

Ing. Karol Rendek

Autoreferát dizertačnej práce

## **Diagnostika šumových vlastností tranzistorov GaN HEMT**

### **Noise analysis of GaN HEMTs**

na získanie akademickej hodnosti Philosophiae Doctor (PhD.)

v doktorandskom študijnom programe mikroelektronika

v študijnom odbore 5.2.13 elektronika

Bratislava, marec 2014



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Karol Rendek

Autoreferát dizertačnej práce

**Diagnostika šumových vlastností tranzistorov GaN HEMT**

**Noise analysis of GaN HEMTs**

na získanie akademickej hodnosti Philosophiae Doctor (PhD.)  
v doktorandskom študijnom programe mikroelektronika  
v študijnom odbore 5.2.13 elektronika

Bratislava, marec 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Karol Rendek  
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Alexander Šatka, CSc.  
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

Oponenti: Ing. Ján Kuzmík, DrSc.  
Elektrotechnický ústav SAV  
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

prof. Ing. Dušan Pudiš, PhD.  
Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita  
Univerzitná 1  
010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ..... o ..... hod. na  
Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave,  
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava.

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.  
dekan FEI STU

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Nízkofrekvenčný šum tranzistorov GaN HEMT.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Tézy dizertačnej práce.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Použité metódy riešenia.....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Zhrnutie dosiahnutých výsledkov .....</b>	<b>9</b>
5.1	Nízkofrekvenčný šum tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT .....	9
5.1.1	Vplyv osvetlenia na nf šum tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT .....	13
5.2	Nízkofrekvenčný šum InAlN/GaN HEMT tranzistorov .....	17
<b>6</b>	<b>Zhrnutie a závery .....</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Summary .....</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Hlavné prínosy dizertačnej práce .....</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	<b>Publikačná činnosť doktoranda .....</b>	<b>22</b>
<b>10</b>	<b>Zoznam použitej literatúry.....</b>	<b>24</b>

# 1 Úvod

V mikroelektronike neustále prebieha vývoj elektronických prvkov a štruktúr s cieľom dosiahnuť vysokú spoľahlivosť, stabilitu, dlhú životnosť a odolnosť voči vonkajším vplyvom ako je napríklad vysoká teplota, vibrácie, elektrické rušenie, prípadne rôzne typy žiarenia. K dosiahnutiu spomenutých vlastností sú vyvíjané a neustále zdokonaľované meracie metódy, ktoré zefektívňujú a skvalitňujú vývojový proces elektronických prvkov.

Jednou z takýchto metód je nízkočfrekvenčná (nf) šumová analýza, umožňujúca charakterizovať veľkosť šumu elektronických prvkov ako aj jeho vlastnosti vo frekvenčnej a časovej oblasti. Je známe, že spektrá nízkočfrekvenčného šumu pozostávajú z rôznych typov nízkočfrekvenčného šumu, pričom každý z nich má charakteristické správanie v časovej a vo frekvenčnej oblasti, podmienené fyzikálnou podstatou jeho vzniku. Šumová analýza preto umožňuje skúmať výskyt záchytných centier, nedokonalostí a nečistôt v štruktúrach PN priechodov, vodivých kanálov tranzistorov a oblasti riadiacej elektródy, čo poskytuje spätnú väzbu pre technológov. Kľúčovou vlastnosťou nízkočfrekvenčnej šumovej analýzy je jej vysoká citlivosť na defekty v kryštalickej mriežke, defekty vzniknuté počas rastu vrstiev tvoriacich štruktúru prvku, alebo finálneho spracovania elektronického prvku do konečnej podoby (kontaktovanie, púzdrenie). Výsledky nízkočfrekvenčnej šumovej analýzy elektronických prvkov sú taktiež veľmi užitočné pri návrhu a realizácii elektronických obvodov ako napr. zosilňovače a oscilátory, kde veľkosť a tvar spektrálnych charakteristík nízkočfrekvenčného šumu použitých elektronických prvkov ovplyvňuje citlivosť, stabilitu a spoľahlivosť celého obvodu.

Vďaka obsiahlym prácam v poslednom období sú jednotlivé zdroje nízkočfrekvenčných šumov v elektronických prvkoch a obvodoch pomerne dobre preskúmané. Publikované štúdie objasňujú fyzikálny pôvod jednotlivých typov šumu, pomocou ktorých je možné získať súvislosť medzi vlastnosťami elektronických prvkov, použitým materiálom, štruktúrou prvku a jeho poruchami. Napriek spomenutému množstvu nepopierateľných výhod šumovej spektrálnej analýzy, práce zaoberajúce sa problematikou nízkočfrekvenčného šumu obsahujú prvky neistoty. Príčinou je výskyt fluktuácií typu  $1/f$ , ktorých pôvod nie je dodnes dostatočne pochopený, čo podporuje ďalší výskum v tejto oblasti.

Pokrok v technológiách tranzistorov GaN HEMT, považovaných za budúcich kandidátov v oblasti bezdrôtovej a výkonovej elektroniky, umožnil realizáciu funkčných zosilňovačov

pracujúcich v oblasti veľmi vysokých frekvencií využitím komerčne dostupných GaN HEMT tranzistorov. Avšak, napriek dosiahnutému výraznému pokroku v technológií tranzistorov GaN HEMT z pohľadu dlhodobej spoľahlivosti je potrebná ďalšia optimalizácia [1]. Z tohto dôvodu je pre udržanie pokroku v technológií GaN HEMT kľúčové určiť dominantné zdroje nízkofrekvenčného šumu a ich pôvod. V predchádzajúcich štúdiách nízkofrekvenčných šumových spektrálnych charakteristík GaN HEMT tranzistorov bolo naznačené, že záchytné centrá v zakázanom pásme sú jedným zo zdrojov šumu. Ku ďalším možným zdrojom nízkofrekvenčného šumu môžu patriť: povrchové efekty (povrchové stavy), samotný objem materiálu, dislokácie, tunelovanie, nerovnomerný odpor kanálu, kvantové efekty a iné.

V predloženej dizertačnej práci je uvedený prehľad dostupných informácií o zdrojoch šumu v polovodičových elektronických prvkoch a štruktúrach so zameraním na GaN HEMT tranzistory, spôsoboch jeho merania a analyzovania za účelom získať kvalitatívnu informáciu o vlastnostiach skúmaných prvkov a ich štruktúre. Doterajšie výsledky nízkofrekvenčnej šumovej analýzy GaN HEMT naznačujú, že okrem skúmania šumových vlastností GaN HEMT tranzistorov v závislosti od pracovného bodu, prípadne od teploty je potrebné nájsť nové metódy umožňujúce hlbšie preskúmať pôvod nízkofrekvenčného šumu. Cieľom práce je preskúmať spektrálne charakteristiky nízkofrekvenčného šumu tranzistorov GaN HEMT pomocou existujúcich a vyvinutých nových metód nízkofrekvenčnej šumovej spektrálnej analýzy, s cieľom podrobnejšie charakterizovať zdroje nízkofrekvenčného šumu GaN HEMT a hlbšie analyzovať príčinu ich vzniku.

## 2 Nízkofrekvenčný šum tranzistorov GaN HEMT

Počas posledných niekoľkých rokov boli šumové vlastnosti GaN HEMT intenzívne skúmané mnohými autormi [2], [3], [4], [5] s cieľom podrobne preskúmať dominantné zdroje nf šumu a následne ich korelovať so štruktúrou a technológiou prípravy. Napriek snahe autorov a množstvu prác zaoberajúcich sa problematikou nf šumovej analýzy, aj v súčasnosti pretrváva snaha o priamu koreláciu medzi tvarom a veľkosťou nf šumových spektrálnych charakteristík s miestom vzniku dominantných zdrojov nf šumu v skúmanej štruktúre GaN HEMT. Najvýznamnejším zdrojom nf šumu HEMT tranzistorov je  $1/f^\gamma$  šum, pričom koeficient  $\gamma$  je obvyčajne v rozsahu od 0,7 po 1,3 [6]. Bolo pozorované, že koeficient  $\gamma$  zvyčajne klesá pri zvyšovaní napätia  $V_{ds}$  a klesá len veľmi mierne so zvyšovaním  $I_{ds}$ . Taktiež závisí od teploty.

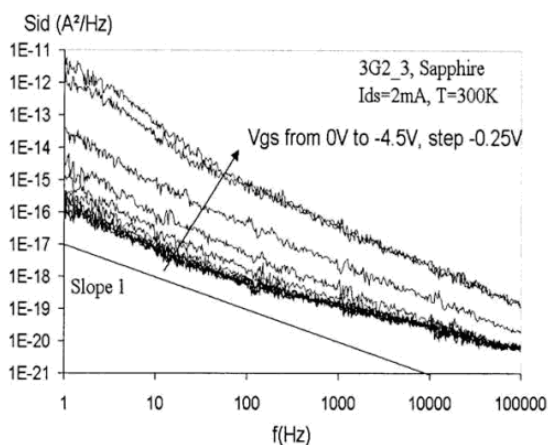
Výsledky prác [7], [6] pripísali toto správanie k efektu pascí, tunelovaniu a efektu horúcich elektrónov. „Vypukliny” v šumovom spektre sú výsledkom g-r procesu. Zdrojom tepelného šumu v GaN/GaAs HEMT je parazitný odpor  $R_d$ ,  $R_s$  a odpor kanála. Výsledky doterajších prác naznačujú, že jedným zo zdrojov nf šumu sú pasce s rôznymi energiami nachádzajúce sa v zakázanom pásme. Inými možnými zdrojmi môžu byť povrchové javy, samostatný objem materiálu, dislokácie, tunelovanie, nerovnomerný odpor kanála, kvantové efekty a iné. Nf šum HEMT tranzistorov je o niekoľko rádov vyšší ako šum bipolárnych tranzistorov, avšak postupný vývoj prispieva k jeho potlačeniu [7].

Pri skúmaní kolektorového šumu (výstupného šumu) tranzistorov GaN HEMT bolo zistené, že  $1/f$  šum patrí ku dominantným zložkám pričom ostatné zdroje sú prekryté jeho typickým  $1/f$  tvarom [2]. *Rumyantsev et al.* ukázali z korelácie medzi veľkosťou prúdu riadiacej elektródy a hodnotou výstupného šumu v tranzistoroch GaN HFET [3], že príspevok fluktuácií pochádzajúcich z hradlového prúdu ku nf kolektorovému prúdovému šumu je úplne prekrytý nf šumom pochádzajúcim z kanála v prvkoch s relatívne vysokou hodnotou  $1/f$  šumu vo výstupných charakteristikách. Na druhej strane zistil, že nf šum pochádzajúci z hradlového prúdu môže výrazne prispievať ku výstupnému šumu pri tranzistoroch s nízkou hodnotou  $1/f$  šumu vo výstupných charakteristikách. Bolo pozorované, že šumová spektrálna hustota hradlového prúdu  $S_{ig}$  je viac ako tri rády nižšia v porovnaní s kolektorovým šumom [7], [6].

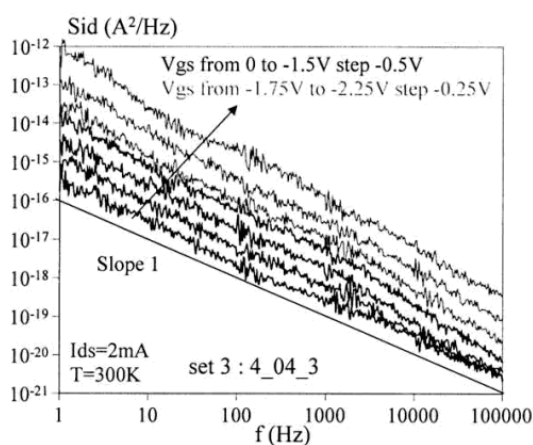
Z pozorovania [7] je známe, že HEMT tranzistory, ktorých zvyškový hradlový prúd sa výrazne mení v závislosti od hradlového napätia majú taktiež vysokú zmenu vo veľkosti nf šumu. *Curutchet et al.* zistili v rozsiahlej štúdií šumových vlastností GaN HEMT tranzistorov [4], že hodnota Hoogeho parametra  $\alpha_H$  troch štruktúr GaN HEMT vytvorených na troch rozdielnych substrátoch je  $\alpha_{HSiC} > \alpha_{HSi} > \alpha_{Hzafir}$ , čo odzrkadľuje aktuálny technologický vývoj. Na základe týchto pozorovaní *Curutchet et al.* dokázali, že hlavný zdroj  $1/f$  šumu v kolektorovom šume pochádza z fluktuácií nachádzajúcich sa nielen v kanáli, ale aj v blízkosti Schottkyho riadiacej elektródy [4] bez spresnenia miesta vzniku.

Na obr. 1 [4] sú závislosti šumovej spektrálnej hustoty kolektorového prúdu  $S_{id}$  od napätia hradlo–emitor  $V_{gs}$  pri konštantnej hodnote kolektorového prúdu  $I_d$  pre HEMT-y na zaříre a Si substráte. Nf kolektorový prúdový šum HEMT tranzistorov na zaříre (obr. 1a) nie je závislý od napätia na hradle pre  $-2,5V < V_{gs} < 0$ . Pre napätia  $V_{gs}$  medzi  $V_{th}$  a  $-2,5 V$  hodnota šumu prudko narastá. Podobné správanie bolo pozorované aj v GaN HEMT tranzistoroch na substráte SiC.





(a)

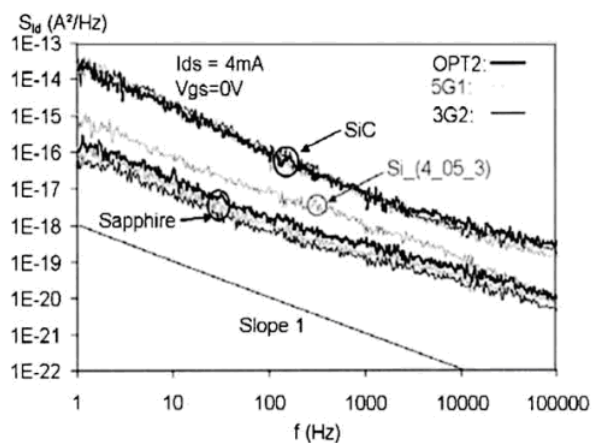


(b)

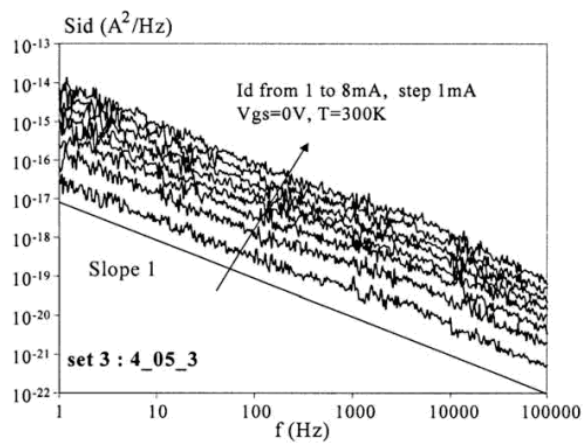
**Obr. 1** Závislosť šumovej spektrálnej hustoty kolektorového prúdu  $S_{id}$  od hradlového napätia  $V_{gs}$  tranzistora HEMT na substráte a) zafír, b) Si [4].

Na druhej strane nf kolektorový prúdový šum HEMT tranzistorov na Si substráte (obr. 1b) stúpa, keď  $V_{gs}$  klesá po  $V_{th}$ . Toto správanie odhaľuje, že fluktuácie sa nachádzajú skôr v kanáli (2DEG) ako v prístupových (kontaktných) oblastiach.

Na obr. 2a [4] je porovnanie šumovej spektrálnej hustoty kolektorového prúdu pre HEMT na SiC a zafíre s tromi rôznymi rozmermi pri teplote 300 K. Závislosť šumovej spektrálnej hustoty kolektorového prúdu  $S_{id}$  od jednosmerného kolektorového prúdu  $I_d$  pre HEMT na Si substráte je na obr. 2b.



(a)



(b)

**Obr. 2** Závislosť šumovej spektrálnej hustoty kolektorového prúdu  $S_{id}$  a) pri  $I_d = 4$  mA a  $V_{gs} = 0$  V, na SiC, zafíre a Si substráte, b) závislosť  $S_{id}$  od  $I_d$  pri  $V_{gs} = 0$  V, pre tranzistor na Si substráte [4].

Tranzistory na SiC vykazujú najväčší šum, pričom ich spektrum bolo z veľkej časti zložené z  $1/f$  šumu. Pre tranzistory na zafíre boli dominantnými šumovými prispievateľmi v spektrálnej charakteristike  $1/f$  a G-R šum s hraničnou frekvenciou približne 10 kHz. Neskôr

*Rao et al.* uskutočnili súčasné/simultánne meranie vstupného a výstupného šumu čo viedlo k zisteniu, že kolektorový šum pochádza najmä z časti kanála pod hradlovou elektródou a je tvorený stabilným 1/f šumom bez výrazných G-R šumových komponentov. Na rozdiel od pozorovaní vzájomnej korelácie medzi vstupným a výstupným nf šumom GaN HEMT tranzistorov s nízkou hodnotou 1/f šumu vo výstupných nf šumových charakteristikách [2], *Rao et al.* zistili, že v nimi skúmaných AlGaIn/GaN HEMT tranzistoroch je extrémne nízka korelácia medzi hradlovým a kolektorovým prúdovým šumom. To je v zhode s výsledkom práce *Rumyantsev et al.*, kde je príspevok fluktuácií pochádzajúcich z hradlového prúdu ku nf kolektorovému prúdovému šumu úplne prekrytý nf šumom pochádzajúcim z kanála v prvkoch s relatívne vysokou hodnotou 1/f šumu vo výstupných šumových charakteristikách.

*Alamo et al.* zistili, že záchytné centrá vo vrstve AlGaIn vytvárajú cestu pre zvodový prúd tvorený elektrónmi z oblasti riadiacej elektródy do oblasti kanála, pričom množstvo zachytených elektrónov ovplyvňuje veľkosť prúdu riadiacej elektródy. Zachytené elektróny svojím elektrostatickým poľom odpudzujú elektróny z kanála, čo následne čiastočne degraduje  $I_{Dmax}$  a  $R_D$  [8]. Ďalej bolo v práci zistené, že zachytené elektróny je možné urýchlene uvoľniť zo záchytných centier pomocou UV ožiarenia povrchu tranzistorov. *Dyakonova et al.* po prvýkrát vo svojej práci preskúmala efekt vnútro - pásmového ožiarenia s energiou fotónov  $E_{ph} < E_g$  ( $E_g$  je šírka zakázaného pásma) a medzi - pásmového ožiarenia s energiou fotónov  $E_{ph} > E_g$  na nf šum v hexagonálnej polytype štruktúre n-typu GaN získanú epitaxiou na zafirovom substráte vo frekvenčnom rozsahu od 20 Hz do 20 kHz [9] a v teplotnom rozsahu od 80 do 400 K. Zistila, že ožiarenie s energiou fotónov  $E_{ph} < E_g$  nemá vplyv na hodnotu šumu, dokonca i pre relatívne vysoký nárast fotovodivosti ( $\Delta\sigma/\sigma \approx 50\%$ ). Na druhej strane ožiarenie s energiou fotónov  $E_{ph} > E_g$  malo vplyv na hodnotu nf šumu v celom skúmanom teplotnom rozsahu [9]. V práci [10] bol skúmaný nf šum v GaN/GaAlIn heteroštruktúre pri UV ožiarení, avšak vplyv UV ožiarenia na vstupný a výstupný nf šum v AlGaIn/GaN HEMT tranzistoroch nebol doteraz dostatočne preskúmaný. Z pohľadu autora je užitočné preskúmať šumové spektrálne charakteristiky GaN HEMT tranzistorov pri ožiarení štruktúry tranzistora rôznymi vlnovými dĺžkami za účelom preskúmania vplyvu aktivovaných záchytných centier nachádzajúcich sa v zakázanom pásme štruktúry na nf šumové spektrálne charakteristiky.

### 3 Tézy dizertačnej práce

Z uvedeného literárneho prehľadu je vidieť, že práca ktorá by jasne a jednoznačne lokalizovala zdroje šumu v GaN HEMT štruktúre, vysvetlila ich fyzikálny pôvod a opísala vplyv na správanie sa prvku v reálnych aplikáciách nie je doposiaľ zverejnená. Jednou z možných príčin je, že teória vysvetľujúca fyzikálny pôvod  $1/f$  šumu nie je doteraz zjednotená. Ďalším vysvetlením je aj to, že skúmané vzorky GaN HEMT sú vyrábané rôznymi technologickými postupmi v závislosti od možností jednotlivých pracovísk.

Na základe poznatkov získaných analýzou súčasného stavu problematiky merania a nízkofrekvenčnej šumovej analýzy elektronických prvkov, ako aj aktuálnej potreby preskúmať šumové vlastnosti GaN štruktúr boli sformulované ciele dizertačnej práce nasledovne:

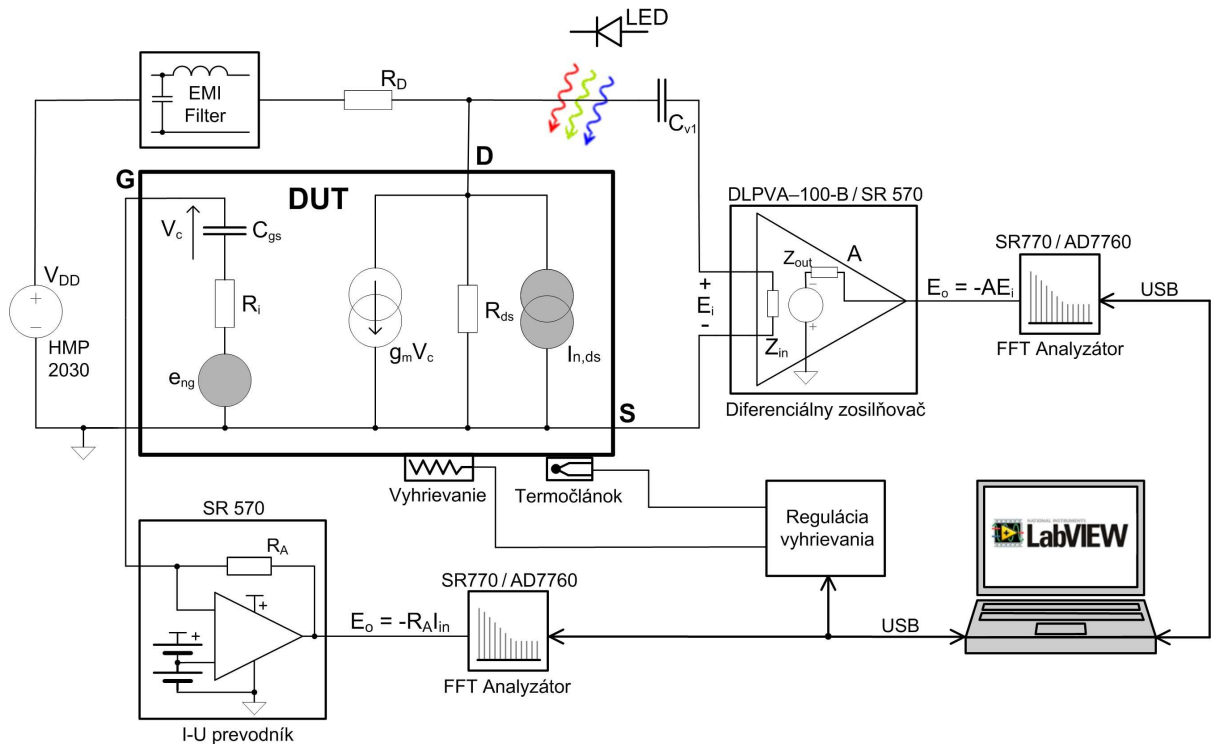
1. Preštudovať nové poznatky o najvýznamnejších typoch a príčinách vzniku šumov v elektronických prvkoch so zameraním na prvky na báze GaN a príbuzných kompozitných polovodičov.
2. Preskúmať experimentálne postupy a metódy merania nízkofrekvenčných šumov a šumovej analýzy elektronických prvkov. Na základe získaných poznatkov navrhnúť a zrealizovať pracovisko pre nízkofrekvenčnú šumovú diagnostiku elektronických prvkov.
3. Aplikovať získané poznatky do procesu systematického merania a analýzy nízkofrekvenčných šumových charakteristík tranzistorov s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMT - High Electron Mobility Transistor) s cieľom nájsť a kvantifikovať dominantné zdroje nízkofrekvenčného šumu v závislosti od voľby pracovného bodu.
4. Získať nové poznatky o súvislosti medzi vstupným a výstupným nízkofrekvenčným šumom tranzistorov so štruktúrou HEMT a ich závislosťou od vybraných parametrov štruktúry.
5. Preskúmať možnosti využitia optickej excitácie aktívnych oblastí polovodičových prvkov pre získanie nových poznatkov o príčinách vzniku nízkofrekvenčného šumu v štruktúrach tranzistorov typu HEMT.

## 4 Použité metódy riešenia

Pod pojmom nf šumová analýza rozumieme meranie charakteristík šumu emitovaného elektronickým prvkom vo frekvenčnom rozsahu od 1 do 100 kHz. Bola realizovaná buď meraním efektívnej hodnoty šumového signálu vo zvolenom frekvenčnom rozsahu, vo frekvenčnej oblasti spektrálnym analyzátorom, alebo v časovej oblasti osciloskopickým meraním. Šumová spektrálna analýza vo frekvenčnej oblasti predstavuje najpodrobnejšiu a najpresnejšiu metódu merania charakteristík šumu, pri ktorej je možné extrahovať jednotlivé zložky nf šumu z nameraných šumových spektrálnych charakteristík. Ďalšou použitou metódou bolo meranie efektívnej hodnoty nf šumu vo zvolenom frekvenčnom rozsahu. Výhodou použitia tejto metódy bolo výrazné urýchlenie nf šumovej analýzy pri porovnaní s meraním nf šumových spektrálnych charakteristík. Najčastejším parametrom skúmaných spektrálnych hustôt nf šumu GaN HEMT tranzistorov v práci boli pracovné napätia alebo prúdy za účelom vyšetriť ich vplyv na vstupné a výstupné nf šumové spektrálne charakteristiky. Ďalším parametrom použitým v práci, len výnimočne využívaným autormi zaoberajúcimi sa nf šumovou analýzou, bolo skúmanie šumových vlastností GaN HEMT tranzistorov pri pôsobení optického žiarenia so špecifickou vlnovou dĺžkou. Bolo zistené, že pre skúmané GaN HEMT tranzistory je nutné použiť žiarenie z UV oblasti. V kapitole 5.2.1 predloženej dizertačnej práce je opísaná navrhnutá metóda nf šumovej analýzy pri UV ožiarení. Ďalším parametrom využívaným pri skúmaní spektrálnych hustôt nf šumu GaN HEMT tranzistorov, v práci použitom len okrajovo, je nf šumová analýza realizovaná pri rôznych teplotách opísaná v kapitole 2.2.3.2 predloženej dizertačnej práce. Je známe, že nf šumové spektrum reálnych elektronických prvkov je tvorené viacerými typmi nf šumu, pričom každý sa vyznačuje charakteristickou frekvenčnou charakteristikou. Úlohou šumovej spektrálnej analýzy bolo zistiť tvar spektrálnych hustôt nf šumu a následne získať charakteristické parametre dominantných nf šumových zdrojov. V prípade, keď spektrálna hustota nf šumu obsahovala jeden a viac G-R šumových zdrojov bolo výhodné využiť spektrálnu dekompozíciu, ktorá umožňuje získať parametre jednotlivých typov šumu tvoriacich šumovú spektrálnu charakteristiku.

Keďže pracovisko pre nf šumovú analýzu tranzistorov GaN HEMT na počiatku vypracovávaní tejto práce na Ústave elektroniky a fotoniky nebolo k dispozícii, bolo navrhnuté a realizované pracovisko umožňujúce vykonať nf šumovú analýzu využitím opísaných metód. Bloková schéma navrhnutého a realizovaného experimentálneho pracoviska

pre meranie nf šumových charakteristík diód a tranzistorov je na obr. 3. Počas realizácie meracieho pracoviska bola zvládnutá optimalizácia tienenia a filtrácia napájania, ďalej bolo zvládnuté vyladenie správnych obvodových riešení pre meranie vstupného a výstupného nf šumu HEMT tranzistorov, efektívne spracovanie nameraných šumových spektrálnych charakteristík a na záver bola realizovaná automatizácia pracoviska [11], [12], [13], [14].



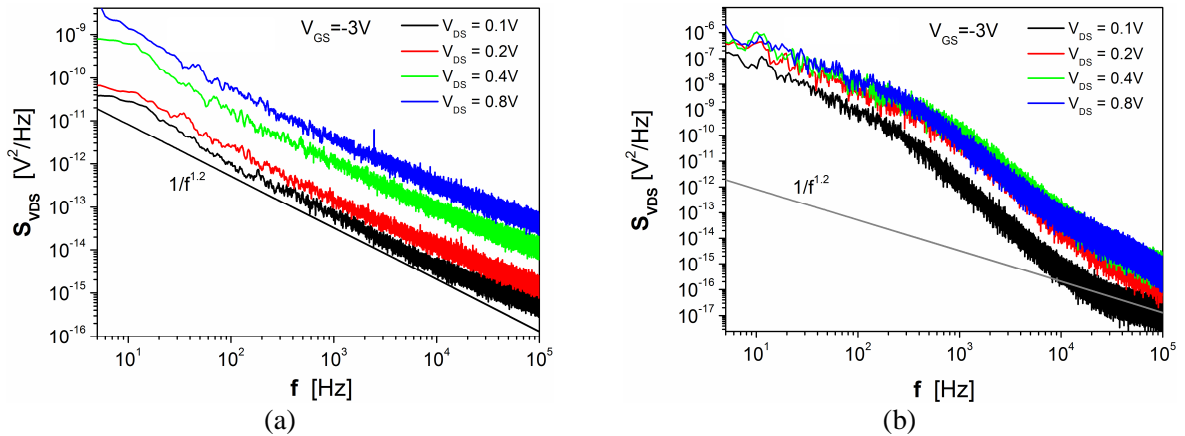
**Obr. 3** Bloková schéma pracoviska pre meranie spektrálnej hustoty vstupného prúdového nf šumu a výstupného napät'ového nf šumu s Pospieszalskeho šumovým náhradným obvodom [15] tranzistora HEMT (DUT).

## 5 Zhrnutie dosiahnutých výsledkov

### 5.1 Nízkofrekvenčný šum tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT

Spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu dvoch rôznych AlGaIn/GaN HEMT tranzistorov, merané v lineárnej oblasti výstupných charakteristík pri kolektorových napätiach  $V_{DS} = 0,1V, 0,2V, 0,4V$  a  $0,8V$  a pri konštantnom napätí na riadiacej elektróde  $V_{GS} = -3V$  sú na obr. 4. Z tvaru závislostí na obr. 4a je vidieť, že dominantným komponentom kolektorového nf šumu vo frekvenčnom rozsahu od  $\sim 4Hz$  do  $\sim 20kHz$  je  $1/f$  šum, ktorého pôvod je autormi zaoberajúcimi sa nf šumovou spektrálnou analýzou pripísaný fluktuácii vodivosti v kanáli tranzistora [16], [17]. Meraním väčšieho množstva vzoriek tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT

sme zistili, že veľkosť  $1/f$  šumu sa medzi vzorkami líšila najmä v dôsledku rôznych rozmerov (FAT HEMT, HEMT) a použitého technologického postupu, ale parameter  $\gamma$  dosahoval hodnoty v intervale od  $\approx 1$  do  $\approx 1,2$ . Tieto zistenia sú v súlade s údajmi publikovanými inými autormi, napr. [7].

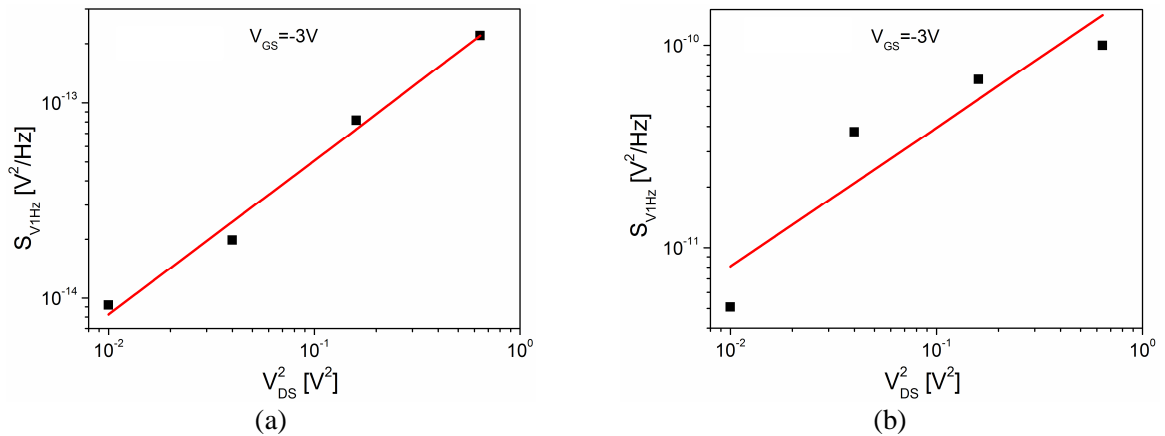


**Obr. 4** Spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu dvoch rozdielnych AlGaIn/GaN HEMT tranzistorov v závislosti od kolektorového napätia  $V_{DS}$  pri napätí na radiacej elektróde  $V_{GS} = -3V$  s dominantným komponentom a)  $1/f$  šumu, b) G-R šumu.

Zistili sme, že napät'ová šumová spektrálna hustota tranzistorov s veľkým množstvom defektov v oblasti kanála rastie nelineárne, čo spôsobuje dominantná G-R šumová zložka ovplyvňujúca kolektorové šumové spektrálne charakteristiky. Takého spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu sú na obr. 4b pričom sú výrazne odlišné od „štandardného“  $1/f$  tvaru šumových spektrálnych charakteristík. Tieto závislosti majú výrazne väčšiu amplitúdu  $1/f$  šumu v oblasti nízkych frekvencií. V spektrálnych hustotách  $1/f$  šumu boli identifikované výrazné G-R šumové komponenty v intervale frekvencií od 1Hz do  $\sim 40$ kHz.

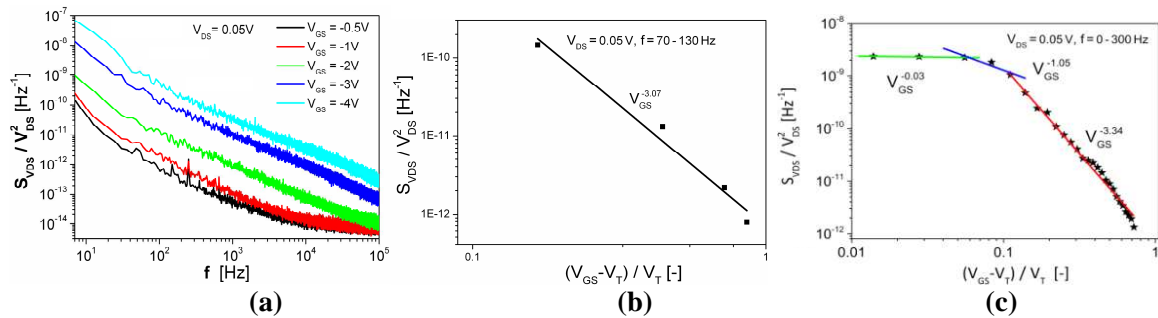
Na obr. 5a-b sú uvedené závislosti spektrálnej hustoty kolektorového napät'ového šumu  $S_{V_{1Hz}}$  od kvadrátu kolektorového napätia  $V_{DS}^2$  namerané na dvoch vzorkách tranzistorov pri  $V_{GS} = -3V$ . Spektrálna hustota kolektorového napät'ového šumu  $S_{V_{1Hz}}$  bola stanovená zo závislostí na obr. 4 ako ich efektívna hodnota vzťahovaná na šírku pásma 1Hz. Takmer lineárna závislosť spektrálnej hustoty kolektorového napät'ového šumu  $S_{V_{1Hz}}$  od kvadrátu kolektorového napätia  $V_{DS}^2$  na obr. 5a potvrdzuje dominantnú zložku  $1/f$  šumu v meraných spektrálnych hustotách kolektorového napät'ového šumu na obr. 4a. Naopak, závislosť  $S_{V_{1Hz}}$  od  $V_{DS}^2$  na obr. 5b nie je lineárna, čo vidieť z veľkých odchýlok  $S_{V_{1Hz}}$  od lineárnej

aproximácie. Príčinou je výrazná G-R šumová zložka v šumových spektrálnych charakteristikách na obr. 4b.



**Obr. 5** Závislosť spektrálnej hustoty kolektorového napät'ového šumu  $S_{V/Hz}$  AlGaIn/GaN HEMT tranzistorov v závislosti od kolektorového napätia  $V_{DS}^2$  a) tranzistor s dominantným  $1/f$  šumom, b) tranzistor s dominantným G-R šumom v spektrálnych hustotách kolektorového napät'ového šumu.

Spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu tranzistora AlGaIn/GaN HEMT merané pre napätia na riadiacej elektróde  $V_{GS} = 0,5V, 1V, 2V, 3V$  a  $4V$  pri konštantnom kolektorovom napätí  $V_{DS} = 0,05V$  sú na obr. 6a. Spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu boli normalizované hodnotou kvadrátu kolektorového napätia  $V_{DS}^2$ , čo umožňuje pozorovať vplyv napätia riadiacej elektródy  $V_{GS}$  na kolektorové nf šumové charakteristiky.

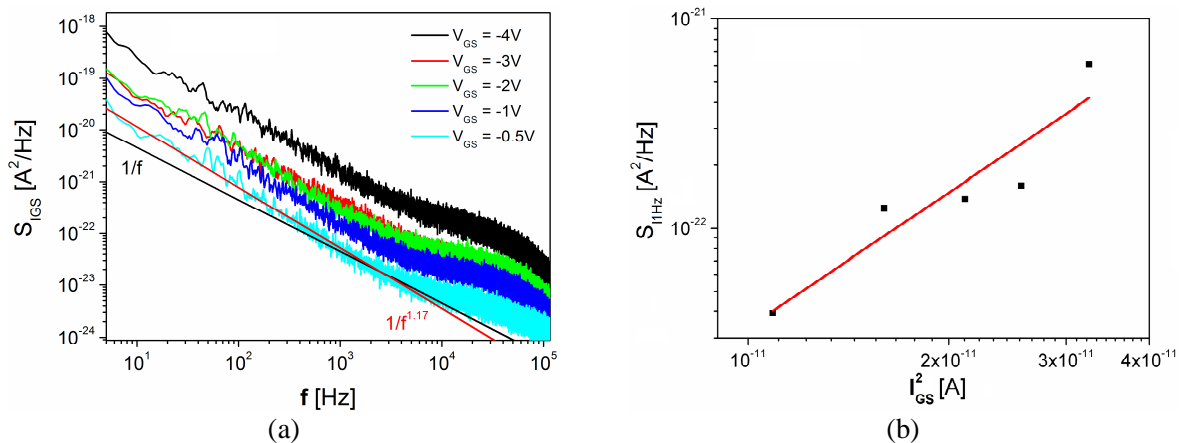


**Obr. 6** a) Normalizovaná spektrálna hustota kolektorového napät'ového šumu tranzistora AlGaIn/GaN HEMT meraná pre  $V_{DS} = 0,05V$  v závislosti od napätia na riadiacej elektróde  $V_{GS}$ . Normalizovaná kolektorová napät'ová šumová hustota AlGaIn/GaN HEMT v závislosti od normalizovaného napätia na riadiacej elektróde pre frekvenčný rozsah  $f$  b) 70-130Hz, c) 0-300Hz.

Z experimentálne získanej závislosti normalizovanej spektrálnej hustoty kolektorového napät'ového šumu  $S_{V_{DS}}(f)/V_{DS}^2$  od normalizovaného hradlového napätia  $(V_{GS}-V_T)/V_T$  na obr. 6a sme získali hodnoty faktora  $m = -3,3$  a  $-1,05$ . Pomocou získaných hodnôt sme odhalili výskyt dominantných šumových zdrojov výstupného šumu AlGaIn/GaN HEMT tranzistorov v kanáli pod riadiacou elektródou. Pre hradlové napätia blízke  $V_T$  (normalizované napätie  $V_{GS}$  pod 0,1),

kedy je tranzistor takmer uzavretý, parameter  $m$  výrazne klesá na hodnotu  $m = -0,03$ , čo znamená, že kolektorový šum je takmer napäťovo nezávislý od hradlového napätia  $V_{GS}$ . Odchýlka od očakávanej závislosti  $V_{GS}^{-1}$  v danej oblasti je spôsobená pravdepodobne zvodovým prúdom riadiacej elektródy.

Analogicky ku analýze spektrálnej hustoty kolektorového nf šumu bola vykonaná analýza spektrálnej hustoty hradlového nf šumu. Metódou analýzy spektrálnej hustoty hradlového prúdového šumu boli vyšetrené nf šumové vlastnosti riadiacej elektródy tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT. Na obr. 7a je spektrálna hustota hradlového prúdového šumu AlGaIn/GaN HEMT tranzistora pre napätia na riadiacej elektróde  $V_{GS} = -0,5V, -1V, -2V, -3V, -4V$  a pri napätí  $V_{DD} = 1V$ . Na obr. 7b je závislosť spektrálnej hustoty hradlového prúdového šumu  $S_{1Hz}$  od kvadrátu prúdu riadiacej elektródy  $I_{GS}^2$  stanovená zo závislostí na obr. 7a ako jeho efektívna hodnota vztiahnutá na šírku pásma 1Hz.



**Obr. 7** a) Spektrálna hustota hradlového prúdového šumu AlGaIn/GaN HEMT tranzistora v závislosti od hradlového napätia  $V_{GS}$  pri napätí  $V_{DD} = 1V$ , b) Závislosť spektrálnej hustoty hradlového prúdového šumu  $S_{1Hz}$  od kvadrátu hradlového prúdu  $I_{GS}^2$ .

Bolo zistené, že spektrálne hustoty hradlového prúdového šumu AlGaIn/GaN HEMT tranzistora sú tvorené kombináciou  $1/f$  a G-R šumu. Avšak príspevok G-R šumu v spektrálnych hustotách hradlového prúdového šumu skúmaných tranzistorov je omnoho výraznejší pri porovnaní so spektrálnymi hustotami kolektorového napäťového šumu, v ktorých je spravidla dominantná zložka  $1/f$  šumu. Meraním väčšieho množstva vzoriek tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT sme zistili, že parameter  $\gamma$  dosahoval hodnoty v intervale od  $\sim 1$  do  $\sim 1,17$ . Naopak, závislosť  $S_{VIHz}$  od  $V_{DS}^2$  na obr. 5b nie je lineárna, čo vidieť z veľkých odchýlok  $S_{VIHz}$  od lineárnej aproximácie. Nelineárna závislosť spektrálnej hustoty hradlového prúdového nf šumu  $S_{IHz}$  od kvadrátu hradlového prúdu  $I_{GS}^2$  na obr. 7b potvrdzuje výrazný



vplyv G-R šumovej zložky v spektrálnych hustotách hradlového prúdového nf šumu tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT.

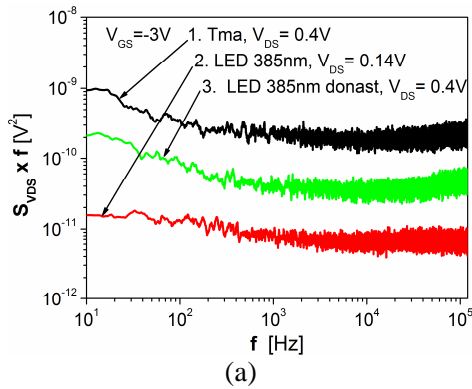
### 5.1.1 Vplyv osvetlenia na nf šum tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT

Pre hlbšie pochopenie a analyzovanie porúch v štruktúre GaN HEMT tranzistorov bola rozpracovaná metóda nf šumových meraní pri ožiarení svetlom s vlnovými dĺžkami v oblasti blízkej UV žiareniu. Pred realizáciou experimentálnych nf šumových meraní pri ožiarení svetlom bol zistený vplyv rôznych vlnových dĺžok na spektrálne hustoty nf šumu GaN HEMT tranzistorov a následne zvolená vhodná vlnová dĺžka pre sériu experimentálnych meraní. Vďaka získaným poznatkom o vplyve optického žiarenia na spektrálne hustoty hradlového prúdového nf šumu boli v realizovaných experimentoch zvolené vlnové dĺžky  $\lambda = 385\text{nm}$  a  $365\text{nm}$  pre podrobnejšie skúmanie šumových vlastností GaN HEMT tranzistorov.

Vďaka rozpracovanej metóde nf šumových meraní pri ožiarení svetlom sme získali nové poznatky o vplyve ožiarenia štruktúry tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT s vlnovou dĺžkou  $\lambda = 385\text{nm}$  na spektrálne hustoty hradlového prúdového a kolektorového napäťového nízkofrekvenčného šumu. Zistili sme, že ožiarenie aktivuje hlboké stavy nachádzajúce sa v zakázanom pásme vo vrstvách AlGaIn a GaN, čo následne výrazne ovplyvňuje tvar a veľkosť spektrálnych hustôt hradlového a kolektorového nízkofrekvenčného šumu. Ožiarenie spôsobuje pokles spektrálnych hustôt kolektorového napäťového nízkofrekvenčného šumu. V prípade spektrálnych hustôt hradlového nízkofrekvenčného šumu dochádza po ožiarení ku nárastu ich amplitúdy, čo je spôsobené nárastom zvodového prúdu riadiacej elektródy, ktorý následne zvyšuje celkovú hodnotu  $1/f$  šumu. Ožiarenie spektrálnych hustôt hradlového nízkofrekvenčného šumu vyvolalo zmenu charakteristickej frekvencie generačno-rekombinačného šumu  $f_{c,G-R}$ , ako výsledok zmeny štatistického obsadenia záchytných centier, avšak tendencia zmeny charakteristickej frekvencie generačno-rekombinačného šumu  $f_{c,G-R}$  vyvolaného ožiarením bola rozdielna pre jednotlivé merania.

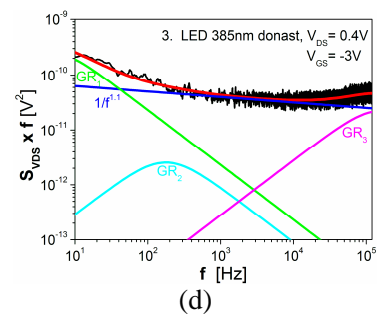
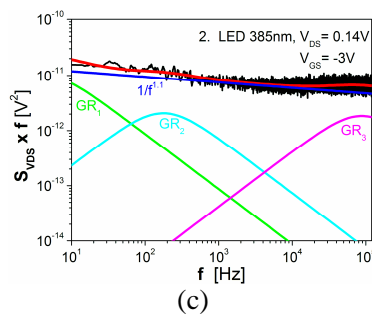
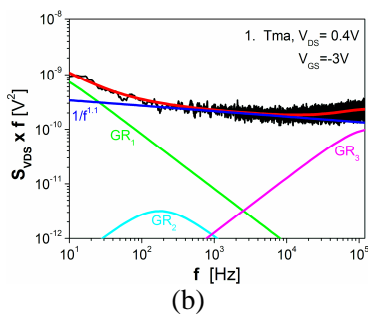
Na obr. 8a sú spektrálne hustoty kolektorového napäťového šumu tranzistora AlGaIn/GaN HEMT pri napätí  $V_{DS} = 0,4\text{V}$  a  $V_{GS} = -3\text{V}$ . Vplyv ožiarenia svetlom na amplitúdu a v prípade frekvenčne závislých nf šumových zdrojov na ich charakteristickú časovú konštantu bol preskúmaný metódou spektrálnej dekompozície vďaka ktorej boli získané parametre troch rozdielnych G-R šumových zložiek a parametra  $1/f$  šumu tvoriacich dominantné šumové komponenty spektrálnych hustôt kolektorového nf šumu na obr. 8a.

Extrahované parametre jednotlivých nf šumových zdrojov sú v Tab. 1. Bolo zistené, že v spektrálnych hustotách kolektorového napäťového šumu tranzistorov AlGaIn/GaN sa nachádzajú tri dominantné generačno-rekombinačné nízkofrekvenčné šumové zdroje s charakteristickou časovou konštantou  $\tau_{c,G-R}$  v rozsahu od milisekúnd do mikrosekúnd, reprezentujúce proces zachytenia/emisie nosičov náboja. Bola vyšetrená závislosť amplitúdy a charakteristickej časovej konštanty  $\tau_{c,G-R}$  od pracovných napätí týchto šumových zdrojov. Pre  $1/f$  šum bol získaný parameter  $\gamma$ , ktorého hodnota bola od  $\sim 1,0$  do  $\sim 1,2$  pre skúmané tranzistory AlGaIn/GaN.



**Tab. 1** Získané koeficienty zo spektrálnej dekompozície.

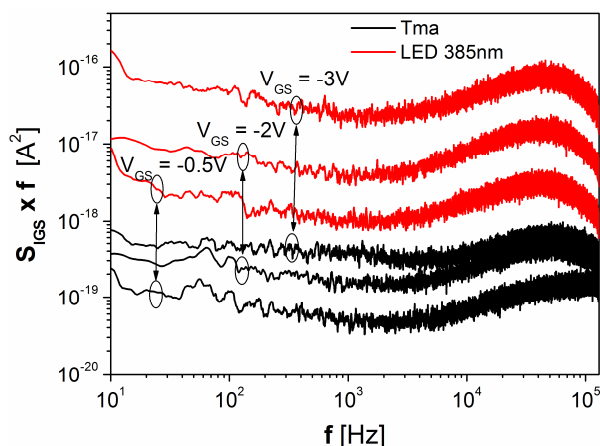
Podmienky	Tma	Tendencia	385nm	385nm donast.
$V_{DS}$ [V]	0.4		0.14	0.4
A	$9.7 \times 10^{-18}$		$2.3 \times 10^{-18}$	$2.8 \times 10^{-18}$
C	$4.3 \times 10^{-10}$	↓	$8 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-11}$
$\gamma$	1.1	konšt.	1.1	1.1
$D_1$	$4 \times 10^{-9}$	↓	$8 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-11}$
$\tau_1$ [s]	$5 \times 10^{-2}$	↓	$3.5 \times 10^{-2}$	$3.5 \times 10^{-2}$
$D_2$	$1 \times 10^{-11}$	↓	$8 \times 10^{-12}$	$6.5 \times 10^{-12}$
$\tau_2$ [s]	$9 \times 10^{-4}$	konšt.	$9 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-4}$
$D_3$	$3.2 \times 10^{-10}$	↓	$7 \times 10^{-11}$	$5.8 \times 10^{-12}$
$\tau_3$ [s]	$1 \times 10^{-6}$	~konšt.	$1 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$



**Obr. 8** Spektrálne hustoty kolektorového napäťového šumu tranzistora AlGaIn/GaN HEMT merané v tme - čierne spektrum a pri ožiarení svetlom ( $\lambda = 385\text{nm}$ ) - zelené a červené spektrum pri  $V_{DS} = 0,4\text{V}$  a  $V_{GS} = -3\text{V}$ . Spektrálne hustoty rozložené do jednotlivých šumových zložiek b) v tme, c) pri ožiarení svetlom – nedonastavený pracovný bod, d) pri ožiarení svetlom – donastavený pracovný bod.

Na obr. 9 sú spektrálne hustoty hradlového prúdového nf šumu tranzistora AlGaIn/GaN HEMT merané za tmy a pri ožiarení svetlom s vlnovou dĺžkou  $\lambda = 385\text{nm}$  pri hradlových napätiach  $V_{GS} = -0,5\text{V}$ ,  $-2\text{V}$  a  $-3\text{V}$  a pri napätí  $V_{DD} = 1\text{V}$ . Po vyhodnotení série meraní spektrálnych hustôt hradlového prúdového nf šumu tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT s rôznou štruktúrou a rozmermi v tme a pri ožiarení svetlom s vlnovými dĺžkami  $\lambda = 385\text{nm}$  a  $365\text{nm}$  nebolo možné určiť tendenciu zmeny charakteristickej frekvencie G-R šumu  $f_{c,G-R}$  vyvolanú ožiarením svetlom. Pre všetky merania bol charakteristický nárast amplitúdy  $1/f$  a G-R šumu, pričom spravidla ožiarenie svetlom s väčšou energiou fotónov vyvolalo vyšší nárast amplitúdy

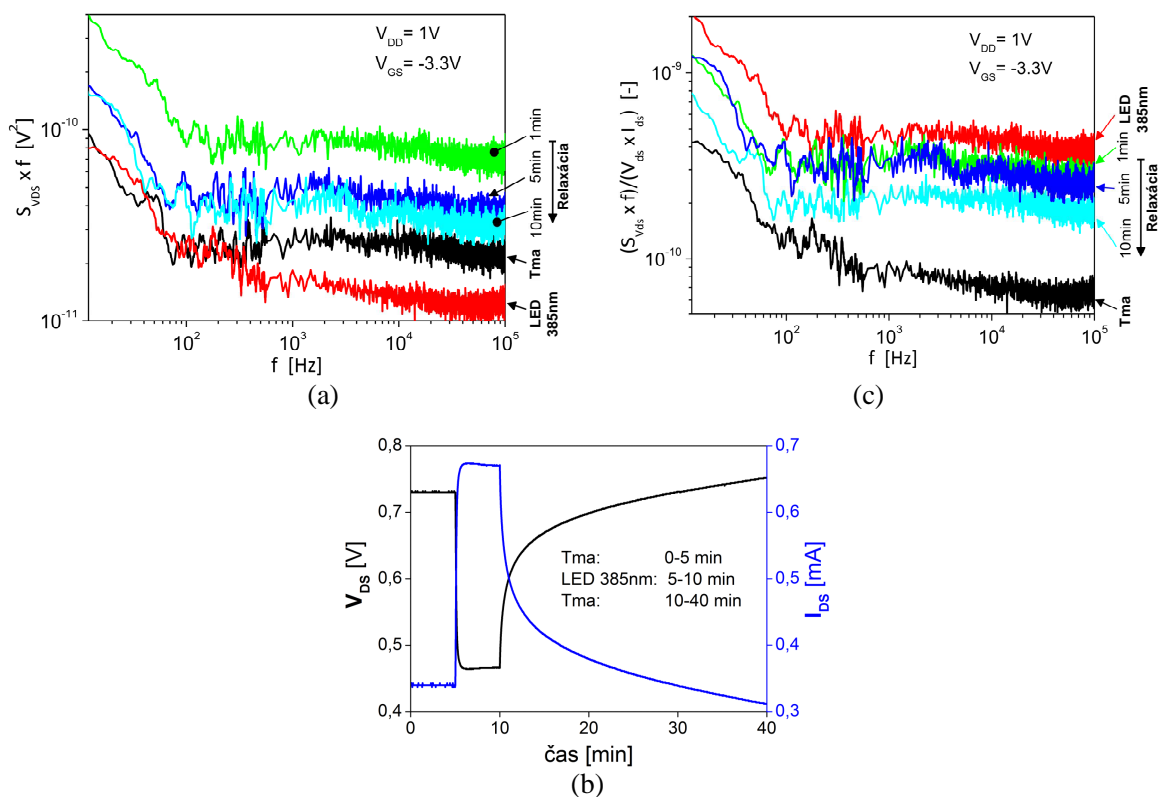
spektrálnej hustoty hradlového prúdového nf šumu. Ožiarenie svetlom s vlnovými dĺžkami  $\lambda = 385\text{nm}$  a  $365\text{nm}$  malo spravidla stabilizačný vplyv na charakteristickú frekvenciu G-R šumu  $f_{c,G-R}$  skúmaných spektrálnych hustôt hradlového nf šumu, podobne ako na obr. 9.



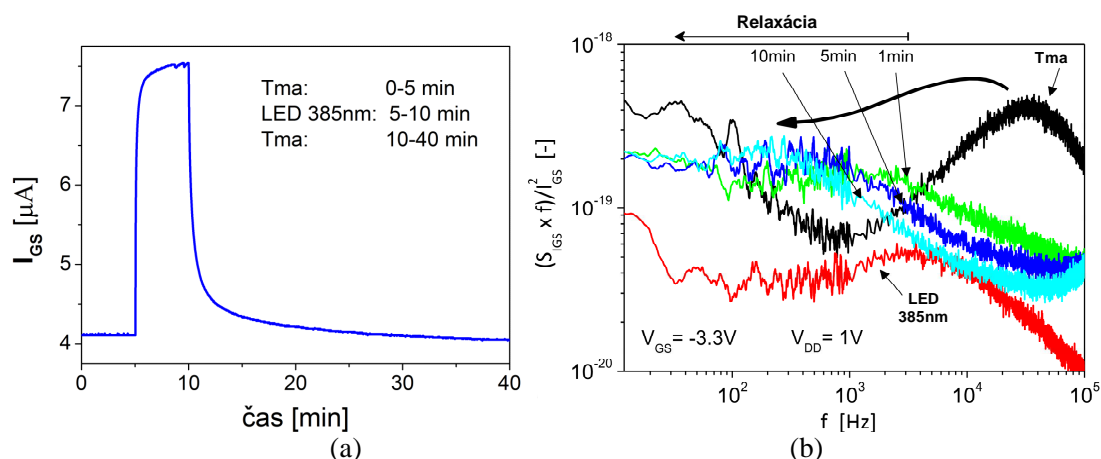
**Obr. 9** Spektrálne hustoty hradlového prúdového nf šumu AlGaIn/GaN HEMT tranzistora merané v tme a pri ožiarení svetlom ( $\lambda = 385\text{nm}$ ) pre napätia na riadiacej elektróde  $V_{GS} = -0,5\text{V}$ ,  $-2\text{V}$  a  $-3\text{V}$  a pri napätí  $V_{DD} = 1\text{V}$ .

Počas realizácie experimentov [18], [19] bolo zistené, že tvar a veľkosť spektrálnych hustôt nf šumu AlGaIn/GaN HEMT závisí taktiež od počtu meraní a od pracovných napätí počas merania. Amplitúda a tvar spektrálnych hustôt nf šumu relaxovali do pôvodného stavu, prípadne veľmi blízkeho po hodinách až dňoch v závislosti od typu vzorky. Preto bola navrhnutá metódu pre skúmanie dlhodobo relaxujúcich centier v štruktúre GaN HEMT tranzistorov. Metóda umožňuje skúmať vplyv relaxácie záchytných centier po vypnutí zdroja optického žiarenia na spektrálne hustoty nízko-frekvenčného šumu. Využitím metódy sme potvrdili výskyt dlhodobo relaxujúcich centier v štruktúre tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT a ich vplyv na časovú závislosť normalizovaných spektrálnych hustôt kolektorového napät'ového nízko-frekvenčného šumu  $(S_{V_{DS}} \times f) / I_{DS} \times V_{DS}$  a normalizovaných spektrálnych hustôt hradlového prúdového nízko-frekvenčného šumu  $S_{I_{GS}} \times f / I_{GS}^2$ . Pozorované časovo závislé zmeny jednosmerného pracovného bodu a spektrálnych hustôt hradlového a kolektorového nízko-frekvenčného šumu po vypnutí optického žiarenia v tranzistoroch AlGaIn/GaN HEMT dokazujú významný príspevok záchytných centier a piezoelektrickej polarizácie na rozhraní vrstiev AlGaIn/GaN v týchto elektronických prvkoch. V práci [20] boli publikované získané poznatky o relaxácii spektrálnych hustôt kolektorového napät'ového a hradlového prúdového nf šumu po vypnutí optického žiarenia s vlnovou dĺžkou  $\lambda = 385\text{nm}$ . Na obr. 10b je časová

závislosť kolektorového napätia  $V_{DS}(t)$  a kolektorového prúdu  $I_{DS}(t)$  tranzistora AlGaIn/GaN HEMT meraná po dobu 30 minút od vypnutia optického žiarenia.



**Obr. 10** a) Spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu  $S_{V_{DS}} \times f$ , b) časová závislosť kolektorového napätia  $V_{DS}(t)$  a prúdu  $I_{DS}(t)$ , c) normalizované kolektorové nf šumové spektrálne charakteristiky  $(S_{V_{DS}} \times f) / I_{DS} \times V_{DS}$  merané v tme, pri ožiarení svetlom ( $\lambda = 385\text{nm}$ ) a počas relaxácie po vypnutí zdroja optického žiarenia.



**Obr. 11** a) Časová závislosť hradľového prúdu  $I_{GS}$ , b) normalizované spektrálne hustoty hradľového prúdového nf šumu  $(S_{I_{GS}} \times f) / I_{GS}^2$  merané v tme, pri ožiarení svetlom ( $\lambda = 385\text{nm}$ ) a počas relaxácie po vypnutí zdroja optického žiarenia.

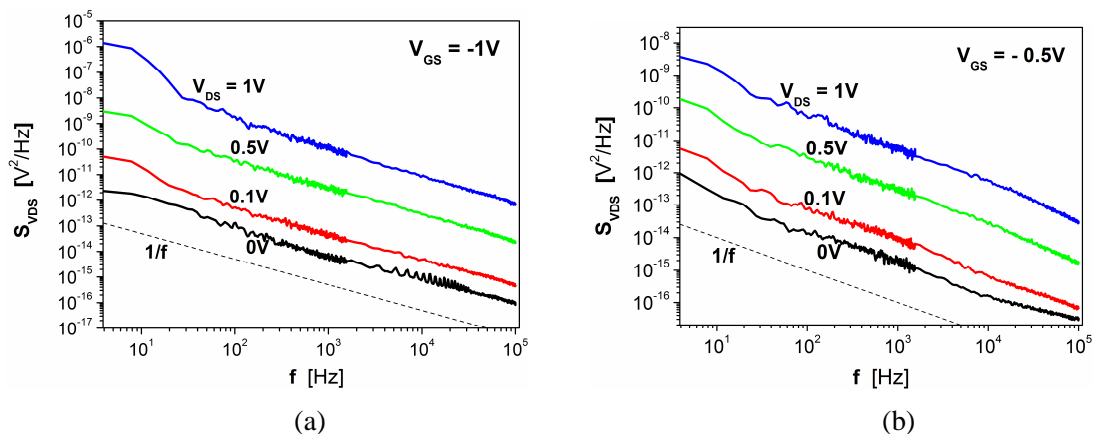
Na obr. 10a sú spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu prenasobené frekvenciou  $S_{V_{DS}} \times f$  a na obr. 10c je ich normalizovaná závislosť  $(S_{V_{DS}} \times f) / I_{DS} \times V_{DS}$ . Spektrálne hustoty

hradlového prúdového nf šumu normalizované na zmenu prúdu  $S_{IGS} \propto f/I_{GS}^2$  tohto AlGaIn/GaN HEMT sú na obr. 11b, časová závislosť prúdu riadiacej elektródy  $I_{GS}(t)$  tranzistora meraná po dobu 30 minút po vypnutí optického žiarenia je na obr. 11a.

## 5.2 Nízko-frekvenčný šum InAlIn/GaN HEMT tranzistorov

Je známe, že historický vývoj III-nitrid elektronických prvkov je založený na AlGaIn/GaN štruktúre [21]. Súčasným trendom pre zlepšenie parametrov HEMT tranzistorov a uľahčenie ich výroby je znižovanie hrúbky bariéry a súčasne zvyšovanie hustoty nosičov náboja v 2DEG pomocou zvýšenia celkovej polarizácie, čo je jednoduchšie dosiahnuť nahradením AlGaIn s InAlIn [21]. Pri vývoji InAlIn/GaN HEMT tranzistorov je rovnako ako aj pri AlGaIn/GaN HEMT tranzistoroch dôležité poznať ich nf šumové vlastnosti, ktoré sú potrebné pri ďalšom vývoji ich štruktúry.

Na obr. 12a-b sú spektrálne hustoty kolektorového napät'ového nf šumu merané pri hradlovom napätí  $V_{GS} = -1V$  a  $-0,5V$  a pri kolektorových napätíach  $V_{DS}$  v rozsahu od 0 do 1V. Vyšetřili sme spektrálne hustoty kolektorového napät'ového nízko-frekvenčného šumu tranzistorov InAlIn/GaN HEMT. Zistili sme, že dominantnými zdrojmi nízko-frekvenčného šumu tranzistorov InAlIn/GaN GaN HEMT sú generačno - rekombinačný a  $1/f$  šum. Vplyv jednotlivých zdrojov nízko-frekvenčného šumu ku efektívnej hodnote šumového napätia a tvaru spektrálnych hustôt nízko-frekvenčného šumu je výrazne závislý od pracovného bodu, od ktorého taktiež závisí tvar a amplitúda spektrálnych hustôt nízko-frekvenčného šumu.

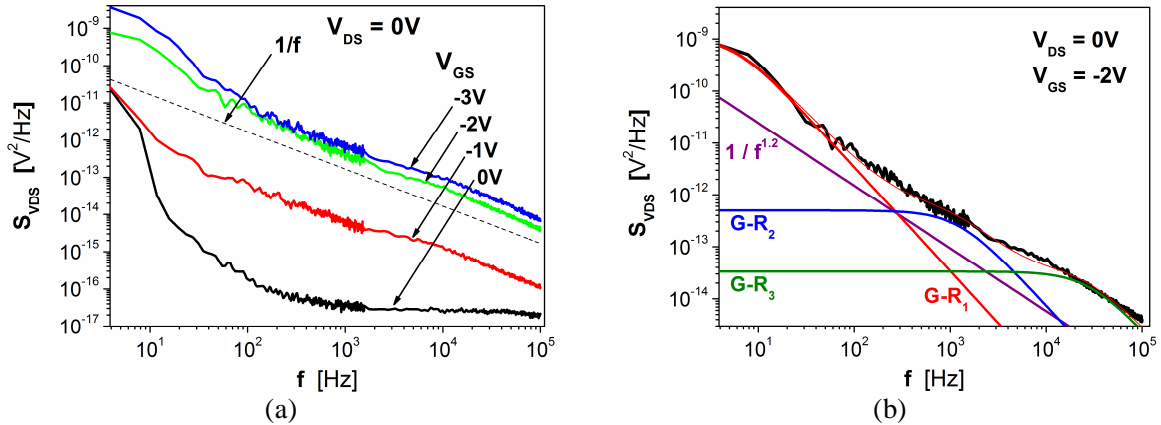


**Obr. 12** Spektrálne hustoty kolektorového napät'ového šumu InAlIn/GaN HEMT tranzistora v závislosti od kolektorového napätia  $V_{DS}$  v rozsahu od 0 do 1V a pri hradlovom napätí a)  $V_{GS} = -1V$ , b)  $V_{GS} = -0,5V$ .

Spektrálna hustota kolektorového napät'ového šumu rastie lineárne s napätím  $V_{DS}$ , čo potvrdzuje, že  $1/f$  šum pochádzajúci z fluktuácií vodivosti je hlavným šumovým

komponentom spektrálnych hustôt kolektorového napäťového šumu InAlN/GaN HEMT, rovnako ako aj v prípade AlGaIn/GaN HEMT tranzistorov. Výstupné šumové spektrálne charakteristiky majú typický tvar  $1/f$ , len veľmi mierne ovplyvnený generačno-rekombinačným šumovým komponentom.

Spektrálne hustoty kolektorového napäťového nf šumu pri kolektorovom napätí  $V_{DS} = 0V$  a hradlovom napätí  $V_{GS}$  v rozsahu od 0 do 3V sú na obr. 13a.



**Obr. 13** a) Spektrálne hustoty kolektorového napäťového šumu InAlN/GaN HEMT tranzistora v závislosti od hradlového napätia  $V_{GS}$  v rozsahu od 0V do -3V pri kolektorovom napätí  $V_{DS} = 0V$ , b) spektrálna dekompozícia spektrálnej hustoty kolektorového napäťového nf šumu meranej pri  $V_{GS} = -2V$  a  $V_{DS} = 0V$ .

Pomocou spektrálnej dekompozície spektrálnych hustôt kolektorového napäťového nízkofrekvenčného šumu, príklad ktorej je uvedený na obr. 13b, boli extrahované charakteristické parametre dominantných zdrojov nízkofrekvenčného šumu. Bolo zistené, že v spektrálnych hustotách kolektorového napäťového šumu tranzistorov InAlN/GaN sa nachádzajú tri dominantné generačno-rekombinačné nízkofrekvenčné šumové zdroje s charakteristickou časovou konštantou  $\tau_{c,G-R}$  v rozsahu od milisekúnd do mikrosekúnd, reprezentujúce proces zachytenia/emisie nosičov náboja. Bola vyšetrená závislosť amplitúdy a charakteristickej časovej konštanty  $\tau_{c,G-R}$  od pracovných napätí týchto šumových zdrojov. Pre  $1/f$  šum bol získaný parameter  $\gamma$ , ktorého hodnota bola od  $\sim 1,0$  do  $\sim 1,21$  pre skúmané tranzistory InAlN/GaN HEMT. V prípade tranzistorov InAlN/GaN FAT HEMT boli získané štyri rozdielne charakteristické časové konštanty generačno-rekombinačných šumových komponentov  $\tau_{c,G-R}$  [22], čo je spôsobené veľkou plochou riadiacej elektródy, a tým zvýšeným množstvom porúch v jej oblasti. V publikovanej práci [23] boli preskúmané spektrálne hustoty kolektorového napäťového šumu InAlN/GaN HEMT v závislosti od kolektorového napätia a spektrálne hustoty hradlového prúdového nf šumu merané v závislosti od hradlového napätia.

V práci [24] bol preskúmaný vplyv veľkosti hradlového napätia na jednotlivé šumové komponenty spektrálnej hustoty kolektorového napät'ového nf šumu.

## 6 Zhrnutie a závery

Počas vypracovávania predloženej dizertačnej práce boli získané viaceré pôvodné poznatky o metódach nízkofrekvenčnej šumovej analýzy, dominantných nízkofrekvenčných šumových zdrojoch v štruktúre tranzistorov GaN HEMT a ich charakteristických parametroch, ako aj o vplyve porúch na šumové vlastnosti tranzistorov GaN HEMT. Spracovali sme dostupné literárne pramene o metódach využívaných pri nízkofrekvenčnej šumovej analýze elektronických prvkov a o najvýznamnejších zdrojoch nf šumu nachádzajúcich sa v tranzistoroch GaN HEMT. Prešetrili sme nízkofrekvenčné šumové modely tranzistorov HEMT, ktoré sme využili pri návrhu metodiky nízkofrekvenčnej šumovej analýzy tranzistorov GaN HEMT. Vypracovali sme metodiku komplexnej nízkofrekvenčnej šumovej charakterizácie viacerými komplementárnymi postupmi a meracími zostavami. Vytvorili sme pracovisko umožňujúce realizovať nf šumovú charakterizáciu prvkov pri rôznych teplotách v závislosti od napájacieho napätia pri súčasnom pôsobení optického žiarenia s vhodne zvolenou vlnovou dĺžkou. V práci uvedené merania spektrálnych hustôt nf šumu GaN HEMT tranzistorov boli uskutočnené na budovanom pracovisku.

Vyšetrili sme spektrálne hustoty kolektorového napät'ového nf šumu a hradlového prúdového nf šumu tranzistorov AlGaIn/GaN a InAlN/GaN HEMT. Spektrálnou dekompozíciou hustôt kolektorového napät'ového nf šumu sme zistili, že spektrá kolektorového napät'ového nf šumu tranzistorov AlGaIn/GaN a InAlN/GaN v oblasti 10 Hz až 100 kHz sú formované spravidla superpozíciou zdroja  $1/f$  šumu a trocha dominantnými zdrojmi generačno-rekombinačného šumu. Pre lokalizáciu zdrojov šumu v štruktúre tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT sme vyšetrili závislosť normalizovanej spektrálnej hustoty kolektorového napät'ového šumu  $S_{VDS}(f)/V_{DS}^2$  od normalizovaného hradlového napätia  $(V_{GS}-V_T)/V_T$ . Získali sme nové poznatky o vplyve optického žiarenia na veľkosť a frekvenčné spektrum nf šumu tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT. Potvrdili sme výskyt veľmi pomaly relaxujúcich centier v štruktúre tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT.

Získané poznatky sú významné nielen z hľadiska rozvoja obecného poznania, ale majú značný praktický význam z hľadiska aplikácií tranzistorov GaN HEMT v nízkošumových predzosilňovačoch, zmiešavačoch a oscilátoroch fázových závesov, nakoľko zistené efekty

determinujú ich parametre resp. dobu ustáľovania a šum oscilátorov s fázovým závesom pri preťaženi, skokových zmenách pracovného bodu/výkonu a pod.

## **7 Summary**

While presented Ph.D. thesis was carried out several new findings have been gained about methods of low frequency noise analysis, dominant low frequency noise sources in the structure of GaN HEMT transistors and their characteristic parameters as well as about the influence of defects in GaN HEMT transistors to the noise properties. The state of the art knowledge of low frequency noise in GaN HEMT transistors, its main sources and equivalent models were summarized. The methodology of complex low frequency noise characterization with multiple complementarily techniques have been developed. All measurements in presented Ph.D. thesis were conducted on developed and realized low frequency noise measurement setup. The measurement setup for low frequency noise characterization allows to measure low frequency noise of GaN HEMTs simultaneously at different temperatures, operating points and under illumination with arbitrary wavelengths.

The drain voltage noise and the gate current noise spectral characteristics of AlGaIn/GaN and InAlN/GaN HEMTs were investigated. Using spectral decomposition process was found that the noise spectral characteristics in the frequency region from 10 Hz to 100 kHz are formed by superposition of three dominant generation-recombination noise sources and  $1/f$  noise. Dominant output low frequency noise sources were localized under the gate electrode region. A new finding about the influence of optical radiation to the low frequency noise spectral characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs has been gained. Presence of very slow relaxing centres in the structure of AlGaIn/GaN HEMT transistors, up to now investigated only by other methods, has been confirmed.

Gained findings of presented Ph.D. thesis do not represent only general knowledge, but they have also considerable practical relevance in the applications of GaN HEMT transistors such as low noise preamplifiers, mixers and phase locked oscillators, hence findings help to determine parameters like stabilization time and noise of the oscillators at overload, step function of operating point/power and so on.



## 8 Hlavné prínosy dizertačnej práce

Medzi hlavné prínosy tejto práce patrí najmä:

- Vypracovanie metodiky charakterizácie nízkofrekvenčného šumu tranzistorov GaN HEMT v závislosti od jednosmerných pracovných podmienok. Návrh a vybudovanie meracieho pracoviska pre charakterizáciu nízkofrekvenčného šumu tranzistorov GaN HEMT s implementáciou metód umožňujúcich skúmať vplyv optického žiarenia a teploty na šum elektronických prvkov .
- Vyšetrenie spektrálnych hustôt kolektorového napät'ového a hradlového prúdového nf šumu tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT v závislosti od pracovných napätí a lokalizácia dominantných zdrojov výstupného šumu tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT v oblasti pod riadiacou elektródou.
- Vyšetrenie spektrálnych hustôt kolektorového napät'ového nf šumu tranzistorov InAlN/GaN HEMT v závislosti od pracovných napätí a zistenie parametrov kolektorového napät'ového šumu tranzistorov InAlN/GaN HEMT, predovšetkým charakteristických časových konštánt G-R šumu.
- Vyšetrenie vplyvu pracovného bodu a vplyvu optického žiarenia na charakteristické parametre dominantných zdrojov nízkofrekvenčného šumu tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT metódou dekompozície spektrálnej hustoty kolektorového napät'ového nízkofrekvenčného šumu.
- Odhalenie zmien spektrálnej hustoty kolektorového a hradlového nízkofrekvenčného šumu tranzistorov AlGaIn/GaN HEMT vyvolaných optickým žiarením s vlnovou dĺžkou  $\lambda = 385\text{nm}$  a získanie pôvodného poznatku o pozvoľnej relaxácii nízkofrekvenčného šumu po ukončení optickej excitácie.

## 9 Publikačná činnosť doktoranda

### *Publikované príspevky v zahraničných karentovaných časopisoch*

- ADC1. Molnár, M. - Donoval, D. - Kuzmik, J. - Marek, J. - Chvala, A. - Pribytny, P. - Mikolasek, M. - **Rendek, K.** - Palankovski, V.: Simulation study of interface traps and bulk traps in n++GaN/InAlN/AlN/GaN high electron mobility transistors, In: Applied Surface Science, 2014, Corrected Proof, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.078>.
- ADC2. Uhrík, J. – Jakabovic, J. – Šatka, A. – Vincze, A. – Flickyngerova, S. – Sladek, L. – Kuzma, A. – Juhasz, P. – Horinek, F. – **Rendek, K.** – Telek, P. – Donoval, M. – Weis, M.: Effects of substrate condition on calcium corrosion and its role in the calcium test for water vapour transmission rate, In: Corrosion Science, July, 2014, Preprint submitted to Corrosion Science.

### *Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách*

- AFC1. **Rendek, K.** - Šatka, A. - Donoval, D.: Measurement set-up for low-frequency noise characterization of GaN HEMT transistors. In: Proc. of the "22nd Int. Conference, Radioelektronika 2012". Brno, Brno University of Technology, p. 149-153, 2012; ISBN 978-80-214-4468-3
- AFC2. **Rendek, K.** - Šatka, A. - Kováč, J. - Donoval, D.: Low-Frequency Noise Analysis of InAlN/ GaN HEMT Transistors. In: Proc. of the „19th European Workshop on Heterostructure Technology, Hetech 2010“, Crete, Greece, 2pp., 2010
- AFC3. **Rendek, K.** - Šatka, A. - Kováč, J. - Donoval, D.: Noise in the InAlN/GaN HEMT Transistors. In: Proc. of the "8th Int. Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM 2010", Smolenice, Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 53-56, 2010; ISBN 978-1-4244-8572-7

#### *Citované:*

Zhu, C.Y., Wu, M., Kayis, C., Zhang, F., Li, X., Ferreyra, R.A., Matulionis, A., Avrutin, V., Özgür, Ü., Morkoç, H.: "Degradation and phase noise of InAlN/AlN/GaN heterojunction field effect transistors: Implications for hot electron/phonon effects", **Applied Physics Letters**, Volume 101, Issue 10, 3 September 2012, Article number 103502

- AFC4. **Rendek, K.** - Daříček, M. - Vavrinský, E. - Donoval, M. - Donoval, D.: Biomedical signal amplifier for EMG wireless sensor system. In: Proc. of the "8th Int. Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM 2010", Smolenice, Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 251-254, 2010; ISBN 978-1-4244-8572-7

#### *Citované:*

Chatterjee, A., Gupta, S., Kumar, S., Garg, K., Kumar, A.: "An innovative device for instant measurement of Surface Electro-Myography for clinical use", **Measurement**, vol. 45, 2012, 1893-1901, ISSN 0263-2241

Pau, J.W.L., Chen, T.S.W., Xie, S.S.Q., Pullan, A.J.: "A neuromuscular interface for the elbow joint", **Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)**, 2012 IEEE/ASME International Conference, On page(s): 214 – 219

- AFC5. Vavrinský, E. - **Rendek, K.** - Daříček, M. - Donoval, M. - Horínek, F. - Horniak, M. - Donoval, D.: Electrode configuration for EMG measurements. In: Proc. of the "8th Int. Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM 2010", Smolenice, Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 203-206, 2010; ISBN 978-1-4244-8572-7

*Citované:*

Gupta, S.D., Al Yusuf, S., Ammar, J.K., Hasan, K.: "An analysis to generate EMG signal and its perspective: A panoramic approach", *Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*, 2012 International Conference on, On page(s): 1 - 5

- AFC6. Vavrinský, E. - Daříček, M. - Donoval, M. - **Rendek, K.** - Horínek, F. - Horniak, M. - Donoval, D.: Design of EMG Wireless Sensor System. In: Proc. of the "Int. Conference on Applied Electronics, Applied Electronics 2011". Pilsen, University of West Bohemia, p. 401-404, 2011; ISBN 978-80-7043-987-6

*Citované:*

Imperatori, G.; Cunzolo, P.; Cvetkov, D.; Barrettino, D. "Wireless Surface Electromyography Probes With Four High-Speed Channels", **Sensors Journal**, IEEE, On page(s): 2954 - 2961 Volume: 13, Issue: 8, Aug. 2013

***Vedecské práce v domácích nekarentovaných časopisoch***

- ADF1. Horínek, F. - Daříček, M. - Horniak, M. - Donoval, M. - Vavrinský, E. - **Rendek, K.** - Donoval, D.: Modulárny systém pre rýchlu diagnostiku ochorení a zvyšovanie kvality zdravotnej starostlivosti. *Časopis EE*, Vol. 16, NO 5/S, p. 165-167, 2010; ISSN 1335-2547

***Abstrakty príspevkov zo zahraničných vedeckých konferencií***

- AFG1. Vavrinský, E. - Daříček, M. - **Rendek, K.** - Horínek, F. - Donoval, D.: Sensor System for Wireless Bio-Signal Monitoring. In: Proc. of the "2nd International Conference, Bio-Sensing Technology", Amsterdam, Bristol: Institute of Bio-Sensing Technology, p. 152-153, 2011

***Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách***

- AFD1. Šatka, A. - **Rendek, K.** - Priesol, J.: Relaxation of Low-Frequency Noise in AlGaIn/GaN HEMTs. In: Proc. of the "9th Int. Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM 2012", Smolenice, Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 199-202, 2012; ISBN 978-1-4673-1195-3.
- AFD2. **Rendek, K.** – Šatka, A.: Investigation of Low-Frequency Noise in AlGaIn/GaN HEMT At Various Temperatures. In: Proc. of the "18th Int. Conference Applied Physics of Condensed Matter, APCOM 2012", Štrbské Pleso, Slovenská technická univerzita v Bratislave, p. 199-203, 2012; ISBN 978-80-227-3720-3
- AFD3. **Rendek, K.** – Šatka, A. – Kováč, J. – Donoval, D.: Investigation of Low-Frequency Noise in AlGaIn/GaN HEMT Structures under Illumination. In: Proc. of the "17th Int. Conference Applied Physics of Condensed Matter, APCOM 2011", Nový Smokovec, Žilinská univerzita, p. 143-146, 2011; ISBN 978-80-554-0386-1
- AFD4. **Rendek, K.** – Šatka, A.: Experimental set-up for low-frequency noise measurement of HEMT transistors. In: Proc. of the „12th Conf. of Doctoral Students, ELITECH`10:“, FEI STU in Bratislava, Bratislava, 6 pp., 2010; ISBN 978-80-227-3303-8
- AFD5. **Rendek, K.** – Šatka, A. – Kováč, J. – Donoval, D.: Investigation of low-frequency noise in HEMT transistors. In: Proc. of the "16th Int. Conference Applied Physics of Condensed Matter, APCOM 2010", Malá Lučivná, FEI STU v Bratislave, p. 210-213, 2010; ISBN 978-80-227-3307-6
- AFD6. **Rendek, K.** - Šatka, A.: Pracovisko na diagnostiku šumových vlastností GaN HEMT tranzistorov. In: Proc. of the "7th.výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra, Fotonika 2012", Bratislava, STU v Bratislave, p. 52-56, 2012; ISBN 978-80-970493-3-1

AFD7. Šatka, A. – Priesol, J. - **Rendek, K.** - Donoval, D. – Uherek, F.: Diagnostika nízkofrekvenčného šumu polovodičových štruktúr a prvkov. In: Proc. of the "9th.výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra, Fotonika 2014", Bratislava, STU v Bratislave, p. 38-42, 2014; ISBN: 978-80-970493-6-2

#### ***Odborné práce v domácich recenzovaných zborníkoch***

BED1. Horínek, F. - Daříček, M. - Horniak, M. - Donoval, M. - Vavrinský, E. - **Rendek, K.** - Donoval, D.: Modulárny systém pre rýchlu diagnostiku ochorení a zvyšovanie kvality zdravotnej starostlivosti. In: Proc. of the "Konferencia, Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2010" Trenčín, Spolok absolventov a priateľov FEI STU (EF SVŠT) v Bratislave, p. 165-167, 2010; ISSN 1335-2547

#### ***Odborné práce v domácich zborníkoch***

BEF1 Valík, L. - **Rendek, K.**: Pracovisko pre meranie šumových vlastností HEMT tranzistorov. In: Proc. of the "Zborník vybraných prác 2012, ŠVOČ 2012", Bratislava, STU v Bratislave, p. 344-348, 2012; ISBN 978-80-227-3697-8

## **10 Zoznam použitej literatúry**

- 1 T. Ohki et al., Reliability of GaN HEMTs: Current Status and Future Technology, IEEE Int. Reliability Physics Symposium. 2009, 61-70.
- 2 Rao, H. – Bosman, G.: Simultaneous low-frequency noise characterization of gate and drain currents in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. J. Appl. Phys., vol. 106, 2009, 103712-5, DOI: 10.1063/1.3259437.
- 3 Rummyantsev, S. L. et al.: Effect of gate leakage current on noise properties of AlGaIn/GaN field effect transistors, J. Appl. Phys., vol. 88, 2000, 6726-6730, DOI 10.1109/LED.2003.816588.
- 4 Curutchet, A. - Malbert, N. - Labat, N. - Touboul, A. - Gaquiere, C. - Minko, A. - Uren, M.: Low Frequency drain noise comparison of AlGaIn/GaN HEMT's grown on silicon, SiC and sapphire substrates. Microelectronics Reliability, vol. 43, 2003, 1713-1718l, DOI 10.1016/S0026-2714(03)00339-1.
- 5 Vertiatichikh, A. V. et al.: Effect of the Surface and Barrier Defects on the AlGaIn/GaN HEMT Low-Frequency Noise Performance. IEEE Electron Device Letters, vol. 24, 2003, 535-537, DOI 10.1109/LED.2003.816588.
- 6 Hsu, S. H. - Valizadeh, P. - Pavlidis, D. - Moon, J. S. - Micovic, M. - Wong, D. - Hussain, T.: Characterization and analysis of gate and drain low-frequency noise in AlGaIn/GaN HEMTs. Proceedings. IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices, 2002, 453-460, DOI 10.1109/LECHPD.2002.1146787.
- 7 Sanabria, Ch.: Noise of AlGaIn/GaN HEMTs and Oscillators. Dissertation work, University of California, California, 2006, 168 pp.
- 8 Del Alamo, J. A. - Joh, J.: GaN HEMT reliability. Microelectronics Reliability, vol. 49, 2009, 1200-1206, DOI 10.1016/j.microrel.2009.07.003.
- 9 D'yakonova N. V. et al.: Low-frequency noise in n-GaN. Semiconductors, vol. 32, 1998, 257-260.
- 10 Levinshtein M. E. et al.: Low-frequency noise in GaN/GaN heterojunctions. Appl. Phys. Lett, vol. 72, 1998, 3053-3055, DOI 10.1063/1.121538.

- 11 Rendek, K. - Šatka, A. - Donoval, D.: Measurement set-up for low-frequency noise characterization of GaN HEMT transistors. In: Proc. of the "22nd Int. Conference, Radioelektronika 2012". Brno, Brno University of Technology, IEEE, 2012, 149-153, INSPEC 12770517.
- 12 Rendek, K. – Šatka, A.: Experimental set-up for low-frequency noise measurement of HEMT transistors. In: Proc. of the „12th Conf. of Doctoral Students, ELITECH`10:“, FEI STU in Bratislava, Bratislava, 2010, 6 pp. ISBN 978-80-227-3303-8.
- 13 Válik, L. - Rendek, K.: Pracovisko pre meranie šumových vlastností HEMT tranzistorov. In: Proc. of the "Zborník vybraných prác 2012, ŠVOČ 2012", Bratislava, STU v Bratislave, 2012, 344-348, ISBN 978-80-227-3697-8.
- 14 Micovčín, T.: Automatizácia meraní nízkofrekvenčného šumu. Diplomová práca, FEI STU v Bratislave, Bratislava, 2012.
- 15 Pospieszalski, M. W.: Modeling of Noise Parameters of MESFET's and MODFET's and Their Frequency and Temperature Dependence. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 37, 1989, 1340-1350.
- 16 Hooge, F. N. - Kleinpenning, T. G. M. - Vandamme, L. K. J.: Experimental studies on  $1/f$  noise. *Rep. on Progress in Physics*, vol. 44, 1981, 480-532.
- 17 Vandamme, L. K. J. - Hooge, F. N.: What Do We Certainly Know About  $1/f$  Noise in MOSTs?. IEEE transactions on electron devices, vol. 55, November 2008, 3070-3085, DOI 10.1109/TED.2008.2005167.
- 18 Rendek, K. – Šatka, A. – Kováč, J. – Donoval, D.: Investigation of Low-Frequency Noise in AlGaIn/GaN HEMT Structures under Illumination. In: Proc. of the "17th Int. Conference Applied Physics of Condensed Matter, APCOM 2011", Nový Smokovec, Žilinská univerzita, 2011, 143-146, ISBN 978-80-554-0386-1.
- 19 Rendek, K. - Šatka, A. - Donoval, D.: Measurement set-up for low-frequency noise characterization of GaN HEMT transistors. In: Proc. of the "22nd Int. Conference, Radioelektronika 2012". Brno, Brno University of Technology, IEEE, 2012, 149-153, INSPEC 12770517.
- 20 Šatka, A. - Rendek, K. - Priesol, J.: Relaxation of Low-Frequency Noise in AlGaIn/GaN HEMTs. In: Proc. of the "9th Int. Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM 2012", Smolenice, IEEE, 2012, 199-202, DOI 10.1109/ASDAM.2012.6418568.
- 21 Kuzmík, J.: Material and Device Issues of InAlIn/GaN Heterostructures. In: Proc. of the "9th Int. Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM 2012", Smolenice, IEEE, 2012, 45-50, DOI 10.1109/ASDAM.2012.6418558.
- 22 Rendek, K. – Šatka, A. – Kováč, J. – Donoval, D.: Investigation of low-frequency noise in HEMT transistors. In: Proc. of the "16th Int. Conference Applied Physics of Condensed Matter, APCOM 2010", Malá Lučivná, FEI STU v Bratislave, 2010, 210-213, ISBN 978-80-227-3307-6.
- 23 Rendek, K. - Šatka, A. - Kováč, J. - Donoval, D.: Noise in the InAlIn/GaN HEMT Transistors. In: Proc. of the "8th Int. Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM 2010", Smolenice, IEEE, 2010, 53-56, DOI 10.1109/ASDAM.2010.5666349.
- 24 Rendek, K. - Šatka, A. - Kováč, J. - Donoval, D.: Low-Frequency Noise Analysis of InAlIn/GaN HEMT Transistors. In: Proc. of the „ 19th European Workshop on Heterostructure Technology, Hetech 2010“, Crete, Greece, 2010, 2pp.

Meno autora: Ing. Karol Rendek

Názov práce: Diagnostika šumových vlastností tranzistorov GaN HEMT

Náklad: 12 ks

Dizertačná práca spolu s autoreferátom je uložená na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Termín vytlačenia: máj 2014