

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav fyziky

Doc. RNDr. Zdeněk Chobola, CSc.

**NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ A STRUKTUR
POMOCÍ ANALÝZY SIGNÁLU ZÍSKANÉHO
PŘI JEJICH NAMÁHÁNÍ**

**NON-DESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS AND
STRUCTURES
BY MEANS OF ANALYZING THEIR STRESS-INDUCED SIGNALS**

TEZE PŘEDNÁŠKY KE JMENOVÁNÍ PROFESOREM



Brno 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

NÁHODNÉ PROCESY, AKUSTICKÁ EMISE, NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ, KVALITA, SPOLEHLIVOST, ŽIVOTNOST

KEY WORDS

RANDOM PROCESSES, ACOUSTIC EMISSION, NON-DESTRUCTIVE TESTING, QUALITY CONTROL, RELIABILITY, LIFE TIME

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

ARCHIV PVO FAST

© Zdeněk Chobola 2002

ISBN 80-214-2043-X

ISSN-1213-418X

OBSAH

Představení autora	4
Úvod	6
1. Využití analýzy charakteristik náhodného procesu pro nedestruktivní testování kvality, spolehlivosti a životnosti elektronických součástek	6
1.1 Teorie měření náhodných procesů	6
1.2 Experimentální uspořádání	8
1.3 Porovnání výsledků získaných z analýzy náhodného signálu s výsledky testování součástek jinými metodami	9
1.4 Využití zrychlené degradace pro predikci životnosti elektronických součástek	15
1.5 Přehled vzorků, které byly testovány	16
2. Využití signálu akustické emise pro nedestruktivní testování kvality stavebních materiálů a konstrukčních prvků	17
2.1 Parametry signálu akustické emise pro posouzení stavu stavebních materiálů a konstrukcí....	17
2.2 Využití signálu akustické emise pro posouzení stavu koroze výztuže železobetonových stavebních prvků a konstrukcí	18
3. Závěry	20
4. Přehled zapojení autora na řešení výzkumných úkolů, grantů, projektů a výzkumu pro výrobní praxi	21
5. Seznam nejvýznamnějších publikací	22
6. Pedagogická činnost autora	25
7. Koncepce další autorovy pedagogické a vědecké činnosti	26
Abstract	28

Představení autora

Zdeněk Chobola se narodil 2. 5. 1948 v Jihlavě. V roce 1966 maturoval na SVVŠ Elgartova v přírodovědné třídě se zaměřením na matematiku a fyziku. V roce 1971 absolvoval přírodovědeckou fakultu UJEP v Brně, učitelský obor matematika-fyzika.

V letech 1971-73 učil jako středoškolský profesor na Gymnáziu v Moravském Krumlově. Od 16. 9. 1973 do 30. 9. 1975 pracoval jako asistent na Katedře fyziky Stavební fakulty VUT v Brně. Od 1. 10. 1975 byl zařazen do vědecké výchovy formou interní aspirantury na výše uvedené katedře. Od 1. 10. 1978 byl zaměstnán na tomto pracovišti jako odborný asistent a od 1. 4. 1990 jako docent. Od 1. 6. 1994 byl jmenován do funkce vedoucího Ústavu fyziky na Stavební fakultě VUT. Celková délka odborné praxe je více než 31 let.

V roce 1975 obhájil rigorózní práci na téma "Stochastické jevy ve fotodiodách". V roce 1979 obhájil kandidátskou disertační práci v oboru 11-30-9 Aplikovaná fyzika. Od 1. 4. 1990 byl jmenován docentem pro obor aplikovaná fyzika. V roce 1992 se prací "Testování spolehlivosti a životnosti polovodičových struktur s přechodem PN pomocí šumových a transportních charakteristik" habilitoval docentem v oboru Experimentální fyzika.

Od nástupu na katedru v roce 1973 byl zapojen do výuky, a to nejprve v laboratorních a teoretických cvičeních a od roku 1981 byl pověřován přednáškami kurzů Stavební fyziky pro I. a II. ročník studia oboru Ekonomika a řízení stavebnictví, Konstrukce a dopravní stavby a Pozemní stavby. V současné době přednáší v předmětech Fyzika I a Fyzika II v rámci společného studijního plánu všech stavebních oborů a Physics 1 a Physics 2 pro výuku v anglickém jazyce. Pro studenty studující v anglickém jazyce připravil skripta příkladů a Anglicko-český a Česko-anglický slovník fyzikálních výrazů. Od roku 1987 se zabýval zaváděním výpočetní techniky pro podporu výuky fyziky. Dosáhl zařazení nového doporučeného předmětu Elektronizace a automatizace měřících metod ve stavebnictví. Společně s doc. Koktavým napsal skripta pro tento nový předmět. Dále se podílel na tvorbě skript Fyzika – laboratorní cvičení a je autorem skript Mechanika deformovatelných těles. Byl školitelem Ing. Le Ba Thuana z Vietnamu, který s prací Predikce spolehlivosti a životnosti logických integrovaných obvodů pomocí šumu obhájil v roce 1993 a Ing. Vlasty Juránkové, která s prací Šumová diagnostika luminiscenčních diod obhájila v roce 1993. V letošním roce dokončil aspiranturu jeho aspirant Dr. Ali Ibrahim z Egypta s prací Nedestruktivní testování kvality, spolehlivosti a životnosti solárních článků. V současné době vede dva doktorandy v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství.

V průběhu působení na Ústavu fyziky byl zapojen jako spoluřešitel do státního výzkumu "Stochastické a degradační procesy v polovodičích". Rovněž se jako spoluřešitel podílel na řadě výzkumných prací pro výrobní praxi (např. ČKD Praha, Tesla Blatná, Tesla Rožnov, Tesla Kolín a pod.). V letech 1981 až 1985 byl odpovědným řešitelem výzkumného úkolu pro ČKD Polovodiče Praha "Studiu korelace mezi šumem a životností tyristorů" a v roce 1985 odpovědným řešitelem HČ Šum a spolehlivost integrovaných obvodů pro Teslu Rožnov. V současné době je odpovědným řešitelem HS pro belgickou firmu CEDO. Byl zapojen v řešení řady domácích grantů a čtyř zahraničních jako spoluřešitel. Jsou to např. COPERNICUS 93-NODITO, 7942, Noise as a Diagnostic Tool for the Reliability Improvement of Microelectronic Components for Information Technology and Enviromental Control, East ELEN-Europen Laboratory for Electronic Noise, GA ČR 102/94/0858 Fluktuální jevy ve struktuře kov-izolant-kov a testování spolehlivosti vysokonapěťových soustav, GA ČR 103/93/2201 Akustická emise ve stavebnictví. Ve spolupráci

s jinými ústavami, např. s Ústavem kovových a dřevěných konstrukcí GA ČR č. 103/96/1673 Mezní stavy ocelových tlacených prutů při opakovaném namáhání, GA ČR Mezní stavy a působení konstrukcí ze skla, kompozitů, kovů a dřeva při namáhání účinky zatížení.

V současné době se podílí na řešení grantů: 1999 – 2001 GA ČR č.102/99/0953 Šumová a galvanomagnetická spektroskopie materiálů $A_{II}B_{VI}$, 1999 – 2001 GA ČR č. 102/99/1088 Šumová spektroskopie a diagnostika elektroizolačních soustav s vysoce tepelně odolnými materiály, 1999 – 2003 Záměr CEZ J22/98:2610007 Teorie, spolehlivost a mechanismus porušování staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí.

V roce 2000 byl garantem grantového projektu GA ČR č. 103/97/P140 „Studium, analýza a vyhodnocení signálu akustické emise aplikované na tenkostěnné betonové systémy“. V současné době (2000-2003) je odpovědným spoluřešitelem projektu č.803/120/108 Ministerstva dopravy a spojů ČR „Stanovení metodiky monitorování koroze výztuží železobetonových a předpjatých konstrukcí pomocí akustické emise“. Je odpovědným řešitelem zahraničního projektu KONTAKT 2001/014 při spolupráci s Universitou v Lublani.

Z uvedených oblastí publikoval 114 prací (z toho 41 v zahraničí) a podílel se na 36 výzkumných zprávách.

Absolvoval krátkodobé studijní a pracovní pobyty na Universitě v Erlangenu 1969, MISI Moskva 1981, LISI Leningrad 1983, Polytechnickém institutu Grenoble 1990 a Universitě Ljubljana 2001.

Úvod

V roce 1961 vznikly rozdělením tři samostatné Katedry fyziky na Fakultách strojní, elektrotechnické a stavební. Prvním vedoucím samostatné Katedry fyziky na Stavební fakultě byl Doc. Ing. Jaroslav Binko, který se zabýval oblastí fyzikální a technické terminologie a normalizace veličin a měrových jednotek.

S nástupem Prof. RNDr. Ing. Josefa Šikuly, DrSc. do čela katedry v roce 1975 se výzkum našeho pracoviště orientoval na studium náhodných procesů a využití jejich parametrů pro testování spolehlivosti a kvality materiálů a struktur v oblasti pevných látek.

Po roce 1980 pak dalším směrem výzkumu na našem pracovišti bylo studium využití signálu akustické emise pro posouzení vad stavebních materiálů a konstrukčních prvků. Na rozvoji této oblasti měl zásluhu především Doc. RNDr. Zdeněk Weber, CSc.

Já jsem byl po nástupu na katedru v roce 1973 zařazen do skupiny zabývající se problematikou využití parametrů náhodného procesu pro nedestruktivní testování elektronických součástek. Po svém ustanovení do funkce vedoucího Ústavu fyziky v roce 1994 jsem se pak rovněž začal zabývat studiem využití parametrů akustického signálu pro nedestruktivní testování stavebních materiálů a konstrukcí.

1. VYUŽITÍ ANALÝZY CHARAKTERISTIK NÁHODNÉHO PROCESU PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK

1.1 TEORIE MĚŘENÍ NÁHODNÝCH PROCESŮ

Při namáhání elektrických součástek přiloženým napětím teče sledovanou strukturou proud, jehož hodnota není konstantní. Fluktuace proudu kolem střední hodnoty je náhodným procesem, který však má značnou vypovídací schopnost o mikrofyzikálních procesech, které v daném materiálu nebo struktuře probíhají.

Při sledování náhodných procesů není možné určit přesné hodnoty nutného počtu počátečních podmínek a nelze tedy předem stanovit absolutní hodnotu uvažovaného proudu. Jedná se o náhodný proces a je nutné hledat statistické zákonitosti, které vystihují různé funkce náhodných procesů popisující jeden a týž fyzikální jev. Tyto nám pak umožňují předpovídat chování systému, a to tím přesněji, čím je větší počet pozorování realizací náhodného procesu.

Získání dodatečného počtu realizací zkoumaného jevu je většinou velmi obtížné. Buď bychom museli zkoumat n -identických soustav, které jsou zdroji daného náhodného procesu, nebo bychom museli nechat probíhat uvažovaný proces n -krát při nezměněných podmínkách.

V případě stacionárních ergodických procesů můžeme však odhad některých charakteristik získat z jedné realizace sledované po dostatečně dlouhou dobu.

Kvantitativně je náhodný proces popsán náhodnou časovou funkcí $\xi(t)$, jejíž hodnoty jsou v libovolných časových okamžicích náhodné proměnné. Základními charakteristikami náhodného procesu jsou distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti.

V mnohých případech nám dostačující informaci o náhodném procesu mohou dát číselné charakteristiky procesu, jako jsou momenty rozdělení pravděpodobnosti:

- střední hodnota (moment prvního řádu jednorozměrného rozdělení)

$$m_1\{\xi(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot w(x, t) dx = a(t), \quad (1)$$

kde $w(x, t)$ je hustota pravděpodobnosti,

- rozptyl (centrální moment druhého řádu jednorozměrného rozdělení)

$$m_1 \{ [\xi(t) - a]^2 \} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)^2 \cdot w(x, t) dx = \sigma^2(t), \quad (2)$$

- korelační funkce (smíšený obecný moment druhého řádu dvourozměrného rozdělení)

$$m_1 \{ \xi(t_1) \cdot \xi(t_2) \} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 \cdot x_2 \cdot w(x_1, x_2, t_1, t_2) dx_1 dx_2 = B(t_1, t_2). \quad (3)$$

Procesy s normálním rozdělením jsou úplně definovány pouze korelační funkcí.

Fourierovou transformací korelační funkce lze získat spektrální hustotu středního výkonu procesu $S(\omega)$, ta má rozměr výkonu na jednotku frekvenčního pásma a má tedy jasný fyzikální smysl

$$S(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos \omega\tau d\tau. \quad (4)$$

Statistické charakteristiky náhodných procesů nelze experimentálně přesně zjistit. Jsou však vypracovány metody pro získání odhadů těchto charakteristik.

Aby byla pravděpodobnost odchylky odhadu od dané charakteristiky minimální, musí být odhad nestranný, efektivní a konzistentní.

Uvažujme-li proces s hustotou pravděpodobnosti odpovídající normálnímu rozdělení

$$w_1(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-x^2 / 2\sigma^2), \quad (5)$$

potom vztah mezi střední hodnotou a rozptylem je

$$m_1 \{ \xi(t) \} = 2 \int x \cdot \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp(-x^2 / 2\sigma^2) dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sigma. \quad (6)$$

Odhadem střední hodnoty bude veličina

$$m_1^* = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} |\xi(t)| dt. \quad (7)$$

Pro odhad rozptylu σ^* dostáváme

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{T_c} \cdot \int_0^{T_c} |\xi(t)| dt. \quad (8)$$

Při realizaci měřicí metody je tedy třeba získat časovou střední hodnotu absolutní hodnoty daného procesu. Pro odhad spektrální hustoty je pak

$$S^* = \frac{\sigma^{*2}}{\Delta f e}, \quad (9)$$

kde $\Delta f e$ je efektivní šířka propouštěného pásma.

Při měření jsme využívali nanovoltmetr typu Unipan 233, který má na výstupu střední hodnotu absolutní hodnoty procesu (napětí U_N). Zjištěná efektivní šířka pásma je funkcí frekvence podle vztahu $\Delta f e = 0,0236 \cdot f$.

Pro odhad napětíové spektrální hustoty jsme tak získali vztah

$$S_U^* = \frac{55}{f} (U_N^2 - U_{N0}^2), \quad (10)$$

kde U_N je napětí indikované voltmetrem při namáhání součástky elektrickým polem a U_{N0} je šumové napětí, když zdroj vnějšího napětí je nulový, f je střední frekvence propouštěného pásma.

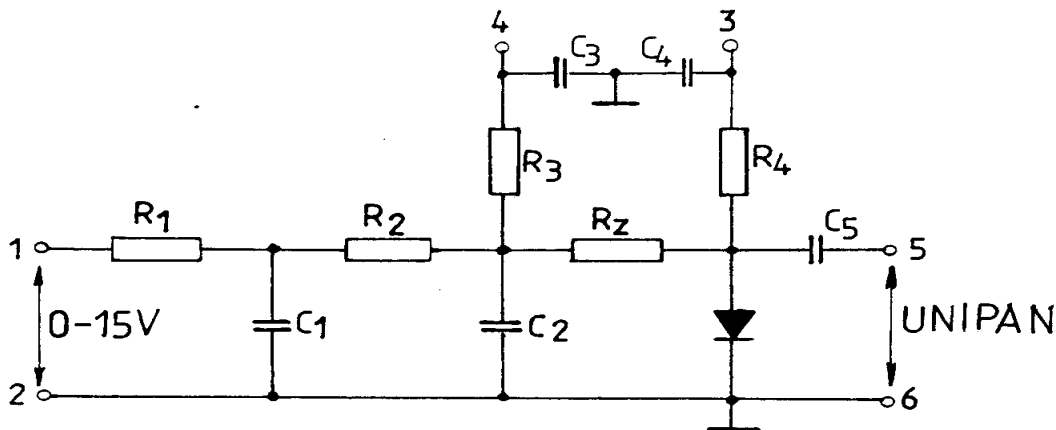
Pro výpočet odhadu proudové spektrální hustoty S_I pak musíme znát hodnotu impedance připojené na vstup předzesilovače.

$$S_I^* = \frac{55}{fR_p^2}(U_N^2 - U_{No}^2)(1 + \omega^2 C^2 R_p^2), \quad (11)$$

kde R_p je hodnota paralelní kombinace zatěžovacího odporu, dynamického odporu diody a vstupního odporu předzesilovače. C je kapacita přechodu PN. Pokud chceme získat přesnost odhadu alespoň 10%, je nutné na frekvenci 100 kHz měřit nejméně 0,04 s, na frekvenci 1 kHz 4,2 s a na frekvenci 10 kHz 424 s. Před měřením byly provedeny testy stacionarity a normality.

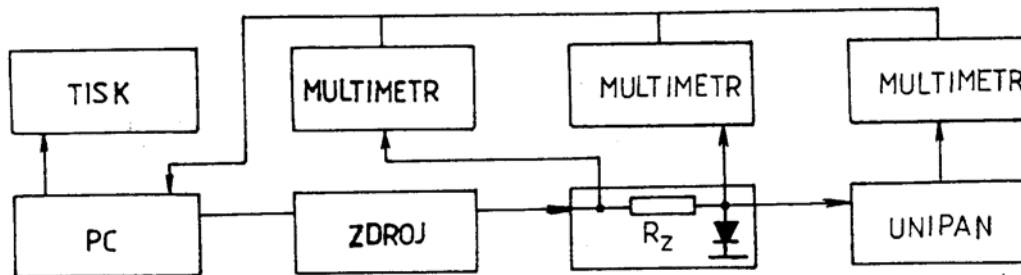
1.2 EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Na obr.1 je uvedeno klasické schéma zapojení vzorku do měřícího obvodu, který umožňuje jak měření V-A charakteristiky, tak snímání signálu náhodného procesu U_N . Mezi body 1 a 2 je přivedeno stejnosměrné napětí ze zdroje HP6645A řízeného počítačem. Mezi bodem 3 a 6 (zemí) můžeme snímat napětí na vzorku. Z napětí mezi body 3 a 4 a velikostí zatěžovacího odporu R_Z můžeme vypočítat proud vzorkem. Kondenzátor C_5 – slouží k odstranění stejnosměrné složky signálu tak, že mezi body 5 a 6 můžeme snímat pomocí nanovoltmetru typu Unipan signál náhodného procesu (šumové napětí U_N). Filtr z odporu R_1 , R_2 a kondenzátorů C_1 a C_2 slouží k potlačení nežádoucího vlivu šumu zdroje. Odporů R_3 , R_4 a kondenzátorů C_3 a C_4 eliminují rušivé vlivy měřících přístrojů.



Obr. 1 Schéma zapojení vzorku

Na obr.2 je obvyklé blokové schéma zapojení přístrojů. Pro digitalizaci jsme používali voltmetry typu MIT 380 nebo multimetr Agilent 34401A. Jako zdroj řízeného napětí využíváme zdroj typu HP6645A. Ke snímání signálu náhodného procesu používáme přístroj Unipan 233 s předzesilovači. Celý proces měření a vyhodnocování byl automatizován a řízen počítačem. V případě měření spektrální charakteristiky $S(\omega)$ byl Unipan zapojen širokopásmově a zesílený výstupní signál byl veden přes frekvenční filtr na vzorkovač s frekvencí 10 MHz. Další zpracování signálu bylo realizováno pomocí rychlé Fourierovy transformace.



Obr. 2 Blokové schéma

Pro možnost sledování teplotních závislostí byl sestaven kovový kryostat, který umožnil měření v teplotním rozsahu 100 K až 400 K. Pro druhý ohřev bylo použito odporového drátu s regulovaným příkonem 0 až 20 W. K měření teploty jsme používali křemíkovou diodu KA 261 zapojenou ve zpětném směru napájenou ze zdroje konstantního proudu 100 μ A. Teplota je pak úměrná úbytku napětí na této diodě.

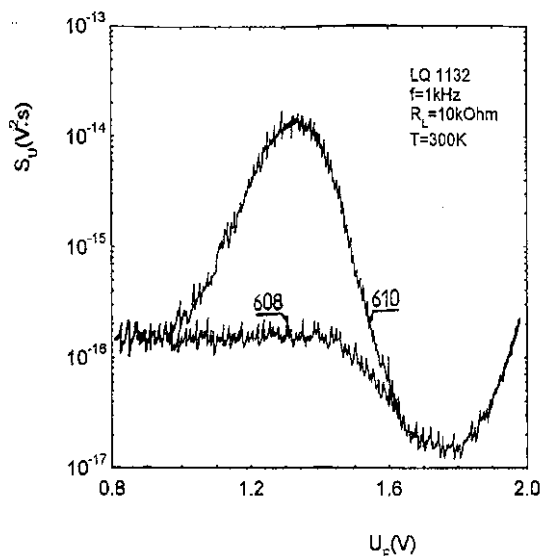
1.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÝCH Z ANALÝZY NÁHODNÉHO SIGNÁLU S VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ SOUČÁSTEK JINÝMI METODAMI

Na obr. 3 je uveden typický průběh závislosti napěťové spektrální hustoty náhodného napětí v závislosti na přiloženém napětí v přímém směru pro struktury s přechodem PN. Konkrétně se jedná o dva vzorky luminiscenčních diod LQ 1132 měřené při pokojové teplotě. Šumové napětí bylo snímáno ze zatěžovacího odporu 10 k Ω při střední frekvenci propouštěného pásu 1 kHz a šířce pásma 20 Hz. Vzorek 608 představuje typ kvalitního vzorku, který vykazuje pouze tepelný šum, jehož spektrální hustota dosahuje hodnoty $1,6 \cdot 10^{-16} \text{V}^2 \cdot \text{s}$. Při napětích nad 1,3 V dochází k poklesu šumového napětí z důvodu otvírání diody a poklesu hodnoty jejího dynamického odporu, který tak zkratuje odpor zátěže. Hodnotu dynamického odporu můžeme určit ze vztahu $R_D = 1/\beta I$, kde I je proud diodou a β exponent v závislosti mezi proudem a napětím $I = I_0 e^{\beta U}$.

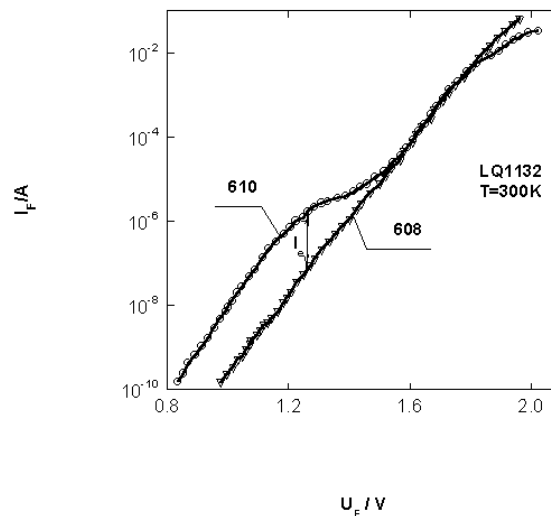
U vzorku 610 naopak při napětích větších než 1 V narůstá nadbytečná složka šumu a dosahuje maxima při přizpůsobení dynamického odporu přechodu diody odporu zátěže. V tomto případě maximální hodnota spektrální napěťové hustoty náhodného procesu je $S_{U_{\max}} = 2 \cdot 10^{-14} \text{V}^2 \cdot \text{s}$, je tedy o dva řády vyšší než složka tepelného šumu. Nárůst šumu pro vzorek 610 při napětích větších než 1,6 V je v důsledku uplatnění nadbytečného šumu kontaktů a svědčí o jejich nízké kvalitě.

Na obr.4 je průběh VA charakteristik vzorků 608 a 610. Charakteristika vzorku 608 se blíží ideálnímu průběhu pro struktury s přechodem PN, zatímco u vzorku 610 můžeme pozorovat až do hodnot napětí 1,4 V nadbytečný proud I_e , který je zdrojem nadbytečného šumu a rovněž u vzorku 610 je patrný rychlý úbytek napětí na kontaktech v oblasti napětí nad 1,5 V, což indikuje velkou hodnotu kontaktního odporu.

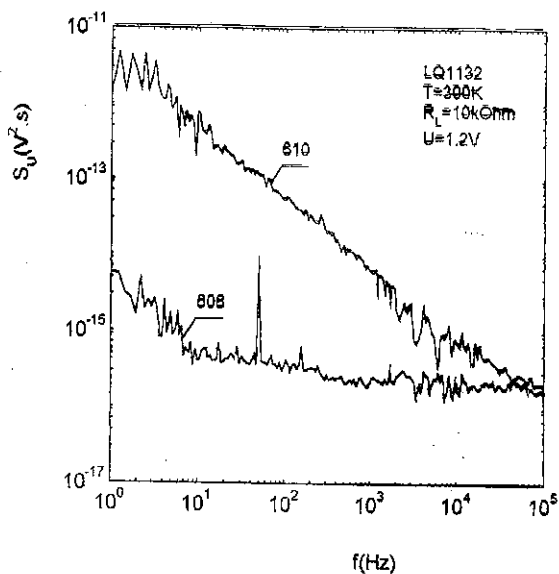
Na obr. 5 je závislost spektrální hustoty S_U na frekvenci pro oba výše zmíněné vzorky. Šumové napětí je přitom snímáno ze zatěžovacího odporu $R_Z = 10 \text{k}\Omega$ a přiložené napětí na vzorek je $U_F = 1,2 \text{V}$. U vzorku 608 můžeme pozorovat v širokém rozsahu frekvencí tepelný šum, který je nezávislý na frekvenci. Nárůst šumu pro frekvence nižší než 10 Hz je způsoben šumem měřící aparatury. Naproti tomu v vzorku 610 lze pozorovat, že tepelný šum je až do frekvencí 10^5Hz maskován přítomností nadbytečného šumu typu $1/f$, který jednoznačně charakterizuje nedokonalosti sledované struktury s přechodem PN.



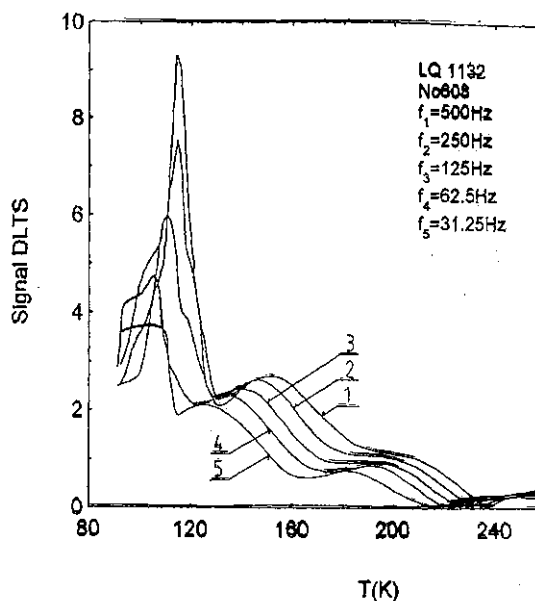
Obr. 3 Spektrální napěťová hustota S_U v závislosti na přiloženém napětí v přímém směru pro luminiscenční diody č.608 a 610



Obr. 4 V-A charakteristika vzorků luminiscenční diody č.608 a 610



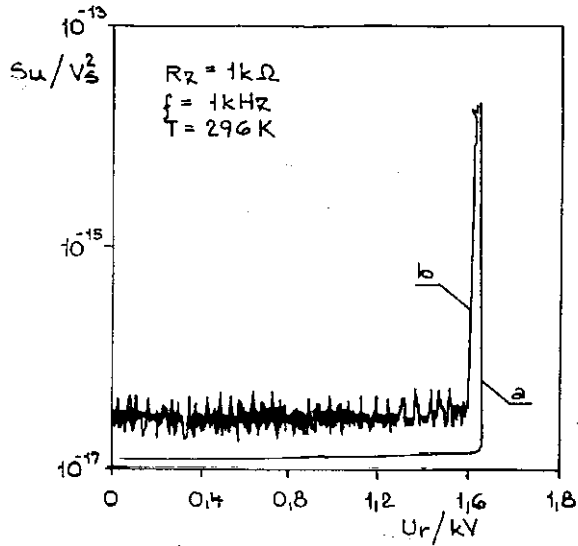
Obr. 5 Závislost spektrální hustoty na frekvenci pro vzorky 608 a 610



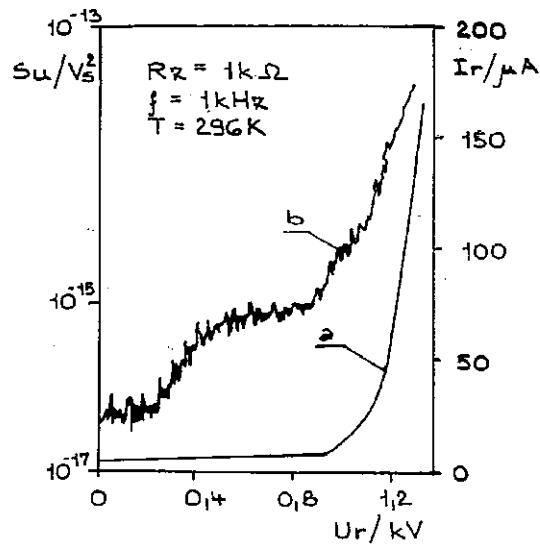
Obr. 6 Průběh signálu DLTS v závislosti na teplotě pro pět budících frekvencí u vzorku 610

Pro další posouzení těchto luminiscenčních diod byla použita metoda měření kapacitní spektroskopie hlubokých hladin DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy). Tato metoda umožňuje sledovat poruchy v oblasti zakázaného pásu. Tyto poruchy mají nežádoucí vliv na kinetické funkce prvku. Metoda kapacitní spektroskopie hlubokých hladin je založena na sledování tepelně

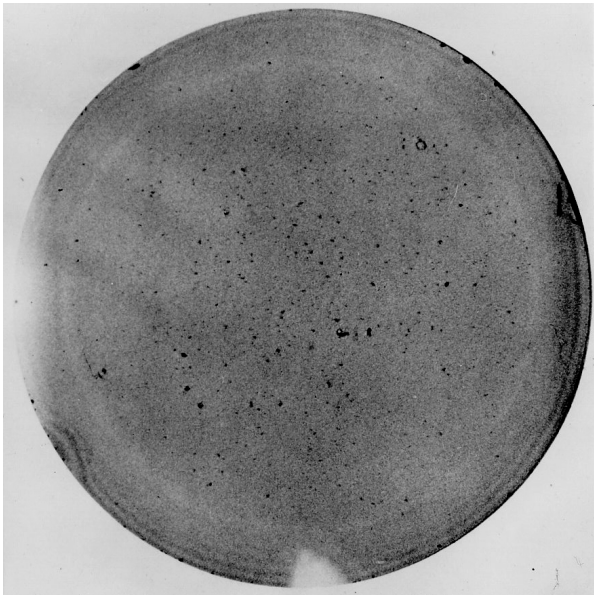
stimulované emise nosičů proudu zachycených pastmi. Při měření bylo využito experimentální zařízení Výzkumného ústavu VÚ 060. Na obr. 6 je záznam u vzorku 610 pro pět budících frekvencí 500 Hz, 250 Hz, 125 Hz, 62,5 Hz a 31,3 Hz v rozmezí teplot 90 K až 300 K. Lze pozorovat závislost velikosti maxim spekter DLTS na periodě budících pulsů při jinak nezměněných podmínkách experimentu. Z poklesu těchto hodnot lze vyhodnotit aktivační energie. U vzorku 610 byly nalezeny hodnoty 0,38 eV a 0,23 eV, u vzorku 608 pak 0,19 eV a 0,15 eV.



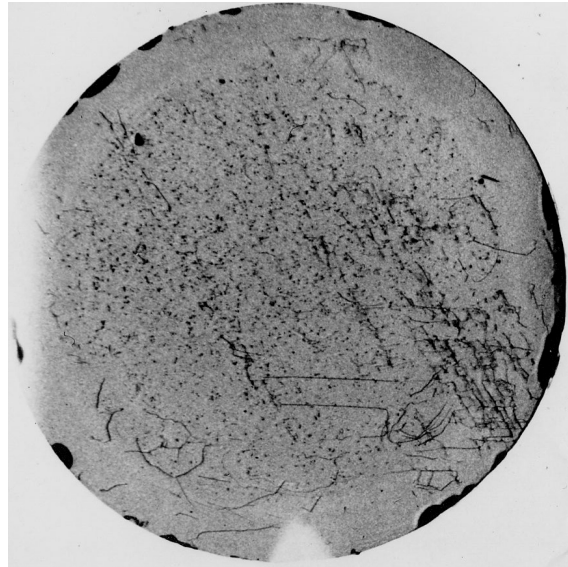
Obr. 7 Průběh spektrální hustoty šumu a VA-charakteristiky u tyristoru T911 s nízkým počtem dislokací



Obr. 8 Průběh spektrální hustoty šumu a VA-charakteristiky u tyristoru T911 s velkým počtem dislokací



Obr. 9 Topogram tyristoru T911 s nízkým počtem dislokací



Obr. 10 Topogram tyristoru T911 s vysokou hustotou dislokací

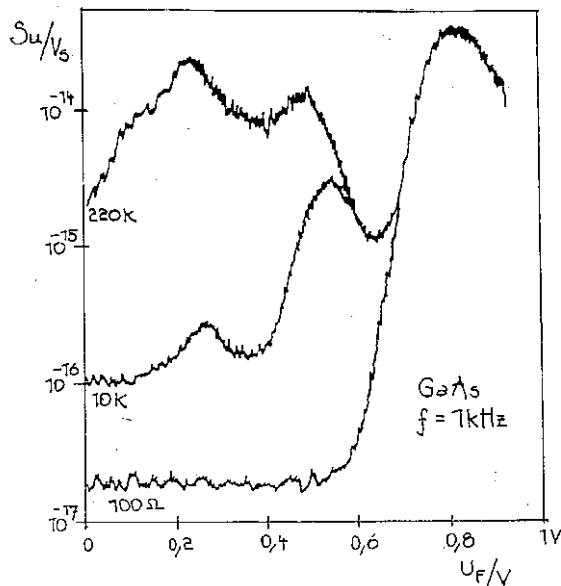
Za příklad měření struktur s přechodem PN při polarizaci přiloženého napětí ve zpětném směru mohou sloužit výsledky získané při analýze šumu tyristoru T911. Tyto vzorky byly rovněž podrobeny rentgenografické analýze na Přírodovědecké fakultě MU.

Na obr. 7 a 8 jsou uvedeny záznamy pro dva vzorky rozdílné kvality. Křivka a je vždy VA charakteristika, křivka b průběh spektrální hustoty šumu na přiloženém napětí. V prvním případě se VA charakteristika blíží ideálnímu průběhu a má ostrý zlom. Hodnota exponentu N mocinné závislosti mezi proudem a napětím $I \approx U^N$ v oblasti lavinového proudu se pohybuje v rozmezí 90 až 100. Hodnota šumu tohoto vzorku roste nad tepelný šum teprve v oblasti lavinového proudu.

Ve druhém případě je závěrná VA charakteristika značně měkká. Hodnota exponentu N se pohybuje v rozmezí 6 až 8. Hodnota nadbytečného šumu rychle roste již při nízkých napětích.

Z topogramů na obr. 9 a 10 lze pozorovat silnou korelaci mezi nadbytečným šumem a hustotou zjištěných dislokací. Pozorovaná bodová černá místa odpovídají úzkým dislokačním smyčkám (asi 1-5 μ m) směřujícím z povrchu do objemu, které vznikají při broušení Si desek a kterými pak Al difunduje do krystalu. Celkově lze pozorovat, že hloubkový přechod tvořený dopantem Al je výrazně nehomogenní.

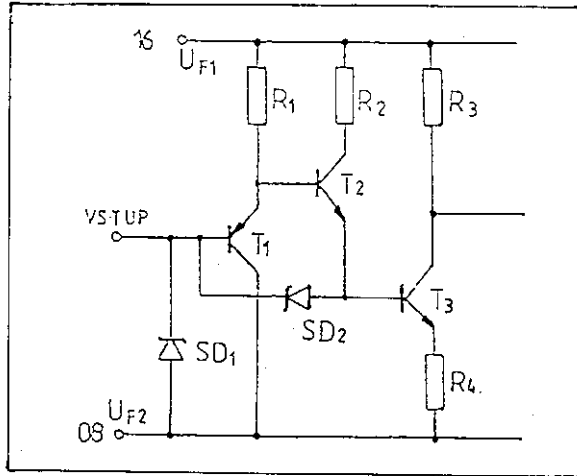
V řadě případů jsme však pozorovali rychlý nárůst šumu při nižších napětích i u vzorků, jejichž VA-charakteristiky se blíží ideální. Rentgenografické topogramy však prokázaly přítomnost vyššího počtu nežádoucích dislokací. To ukazuje na skutečnost, že parametry funkcí popisující náhodné procesy jsou citlivějším indikátorem kvality sledované struktury.



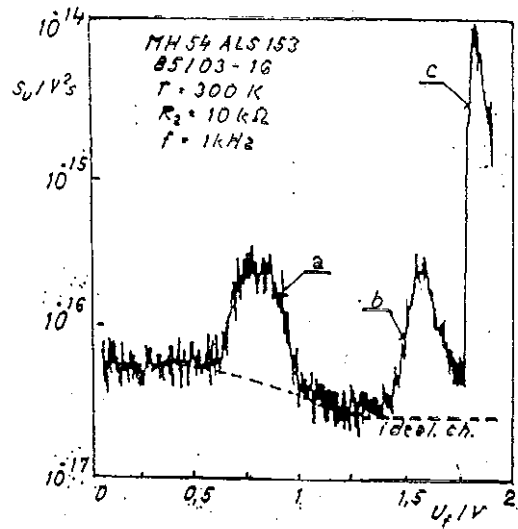
Obr. 11 Závislost spektrální napěťové hustoty na U_F pro GaAs diodu

Na obr. 11 je záznam spektrální napěťové hustoty šumu v závislosti na přiloženém napětí v přímém směru pro diodu z GaAs pro různé zatěžovací odpory 100 Ω , 10 k Ω a 220 k Ω . Takto provedená analýza ukazuje, že se jedná o struktury s větším výskytem poruch.

Obr. 12 a 13 se vztahují ke sledování šumu integrovaných obvodů MH 54 ALS 153. Na obr. 12 je schéma zapojení tohoto integrovaného obvodu. Na obr. 13 je výsledek měření spektrální napěťové hustoty S_U měřené mezi vývody VSTUP a 16. Pin 16 byl připojen na kladný pól zdroje napětí. U měřeného integrovaného obvodu se nejprve při napětí do 1 V uplatňuje přechod báze-emitor tranzistoru T1 se sériovým odporem R1. Při zvyšování napětí je pak rozhodující šum přechodu báze-kolektor tranzistoru T2. Při napětích nad 1,6 V pak hraje roli přechod PN diody SD2 v sérii s přechodem báze-kolektor tranzistoru T3. Obr. 13 ukazuje, že lze provést šumovou spektroskopii celé řady prvků na vstupu integrovaného obvodu.

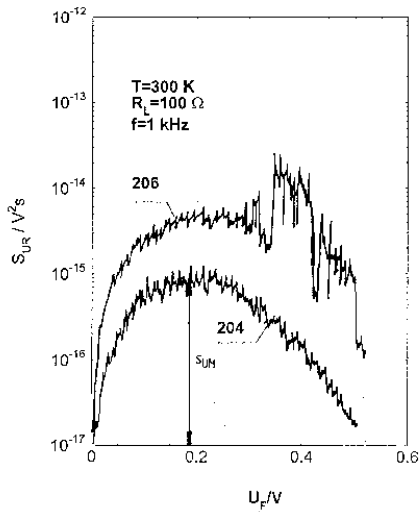


Obr. 12 Schéma zapojení integrovaného obvodu MH 54 ALS 153

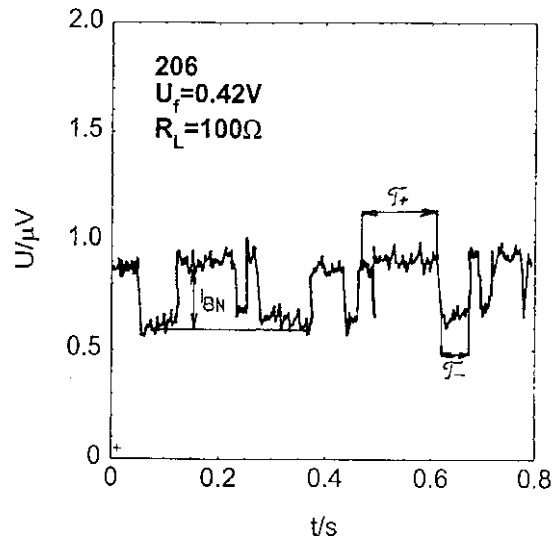


Obr. 13 Šumová spektroskopie vstupní části integrovaného obvodu MH54ALS 153

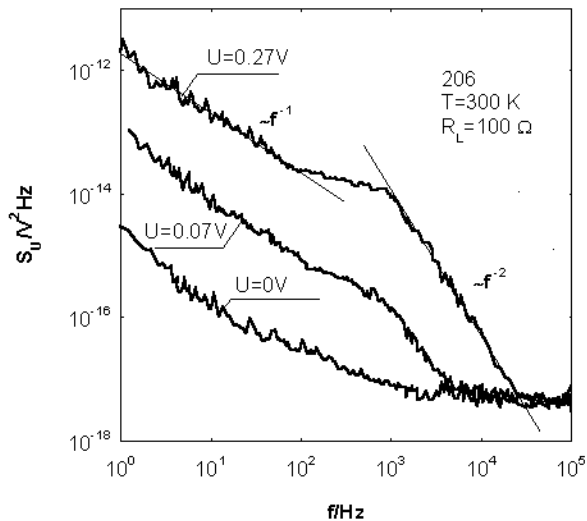
V řadě případů jsme u sledovaných vzorků pozorovali výskyt impulsního šumu. Např. na obr. 14 u křemíkového solárního článku č.206 v oblasti napětí 0,3 V až 0,5 V. Na obr. 15 je zachycen časový průběh impulsního šumu tohoto vzorku při konstantním napětí $U_F = 0,42$ V. Je patrné, že se



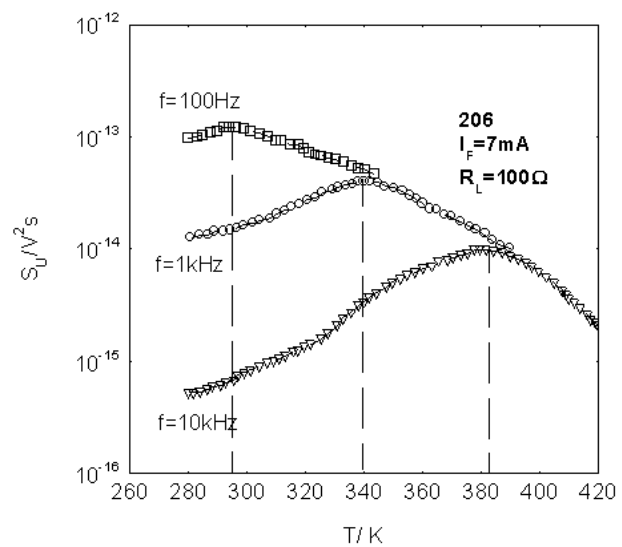
Obr. 14 Závislost spektrální napěťové hustoty v závislosti na U_F pro solární články č.204 a 206



Obr. 15 Časový průběh impulsního šumu u solárního článku 206 při napětí $U_F = 0,42$ V



Obr. 16 Závislost spektrální napěťové hustoty na frekvenci pro solární článek č.206



Obr. 17 Závislost spektrální hustoty na teplotě pro vzorek č.206

jedná o dvoustavový impulsní šum s dlouhou dobou zachycení 0,015 až 0,2 s. Pro měření doby zachycení a uvolnění nosiče náboje bylo sestaveno speciální automatizované pracoviště s využitím čítače BM 640. Spektrální hustota S_U tohoto vzorku s výskytem impulsního šumu vykazovala průběh typický pro přítomnost generačně-rekombinačního šumu (obr. 16), který závisí nepřímo na druhé mocnině frekvence.

$$S(\omega) = \frac{A\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (12)$$

kde A je konstanta závislejší na druhu poruchy a τ průměrná doba trvání pulsů.

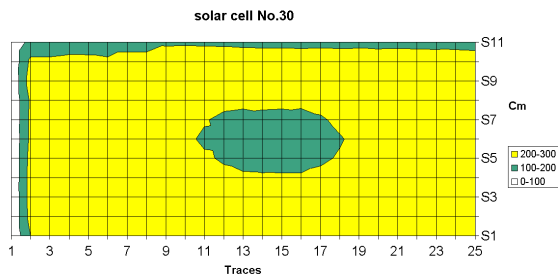
Přítomnost impulsního šumu signalizuje existenci poruch – např. kovového precipitátu v oblasti prostorového náboje. Potenciální bariéra oblasti s poruchou je mnohem nižší, než oblasti bez ní. Proto může být proud tekoucí přes poruchy mnohem větší, než proud tekoucí neporušenou oblastí.

Obr. 17 ukazuje závislost spektrální napěťové hustoty S_U vzorku 206 v závislosti na teplotě pro tři frekvence 100 Hz, 1 kHz a 10 kHz. Při měření protékal vzorkem konstantní proud $I_F = 7$ mA. Amplituda spektrální hustoty S_U závisí na době zachycení τ . Ze vztahu mezi τ a aktivační energií

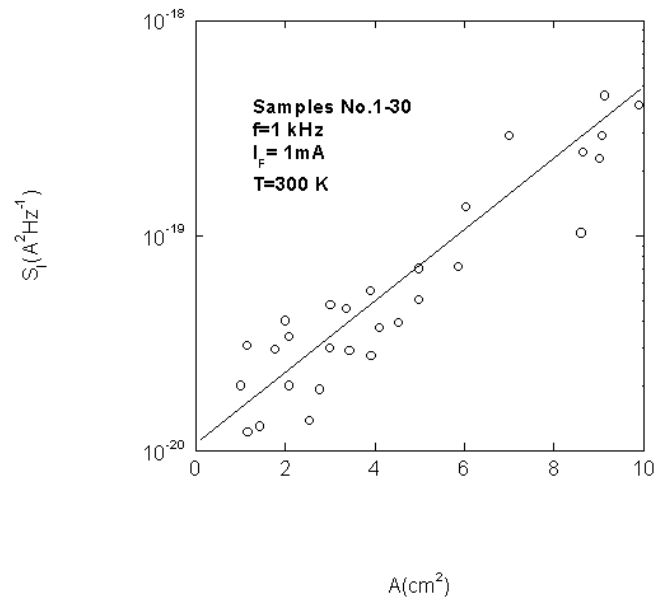
$$\tau \approx \frac{1}{T^2} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (13)$$

jsme pak určili hodnotu aktivačních energií poruchy u vzorku 206, a to $\Delta E = 0.41$ eV.

Další srovnávací metodou pro posouzení vypovídací schopnosti analýzy náhodných procesů bylo porovnání s výsledky studia homogenity povrchu solárních článků metodou LBIV (Light Beam Induced Voltage), tj. skenování povrchu solárního článku paprskem světla o průměru 5 mm vysílaného luminiscenční diodou z GaAs o optickém výkonu 10 mW a vlnové délce světla $\lambda=870$ nm. Pro zobrazení homogenity povrchu byl snímán stejnosměrný fotovoltaický signál při osvětlení v jednotlivých místech povrchu. Výsledky měření pro solární článek č. 30 jsou na obr. 18. Z obr. 19 je patrná vysoká korelace mezi velikostí plochy A zjištěných nehomogenit metodou LBIV a hodnotou spektrální hustoty šumu (měřeno u 30 vzorků).



Obr. 18 Rozložení fotovoltaického napětí v závislosti na topologii povrchu solárního článku č.30

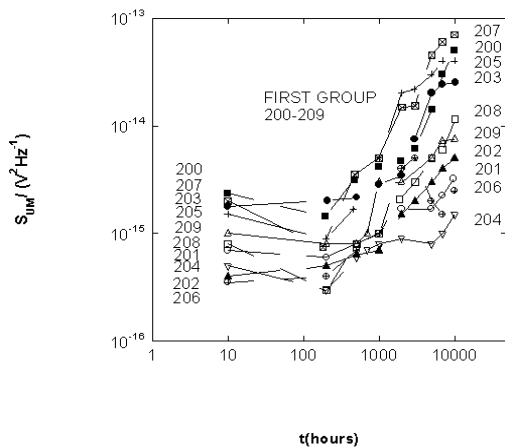


Obr. 19 Korelace mezi spektrální hustotou a velikostí plochy nehomogenit u skupiny 30 solárních článků

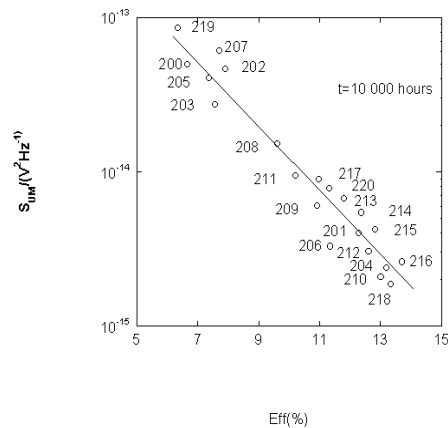
1.4 VYUŽITÍ ZRYCHLENÉ DEGRADACE PRO PREDIKCI ŽIVOTNOSTI ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK

Nadbytečný šum je vyvolán nedokonalostmi technologie přípravy přechodu PN, nedokonalostí tloušťkou, precipitáty, dislokacemi a jinými poruchami v přechodu PN. Vzhledem k tomu, že v procesu stárnutí-degradace vliv těchto poruch na transportní a šumové charakteristiky roste, lze zrychleným stárnutím dosáhnout informace o kvalitě, spolehlivosti a životnosti vzorků. Celá řada vzorků, jako luminiscenční diody, tyristory, Zenerovy diody a solární články apod., byly podrobeny zrychlenému stárnutí zvýšeným teplem (400 K), případně za společného působení elektrického pole. Tato práce je však velmi náročná, jak co rozsahem měřených hodnot a jejich zpracování, tak co do doby trvání celého experimentu. Např. u tyristorů T911 jsme sledovali u 30 vzorků devět parametrů v obou polaritách v devíti etapách stárnutí (celkem 2000 hod.), tedy celkem bylo potřeba naměřit, vyhodnotit a zpracovat asi 5000 informací a celá práce trvala 4 roky.

V současné době sledujeme soubor 20 ks křemíkových solárních článků. Tyto vzorky byly namáhány tepelně po dobu 10 000 hodin. Průběh změn spektrální hustoty na čase je uveden na obr. 20. Na obr.21 je uvedena korelace mezi napětovou spektrální hustotou S_U a efektivitou Eff , která charakterizuje schopnost solárního článku konvertovat světlo na elektrickou energii. Tato závislost



Obr. 20 Průběh degradace solárních článků
za dobu 10 000 hodin



Obr. 21 Korelace mezi šumem a efektivitou
po 10 000 hodinách degradace

byla měřena po 10 000 hodinách zrychlené degradace vyvolané zvýšenou teplotou 400 K. Parametry získané po dlouhodobých zkouškách umožňují ukázat na vhodnost volby šumu pro testování kvality, spolehlivosti a životnosti elektronických prvků.

1.5 PŘEHLED VZORKŮ, KTERÉ BYLY TESTOVÁNY (řazení dle časové posloupnosti)

1. Germániové fotodiody 10PN40
2. Křemíkové fotodiody 1PP75
3. Fotodiody řady SP 100
4. Schottkyho diody z GaAs
5. Rychlé fotodiody BPYP44
6. Struktury z GaAs
7. Kvaternární fotodiody GaAsInP
8. Křemíkové lavinové fotodiody
9. Lavinové fotodiody s heterostrukturou
10. Spínací tranzistory BUX80
11. Spínací tranzistory SV169
12. Diody DV822
13. Lineární integrované obvody MAA125, MBA 245, MBA 125
14. Logické integrované obvody MH 7400, 7404, 7405, 7420, 7430, 7437
15. Optrony WK 16413
16. Tantalové kondenzátory TE 122
17. Hliníkové kondenzátory TF 006
1. Luminiscenční diody GaAsP
19. Schottkyho diody z NiPt
20. Odporů typu TR 296, UR 003, UR 004
21. Japonské uhlíkové práškové odpory FRD 25

Degradační procesy byly sledovány u těchto prvků:

22. Luminiscenční diody GaAsSi
23. Tyristory T911
24. Zenerovy diody KZ 260
25. Tyristory T631

26. Luminiscenční diody LQ 1732
27. Luminiscenční displeje LQ 410
28. Logické integrované obvody typu MH54ALS153
29. Křemíkové solární články

2. VYUŽITÍ SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ KVALITY STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ A KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ

2.1 PARAMETRY SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE PRO POSOUZENÍ STAVU STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ A KONSTRUKCÍ

Akustická emise v pevných látkách může být vyvolána posuvem dislokací, vznikem trhlin, změnou fáze, třením, magnetizací ferromagnetů, elektrickou polarizací, kavitací, únikem média a dalšími mechanismy.

Působením síly na krystalovou mřížku vzrůstá v mřížce mechanické napětí. Chybí-li v mřížce jeden nebo více atomů, (tzv. vakantní atomy), je porušena rovnováha vazebních sil. Při překročení meze pevnosti v kluzu přeskočí atom sousedící s vakancí na její místo a dojde k uvolnění energie. Přeskok jednoho atomu je nazýván energeticky nejméně významnou událostí. Obvykle však v reálném materiálu bývá vakancí mnoho, často tvoří mřížkové dislokace. Působením síly potom dojde k přeskoku podél celé dislokační čáry. Uvolněná energie je mnohem větší a je možné vzniklou tlakovou vlnu detekovat a vyhodnotit.

Překročením meze pevnosti vznikají v materiálu trhliny a její rozšíření se děje skokově. Trhlinou je narušen rovnovážný stav v materiálu a následně dojde k uvolnění energie. Je generována tlaková vlna se strmou náběžnou hranou relativně velmi vysoké úrovně, hovoříme o energeticky nejzávažnější emisní události.

Vznik AE posuvem dislokací a šířením trhlin je možné využít při studiu deformačních procesů, mechanismů lomů, studiu trhlin, při zatěžovacích zkouškách ocelových konstrukcí a ocelových lan, monitorování tlakových nádob, kontrole kvality třískového obrábění – diagnostice otupení. AE, vzniklá změnami fáze, je nejčastěji využívána při kontrole kvality svařování. Generování AE při tření je základem pro bezdemontážní diagnostiku strojních zařízení a jejich ložisek, zejména u pomaloběžných strojů. Metodou AE lze rovněž zjistit polarizaci dielektrik, což umožňuje monitorování vzniku nebezpečných tzv. částečných výbojů u elektrických strojů (transformátorů, dynam apod.).

Jednorázový proces, v jehož důsledku se uvolní jisté množství energie, označujeme emisní událostí. Množství elektrických signálů generovaných snímačem, které překročí jistou, předem stanovenou hodnotu, nazýváme počet impulsů. Výsledky z akustické analýzy reprezentují množstvím akustických emisních událostí, energii emisní událostí, amplitudou signálu, dobou trvání emisní událostí. Z plochy pod pracovním diagramem lze určit mechanickou energii spotřebovanou pro šíření

trhliny. Graf historie představuje časový průběh změn parametrů AE. Záznam může být buď absolutní nebo kumulativní. Při tom je vhodné kromě časové závislosti využít i zatěžovací závislosti vzhledem k tomu, že právě zatížení bývá příčinou AE. Vhodné je rovněž využívat grafu rozdělení parametrů AE. Ten ukazuje na statistické vlastnosti signálu nebo impulsů AE. Graf četností ukazuje množství impulsů připadajících ke zvolené hodnotě nebo intervalu hodnot parametru akustické emise. Rozdělení deformačních mechanismů a rozpoznání změn ve vzorku lze dobře provést právě v tomto grafu. Rovněž růst velikosti trhlin a lomy jsou patrné z grafu četností.

Pro určení polohy zdroje AE se využívají lokalizační grafy. Pro posouzení druhů zdrojů akustické emise je vhodné využívat korelační grafy např. korelační graf počtů překmitů a energií signálu AE.

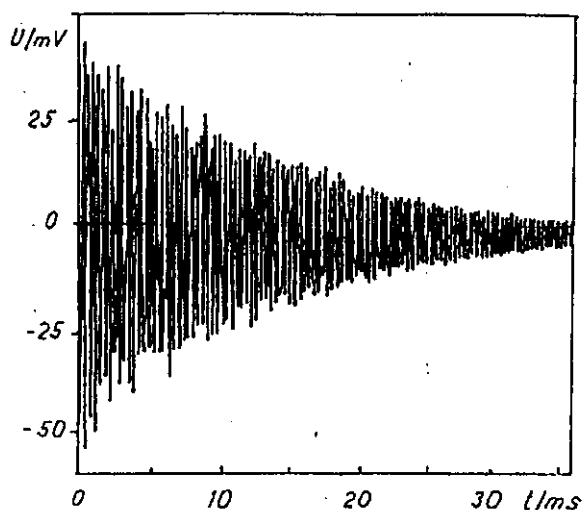
Vysokou vypovídací schopnost mají grafy po transformaci, zejména spektrální závislost impulsu AE. K výpočtu se využívá Fourierova transformace. Vzhledem k tomu, že signál akustické emise je neperiodický signál, je vhodné pro analýzu tohoto signálu použít okénkovou Fourierovu transformaci nebo waveletovou transformaci.

Okénková Fourierova transformace lokalizuje signál zároveň v čase i frekvenci tak, že ho pozoruje přes okénko konečné šířky, které se posouvá nejdříve v čase a potom se posouvá ve frekvenci. Nevýhodou jsou příliš rychlé nebo příliš pomalé děje. Diskrétní waveletová transformace řeší problém podlokalizování i přelokalizování nahrazením modulace měřítkováním. Měřítkováním zavedeme okénkovou funkci, tzv. základní wavelet, od které jsou odvozeny všechny ostatní wavelety pomocí dilatace/kontrakce a posunu.

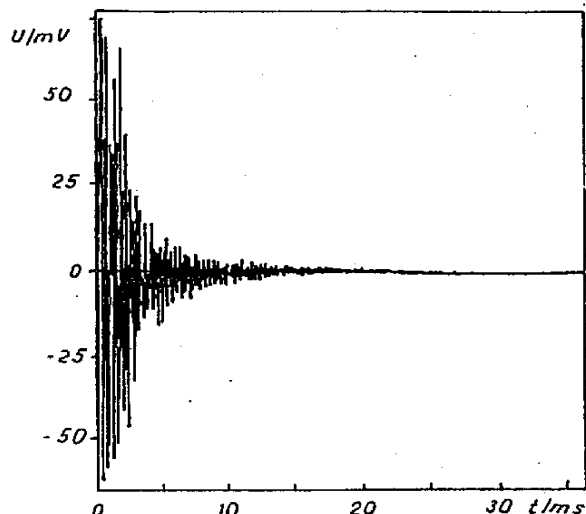
Spojité waveletové transformace má výhodu, že pro různá frekvenční pásma se používají časová okénka různých šířek a že frekvenční oblast je rozdělena logaritmičtí.

2.2 ZAMĚŘENÍ VÝZKUMU NA VYUŽÍVÁNÍ AE PŘI HODNOCENÍ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ A KONSTRUKCÍ NA NAŠEM PRACOVIŠTI

Na našem pracovišti bylo sledováno využití akustické emise při analýze strukturních změn betonu vyvolaných zásahy do složení směsí. Dále byla prováděna analýza odezvy vzorku na vnější mechanický impuls krátkodobě působící na povrchu výrobku. Zdroj simulovaného mechanického impulsu vybudí ve vzorku harmonické vlnění na vlastní frekvenci a na vyšších harmonických. Toto elastické vlnění je superponováno odraženými vlnami od strukturálních vad látky. Spektrální analýzou (frekvenční inspekci) můžeme rozlišit kvalitu materiálu.

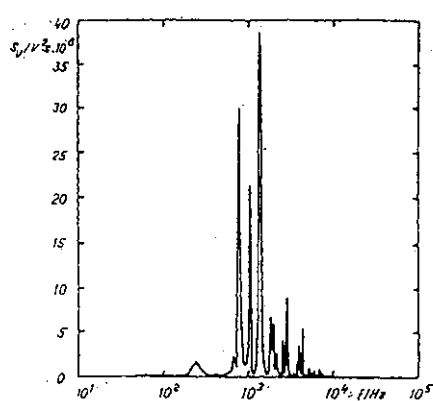


Obr. 22 Časový záznam odezvy tašky dobré kvality

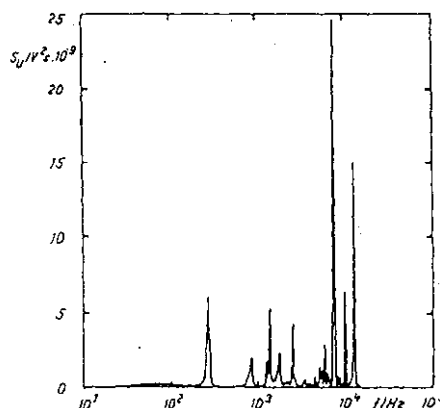


Obr. 23 Časový záznam odezvy tašky nízké kvality

Na obr. 22 a 23 jsou časové záznamy odezvy pálené tašky dvou rozdílných kvalit a na obr. 24 a 25 je pak frekvenční spektrum těchto tašek. Je patrné, že u tašky, která vykazovala vady, je časový záznam velmi rychle zatlumen a frekvenční spektrum obsahuje frekvence, které se posunuly směrem k vyšším frekvencím (10^4 Hz) oproti dobré tašce, jejíž spektrum leží v oblasti 10^3 Hz.



Obr. 24 Frekvenční spektrum tašky dobré kvality



Obr. 25 Frekvenční spektrum tašky nízké kvality

Testování stropních desek Hurdis metodou AE

V souvislosti s výskytem většího počtu havárií je naše pracoviště zapojeno i do problematiky hledání příčin poruch stropních konstrukcí s deskami Hurdis, a to v rámci možnosti posouzení jejich stavu pomocí metody akustické emise. Byla provedena srovnávací měření hurdisek kvalitních a hurdisek vykazujících trhliny. Ze spektrální analýzy vyplývá, že vady se projevují vyššími frekvencemi, a to z oblasti 1,5 kHz – 15 kHz. Obdobně byla provedena měření sendvičů připravených

z hurdisků pokrytých betonovým potěrem. Nebyla zatím provedena měření na hurdiskách zabudovaných ve stropních konstrukcích.

Využití metody akustické emise pro zjišťování stavu koroze ocelové výztuže v železobetonových konstrukcích

V současné době řešíme ve spolupráci s Centrem dopravního výzkumu Brno a ve spolupráci s řadou ústavů naší fakulty, jako je Ústav stavebnin a zkušebních metod, Ústav technologie stavebních hmot a dílců a Ústav betonových a zděných konstrukcí rozsáhlý projekt 803/120/108 „Využití metody akustické emise pro zjištění stavu koroze ocelové výztuže železobetonových konstrukcí“.

Koroze ocelových výztuží znehodnocuje technické vlastnosti, snižuje spolehlivost a zkracuje životnost železobetonových konstrukcí. V ČR je více jak 15 000 silničních mostů. Více než polovina jich vykazuje závažné poškození díky korozi a téměř 10% je zcela havarijních.

Vypracovali jsme metodiku monitorování stavu koroze výztuží železobetonových konstrukcí s využitím analýzy signálu akustické emise. Předností akustické metody testování stavu železobetonových konstrukcí je to, že se jedná o nedestruktivní diagnostiku s relativně dobrou citlivostí při zjišťování a sledování vyvíjejících se defektů. Přitom metoda akustické emise je metodou, která nezatěžuje životní prostředí ani neohrožuje zdraví obsluhy.

Využití AE pro monitorování mostů je rozšířeno v Japonsku, Rusku i USA. Výhodou je, že nevyžaduje uzavírání mostů, je to relativně rychlá a jednoduchá metoda na instalaci, umožňuje též kontinuální měření (s možností přenosu dat na dálku).

3. ZÁVĚR

Ve výzkumu jsem se zaměřil především na experimentální studium náhodných procesů v pevných látkách, a to zejména u struktur s přechodem PN s cílem využít parametrů charakteristik těchto procesů pro posouzení kvality, spolehlivosti a životnosti sledovaných struktur.

V rámci řešení této problematiky jsem vybudoval automatizované pracoviště řízené mikropočítačem pro možnost měření a vyhodnocování voltampérových charakteristik a charakteristik náhodných procesů. Na tomto pracovišti lze při měření parametrů náhodných procesů získat spektrální proudovou a napětovou hustotu v závislosti na napětí a protékáném proudu, kdy v každém bodě měření je analyzována VA-charakteristika, počítána hodnota dynamického odporu sledovaného přechodu PN a odpočítán šum pozadí pro danou paralelní kombinaci dynamického odporu přechodu PN, zatěžovacího odporu a vstupního odporu předzesilovače. Při měření a vyhodnocování frekvenční závislosti spektrální hustoty je využita metoda průběžného sledování přesnosti získané hodnoty a tím zkrácena doba měření při zachování předepsané přesnosti.

Sestavil jsem aparaturu pro měření a vyhodnocování parametrů impulsního šumu, včetně automatizovaného snímání a vyhodnocování dob zachycení a uvolnění nosičů náboje na záchytných centrech. Z výsledků měření teplotních závislostí impulsního šumu jsem pak u řady vzorků určil některé parametry poruch, jako jsou aktivační energie a záchytné průřezy. Při měření s amplitudovým analyzátořem jsem našel novou experimentální metodu určování parametrů impulsního šumu, jako je amplituda impulsního šumu a doby zachycení či uvolnění nosičů náboje na centrech, z průběhu záznamu hustoty pravděpodobnosti.

Při analýze šumových vlastností vzorků jsem dospěl k závěru, že je nezbytné sledovat nikoliv celkový proud vzorkem, ale příspěvky k nadbytečnému šumu od jednotlivých složek proudu, jako jsou nasycený proud minoritních nosičů, generačně-rekombinační proud či tunelový proud.

Provedl jsem porovnání výsledků získaných z analýzy náhodného signálu s výsledky testování součástek jinými metodami, tj parametry V-A charakteristik, porovnání s množstvím krystalografických poruch zjištěných rentgenografickou analýzou, porovnáním aktivačních energií hlubokých příměsí zjištěných metodou DLTS, nebo korelací mezi velikostí plochy nehomogenit analyzovaných metodou LBIV.

Ve druhé etapě jsem pak prováděl sledování korelace mezi degradací a změnou šumových parametrů, a to především u tyristorů T911, křemíkových solárních vzorků, ale i dalších vzorků, jako Zenerových diod, luminiscenčních diod z GaAsSi, laserů z GaAs a pod. Výsledkem tohoto studia byl výběr parametrů pro posouzení stavu degradace a prokázání vhodnosti využití šumových parametrů pro diagnostiku kvality a spolehlivosti součástek s přechodem PN a možnost predikce jejich životnosti.

V letech 1987 až 1990 byly na našem pracovišti ve spolupráci s Katedrou fyziky FEI konstruovány testovací zařízení pro posouzení kvality a spolehlivosti luminiscenčních diod a optronů pro Teslu Kolín. Zde jsem se podílel na výběru parametrů, určení hodnot rozhodovacích hladin a testování těchto přístrojů.

V posledních letech se zabývám analýzou signálu akustické emise pro možnost nedestruktivního testování stavebních materiálů a konstrukcí. Podařilo se vybudovat laboratoř vybavenou špičkovou měřicí technikou umožňující dosáhnout velmi dobrých experimentálních výsledků. Byla vypracována metoda monitorování stavu koroze výztuží železobetonových konstrukcí s využitím analýzy signálu akustické emise.

4. PŘEHLED ZAPOJENÍ AUTORA NA ŘEŠENÍ VÝZKUMNÝCH ÚKOLŮ, GRANTŮ, PROJEKTŮ A VÝZKUMU PRO VÝROBNÍ PRAXI

- 1973 – 1978 Státní úkol I-1-1/10 „Stochastické jevy v polovodičích“
- 1978 – 1985 Státní úkol I-1-1/04 „Flukтуаční jevy a ireversibilní procesy v polovodičích“
- 1986 – 1990 Státní úkol I-4-2/10 „Stochastické a degradační procesy v polovodičích“
- 1993 – 1995 GA ČR č. 103/120/93 Zhodnocení vlivu produktů vznikajících při likvidaci stavebních materiálů a výrobků na životní prostředí
- 1993 – 1995 COPERNICUS 93 – NODITO, No 7942 Noise as a Diagnostic Tool for the Reliability
- 1994 – 1996 East ELEN – European Laboratory for Electronic Noise
- 1993 – 1995 GA ČR č.103/93/2201 Akustická emise ve stavebnictví
- 1994 – 1996 GA ČR č.102/94/0858 Flukтуаční jevy ve struktuře kov-izolant-kov
- 1996 – 1998 GA ČR č.103/96/1637 Akustická emise jako nástroj růstu trhlin při dýchání tenkostěnných systémů
- 1996 – 1998 GA ČR č. 103/96/1673 Mezní stavy ocelových tlačených prutů při opakovaném namáhání
- 1996 – 1998 GA ČR Mezní stavy a působení konstrukcí ze skla, kompozitů, kovů a dřeva při namáhání
- 1997 – 1999 PECO ELEN Contact No. ERBCHXCT 920047
- 1998 – 1999 COPERNICUS – CIPA CT 940158 Control of Environmental Pollution by Tuneable Diodes Laser

- 1999 – 2001 GA ČR č. 102/99/0953 Šumová a galvanomagnetická spektroskopie materiálů $A_{II}B_{VI}$
- 1999 – 2001 GA ČR č. 102/99/1088 Šumová spektroskopie a diagnostika elektroizolačních soustav s vysoce tepelně odolnými materiály
- 1999 – 2003 **Koordinátor skupiny FYZ1** v záměru CEZ J22/98:2610007 Teorie, spolehlivost a mechanismus porušování staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí
- 2000 **Garant** grantového projektu 103/97/P140 Studium, analýza a vyhodnocení signálů akustické emise aplikované na tenkostěnné betonové systémy.
- 2001–2003 **Odpovědný spoluředitel** Projekt 803/120/108 Ministerstva dopravy a spojů ČR „Stanovení metodiky monitorování výztuží železobetonových a předpjatých konstrukcí“ ve spolupráci s Centrem dopravního výzkumu Brno
- 2001- 2002 **Odpovědný řešitel** mezinárodního Projektu spolupráce KONTAKT 2001/014 s Universitou v Ljubljani

Výzkum pro výrobní praxi

1. HČ č. 20183/79 Analýza flukтуаčních procesů v Schottkyho diodách
2. HČ č. 20022/81 Vývoj nedestruktivní diagnostické metody pro předpověď spolehlivosti založené na flukтуаčních procesech
3. HČ č. 20081/81 Studium korelace mezi šumem a životností tyristorů úkolu VHČ
4. HČ č. 20020/81 Studium šumu odporů a dielektrických ztrát
5. HČ č. 20004/81 Šum GaAs tranzistoru MESFET
6. HČ č. 204323/82 Studium degradace luminiscenčních diod LQ 110 úkolu
7. **Odpovědný řešitel**-HČ č. 207420/83 Studium korelace mezi šumem a životností tyristorů
8. **Odpovědný řešitel**-HČ č. 204439/83 Studium korelace mezi šumem a životností tyristorů
9. **Odpovědný řešitel**-HČ č. 209040/84 Šumová diagnostika tyristorů T 160
10. **Odpovědný řešitel**-HČ č. 204323/84 Studium šumových vlastností výkonových polovodičových součástek
11. **Odpovědný řešitel**-HČ č. 203751/85 Výzkum metod pro testování životnosti polovodičových součástek s přechodem PN
12. HČ č. 23564/86 Šumová diagnostická metoda pro testování integrovaných obvodů
13. HČ č. 200778/87 Ověření šumové diagnostické metody pro testování logických
14. HČ č. 216577/88 Šumové diagnostické metody pro kondenzátory
15. HČ HS 206091/89 Šum a spolehlivost kondenzátorů
16. HČ HS 207594/89 Metody prognózy spolehlivosti vysokonapěťových kondenzátorů
17. HČ HS 204609/90 Automatizace snímání mechanických tlaku
18. **Odpovědný řešitel**-HČ/90 Šum a spolehlivost integrovaných obvodů MH54ALS153
19. HČ/94 Noise Reliability Study of Power PN-Junction Devices for Siemens Munchen
20. **Odpovědný řešitel** HS 210027 Návrh specifických analogových integrovaných obvodů a provedení jejich šumové analýzy v rozsahu provozních teplot a kmitočtů pro belgickou firmu CEDO.

5. PŘEHLED NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH PUBLIKACÍ

Publikace v mezinárodních časopisech

1. Šikula J., Vašina P., Musilová V., Chobola Z., Rottbauer M.: "1/f Noise in Schottky Diodes", Phys.Stat.Sol. A-84,(1984), pp. 693-96.

2. Chobola Z.: Impulse noise in silicon solar cells. *Microelectronics Journal*, Vol.32/9 (2001), ISSN 0026-2692, pp. 707-711.
3. Chobola Z.: Noise as a tool for non-destructive testing of single-crystal silicon solar cells. *Microelectronics Reliability*, Vol. 41/12 (2001), pp. 1947-1952.
4. Chobola Z., Ibrahim A.: Noise and scanning by local illumination as Reliability estimation for silicon solar cells. *Fluctuations and Noise Letters*, Vol. 1, No. 1, (2001), L21-L2
5. Ibrahim A., Chobola Z.: Effect of illumination 1/f noise and transport characteristics of a monocrystalline silicon solar cells. *Elektronika Poland*, Vol. 12 (2001), pp. 92-97.
6. Chobola Z., Ibrahim A.: Low frequency noise and DLTS as silicon solar cell characterization tools. *Fluctuations and Noise Letters*, Vol.2, No.1 (2002), L44, in print.

Publikace v národních časopisech

1. Chobola Z., Synek S.: "Fotodiody řady SP 100", *Jemná mechanika a optika*, 1981, č. 5, str. 74-76.
2. Chobola Z., Synek S.: Rychlá fotodioda BPYP 44", *Sdělovací technika*, 1981, č. 5, str. 169-170.
3. Šíkula J., Chobola Z., Šimeček T., Hulicius E., Roskovcová L.: "Degradací procesy luminiscenčních diod z GaAs: Si", *Elektrotechnický časopis* 35, {1984}, č. 8, str. 607-612.
4. Chobola Z., Synek S.: "Studium šumových vlastností kvaternárních fotodiód na bázi GaAsInP", *Jemná mechanika a optika*, [1984], č. 11, str. 313-314.
5. Chobola Z., Synek S.: "Analýza vlastností lavinových fotodiód s heterostrukturou", *Jemná mechanika a optika*, [1986], č. 4, str. 105-106.
6. Chobola Z., Kuběna J., Pína B.: "Vliv krystalografických poruch na transportní a šumové charakteristiky tyristoru", *Elektrotechnický časopis*, 39, [1988], č. 4, str. 298-303.
7. Šíkula J., Chobola Z.: "Teplotní závislost šumu stabilizačních diód KZ 260", *Elektro-technický časopis* 41 (1990), č. 10, str. 793-799.
8. Chobola Z.: "Impulsní šum logických integrovaných obvodů typu MH 7400", *Československý časopis pro fyziku. Svazek 42A* (1992), 5/6, str. 551-555.

Publikace na mezinárodních konferencích

1. Šíkula J., Chobola Z., Vašina P.: "Noise of the Ge-Photodiodes", *Proceedings of the 9th International Symposium on Photon-Detectors IMECO*, Hungary 1980, pp. 56-63.
2. Šíkula J., Vašina P., Koktavý B., Chobola Z.: "1/f Noise in Schottky Barrier Diodes", *USA 1981 Washington, 6th Internat. Symposium Noise in Physical Systems*, (1981), pp. 248-250.
3. Šíkula J., Chobola Z., Vašina P.: Noise as a Criterion for Reliability Testing of Bipolar Transistors in Integrated Circuits. *Proceedings of the 2nd Workshop on Fluctuations and Noise in advanced Microelectronics Devices. Grenoble, France, June 1991*, pp. 3-4.
4. Šíkula J., Juránková V., Chobola Z., Vašina P.: "1/f noise and L-V characteristics of GaAsP LED's", *International conference on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations*, Japan, Kyoto (1991), pp. 36-39.
5. Šíkula J., Koktavý B., Šikulová M., Chobola Z., Vašina P.: Noise as a Criterion for Reliability Testing of Bipolar Transistors in Integrated Circuits. *Proceedings of the 3rd European Symposium on Reliability of Electron Devices*, 5.-8. October 1992, Gmund, Germany, ESREF 92, pp. 415-418.
6. Chobola Z., Vašina P., Šíkula J.: RTS Noise in Integrated Circuits. *Proceedings of the 12th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations*. August 1993 St.Louis, Missouri USA, pp. 212-215.
7. Šíkula J., Koktavý B., Vašina P., Chobola Z., Juránková V.: Noise Reliability Indicators. *Proceedings of the 4th European Symposium on Reliability of Electron Devices. ESREF 93. Bordeaux - France*, 4. - 7. 10. 1993, pp. 341-346.

8. Chobola Z., Pazdera L., Šikula J., Vašina P.: Noise in NiPt Schottky Diodes. Proceedings of ELEN Workshop, Montpellier, 18.-20. October, 1994, pp. 126-132.
9. Šikula J., Koktavý B., Vašina P., Chobola Z., Schauer P., Kořenská M.: Noise Diagnostics of PN-Junction Power Devices. Proceedings of Conference ESREF 94, Glasgow, Scotland 4. - 7. 10. 1994, pp. 217-220.
10. Šikula J., Schauer P., Vašina P., Šikulová M., Koktavý B., Chobola Z., Navarová H., Pazdera L.: 1/f Noise in Metallic Thin Films. Proceedings of the Sixth Van der Ziel Symposium on Quantum 1/f Noise and other Low Frequency Fluctuations in Electronic Devices, May 27-28, 1994, St.Louis, Missouri, USA, pp. 11-16.
11. Chobola Z., Hruška P., Pazdera L., Juránková V., Šikula J.: Noise Reliability Indicators for Solar Cells. Proc. of Second ELEN Conf., Grenoble, France, 25. - 27. 10. 1995, pp. 505/1-6.
12. Hruška P., Chobola Z., Šikula J.: Transport Reliability Indicators for Solar Cells. Proceedings of Second ELEN conference, Grenobl, France 25. - 27. 10. 1995, pp. 506/1-12.
1. Chobola Z., Šikula J., Vašina P., Pazdera L., Juránková V., Řehák Z.: Analysis of Noise Properties of R1 Solar Cells. Proc. of the Int. NODITO Workshop, Brno 1995, pp. 220-223.
14. Hruška P., Chobola Z., Pazdera L., Juránková V., Šikula J.: Analysis of Solar Cell Transport Properties. Proceedings of the International NODITO Workshop, Brno 1995, pp. 216-219.
15. Chobola Z., Vašina P., Šikula J., Juránková V., Claeys C., Simoen E.: 1/f Noise and DLTS in LEDS. Proceedings Third ELEN Workshop Leuven, Belgium 1996, pp. 32-36.
1. Jurankova V., Chobola Z.: DLTS and noise in LEDS, Proceedings of Workshop 97, Kočovce, Slovakia 1997, pp. 92-95.
17. Navarova H., Jurankova V., Chobola Z.: Experimental study of impuls arise in high-tension bushings. Proceeding of Workshop 97, Kočovce, Slovakia, 1997, pp. 96-100.
18. Jurankova V., Navarova H., Chobola Z.: Random current impulse in high-tension bushings. Proceeding of Workshop 97, Kočovce 97, Slovakia 1997, pp. 101-106.
19. Chobola Z.: Non-destructive testing of contact on GaSb substratcs. Proceedings of Workshop 97, Kočovce, Slovakia 1997, pp. 119-122.
20. Ibrahim A., Chobola Z.: Low Frequency Noise in Monocrystalline and Polycrystalline Solar Cells. Proc. of 5th Electronic Devices and Systems Conference 1998, Brno, pp. 105-108.
21. Vaněk J., Chobola Z., Kazelle J.: New Methodes for Testing Quality of Solar Cells and Employment of Photovoltaic Systems in Czech Republic. Proceedings of 5th Electronic Devices and Systems Conference 1998, Brno, pp. 109-112.
22. Ibrahim A., Chobola Z.: Capacitance measurements for a monocrystalline solar cells made in Czech Republic. In: Proc. of International Scientific Conference, Bratislava, 1998, pp. 25-28.
23. Ibrahim A., Chobola Z.: Reliability of monocrystalline silicon solar cells. In: Proceedings of International Scientific Conference, Bratislava, 1998, pp. 29-32.
24. Chobola Z., Juránková V.: Noise testing of heterostructure laser basen on GaSb and InAs. In: Proceedings of the XI. Int. Scientific Conference, Brno, 1999, pp. 115-118.
25. Ibrahim A., Chobola Z.: Effect of temperature cycling above room temperature on the noise spectral voltage density for a monocrystalline silicon solar cells. In: Proceeding of the XI. International Scientific Conference Brno, 1999, pp. 119-121.
26. Ibrahim A., Chobola Z.: A comparison between homogeneity and noise measurement for a monocrystalline silicon solar cells. In: Proceeding of the XI. International Scientific Conference, Brno, 1999, pp. 123-126.
27. Chobola Z., Kořenská M., Melcher J., Pazdera L., Smutný J., Weber Z.: Application of discrete wavelet transform to analysis acoustic emission signal generate at determination strength limit of glass walls. In: Proc. of Int. Workshop, Bratislava, 2000, pp. 109-110.

28. Chobola Z., Kořenská M., Pazdera L., Smutný J., Šikula J., Weber Z.: Non-destructive testing method – acoustic emission with generated load. In: Proceedings of International Workshop, Bratislava 2000, pp. 63-69.
29. Chobola Z., Juránková V., Slaidiňš I.: Non-destructive testing of heterostructure laser based of GaInAsSb. In: Proc. of International Workshop, Bratislava, 2000, pp. 53-56.
1. Ibrahim A., Chobola Z.: Invited paper. Effect of illumination on 1/f noise and transport characteristic of a monocrystalline silicon solar cells. In: Proceedings of Seminar Noise 2000, Gdaňsk, Poland, 2000, pp. 10.
31. Ibrahim A., Chobola Z.: Temperature dependence of 1/f noise and transport characteristics as a nondestructive testing of monocrystalline silicon solar cells. In: Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma (Italy), 15.–21. October 2000, pp. 231-235.
32. Kořenská M., Chobola Z., Pazdera L., Řitičková L.: Method of concrete crossbeam with cyclic bend loading. In: Proceedings of 15th World Conference on Non-destructive Testing, Roma, Italy, 15.-21. October 2000, p. 83.
33. Chobola Z., Ibrahim A., Ruzicka Z.: Light beam induced voltage (LBIV), low frequency noise and DLTS as silicon solar cell characterization tools. In: Proceedings of the 6th International Conf. of Slovenian Society for Non-destructive Testing, Portorož, Slovenia, 2001, pp. 335-361.
34. Ibrahim A., Chobola Z., Šikula J.: Non-linearity and Noise as a Quality Indicators for Silicon Solar Cells. In: Proceedings of 16th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations, Florida, USA, 2001, pp. 739-742.
35. Chobola Z., Ibrahim A.: C-V and DLTS as a characterization Tools for Silicon Solar Cells. In: Proceedings of 23rd International Conference on Microelectronics, Niš, Yugoslavia, May 2002. Accepted in print.

Dalších 66 článků bylo publikováno ve sbornících národních konferencí a v Knížnici VUT.

6. PEDAGOGICKÁ ČINNOST AUTORA

Od nástupu na katedru v roce 1973 jsem byl zapojen do výuky, a to i po dobu interní aspirantury. Nejprve jsem byl pověřován vedením teoretických a laboratorních cvičení. Od roku 1981 pak rovněž přednáškami, a to na oborech Ekonomika a řízení stavebnictví, Konstrukce pozemních staveb a Pozemní stavby. V současné době přednáším v předmětech Fyzika I a Fyzika II v rámci společného studijního plánu všech stavebních oborů a Physics 1 a Physics 2 pro výuku v anglickém jazyce. Pro studenty studující v anglickém jazyce jsem připravil skripta příkladů a Anglicko-český a Česko-anglický slovník fyzikálních výrazů. Podílím se také na výuce výběrového předmětu P3 Automatizace měření v rámci doktorského studia. Při výuce mám velmi dobrý vztah ke studentům, učivo se snažím podávat ve srozumitelné formě. Při přednáškách využívám audiovizuální techniku a reálný experiment.

Od roku 1988 se zabývám zaváděním výpočetní techniky pro podporu výuky fyziky. Navrhl jsem a dosáhl zařazení nového doporučeného předmětu s názvem Elektronizace a automatizace měřících metod ve stavebnictví, jehož výuka byla zahájen ve školním roce 1987/88. Náplní tohoto předmětu je seznámit studenty s čidly umožňujícími převod fyzikálních veličin na elektrický signál, způsob budování automatizovaných pracovišť řízených mikropočítači a sestavování potřebných softwarových vybavení. Společně s doc.Koktavým jsem napsal skripta pro tento nový předmět. V současné době je tento předmět zařazen jako výběrový v rámci II. Ročníku doktorského studia.

Dále jsem se podílel na tvorbě skript - Doc.Schauer a kol.: Fyzika - laboratorní cvičení, MON Praha, 1991 a jsem autorem skript Mechanika deformovatelných těles, Brno, 1994.

Výrazných úspěchů jsem dosahoval při práci s talentovanými studenty v oblasti SVOČ a STČ.

Od roku 1978 jsem členem zkušebních komisí pro přijímací řízení a od roku 1994 jsem pověřován funkcí předsedy přijímacích komisí studentů. Od roku 1998 jsem členem Oborové pedagogické rady oboru K a E a Oborové pedagogické rady doktorského studia pro obor Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství. V letech 1987 - 1989 jsem byl členem komise pro výpočetní techniku a modernizační komise na FAST VUT.

Významných úspěchů jsem dosáhl při výchově nových vědeckých pracovníků. V roce 1993 ukončil pod mým vedením interní aspiranturu Ing. Le Ba Thuan z Vietnamu s prací „Predikce spolehlivosti a životnosti logických integrovaných obvodů pomocí šumu“, v roce 1993 Ing. Vlasta Juránková, odborná asistentka Ústavu fyziky FAST s prací „Šumová diagnostika luminiscenčních diod“. V roce 2001 ukončil pod mým vedením interní aspiranturu Dr. Ali Ibrahim z Egypta s prací „Non-destructive testing of solar cells“. V současné době jsem školitelem dvou doktorandů v oboru 36-33-9 Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, a to Mgr. Jana Martinka a Mgr. Petry Mikulkové.

Své organizační schopnosti využívám při modernizaci výuky zejména v oblasti laboratoří a zavádění výpočetní techniky. Za svoji pedagogickou činnost jsem byl v roce 1979 a 1986 oceněn děkanem fakulty. Moderní přístupy k využití výpočetní techniky ve výuce fyziky jsem prosazoval též jako člen komise pro fyziku Jednoty československých matematiků a fyziků.

Od roku 1997 jsem členem Akademického senátu fakulty, kde pracuji v ekonomické a vědecké komisi a dále jsem členem vědecké a ekonomické komise děkana fakulty. Od roku 2000 jsem členem Vědecké rady Stavební fakulty VUT v Brně.

Od roku 1994 jsem vedoucím Ústavu fyziky. V této funkci se snažím, aby výuka fyziky byla více zaměřena na oblast stavební problematiky. To se projevilo jak v zařazení celé řady nových laboratorních úloh s tematikou blízkou stavebnictví do výuky, tak i v úpravě osnov jednotlivých předmětů.

7. KONCEPCE DALŠÍ AUTOROVY PEDAGOGICKÉ A VĚDECKÉ ČINNOSTI

V pedagogické oblasti bych chtěl jednak pokračovat v organizaci úprav laboratorních úloh pro studenty tak, aby rostl podíl úloh, které lépe charakterizují fyzikální vlastnosti uplatňující se ve stavební praxi. V rámci přednášek pak posilovat fyzikální představu studentů o hmotě, energii a pohybu v prostoru a čase se specifickým zaměřením na poznatky souvisejícími se stavební problematikou tak, aby studenti byli schopni tvůrčím způsobem reagovat na měnící se podmínky výrobních technologií či změnu materiálů využívaných ve stavebnictví.

Ve vědeckovýzkumné a odborné činnosti předpokládám pokračování v následujících oblastech:

- zhodnotit vysokou úroveň, kterou jsme dosáhli v oblasti studia využití parametrů náhodných procesů pro nedestruktivní testování spolehlivosti, kvality a predikci životnosti elektronických součástek zejména se zaměřením ve spolupráci s výrobním podnikem Soltech na zvyšování kvality a efektivity konverze sluneční energie na elektrickou pomocí solárních článků, které budou hrát stále větší roli jako alternativní zdroj energie.
- rozšiřovat mezinárodní spolupráci v oblasti studia využití parametrů náhodných procesů pro nedestruktivní testování spolehlivosti a kvality materiálů a struktur s cílem zvýšení pravděpodobnosti získání grantů, projektů či hospodářských zakázek v této oblasti.

V oblasti studia využití akustické emise pro nedestruktivní testování kvality stavebních materiálů a konstrukčních prvků využívaných ve stavebnictví se zaměřím na tyto oblasti:

- další zkvalitňování přístrojového vybavení laboratoří zaměřených na diagnostiku využívající parametry akustické emise.
- získávání nadaných studentů do doktorského studia v oblasti využití fyzikálních jevů pro posouzení vlastností stavebních materiálů a konstrukcí se zaměřením především na využití parametrů akustické emise.
- posílení spolupráce s odbornými specializovanými pracovišti, jako jsou Ústav stavebnin a zkušebních metod, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Ústav betonových a zděných konstrukcí a Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, jakož i s institucemi mimo fakultu, jako je Centrum dopravního výzkumu, Kloknerův ústav apod., s cílem dosáhnout toho, abychom byli schopni poznatky, které jsme získali v laboratořích, přenést, realizovat a využít při měření in situ.

ABSTRACT

I focused my research efforts on experimental study of random processes in solids, especially in PN junction structures, with the goal to employ these characteristics to the respective devices' quality assessment and reliability and service life prediction.

In the framework of the research, I have built an automatic-operating, computer-controlled apparatus intended to measure and evaluate U-I characteristics and random process characteristics. When measuring noise, this apparatus allows the operator to obtain the voltage as well as current spectral density versus voltage or current plots. In addition, the U-I curve is analyzed, the dynamic resistance of the PN junction under test and the background noise for the PN junction dynamic resistance in parallel with the load resistance and the amplifier input resistance are calculated for each particular voltage or current set-point value. When measuring and evaluating the spectral density versus frequency plots, the measured value accuracy is being traced continuously, which allows the measurement time interval to be shortened while maintaining the required accuracy.

I have assembled an apparatus to measure and evaluate impulse noise parameters, which is capable, among others, to automatically scan and evaluate the charge carrier respective capture and emission times on/from trapping centres. From the results of the impulse noise characteristic temperature dependence measurements, I have determined some defect parameters, such as activation energies and capture cross sections. While employing the amplitude analyzer, I invented a new experimental method to measure some of the impulse noise parameters, such as the impulse noise amplitude and the carrier capture and emission times, based on the probability density plot analysis.

When analyzing the sample noise behaviour, I have arrived at a conclusion that what matters for the analysis is the different noise-contributing current components, such as minority carrier saturated current, generation-recombination current or tunnel current, rather than the total sample current.

I have compared the results obtained from a random signal analysis with those obtained via other methods, such as: U-I characteristic analysis, amount of crystallographic defects by X-ray analysis, deep centre activation energies by DLTS method, or, correlation between inhomogeneity area as analyzed by means of LBIV (Light Beam Induced Voltage) method.

In the second stage, I studied the correlation between the device degradation and the noise parameter evolution, in the first place, for T911 type thyristors, silicon solar cells as well as other specimens, such as Zener diodes, GaAsSi light emitting diodes, GaAs lasers, etc. These studies have resulted in a set of parameters which are well suited for assessing the device degradation progress. Moreover, the studies also proved that noise parameters make suitable tools to diagnose the PN junction device quality and predict their service life.

In the period from 1987 to 1990, this Department, in cooperation with the Department of Physics of the Faculty of Electrical Engineering, designed light emitting diode and optocoupler quality and reliability testers for Tesla Kolín factory. Here, I took part in the choice of device quality criteria, definition of discrimination levels and testing of these instruments.

Recently, I have been dealing with acoustic emission signal analysis, which provides a powerful tool to test building materials and structures. I have managed to establish an up-to-date instrumentation equipped laboratory, allowing the researchers to achieve very good experiment results. A method to monitor the reinforced concrete armature corrosion progress employing acoustic emission method has been elaborated.