce je šum generovaný náhradním rezistorem R_e a zkoumaným přechodem zanedbatelný malý, tak že spektrální hustota proudových fluktuací je dána jednoduchým vztahem:

$$S_i = S_{ie} / (1 + \beta_e I_e R_e)^2. \quad (2-4)$$

Na základě všech předchozích úvah je potvrzeno, že nadbytečný šum souvisí s nadbytečným proudem. Vznik nadbytečného proudu se dá vysvětlit jako parazitní laterální přechod, který je paralelně připojený přes běžný přechod PN, připravený pro užitnou funkci zkoumané součástky. Tuto metodu prognózy spolehlivosti potvrzuje korelace mezi šumem a nadbytečným proudem, kterou jsme u vzorků vykazujících krátkou dobu života pozorovali. Z těchto dílčích výsledků se dá uvést dílčí závěr.

Spektrální hustota S_{Um} , kterou jsme zahrnuli mezi relevantní parametry je vhodným indikátorem k nedestruktivnímu zjišťování kvality při technologické přípravě přechodů PN.

2.6 DEGRADACE LUMINISCENCE

Zářivé přechody nosičů mezi jednotlivými energetickými pásy závisí na injekci minoritních nosičů. Při nízké injekci, koncentrace injektovaných minoritních nosičů závisí na přiloženém propustném napětí U_F . Změny v injekci nosičů jsou úzce spojené se změnami luminiscence, které mohou být ve vzájemné souvislosti se změnami pozorovanými v průběžích V-A a C-V charakteristik.

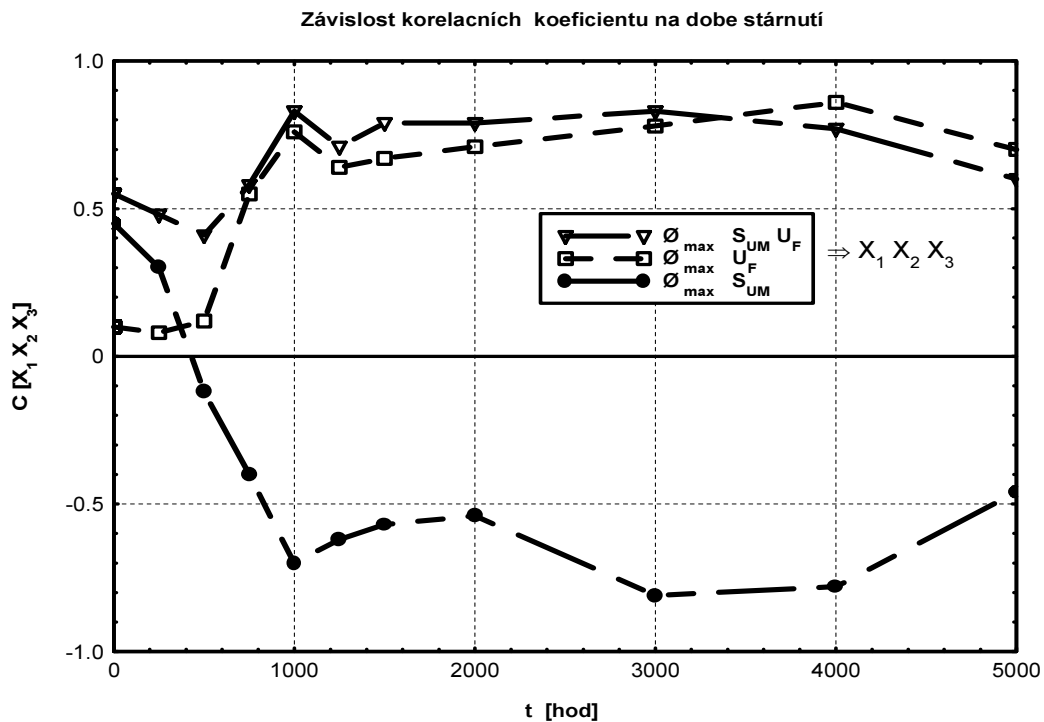
Účinnost luminiscence závisí na počtu nezářivých center, které se nachází v přechodu. S růstem počtu těchto nezářivých rekombinačních center nacházejících se v přechodu klesá luminiscence a naopak dochází k nárůstu rekombinačních složek proudu, což se projevuje v V-A charakteristikách při napětí v propustném směru menším než je napětí saturační. S nárůstem nezářivých rekombinačních center je spojen i nárůst závěrného proudu.

Proces stárnutí jsme definovali jako pracovní podmínky pro vybraný, poměrně rozsáhlý soubor vzorků při zvýšené teplotě a atypickém pracovním režimu. Během stárnutí souboru měřených vzorků diod jsme získali data odpovídající dvanácti periodám měření v celkovém časovém intervalu 5000 hodin.

Z experimentálně získaných hodnot jsme postupně zjišťovali základní statistické veličiny jako jsou střední hodnota, směrodatná odchylka, distribuční funkce a některé další. Proces stárnutí byl vyhodnocován také výpočtem koeficientu korelace. Zjistili jsme, že některé podsoubory vzorků nemohou být normalizovány i když do výpočtu nezahrneme extrémní hodnoty. Posuzování na základě zjištěné středné hodnoty a odhadu disperze nedávalo příliš dobré výsledky, protože jsme nemohli vyřadit vzorky, které během stárnutí přestaly fungovat. Přesto sledování a vyhodnocování jednotlivých parametrů během procesu stárnutí slouží v dobrém přiblížení ke stanovení spolehlivostních parametrů.

K vyhodnocení distribuční funkce odpovídající podsouboru vzorků luminiscenčních diod, které prošly procesem stárnutí jsme získali zářivý (luminiscenční) tok Φ jako náhodnou veličinu $X(t)$. Střední hodnota distribuční funkce je klesající časovou závislostí.

Během měření zářivého toku Φ na souboru vzorků luminiscenčních diod jsme považovali naměřené hodnoty n realizací za náhodné veličiny $X(t_i)$. Tyto hodnoty představují náhodný výběr ze základního souboru, který má distribuční funkci $X(t_i)$. Zjištěná distribuční funkce má normální rozdělení. S rostoucím časem klesá během provozu zářivý tok Φ a u některých vzorků LED klesá jeho hodnota pod mez, kdy se už nedá považovat za hodnotu, kterou udává výrobce jako nejnižší povolenou. Touto limitující hodnotou zářivého toku Φ jsme zvolili 50% hodnoty počáteční. Pokud klesne luminiscenční tok Φ pod takto definovanou mez, považujeme vzorek LED za vadný. Výsledná distribuční funkce je pak jednostranně omezená. Závěry potvrzují výpočty střední hodnoty zářivého toku souboru vzorků. Vyhodnocení zářivého toku určuje základní informace týkající se svítivosti jednotlivých vzorků. V souboru existovaly i vzorky, jejich zářivý tok Φ v čase rostl.



Obr. 2.8 Závislost korelačních koeficientů na době stárnutí

(max. zářivý tok $\Phi_{\max} = X_1$; maximální spektrální hustota $S_{UM} = X_2$;
zářivý tok $\Phi_{\max} = X_1$; napětí v propustném směru $U_F = X_3$;

zářivý tok $\Phi_{\max} = X_1$; maximální spektrální hustota $S_{\text{UM}} = X_2$, napětí v propustném směru $U_F = X_3$;

Dalším parametrem, kterým jsme popsali stárnutí souboru vzorků LED byl koeficient korelace. Na obrázku 2.8 uvádíme diagram, kde korelační koeficienty jsou vztaheny k zářivému toku, měřenému v kolmé vzdálenosti od středu LED (Φ_{\max}) a :

- a) maximální hodnotě šumové spektrální hustotě S_{um}
- b) propustnému stejnosměrnému napětí U_f při proudu $I_F = 100 \mu\text{A}$

Trojnásobný korelační koeficient Φ_{\max} , S_{um} a U_F je zobrazen na obr. 2.2. Podobné výsledky jsme získali i pro případ celkového koeficientu korelace mezi Φ_{\max} , S_{um} a I_R .

Během procesu stárnutí LED jsme dokázali, že dochází k degradaci základních parametrů jednotlivých vzorků a vlastní degradaci je možné zachytit pomocí následujících relevantních parametrů:

- a) nadbytečným proudem v propustném směru
- b) zvýšenou hodnotou šumu měřenou při zapojení diody v propustném směru
- c) poklesem zářivého (luminiscenčního toku.).

Tyto parametry jsou korelovatelné, což ukazuje diagram na obr. 2.8. Z něho je taktéž patrné, že závislosti koeficientů korelace mají podobnou závislost na čase.

Můžeme vyslovit i empirickou zkušenost, že u těch vzorků LED jejichž zářivý tok Φ byl blízký průměrné hodnotě získané z celého souboru, tyto vzorky vykazovaly větší spolehlivost. Na druhé straně, vzorky diod, jejichž zářivý tok Φ se výrazně lišil a to jak nízkou, tak i příliš vysokou hodnotou zářivého toku byly podstatně náchylnější k poruše funkčnosti a tím i ke kratší střední době života.

2.7 TESTER LUMINISCENČNÍCH DIOD

Na základě předchozích rozborů degradace, stárnutí a vyhodnocení experimentálně zjištěných hodnot jsme definovali relevantní parametry jejichž zjišťování a vyhodnocování nás nasměrovalo k návrhu a konstrukci automatického testeru spolehlivosti luminiscenčních diod. Luminiscenční diody (dále jen LED) jsou elektronické součástky, které využívají přechodu PN k přímé přeměně elektrického proudu na záření. Jsou to součástky, které jsou používány prakticky ve všech elektronických obvodech jako indikátory stavů, zobrazovače veličin nebo jako informační tabla. Zejména při využívání ve velkých zobrazovacích jednotkách je kladen zvláštní důraz na jejich dlouhou životnost a zejména spolehlivost, která garantuje plnou čitelnost a úplnost vysvícených informací.

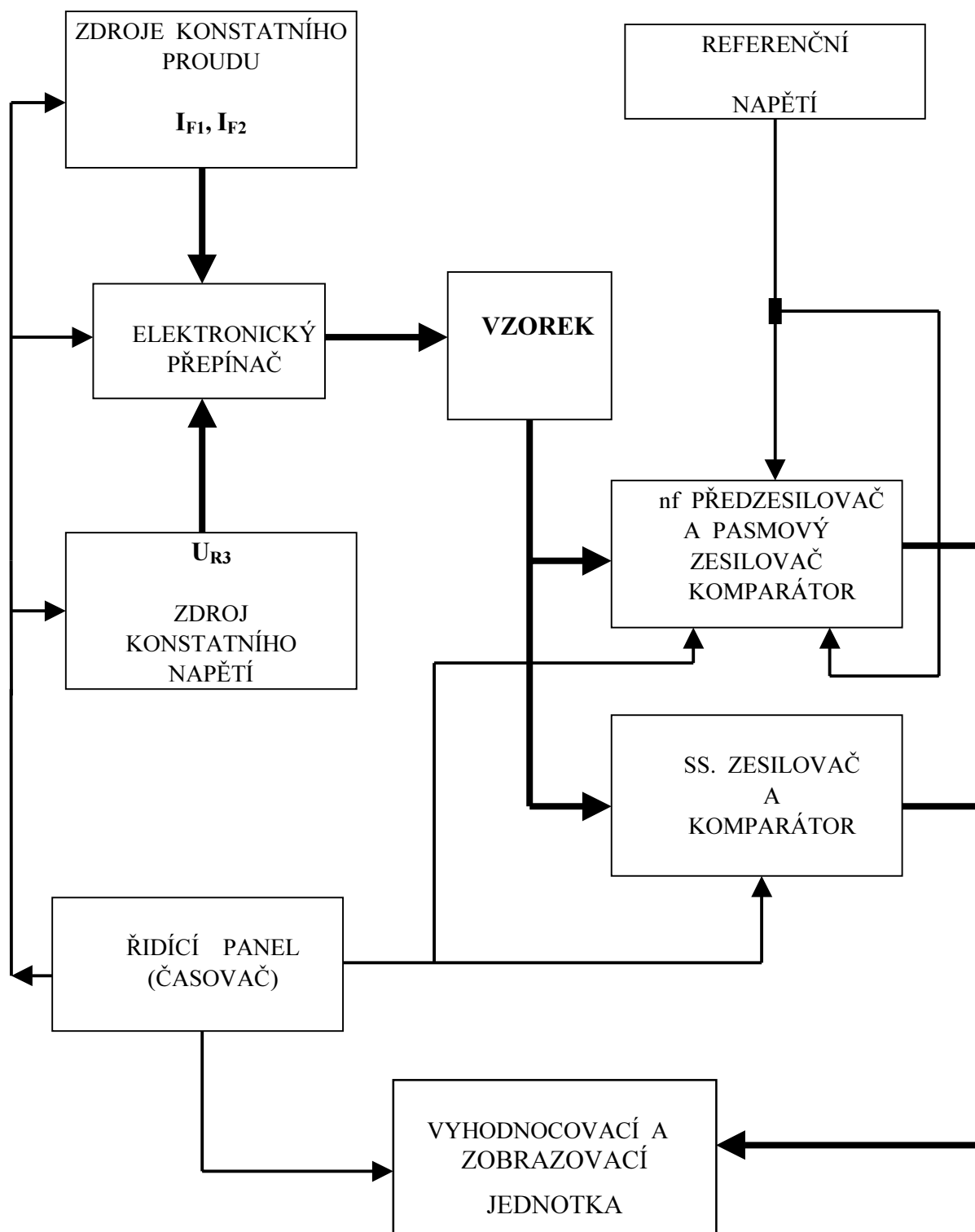
Vzhledem k faktu, že ve velkých informačních svítivých jednotkách je využíváno velké množství diod LED a obvykle při poruše více jak 3% součástek z použitého množství se stává informace nečitelnou nebo zkreslenou je výběr spolehlivých elementů prvořadým úkolem konstruktérů.

Předkládaný tester luminiscenčních diod využívá při testování spolehlivosti šumových a transportních charakteristik uvedených součástek.

Tester byl navržen k předběžnému členění větších souborů luminiscenčních diod s cílem vyhodnotit spolehlivost jednotlivých vzorků. Vyhodnocení spolehlivosti testovaných součástek je prováděno pomocí automaticky pracujícího zařízení. U každé testované součástky jsou změřena šumová napětí U_{N1} až U_{N3} , velikosti napětí v propustném směru U_{F1} až U_{F3} , proud v závěrném směru I_{R3} a relativní velikost zářivého toku Φ . Měření probíhá tak, že pracovní bod LED nastavován nejdříve ze zdroje konstantního proudu velikosti 10 nA, 10 mA v propustném směru a nakonec je na diodu připojeno stejnosměrné závěrné napětí o velikosti 5V.

Uvedené hodnoty vyplynuly z rozsáhlých souborů měření, při nichž byly měřeny a vyhodnocovány šumové charakteristiky luminiscenčních diod tj. závislosti $S_u = f(U_f)$ při různých teplotách PN přechodu LED, při různém zatěžovacím odporu R_L , při různém středním kmitočtu f_0 , různé šířce kmitočtového pásma B a různém stupni degradace. Byly experimentálně stanoveny

Obr. 2.9 Blokové schéma realizovaného testeru LED



maximální hodnoty šumového napětí U_N v závislosti na propustném proudu I_F , charakteristické velikosti napětí v propustném směru U_F , velikost šumového napětí v závěrném směru a relativní hodnota zářivého toku. Všechny definované hodnoty šumových, transportní a vyzařovacích charakteristik byly stanoveny s ohledem na maximální spolehlivost.

Funkce realizovaného testeru využívá popsaných vlastností a je patrnější z blokového schématu obr. 2.9. Tester byl zkonstruován, laboratorně ověřen a na zakázku praxe předán k používání do Tesly Kolín.

3 LOKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY - NANOMETROLOGIE

V rámci projektu Barrande č. 98022 který jsme získali ve spolupráci s Universitou v Besançonu, popisujeme použití této metody jako srovnávací analýzu vlivu stárnutí v mikroskopických rozměrech na struktury vysoce výkonných laserových diod, které mají vlnovody s různými charakteristikami. Řešili jsme zde, z hlediska optického blízkého pole, vliv stárnutí na koncentraci defektů uvnitř aktivní vrstvy a na nezářivé rekombinační procesy v blízkosti povrchu. Dále jsme ukázali, že struktura laserové diody hraje důležitou roli pro proces tvorby obrazů, který je analyzován pomocí paprskového modelu. SNOM mikroskop je vhodné zařízení i pro spektroskopii fotoproudu v blízkém poli. Je možné pomocí něj studovat lokalizaci defektů a vliv procesu stárnutí pro jednoduché luminiscenční i vysoce výkonné laserové diody.

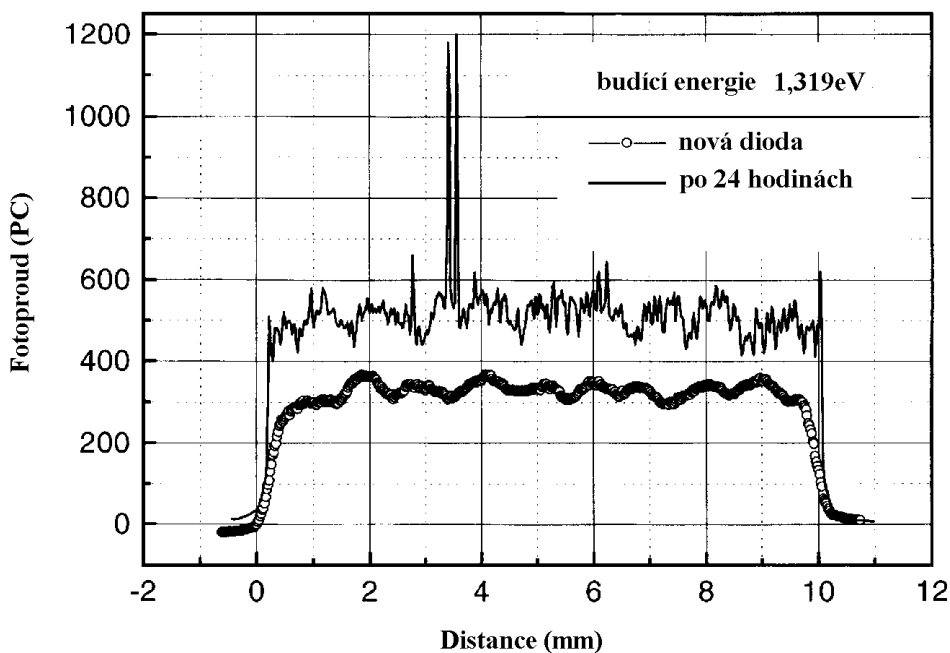
Vzhledem k velkým zkušenostem ze šumové spektroskopie vyzařovacích diod jsme v několika pracích provedli srovnávací studie prostorového rozložení spekter se superrozlišením pro výkonné laserové diody, které se vyznačují různou stavbou vlnovodné struktury. Diody byly zkoumány před a po akcelorovaném stárnutí laserové struktury. To bylo realizováno při teplotě 50 °C po dobu 720 hodin. V experimentech jsme dosáhli subvlnové příčné rozlišovací schopnosti, a to pomocí optické sondy pracující v režimu blízkého pole. Ukazuje se též cesta, jak je možné využít tuto metodu pro analýzu mikroskopických procesů stárnutí optoelektronických polovodičových součástek. Provedené experimenty umožňují pohled na mechanismus vzniku poruch v p-i-n přechodech InAlGaAs/GaAs laserů, které podléhají procesu zrychleného stárnutí. Pomocí metody BPM (beam propagating method) jsme studovali vliv vlnovodné struktury a procesů povrchové rekombinace na rozdělení fotoproudů v blízkém poli. Vzhledem k nedestruktivní povaze metody je navržená technika obzvlášť přitažlivá pro in-situ analýzu výkonných laserových diod.

Pevnofázové lasery a výkonné laserové diody se používají např. pro čerpání pevnofázových laserů, generování modrého a UV záření, např. pomocí zdvojení frekvence. Vysoká hustota výkonu v diodách a vysoká intenzita světla v blízkosti hran zrcadel způsobují změny ve struktuře aktivní vrstvy laseru, což působí na životnost těchto materiálů. Proto má mikroskopické studium procesu stárnutí výkonných laserových diod značný význam pro zvýšení výkonnosti a životnosti těchto součástek. Tento problém byl zkoumán různými metodami, jejichž přehled je v pracích Fukudy [5] a Elisejeva [6]. Navíc, z fundamentálního hlediska představují vysoce výkonné laserové diody jedinečný modelový systém pro studium procesů vzniku defektů a migrace, které se objeví v důsledku vysokého vnitřního elektrického pole.

Pochopení mechanismu stárnutí ve vrstevnatých strukturách laserových diod je dosti komplikovanou záležitostí ve srovnání s případy jednoduchých vyzařovacích diod (LED). Je to způsobeno faktem, že vlastnosti těchto součástek se mohou měnit případ od případu. To je patrné

na obr. 3.1., kde je znázorněn makroskopický prostorově rozlišený signál fotoproudu (rozlišení $< 30 \mu\text{m}$) pro InAlGaAs laserovou strukturu sestávající z 50 elementů při excitaci světlem pod zakázaným pásem ($\lambda = 940 \text{ nm}$), před a po 24 hodinách působení akcelerovaného stárnutí.

Nová dioda nevykazuje žádné výrazné odchylky v prostorovém rozložení fotoproudu od jednotlivých vysílačů, vzdálených od sebe $200 \mu\text{m}$. Pro diodu, která podstoupila proces stárnutí, je vidět značné fluktuace prostorového rozložení fotoproudu. Dva z vysílačů dosahují až dvojnásobné hodnoty fotoproudu než ostatní.



Obr. 3.1 Makroskopický sken fotoproudu pro DQW step-indexovou LD

Dioda sestává z 50 vysílačů o šířce $60 \mu\text{m}$, oddělených vrstvou $140 \mu\text{m}$, před a po akcelerovaném stárnutí. Energií excitace $1,319 \text{ eV}$ ($\lambda = 940 \text{ nm}$). Zatímco nová dioda nevykazuje téměř žádné změny fotoproudu napříč strukturou, signál diody, která prošla procesem stárnutí, fluktuuje od vysílače k vysílači. Dva z vysílačů, které se nacházejí $3,5 \mu\text{m}$ od levého okraje, vykazují signál fotoproudu, který je 2x vyšší, než u ostatních. Prostorové rozlišení tohoto makroskopického měření je $30 \mu\text{m}$. Nová dioda nevykazuje žádné odchylky v prostorovém rozložení fotoproudu od jednotlivých zářivých rekombinačních center, která jsou od sebe vzdálena asi $200 \mu\text{m}$. U diody, která podstoupila proces akcelerovaného stárnutí jsme naměřili signál, z něhož jsou patrné značné fluktuace prostorového rozložení proudu. Dva z vysílačů dosahují až dvojnásobné hodnoty.

K dosažení vyššího rozlišení si uvedená pozorování zákonitě žádají použití analýzy pomocí mikroskopických metod. Nedávno byla zavedena NFPS (Near Field Photocurrent Spectroscopy) jako nový nástroj pro mikroskopické monitorování procesu stárnutí ve vysoce výkonných laserových diodách [28]. Při této technice blízké pole od nanoapertury - hrotu optického vlákna - generuje fotonosiče indukující fotoproud ve vzorku, který se chová jako fotodiody. Nachází-li se apertura v těsné blízkosti vzorku, je možné dosáhnout subvlnových rozměrů excitační skvrnky. Průměr skvrnky může dosáhnout i hodnot $< 50 \text{ nm}$. Rozlišení NFPS je určeno velikostí excitační skvrnky, tj. plochou interakce mezi zářením a hmotou, absorpční délkou záření a transportními procesy minoritních nosičů. To vše způsobí, že příčné rozlišení zařízení $< 250 \text{ nm}$.

Tato metoda se vyznačuje některými vlastnostmi, které jsou velmi atraktivní při analýze LD. Kombinuje se v ní vysoká prostorová rozlišovací schopnost s nedestruktivním charakterem měření a možností excitace struktury pomocí laditelného světelného zdroje. To vše umožňuje analýzu LD v různém stádiu stárnutí struktury, aniž by se tím narušila výkonnost zařízení.

Experimentální zařízení pro měření lokálních fotoproudů v blízkém poli je tvořeno upraveným SNOM mikroskopem, na jehož pracovním stolku je umístěn vzorek laserové struktury. Struktura je excitována plynule laditelným světlem v rozsahu 500 - 950 nm, které je přenášeno hrotem optického vysílače, umístěného v těsné blízkosti povrchu, na vzorek.

Hrot je pomocí modifikovaných optických střižných sil udržován v konstantní vzdálenosti od povrchu vzorku a sleduje jeho topografii. Mechanismus střižných sil spočívá v tlumení rezonančních příčných kmitů hrotu sondy při přibližování sondy k povrchu. V oblasti 20 - 10 nm od povrchu dochází k prudkému tlumení kmitů o frekvenci 30kHz. Tyto rezonanční příčné kmity hrotu sondy s amplitudou < 10 nm jsou vybudeny pomocí kmitajícího piezoposuvu. Amplituda kmitů hrotu je měřena pomocí nasměrování světla z osvětlovací LD ($\lambda = 670$ nm) na kmitající hrot a zobrazením výsledného difrakčního obrazce na kvadrantovou fotodiodu. Střídavý signál na polích kvadrantové fotodiody umožní přímé měření amplitudy kmitů a pomocí zabudované zpětnovazební smyčky je možné nastavit svislou vzdálenost hrotu vzhledem k povrchu zkoumané LD s přesností 1 nm. Měřením napětí na z- piezočlenu přímo určíme informaci o topografii povrchu vzorku. Tento topografický obraz je snímán současně s obrazem fotoprodu v blízkém poli, což vytváří prostorovou korelaci mezi fotoproudem v blízkém poli a strukturou vrstvy laserové diody.

V tomto případě našeho SNOM mikroskopu se využívalo velmi ostré sondy s vrcholovým úhlem 10° , která byla pokovena 50-100 nm vrstvou Al či Au, čímž vznikla nanoapertura o průměru < 30 nm. Tím dosáhla světelná skvrnka na povrchu struktury průměru 60-100 nm. Optické vlákno skenuje povrch LD v režimu konstantního proudu.

Topografické obrazy, vytvořené pomocí této sondy, vykazují příčné rozlišení lepší než 12 nm. Optické rozlišení pokovených sond bylo testováno na standardních AFM mřížkách a bylo < 50nm. Průhyb trubičky piezoskenneru byl linearizován pomocí software a kalibrován na mřížkách AFM s kalibrační chybou $\pm 5\%$. Velikost skenované plochy byla $10 \times 10 \mu\text{m}$ a v každém řádku bylo zaznamenáno 100 nebo 200 datových bodů, tzn. celkem 10 000 či 40 000 bodů.

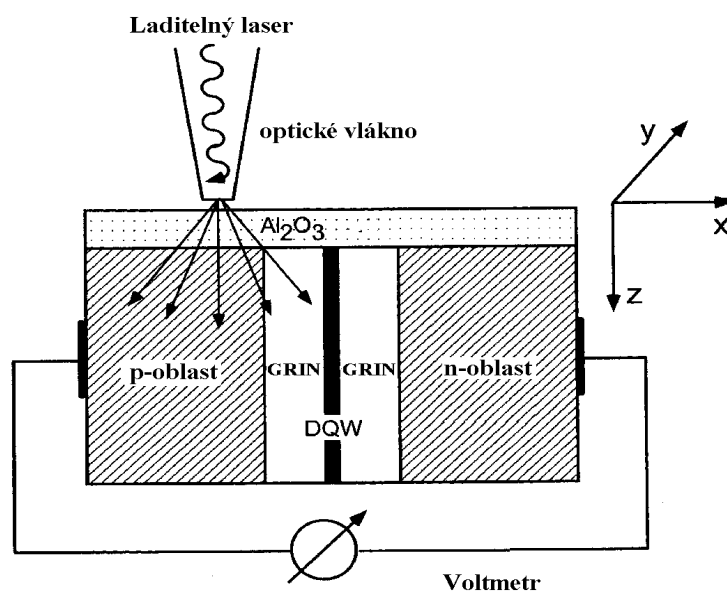
Měřená struktura vrstvy DQW-GRIN diody se skládá ze dvou GaAs kvantových jam o šířce 12 nm, kolem nichž jsou 220 nm široké nedopované $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ($0,3 < x < 0,6$) vrstvy s gradientní změnou indexu lomu a 1,5 - 2 μm široké p- či n- dopované $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$ ochranné vrstvy.

Pro buzení vzorků byl použit jednak spojitě laditelný ultrafialový dusíkový laser ($\lambda = 377$ nm) s barvičkovou hlavou, jednak He-Ne laser. Fotoindukované napětí na vzorku bylo měřeno synchronním nanovoltmetrem na p- a n- kontaktech LD bez předpětí. Světlo laseru bylo amplitudově modulované frekvencí 1 kHz. Do optického vlákna byl vevázán výkon 3 mW, v hrotu klesla jeho hodnota na 10 - 100 nW. Tuto hodnotu jsme detekovali ve vzdáleném poli. Takto malé výkony jsou třeba k tomu, aby ohřev vlákna neovlivňoval experimenty. Detekované fotoindukované napětí je v rozsahu 1 μV - 1 mV. Makroskopická spektra fotoprodu byla zaznamenána pomocí standardního optického mikroskopu, jehož prostorové rozlišení < 30 μm , halogenové lampy, monochromátoru a synchronního voltmetru .

Cílem práce bylo sledovat lokální charakteristiky fotoprodu dvou kvaternálních struktur InAlGaAs/GaAs s různými vlnovodnými kanálky, které jsou použitelné jako vysoce výkonné LD. První strukturu tvořila dvojité kvantové jámy DQW s gradientním průběhem indexu lomu, oddělená tenkou heterostrukturou, vytvořenou epitaxní depozicí metalorganických par na n- GaAs substrátu. DQW se nachází v symetrické štěrbině, která vznikla mezi dvěma 220 nm širokými nedopovanými $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ($0,3 < x < 0,6$) vrstvami s gradientní změnou indexu lomu. Ty jsou obklopeny p- a n- dopovanými 1,5 - 2 μm tlustými ochrannými pláštěmi z $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$ majícími

energie zakázaného pásu $E_g = 2,2$ eV. Dopovaná oblast má svůj maximální index lomu uvnitř oblasti DQW-GRIN.

Druhou studovanou strukturou byla DQW se skokovou změnou indexu lomu, kde DQW oblast leží uprostřed nedopované, 220 nm široké vrstvy $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ ($E_g = 1,8$ eV). V obou strukturách vzniká zisk vedením pouze v kontaktních proužcích a takto vytvořená maticová struktura je položena p-stranou na měděný chladič. Odrazivost předního čela struktury byla upravena na hodnotu $R = 0,05$ napařením antiodrazné Al_2O_3 vrstvy o tloušťce 120 nm. Energie vyzářeného fotonu laserové diody byla u všech zkoumaných struktur $h\nu = 1,53$ eV, tj. $\lambda = 808$ nm. Proces akcelerovaného stárnutí byl simulován ohřevem struktur při 50°C po dobu 1200 hodin.



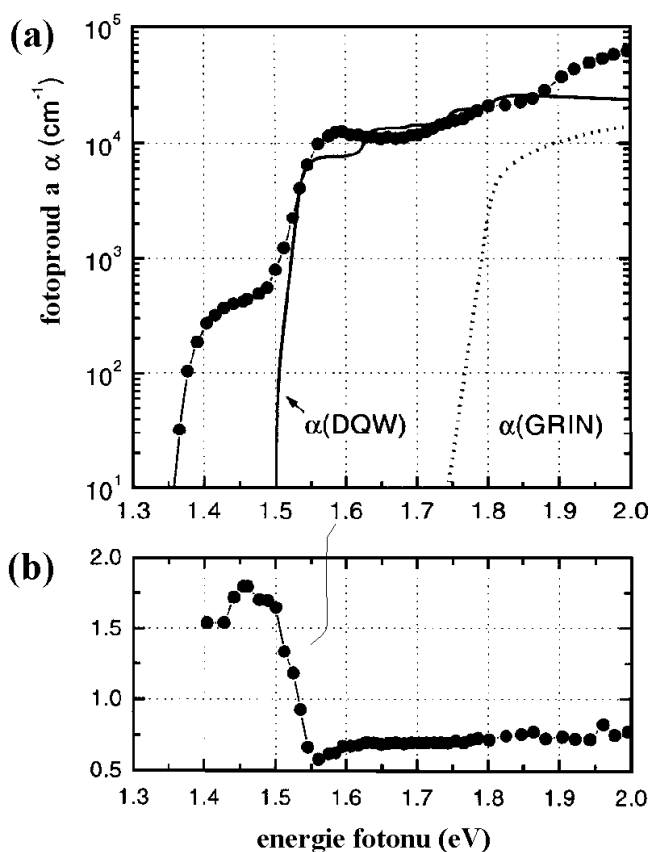
Obr. 3.2 Schéma experimentu pro měření fotoproudu v blízkém poli [27]

3.1 VÝSLEDKY A DISKUSE

Pro srovnání byla měřena i spektra fotoproudu ve vzdáleném poli. Na obr. 3.3 jsou znázorněny výsledky makroskopických měření spektra fotoproudu pro novou DQW-GRIN laserovou diodu (plná kolečka), která vyzařuje fotony o energii 1,53 eV (808 nm). Prostorové rozlišení měření bylo $30 \mu\text{m}$. V obr. 3.3 a jsou znázorněny i vypočtené hodnoty spektra absorpční hrany DQW $\alpha_{\text{DQW}}(h\nu)$ (plná čára) a dolní části GRIN struktury $\alpha_{\text{GRIN}}(h\nu)$ (tečkovaná čára) (v cm^{-1}). Při této konfiguraci experimentu se struktura laserové diody chová jako fotodioda, na níž dopadá světlo o určité energii fotonů. Tvar spektra fotoproudu úzce souvisí s koeficientem absorpce celé struktury. Pro všechny polohy spektra korelují hodnoty signálu fotoproudu se sumou příspěvků $\Sigma\alpha_i(h\nu)$ od jednotlivých vrstev struktury (viz obr. 3.3 a). Navíc závisí signál na gradientu celkového potenciálu, skládajícího se z příspěvků od hran pásů a profilu dopantů a na difúzi fotogenerovaných nosičů do intrinsické oblasti a také na penetrační hloubce světla do laserové struktury.

V obr. 3.3 je možné rozlišit tři charakteristické oblasti příspěvků fotonů. Nejvýznamnějším znakem je značný vzrůst signálu při $E_g > 1,55$ eV, tj. pro hodnoty vyšší než je energie vyzařovaných fotonů z DQW ($E=1,53$ eV). Signál zřetelně roste od počátku mezipásové absorpce přechodu od první těžké díry k prvním subpásmu elektronů ($1\text{ hh} \rightarrow 1\text{ e}$) v DQW (spojitá čára v obr. 3.3 a). Opačný přechod způsobuje laserovou emisi. V oblastech energie mezi 1,55 - 1,75 eV zůstává intenzita signálu fotonů přibližně konstantní. Při energiích nad 1,75 eV se vytvoří absorpce v gradientních vrstvách (tečkovaná čára), což způsobí další růst intenzity při vyšších energiích.

Třetím významným znakem spektra fotonů je nízké širokopásmové rameno pod hranou efektivního pásu (1,53 eV) v oblasti 1,5 - 1,3 eV. Měření fotonů, které jsme pomocí Fourierovy transformace na těchto vzorcích provedli, ukazuje, že toto rameno sahá dokonce dále do IČ oblasti, nejméně až k 0,8 eV. Takový příspěvek pásma pod úrovní zářivé energie ke spektru fotonů vyžaduje mechanismus absorpce nízkých úrovní energie, jako je např. přechody mezi defektem a pásem. Závislost energie na samotném spektru fotonů neumožní jednoznačné přiřazení mikroskopické povahy těchto přechodů. Avšak můžeme usoudit, že proces stárnutí LD zvyšuje migraci přirozených bodových defektů - např. vakancí.



Obr. 3.3 a) Makroskopické spektrum fotonů (při 20°C) (plná kolečka) nové výkonné LD se strukturou DQW-GRIN, vyzařující fotony o energii $E_g = 1,53$ eV. V obrázku je možné rozlišit tři charakteristiky:

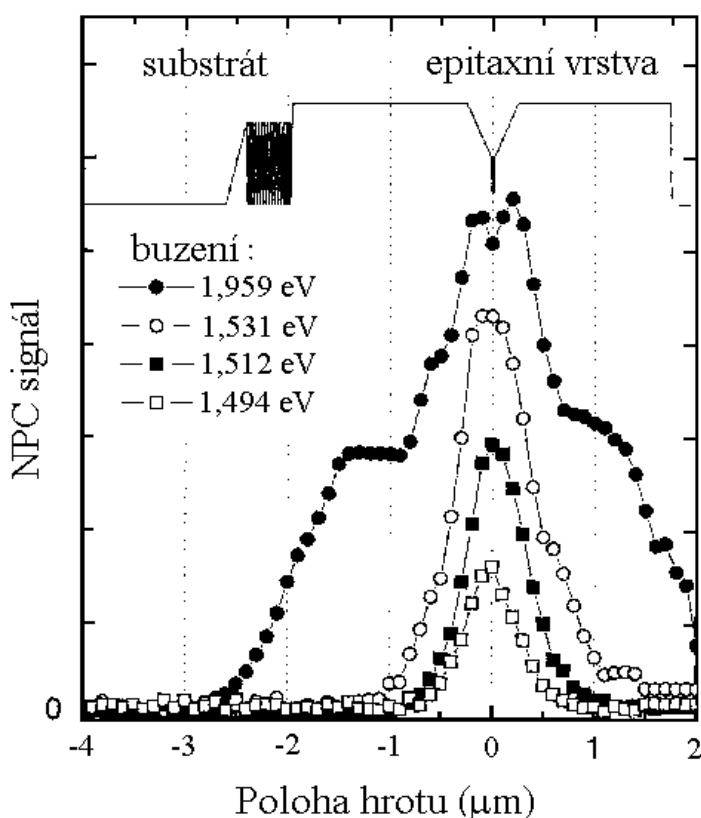
- aa) slabé rameno v oblasti pod energií přechodu (tj. v oblasti 1,3 - 1,5 eV), způsobené absorpcí na příměsích nebo defektech,
- ab) DQW signál, který převládá ve spektru energií nad 1,55 eV,

- ac) absorpce na GRIN vrstvách, která zvyšuje signál při energiích vyšších než 1,8 eV. Vypočtené hodnoty koeficientu absorpce (v cm^{-1}) pro DQW jsou znázorněny plnou čarou a pro spodní část GRIN tečkovanou čarou.
- b) Poměr makroskopických hodnot fotoproudu po stárnutí a před stárnutím pro DQW-GRIN laserovou diodu. Na obrázku je patrný prudký nárůst příspěvků od defektů v oblasti pod energií vyzařování, zatímco signál DQW pro diodu, která podstoupila proces urychleného stárnutí, klesá při energiích větších jak 1,55 eV jen zvolna.

Takové procesy ovlivňují spektra fotoproudu mnohem výrazněji než např. migrace cizích atomů (např. dopujících materiálů) do aktivní vrstvy.

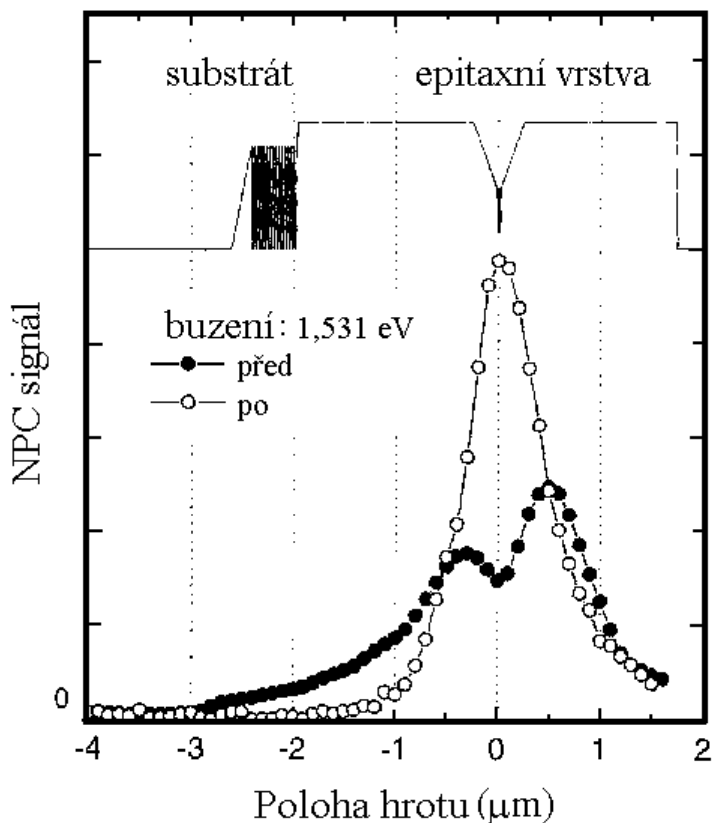
Porovnáme-li nyní výsledky spekter fotoproudu v blízkém poli, které jsme dostali v případě nové diody a též struktury po proceduře akcelerozaného stárnutí. Důležité se jeví dva problémy. Vliv stárnutí na koncentraci a rozložení příměsí a vliv stárnutí na nezářivé rekombinační procesy v blízkosti povrchu, které byly objeveny ve spektru fotoproudu v blízkém poli pro energie pod, v blízkosti a relativně dostatečně nad energií fotonu laseru pro DQW-GRIN diodu před a po zrychleném stárnutí.

Na obrázku 3.4 je uveden sken fotoproudu v blízkém poli pro excitační energie $E_{\text{ex}} = 1,959$ eV; 1,531 eV; 1,512 eV; 1,494 eV pro diodu DQW/GRIN po aplikaci procesu akcelerozaného stárnutí.



Obr. 3.4 Skeny fotoproudu v blízkém poli pro $E_{\text{ex}} = 1,959$ eV, 1,531 eV, 1,512 eV a 1,494 eV pro DQW-GRIN diodu po procesu akcelerozaného stárnutí. Směr skenování je kolmý k aktivní vrstvě. Maximální hodnota signálu pro každý přechod byla normalizována, abychom mohli lépe porovnat přechody pro různé excitační energie.

Směr skenu je kolmý k aktivní vrstvě. Tvar fotoproudů i jeho amplituda jsou v blízkém poli podobné jak před, tak i po stárnutí. Signál tvoří široké plato, jestliže se hrot sondy nachází nad n- či p- dopovanou oblastí a malý pík uvnitř DQW-GRIN vrstvy. Plato vzniká v důsledku absorpce nešířených vln ve vrstvách DQW-GRIN, zatímco menší pík pochází od absorpce vedených šířících se vln uvnitř DQW oblasti a proces stárnutí jej prakticky neovlivňuje. Stárnutí mělo značný vliv na tvar signálu fotoproudu v blízkém poli pro budící energie kolem pásu aktivní vrstvy. Signály fotoproudu v blízkém poli vykazují jeden vrchol v DQW oblasti. Šířka těchto vrcholů se mírně zvětšuje s rostoucí energií. Tyto výsledky jsme porovnali s novou diodou při budící energii 1,531 eV viz. obr. 3.4.



Obr.3.5 Porovnání skenů fotoproudu v blízkém poli pro $E_{ex} = 1,531$ eV pro DQW-GRIN laserové diody před (plné kroužky) a po (prázdné kroužky) akcelarováním stárnutím. Při této budící energii se nemění intenzita makroskopického spektra, což odpovídá integrálu přes sken fotoproudu v blízkém poli. Na obrázku je znázorněn i tvar potenciálu vodivostního pásu (plná čára).

Při této budící energii zůstává intenzita makroskopického spektra fotoproudu a tím i integrál spektra fotoproudu v blízkém poli ve směru kolmém na aktivní vrstvu při stárnutí nezměněna. Přesto stojí za povšimnutí dvě výrazné změny ve spektru fotoproudu v blízkém poli. První z nich je, že struktura dvojího maxima pro polohy hrotu v blízkosti oblasti DQW-GRIN před stárnutím se změnila na jediný vrchol po procesu stárnutí. Druhá, že široké pozadí, které jsme našli pro novou diodu při polohách hrotu v p-dopované oblasti vrstvy pláště, po aplikaci procesu akcelarování stárnutí zmizelo. V případě nové diody jsme předpokládali, že toto pozadí pocházelo od absorpce nevedených vln v DQW oblasti. Tzn., že DQW příspěvek k signálu fotoproudu v blízkém poli prudce klesá v závislosti na procesu stárnutí diody.

V této části komentáře jsme provedli srovnávací studii prostorově rozlišitelných spekter fotoproudu v blízkém poli pro dvě výkonné laserové diody, vyznačující se různými vlnovými

charakteristikami v případě před a po procesu akcelerovaného stárnutí diody (720 hodin při teplotě 50°C). Bylo dosaženo subvlnné rozlišení pomocí buzení laserové struktury pomocí nanometrické apertury odrazného SNOM mikroskopu.

Tvar skenovací čáry závisí značně na velikosti rychlosti rekombinace na povrchu. Z tohoto důvodu je spektroskopie fotoproudu v blízkém poli významným nástrojem pro mikroskopickou analýzu vlivu stárnutí na rekombinační proces na povrchu. Kvantitativní extrakce rekombinačních procesů na povrchu však vyžaduje detailnější analýzu experimentálních dat pomocí komplikovaných modelů popisujících interakci v blízkém poli.

Ukázali jsme, že spektroskopie fotoproudu v blízkém poli je vhodná metoda, která může poskytnout přímý pohled na vliv stárnutí, které ovlivňuje mikroskopické procesy tvorby defektů a povrchových rekombinací v aktivní vrstvě výkonných laserových diod.

4 ZÁVĚR

V předložené práci jsme se věnovali problematice studia experimentálních metod vhodných pro nedestruktivní testování polovodičových součástek a materiálů. Práce je rozdělena do dvou částí. První pojednává o nedestruktivní šumové spektroskopii. Detailně jsou zde rozebrány šumové a transportní charakteristiky luminiscenčních diod, jejichž výzkumem jsme se v rámci řešených grantů a výzkumné orientace pracoviště zabývali. Ve vybraných publikacích, které tvoří přílohu práce, jsme provedli rozbor jednotlivých relevantních parametrů na definovaných souborech vzorků.

Šumové diagnostické metody vycházejí ze skutečnosti, že transport nosičů náboje, vyzařování a pohlcování světla a další procesy, probíhající při vedení proudu v materiálech a součástkách jsou stochastické povahy a projevují se fluktuací proudu, napětí či jiných fyzikálních veličin. Statistické charakteristiky těchto fluktuací přinášejí další cenné informace o procesech, probíhajících ve sledovaných soustavách, a doplňují tak střední hodnoty makroskopických veličin o další momenty, jako jsou např. korelační funkce, výkonová spektrální hustota nebo další statistické charakteristiky, jako je hustota rozdělení sledovaného náhodného procesu.

Proudové fluktuace se projevují ve vnějším obvodu jako proudový nebo napěťový šum, u elektroluminiscenčních součástek také jako šum záření. Typ zdroje šumu a jeho lokalizaci je možno určit z rozboru šumových a transportních charakteristik. Vedle základních typů šumu, jejichž zdroje nelze odstranit (např. tepelný šum, generačně-rekombinační šum v polovodičích nebo výstřelový šum ve strukturách s PN přechody), existují také tzv. nadbytečné šумы. Předpokládáme, že technologické závady při výrobě materiálů a součástek se projevují jako zdroje nadbytečných proudů a nadbytečných šumů. V mnoha případech je potom proudový šum citlivějším indikátorem poruch než střední hodnota proudu.

Vyjdeme-li ze skutečnosti, že poruchy ve struktuře, které jsou zdrojem nadbytečného šumu, vedou k degradaci fyzikálních a technických parametrů, můžeme podle hodnoty šumových charakteristik posuzovat kvalitu a životnost sledované soustavy a provádět třídění součástek.

Přechody PN nebo heteropřechody, které tvoří luminiscenční diody a polovodičové lasery, vykazují v souvislosti s jejich funkcemi většinou nízkofrekvenční nadbytečný šum a při zkoumání transportu nosičů i nadbytečný proud. Bylo prokázáno, že míra degradace v závislosti na časové délce používání takových součástek v běžném provozu není vždy monotónní. Projevují se různé anomálie, které se čím dál více daří dávat do souvislosti s experimentálně zjištěným nadbytečným šumem. Proces degradace pracovních charakteristik nebo jednotlivých parametrů je doprovázen během jejich funkčního využívání ireverzibilními změnami jak při transportu, tak i v optické oblasti charakteristik. Tyto procesy jsou v podstatě stochastické povahy a je proto vhodné sledovat

co možná největší soubor jejich statistických charakteristik. V dané práci byla pozornost věnována převážně jen prvním momentům, tj. středním hodnotám, protože jsou dobře experimentálně sledovatelné.

Bylo navrženo experimentální zařízení v podobě testeru a vypracována metodika pro měření důležitých bodů na VA charakteristikách a byly stanoveny relevantní parametry pro vyhodnocování spolehlivosti.

Druhá část práce je věnována optické nanometrologii. Ukázalo se, že v rámci studia spolehlivosti na základě zjišťování šumových a transportních charakteristik mají dosažené výsledky výrazně statistickou povahu a je nutné je provádět na relativně velkém souboru studovaných vzorků. Pomocí optické nanometrolgie mohou být práce orientovány na lokální výzkum polovodičových struktur, experimentální měření lokálních spektroskopických vlastností polovodičových rozhraní a povrchů, sledování lokálních fotoproudů na Schottkyho bariéře. První výsledky ukázaly, že spektroskopie fotoproudu v blízkém poli je vhodnou metodou, která může poskytnout přímý pohled na vliv stárnutí, které ovlivňuje mikroskopické procesy tvorby defektů a povrchových rekombinací v aktivní vrstvě luminiscenčních diod a výkonových diod. Tyto práce jsou na pracovišti v počátku vzhledem k budování mikroskopu a zjišťování jeho potenciálu.

V budoucnu se předpokládá, že pomocí optické nanometrolgie mohou být vyrobeny pevnofázové součástky s jednoznačně určenými objekty jako jsou bariéry, ostrůvky a další lokalizované stavy uvnitř přechodů PN a heteropřechodů. Velmi nadějně se jeví tato metoda zejména u nanostruktur na bázi GaAs a AlAs, tedy materiálů vhodných pro LED a výkonové lasery.

LITERATURA

- [1] ŠIKULA, J. et al In *Proc. of the 3rd European Symp. on Reliability of Electron Device, Failure Physics and Analyses*, Schwäbisch Gmünd 1992
- [2] MAGISTRALLI, F. et al In *7^{eme} Colloque International de Fiabilité et de Maintanabilité*, Brest, 1990
- [3] BACCARANI, G., FANTINI, F. *Microelectr. Reliability*, 1989, vol. 2, p. 47-81, Artech House, 1989
- [4] BAGNOLI, P. et al, In *14th European Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits '90*, Cardiff , United Kingdom, 1990
- [5] FUKUDA, M.: *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LED's*, 1st ed. Boston: Artech House, 1991.
- [6] ELISEEV, P.G. *Reliability Problems of Semiconductor Laser*. Commack: Nova Science, 1991
- [7] GRMELA,L.,VAŠINA,P.: "Reliability Tester for LEDs", in: V.Palenskis (Ed.): *Fluctuation phenomena in physical systems*, 176-181, Vilnius University Press (1994) (ISBN 9986-19-078-9)
- [8] TOMÁNEK, P., GRMELA,L.: "Signal-to noise ration in scanning tunneling reflection optical microscopy", in: V.Palenskis (Ed.): *Fluctuation phenomena in physical systems*,345-349, Vilnius University Press (1994) (ISBN 9986-19-078-9)
- [9] TOMÁNEK,P., BRÜSTLOVÁ,J., DOBIS,P., GRMELA,L., UHDEOVÁ,N.: "STM/SNOM setup", in: P.Tománek (Ed.): *Near field optics and related techniques*, EOS Topical Meeting, vol.8, 78-79, Paris (1995) (ISSN 1167-5357)
- [10] GRMELA,L.,TOMÁNEK,P., DOBIS,P.: "Characterization of surface corrugation by near-field techniques", *Photonics'95*, EOS AM vol. 2A, 101-104, Paris, (1995) (ISSN 1022-0151)
- [11] GRMELA,L.,TOMÁNEK,P., BRÜSTLOVÁ,J.: "Versatile near-field and far-field optical microscope", *Photonics'95*, EOS AM vol. 2A, 132-135, Paris, (1995) (ISSN 1022-0151)
- [12] TOMÁNEK,P., GRMELA,L., BRÜSTLOVÁ,J., DOBIS,P.: „Tunnel noise spectroscopy by reflection SNOM and STM“, in: Optical Inspection and Micromeasurements II, Ch.Gorecki (Ed.), *Proc.SPIE*, 3098, 514-519, (1997) (ISSN 277-786X/97)

- [14] TOMÁNEK,P., BRÜSTLOVÁ,J., DOBIS,P., GRMELA,L.: „Hybrid STM /SNOM with novel probe“, *Ultramicroscopy*, 71, 199-203 (1998) (ISSN0304-3991)
- [15] LÉTAL,P., TOMÁNEK, P., DOBIS, P, BRÜSTLOVÁ, J., GRMELA, L.: „Local spectroscopy by scanning near-field optical microscopy“, *Engineering Mechanics*, 5, 3, 215-218 (1998) (ISSN 1210-2717)
- [16] GRMELA L. KRATĚNA, L., ŽDÁNSKÝ, K., ŠIKULA, J.,VAŠINA, P.: „Noise and deep level transient spectroscopy of deep level DX centers in GaAs-GaAlAs heterostructures. Proc. of the 10th Int. Conf. on Noise in Phys. Systems. Budapest, Hungary, 209-313, (1989) (ISBN 963-05-5778-9)
- [17] GRMELA, L., VAŠINA, P., ŠIKULA, J., HÜTTEL, I., HLÁVKA, J.: Noise diagnostics of GaAlAs heterostructure luminescent diodes. Proc. of the 10th Int. Conf. on Noise in Phys. Systems. Budapest, Hungary, 217-220, (1989) (ISBN 963-05-5778-9)
- [18] GRMELA,L.: Šum v luminiscentnych diodach. In: Issledovanie i razrabotka sovremennykh radioelektronnykh elementov i ustrojstv. Tezisi dokladov, Riga, USSR, 174-178, (1989)
- [19] GRMELA,L., TOMÁNEK,P.: "Modal noise in multimodal fiber probe", in: *NFO2 - Second International Conference on Near Field Optics*, TP 1 - 3, 72, Raleigh, USA (1993)
- [20] GRMELA,L.,TOMÁNEK,P.: "Degradation and reliability analysis of LED", *Applied Optics and Opto-Electronics*, 334-335, IOP Publishing, Bristol (1994)
- [21] TOMÁNEK,P., GRMELA,L.: "Signal-to-noise ratio in scanning tunneling optical microscopy using multimode fibre as a probe", *Applied Optics and Opto-Electronics*, 382-383, IOP Publishing, Bristol (1994)
- [22] GRMELA,L., VAŠINA,P.: "Luminiscent Diode Reliability Tester", in:*Electronic Devices and Systems Conference 1994, Vol.II*. 312-315, VUT Brno, (1994)
- [23] TOMÁNEK,P., GRMELA,L., DOBIS,P., BRÜSTLOVÁ,J., UHDEOVÁ,N.: "Versatile STM+STOM+AFM" in: P.Tománek, M.Spajer (Eds): *Nanometrology, Scanning probe microscopy and related techniques*, 43-44, PC-DIR, Brno (1994)
- [24] GRMELA,L.,LIEDERMANN,K., VAŠINA,P.: "Apparatus for measurement of dielectric relaxation within a large range of relaxation times", *Impedance Spectroscopy at Electrodes and Interface*, paper 5.30, Cantenbury,(1995)
- [25] GRMELA,L., VAŠINA,P.: "Reliability tester for one-port devices", *International NODITO Workshop 95*, 193-197, Brno,(1995)
- [26] TOMÁNEK,P., BRÜSTLOVÁ, J., GRMELA,L., DOBIS,P.: "Novel technology for an optical fiber tip", *Lasers, Optics, and Vision for Productivity in Manufacturing I'*, Europto Series, Abstract book, paper 2782-91, 16, Besançon (1996)

- [27] GRMELA,L., LIEDERMANN,K.: "An apparatus for measurement of relaxation time in dielectrics", *Conference ELMAT 96*", 133-137, Košice (1996)
- [28] TOMÁNEK,P., DOBIS,P., BRÜSTLOVÁ,J., GRMELA,L.: "Hybrid STM/Reflection SNOM with a novel optical fiber probe", *4th Int. Conf.on Near Field Optics, NFO-4*, Jerusalem, 9.-13.2.1997, Book of Abstracts, p.140 (1997)
- [29] BRÜSTLOVÁ,J., DOBIS,P., GRMELA,L., TOMÁNEK,P.: "Novel probes for SNOM", *4th Int. Conf. Near Field Optics, NFO-4*, Jerusalem, 9.1997, Book of Abstracts, p. 141 (1997)
- [30] TOMÁNEK,P., GRMELA,L., BRÜSTLOVÁ,J., DOBIS,P.:"Tunnel noise spectroscopy by reflection SNOM and STM", *Lasers, Optics, and Vision for Productivity in Manufacturing II*", Europto Series, München (1997) paper 3098-62
- [31] GRMELA,L., TOMÁNEK,P.: „Reliability for one port devices“, *5th CO-MATTECH 97*, 109-114, STU Bratislava (1997) (ISBN 80-227-0979-4)
- [33] TOMÁNEK,P., BRÜSTLOVÁ, J., DOBIS,P., GRMELA,L., LÉTAL,P.: "Topography and local spectroscopy of transparent and reflection surfaces with subwavelength lateral resolution“,in: *New trends in surface Analysis*, Breza J. et al. (Eds), 49-52, Bratislava (1997) (ISBN 80-227-1010-5)
- [34] GRMELA, L., LÉTAL, P., TOMÁNEK, P.: " "Studium lokálních charakteristik fotoproudu pomocí SPM", *Čs. časopis pro fyziku*, 51, 1, (2001) (ISSN 0009-0700)
- [35] LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., BRÜSTLOVÁ,J., DOBIS,P., GRMELA,L.: „Locally Resolved Topography and Spectroscopy of Semiconductors (with Lateral Resolution better than of 250 nm)“, in: R. VRBA (Ed.): *Proc. of 5 th Int. conf. Electronic Devices and Systems 1998 (EDS'98)*, 173-176, FEI VUT Brno (1998) (ISBN 80-214-1198-8)
- [36] LÉTAL,P., BRÜSTLOVÁ,J. DOBIS,P., GRMELA,L., TOMÁNEK,P.: „Near-Field and Far-Field Spectroscopy of Semiconductors“ *2nd Int.coll. MSMF-2*, FS VUT Brno, 1.-3.7.1998, Abstract booklet, 62-63 (1998) (ISBN 80-214-1181-3)
- [37] GRMELA, L., TOMÁNEK, P.: „Optoelectronic devices: fundamental characteristics and automation of measurement“, in P.TOMÁNEK, N.UHDEOVÁ (Eds): *Proc. of Experiments and Measurements in Engineering Physics Education (EMEPE'98)*, 30-33, FEI VUT (1998) (ISBN 80-214-1223-2)
- [38] GRMELA, L., SEDLÁKOVÁ, V., TOMÁNEK, P., DOBEŠ, M., OSTRÝ, L.: "Signal to noise ratio in sensor for acoustic emission of ball screw", *8th CO-MAT-TECH 2000*, 4, 111-116, STU Bratislava (2000) (ISBN 80-227-1413-5)
- [39] LÉTAL, P., GRMELA, L., TOMÁNEK, P.: „Near-field photocurrent spectroscopy: superresolving method for inspection of semiconductor interfaces", *8th CO-MAT-TECH 2000*, 4, 141-146, STU Bratislava (2000) (ISBN 80-227-1413-5)

- [40] GRMELA, L., LÉTAL, P., TOMÁNEK, P.: „Near-field photocurrent spectra in DQW-GRIN laser diodes“ ,in: Musil, V. (Ed.) *Electronic devices and systems* , 213-216, VUT Brno, FEI (2000). (ISBN 80-214-1780-3)
- [41] GRMELA, L., TOMÁNEK, P., KOKTAVY, P., PAVELKA, J., ŠIKULA, J.: „Noise spectroscopy of thick film electroluminescent lamps“ ,in: Musil, V. (Ed.) *Noise and Non-Linearity Testing of Modern Electronics Components- Workshop*, 45, VUT Brno, FEI (2001). (ISBN 80-214-1960-1)
- [42] GRMELA, L., PAVELKA, J.: „Automatic apparatus for noise spectral density measurement“ ,in: Musil, V. (Ed.) *Noise and Non-Linearity Testing of Modern Electronics Components- Workshop*, 52, VUT Brno, FEI (2001). (ISBN 80-214-1960-1)
- [43] GRMELA, L., PAVELKA, J., HLÁVKA, J., SEDLÁK, S.: „Relay contacts quality screening by non-linearity tester“ ,in: Musil, V. (Ed.) *Noise and Non-Linearity Testing of Modern Electronics Components- Workshop*, 55, VUT Brno, FEI (2001). (ISBN 80-214-1960-1)
- [44] PAVELKA, J., SEDLÁKOVÁ, V., GRMELA, L.: „The tantalum capacitors as a MIS structure in reverse mode“ ,in: Musil, V. (Ed.) *Noise and Non-Linearity Testing of Modern Electronics Components- Workshop*, 49, VUT Brno, FEI (2001). (ISBN 80-214-1960-1)

SUMMARY

Reliability indicators employing operating, transport and stochastic characteristics of LED's, whose relevance has been verified by our recent analysis, make a basis for the design of a reliability tester.

The philosophy of the tester design is based on the fact that the degradation of any device which takes place during its operation is accompanied by irreversible changes in operational, transport and (if any, for example in LED's) optical characteristics. All these changes manifest a decreased device reliability. Ageing experiments show that the LED degradation is manifested through certain parameters, which are relatively easy to measure and proved to be closely correlated with the degradation.

Another important point was ease and duration of the measurement of each of the envisaged parameters to evaluate.

Two criteria have been set forth for each of the parameters to be tested. First, degree of correlation, if any, between a deviation of the parameter value for a given sample from the rated ideal value. Second, the measurement procedure, how sophisticated it is and how much time the measurement really takes. As a model device, a light emission diode (LED) has been selected. However, the method can be applied to any low power as well as high power PN junction diodes. Out of these points, the first four points have been accomplished by the time of compilation of this report. The work will of course continue in order to accumulate experience and sufficient knowledge to design and implement the second version of the tester.

Extensive measurements were made to identify the statistical weight of each of the mentioned parameters, aiming at selection of a minimum set to characterise the sample ensemble in the most representative way. The results of this stage of work can be summarised as follows. The forward voltage U_{F1} at a given value of the forward current I_F provides information on the excess current. It is easy to measure and the measurement does not take much time. The higher U_{F1} the lower the excess current. This quantity has been selected.

The value of the exponential factor β in the U-I characteristic law which is measured on a sample indicates how far the behaviour deviates from that of an ideal sample, that is, how far the sample technology deviates from a standard one. On the other hand, to evaluate β one measurement is not sufficient. Several points of the U-I curve are to be measured which is time consuming. Therefore, this quantity has been left out from production line testing.

The saturated current I_0 obtained by extrapolation of the forward characteristic proved to be of very little importance for the LED lifetime. On the other hand, its comparison with I_{R0} brings important results. However, it has been left out from the production line testing.

The reverse current I_{R0} at a suitably selected reverse voltage, e.g., $U_R = 5$ volts proved to be a quantity which can be measured easily, provides directly the value of I_{R0} and can be compared with the rated value. Therefore, it was included into the set of the measured quantities.

Measurement of the exponent n of the reverse branch of the U-I curve in the avalanche multiplication region is difficult to measure within a short time interval. It is a good parameter for laboratory analysis but not suitable for production line testing.

The reverse voltage U_{RB} which corresponds to the transition from the $n = 1$ region to the avalanche region can be replaced by U_{RI} at a current of $I_{RI} = 1$ to $100 \mu\text{A}$. The latter quantity is easy to incorporate into the production line. It is known that the C-U curves provide valuable information on the junction slope and on the maximum field in the junction. However, their measurement requires quite another measurement set up. Therefore, they have been left out of the tester functions, although they are very important for laboratory analysis.

Both the maximum value of the noise spectral density S_{UM} measured in forward direction across a load resistance of $10 \text{ k}\Omega$ and the reverse voltage U_{R2} at which the noise voltage spectral density across a load resistance of $100 \text{ k}\Omega$ equals $S_U = 10^{-13} \text{ V}^2/\text{s}$ have been selected among the function of the tester.

Finally, for LED's only, the luminous flux Φ under standard operation conditions as specified by the manufacturer has been included into the tested parameters.

To evaluate these parameters a reliability tester has been designed and implemented. In what follows a short description of the tester is given.

In second part of the thesis, novel applications of Scanning Near-Field Optical Microscopy (SNOM) us to comparative study of spatially resolved near-field photocurrent spectra for two two laser diode arrays with different wave guide characteristics was presented before and after accelerated aging. In summary is demonstrated that near-field photocurrent spectroscopy has potential to provide direct insight into microscopic processes of aging induced defect creation and surface recombination in the active region LED's and laser diodes and can lead to the fabrication of improved devices.