

Charakterizácia impulzných vlastností tranzistorov HEMT na báze GaN

Hronec Pavol · Elektrotechnika, Študentské práce

02.12.2011



Práca sa zaoberá charakterizáciou impulzných vlastností tranzistorov s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMT) na báze GaN. Na vybraných vzorkách tranzistorov boli vyšetrované ich vlastnosti pri spínaní hradla obdĺžnikovým signálom s rôznou frekvenciou. Z tohto pohľadu je najdôležitejšou informáciou priebeh výstupnej charakteristiky, ktorý je porovnávaný s výstupnou charakteristikou zmeranou v jednosmernom (DC) režime pričom je porovnaný vplyv rôznej periódy a striedy hradlového impulzného signálu na výstupnú charakteristiku tranzistora.

1. Úvod

Tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov (High Electron Mobility Transistors HEMTs) na báze GaN sú v súčasnosti perspektívne pre mikrovlnné a vysoko výkonové zosilňovače. Typické oblasti použitia týchto tranzistorov sú vesmírne rádio teleskopy a mobilné telefóny. Konvenčné dostupné HEMT-y na trhu využívali ako substrát GaAs s vrchnou vrstvou AlGaAs. Výskum tohto materiálového systému sa však už priblížil k teoretickým limitom, preto je pre zachovanie technologického pokroku potrebný vývoj nových materiálov. Takýmito materiálmi sú polovodiče zo skupiny III-N (GaN, InN, AlN).

Tieto materiály sú charakteristické veľkou šírkou zakázaného pásma, schopnosťou pracovať pri oveľa vyšších teplotách ako kremík, germánium alebo GaAs, veľkou saturačnou rýchlosťou elektrónov a vysokým priernym napätím. [1] Dôležitú úlohu vo vývoji elektronických a optoelektronických súčiastok na báze polovodičov III-N zohrali bezpochyby roky 1992 a 1993. Najskôr sa v roku 1992 podarilo nájsť spôsob, akým sa dá dosiahnuť p-typ dopovania GaN. Tento objav bol kľúčový pre aplikácie v optoelektronike. Odvtedy je možná konštrukcia elektroluminiscenčných a laserových diód v spektrálnom rozsahu, ktorý nebolo možné dosiahnuť konvenčnými polovodičmi ako sú kremík, (Al)GaAs alebo AlInGaP.

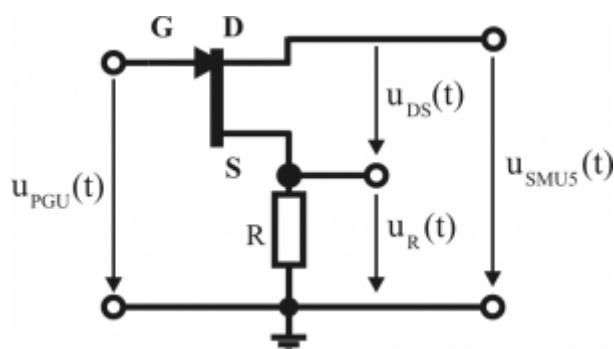
O rok neskôr bol po prvýkrát realizovaný HEMT tranzistor so štruktúrou AlGaN/GaN, ktorý je vďaka prítomnosti dvojdimenzionálneho elektrónového plynu (2DEG) v kombinácii s výbornými vlastnosťami materiálu predurčený pre použitie v elektronike. Nakoľko sú polovodiče zo skupiny III-N silne polarizované materiály, vytvorenie dvojdimenzionálneho elektrónového plynu je možné bez akéhokoľvek dopovania

vrstiev štruktúry.

Ďalej pnutie pochádzajúce z mriežkového neprispôsobenia medzi vrstvami použitých materiálov indukuje tiež piezoelektrický náboj, ktorý je zdrojom ďalších elektrónov v kanáli HEMT-u. Tento celkový náboj je 4 až 5-krát väčší ako pri HEMT-och na báze AlGaAs/GaAs. Od prvej demonštrácie HEMT-u na báze AlGaN/GaN bol zaznamenaný významný pokrok aj so štruktúrou InAlN/GaN realizovaný na rôznych substrátoch, avšak obrovský potenciál tejto technológie nebol dodnes vyčerpaný, nakoľko existujú oblasti, ktoré potrebujú ďalší vývoj a výskum pre zlepšovanie dosahovaných parametrov a vyššiu stabilitu. [2]

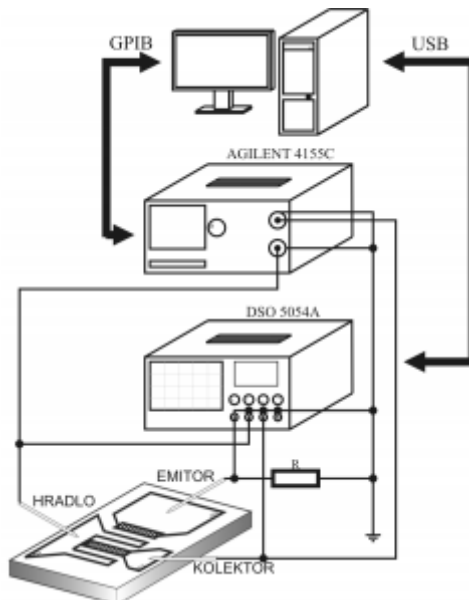
2. Impulzná charakterizácia tranzistorov

Pri meraní impulzných IV charakteristík HEMT-ov je na hradlo tranzistora privedené impulzné napätie z napäťového zdroja PGU parametrického analyzátora Agilent 4155 C a súčasne je na kolektor privedené schodovité napätie zo zdroja SMU5 tohto analyzátora. Výstupné napätie sa meria osciloskopom Agilent DSO5054A na zaťažovacom odpore R podľa schémy na Obr. 1. Osciloskop je pripojený k PC cez USB zbernicu.

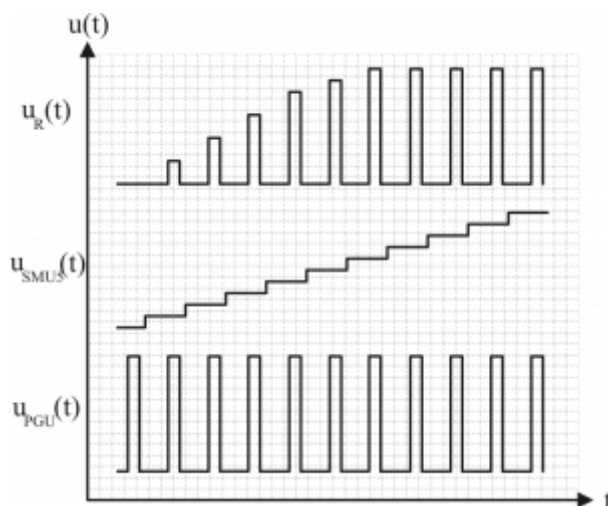


Obr. 1 Schéma zapojenia pre meranie impulzných charakteristík tranzistorov HEMT

Voľba veľkosti zaťažovacieho odporu závisí najmä od veľkosti pretekajúceho prúdu cez kanál tranzistora. Je vhodné voľiť čo najmenší odpor, avšak pri malých prúdoch na ňom vznikne malý úbytok napätia, ktorý je obtiažne merať. Schéma meracieho systému pre meranie impulzných IV charakteristík je na Obr. 2 a jednotlivé priebehy napätí sú ilustračne zobrazené na Obr. 3. Pre meranie impulzných IV charakteristík bol vyvinutý program v prostredí LabVIEW.



Obr. 2 Schéma meracieho systému pre meranie impulzných IV charakteristík.



Obr. 3 Priebehy napätí z generátorov napätia a výstupný priebeh meraný na odpore R.

3. Spôsob vyhodnotenia nameraných údajov

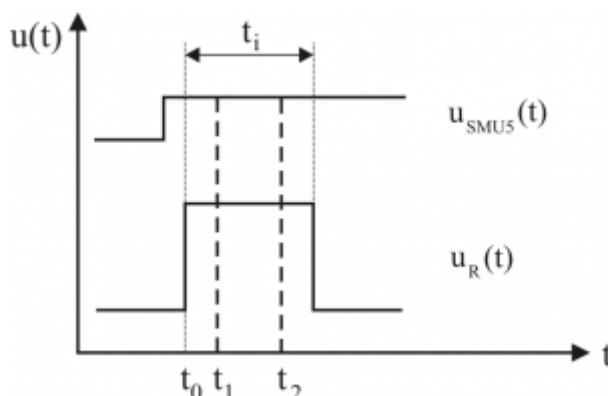
Osciloskopom boli merané tri priebehy napätia naznačené na Obr. 1. Bolo to napätie $u_R(t)$ na rezistore R, priebeh impulzného napätia $u_{PGU}(t)$ zo zdroja napätia PGU a schodovité napätie $u_{SMU5}(t)$ zo zdroja napätia SMU5. Z Obr. 1 je zrejmé, že medzi kolektorom a emitorom HEMT tranzistora nebude plné napätie $u_{SMU5}(t)$, nakoľko na rezistore R vzniká úbytok napätia ktorý meriame.

Veľkosť odporu tohto rezistora je potrebné optimalizovať z hľadiska presnosti merania. Čím väčší bude jeho odpor, tým väčší bude aj úbytok napätia na ňom a tým menej výrazný je vplyv šumu pri meraní. Avšak z hľadiska pretekajúceho prúdu cez kanál je veľký odpor nevhodný, nakoľko veľký odpor tento prúd obmedzuje. Preto veľkosť odporu volíme kompromisom medzi odporom kanála tranzistora a odporom rezistora R, ktoré vytvárajú napäťový delič, takže

$$u_{DS}(t) = u_{MSU5}(t) - u_R(t) \quad (1)$$

Konštantné napätie U_R na rezistore R pri danom napätí na kolektore sa vypočíta ako

priemer hodnôt zmeraných medzi časmi t_1 a t_2 ako je uvedené na Obr. 4. Hodnoty sa spriemerujú v tom istom časovom intervale aj pre napätie zo zdroja SMU5, čím vznikne hodnota napätia U_{SMU5} .



Obr. 4 Časový interval priemerovania nameraných hodnôt napätia.

Pre jednotlivé časové intervaly na Obr. 4 platia nasledujúce vzťahy:

$$t_1 - t_0 = \frac{t_i}{4} \quad (2)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{t_i}{2} \quad (3)$$

Tieto hodnoty časových intervalov boli zvolené z toho dôvodu, že priebeh napätia zo zdroja SMU5 sa ukázal ako nie úplne nezávislý od priebehu napätia $u_{PGU}(t)$. Pri nábežných a dobežných hranách napätia $u_{PGU}(t)$ sa na schodovitom napätí $u_{SMU5}(t)$ objavili zákmity, ktoré sa voľbou vhodného časového intervalu eliminovali, a tým nemali vplyv na vyhodnotenie IV charakteristiky. Po takto spracovaných hodnotách bolo napätie UDS prislúchajúce jednému bodu IV charakteristiky vypočítané ako

$$U_{DS} = U_{SMU5} - U_R \quad (4)$$

Hodnoty charakteristík namerané z jednotlivých kanálov osciloskopu si program ukladá do polí hodnôt a následne tieto polia ukladá do tabuľky, pričom v každom stĺpci v tabuľke sú uložené dáta z jedného kanála osciloskopu. Po skončení merania program vyhodnotí hodnoty v poliach. Postup vyhodnotenia je zvolený tak, že najskôr vyčíta hodnoty priebehu napätia $u_{SMU5}(t)$.

Keď program vyhodnotí, že sa napätie zvýšilo o zvolený napäťový krok, tak v tom istom časovom bode začína program vyčítavať pole s hodnotami napätí $u_{PGU}(t)$ až kým identifikuje nábežnú hranu. Potom začína spracovávať dáta z poľa hodnôt napätia $u_R(t)$ hore uvedeným spôsobom. Keď program vyhodnotí prvý impulz, tak pokračuje v spracovaní poľa hodnôt s napätím $u_{SMU5}(t)$. Napätia pre IV charakteristiku potom program vypočíta podľa rovnice (4) a prúdy vypočíta podľa vzťahu

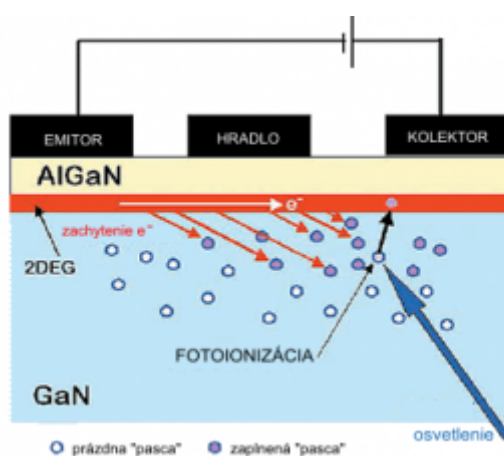
$$I_{DS} = \frac{U_R}{R} \quad (5)$$

4. Prúdový kolaps v tranzistoroch HEMT

Pri výrobe HEMT-ov vznikajú v štruktúre tzv. pasce. Vyskytujú sa najmä vo vrstve GaN (Obr.5) a sú to v podstate atómy neželaných prímiesí alebo defekty v kryštalickej

mriežke, ktoré zachytávajú nosiče náboja a lokalizujú ich v blízkosti pascového centra. Zapojením napätia medzi kolektor a emitor tranzistora HEMT sú elektróny vo vodivostnom kanáli týmto elektrickým poľom prudko urýchlené, čím získajú dostatočnú kinetickú energiu na to, aby vnikli do susednej vrstvy v štruktúre tranzistora. Ak sa v tejto oblasti nachádzajú pasce, nosiče náboja sa v nich zachytávajú.

Výsledkom týchto javov je pokles kolektorového prúdu, ktorý sa označuje ako prúdový kolaps okrem tepelného kolapsu spôsobeného ohrevom aktívnej vrstvy. Na Obr. 5 môžeme vidieť princíp zachytávania nosičov náboja vo vysokorezistívnej vrstve GaN v štruktúre HEMT-u, o ktorej je známe, že obsahuje vysokú koncentráciu pascí. Poklesnutý kolektorový prúd môže byť obnovený, ak vrstvu so zachytenými nosičmi náboja osvetlíme. Ak toto svetlo odovzdá dostatočnú energiu zachyteným nosičom náboja, tak tieto nosiče vniknú naspäť do vodivostného kanála, kde sa opäť podieľajú na prenose náboja medzi kolektorom a emitorom.



Obr. 5 Prúdový kolaps v AlGaIn/GaN štruktúre HEMT-u ako dôsledok zachytávania nosičov náboja do pascí. [3]

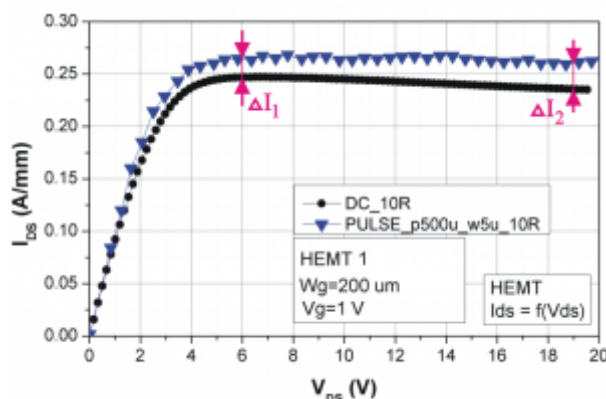
5. Impulzné merania tranzistorov HEMT

Pre meranie bola vybraná vzorka s tranzistormi HEMT so štruktúrou $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ na kremíkovom substráte s množstvom india v zlúčenine $x = 0,18$ pripravená vo výskumnom centre Jülich. V prípade impulzných meraní sa prúdy merali cez zaťažovací odpor ako je popísané v odseku 3. Aby bolo možné porovnať DC a impulzné merania, tak aj výstupná charakteristika v DC režime bola zmeraná cez rovnaký zaťažovací odpor. Hodnota odporu bola optimálne zvolená 10Ω tak, aby na ňom nevznikal veľký úbytok napätia a zároveň aby bolo možné spoľahlivo zmerať výstupné charakteristiky.

5.1 Porovnanie meraní DC a impulzných výstupných charakteristík tranzistorov HEMT

Najmenšia možná šírka impulzu, ktorú je možné vygenerovať generátorom PGU parametrického analyzátora Agilent 4155C je $1 \mu\text{s}$. Avšak táto hodnota je porovnateľná s dĺžkou nábežnej a dobežnej hrany impulzu, preto bol na porovnanie impulzných a DC charakteristík zvolený impulz so šírkou $5 \mu\text{s}$. Očakáva sa, že čím menšia je strieda signálu, tým viac sa eliminuje zahrievanie kanála, a teda aj prúdový kolaps tranzistorov HEMT. Preto bola zvolená strieda signálu 1%.

V prípade DC merania so zaťažovacím odporom došlo k miernemu poklesu saturačného prúdu oproti DC meraniu bez neho. Meraním impulzných charakteristík došlo k eliminácii mierneho prúdového kolapsu ako vyplýva z priebehov na Obr. 6, pričom $\Delta I_1 < \Delta I_2$. To je v zhode s očakávaným výsledkom, zatiaľ čo došlo k miernemu nárastu saturačného prúdu.



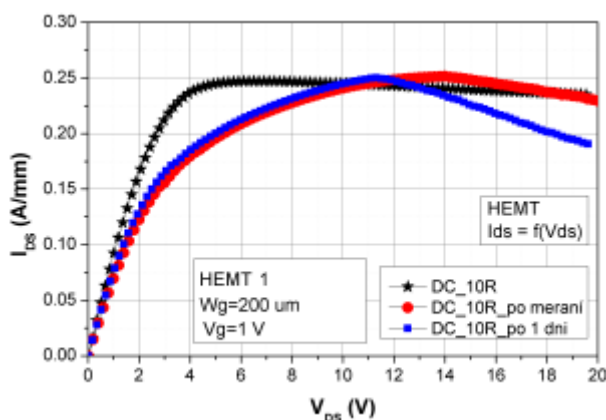
Obr. 6 Porovnanie výstupných charakteristík vybraného tranzistora.

5.2. Vplyv parametrov impulzného signálu na výstupné charakteristiky tranzistorov HEMT

V tejto časti práce je skúmaný vplyv parametrov impulzného signálu pripojeného na hradlo tranzistora HEMT. Pri meraní boli menené nasledovné parametre signálu:

- šírka impulzu
- perióda (frekvencia)
- strieda signálu

Pred impulznými meraniami bola najprv zmeraná výstupná charakteristika v DC režime. Výstupné charakteristiky boli v impulznom režime zmerané pre sedem rôznych stried impulzného signálu s jedenástimi rôznymi šírkami impulzov od 100 μ s do 4 μ s. Pre porovnanie bola po impulzných meraniach opäť zmeraná výstupná charakteristika v DC režime.



Obr. 7 Porovnanie výstupných charakteristík zmeraných v DC režime pred impulznými meraniami, po nich a po jednom dni.

Z nameraných DC charakteristík bolo možné určiť vplyv impulzných meraní na vlastnosti tranzistora. Po impulzných meraniach došlo k poklesu prúdu v oblasti

prechodu z lineárnej oblasti charakteristiky do saturačnej oblasti a tranzistor dosiahol saturačný prúd pri podstatne vyššom napätí. Za účelom zistenia, či sú tieto zmeny trvalé, bolo meranie výstupnej charakteristiky v DC režime zopakované o deň neskôr. Všetky tri namerané priebehy sú na Obr. 7. V saturačnej oblasti sa však veľmi výrazne začal prejavovať prúdový kolaps.

Vplyv impulzov s rôznymi parametrami bol vyhodnotený pre dve rôzne napätia pripojené medzi kolektor tranzistora a zem, pričom sa sledovala závislosť kolektorového prúdu od parametrov impulzu pri týchto napätiach. Napätia boli zvolené podľa toho, kde sa môže vyskytnúť výrazný vplyv parametrov impulzu na kolektorový prúd. Pre vyhodnotenie bolo zvolené napätie 5 V, ktoré má vplyv na kolektorový prúd na rozhraní lineárnej a saturačnej oblasti výstupnej charakteristiky a napätie 15 V, ktorého vyhodnotenie ukáže vplyv parametrov signálu na veľkosť saturačného prúdu tranzistora.

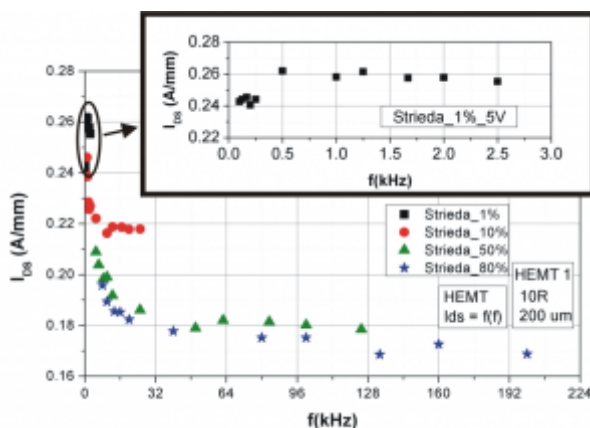
Vyhodnotenia pri napätí 5 V ukázali výraznú závislosť kolektorového prúdu od frekvencie impulzného signálu. Na Obr. 8 je z dôvodu prehľadnosti táto závislosť zobrazená len pre štyri striedy signálu, pričom klesajúci trend so vzrastajúcou frekvenciou sa prejavuje pri všetkých meraných striedach. Rozdiel medzi maximálnym a minimálnym nameraným kolektorovým prúdom v závislosti od frekvencie je približne 0,03 A/mm pre všetky striedy signálu, čo je v prípade vzorky so šírkou hradla 200 μm rozdiel 0,006 A. Pre striedu 1% sa hodnota kolektorového prúdu pre frekvencie do 500 Hz výrazne nemení a pri frekvencii 500 Hz vzrastie a opäť sa výrazne nemení, ako vidieť na Obr. 8 a Obr. 10.

Na os x bola vynesená frekvencia, ktorá sa vypočítala zo šírky impulzu a striedy signálu pomocou vzťahu

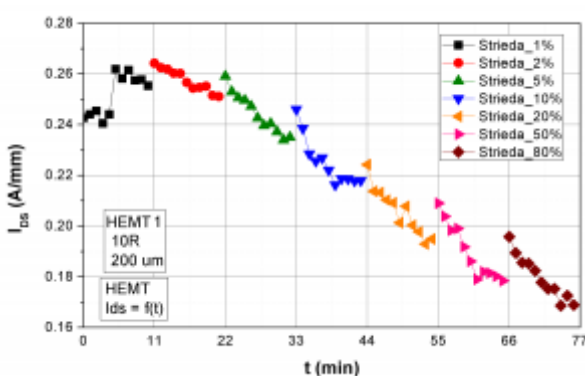
$$f = \frac{D}{t_{\text{imp}}} \quad (6)$$

kde f je frekvencia signálu, D je jeho strieda a t_{imp} šírka impulzu. Na jednu hodnotu striedy pripadá jedenásť meraní s rôznymi šírkami impulzov, ktoré zodpovedajú jedenástim hodnotám frekvencie a v konečnom dôsledku rovnakému počtu bodov vo frekvenčnej závislosti kolektorového prúdu. Frekvenčné závislosti kolektorového prúdu zmerané pre jednotlivé striedy sú na Obr. 8 rozlíšené farbami.

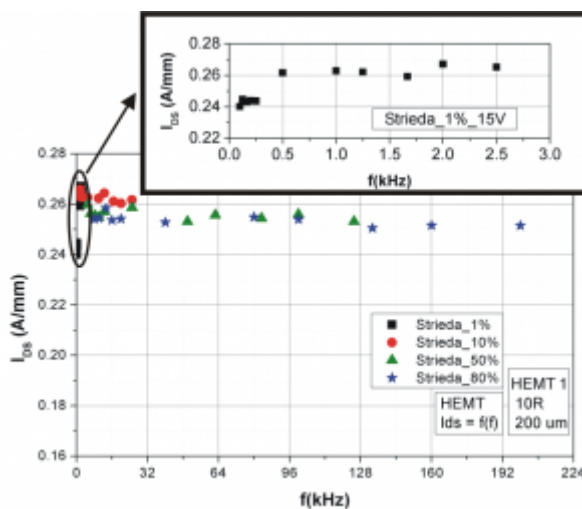
Všetky merania sú zobrazené na Obr. 9 v priebehu nameraných kolektorových prúdov v čase. Merania prebiehali kontinuálne za sebou v rovnakých časových úsekoch 11 min pre jednu striedu. Z priebehu je zrejмый vplyv frekvencie na kolektorový prúd. Kolektorový prúd sa mení v čase aj v závislosti od striedy aplikovaného signálu, čo pravdepodobne spôsobil prúd tečúci kanálom tranzistora počas 77 meraní, ktorých celková dĺžka trvania bola rádovo niekoľko desiatok minút.



Obr. 8 Závislosť kolektorového prúdu od frekvencie signálu pripojeného na hradlo tranzistora pre rôzne striedy signálu pre napätie 5V.

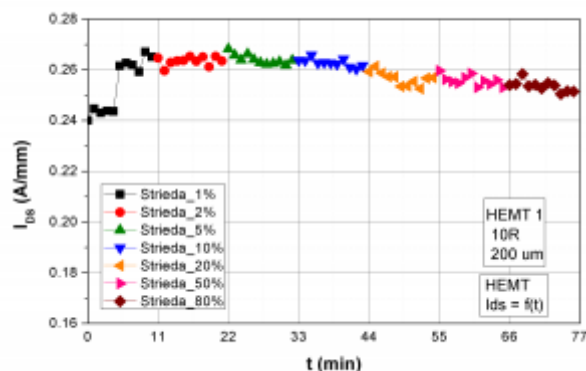


Obr. 9 Priebeh nameraných hodnôt kolektorového prúdu v čase pre napätie 5V.



Obr. 10 Závislosť kolektorového prúdu od frekvencie signálu pripojeného na hradlo tranzistora pre rôzne striedy signálu pre napätie 15V.

Rovnaký postup bol pri vyhodnotení meraní pri 15 V. Závislosť kolektorového prúdu od frekvencie je na Obr. 10 a všetky merania pri 15 V sú na Obr. 11. Z týchto priebehov je možné vidieť, že zmena kolektorového prúdu nie je taká výrazná ako pri 5 V. Rozdiel medzi maximálnym a minimálnym zmeraným kolektorovým prúdom v závislosti od frekvencie je približne 0,005-0,01 A/mm pre všetky striedy signálu, čo je v prípade vzorky so šírkou hradla 200 μm rozdiel 0,001-0,002 A. Frekvenčná závislosť kolektorového prúdu pri striede 1% je rovnaká ako v prípade meraní pri napätí 5 V.



Obr. 11 Priebeh nameraných hodnôt kolektorového prúdu v čase pre napätie 15V.

6. Záver

Výsledkom práce bolo vypracovanie metodiky merania a realizácia pracoviska na meranie impulzných charakteristík s cieľom porovnať výstupné charakteristiky tranzistora zmerané v DC a impulznom režime. Merania ukázali, že pri aplikovaní signálu s dĺžkou impulzu 5 μ s a striedou 0,01 sa podarilo eliminovať prúdový kolaps tranzistora spôsobený záchytnom nosičov na pasciach, pričom saturačný prúd mierne narástol.

Ďalej z meraní vyplýva, že kolektorový prúd na rozhraní lineárnej a saturačnej oblasti výstupnej charakteristiky vybranej vzorky tranzistora značne závisí od frekvencie signálu, pričom rozdiel medzi maximálnym a minimálnym zmeraným kolektorovým prúdom je približne 0,03 A/mm pre všetky striedy signálu, okrem striedy 1%, kde došlo ku skokovému nárastu kolektorového prúdu pri frekvencii 500 Hz.

Rozdiel medzi maximálnym a minimálnym kolektorovým prúdom v saturačnej oblasti pri 15 V je 0,005-0,01 A/mm, pričom frekvenčná závislosť tohto prúdu bola menej výrazná. Tieto merania sú dôležité pre charakterizáciu tranzistorov typu HEMT z hľadiska vplyvu impulzného signálu spínajúceho tranzistor na prúdový kolaps a priebeh výstupnej charakteristiky všeobecne a budú predmetom ďalšieho skúmania.

PodĎakovanie

Za vedenie práce ďakujem prof. J.Kováčovi, PhD. a za poskytnutie vzoriek a diskusiu doc. P. Kordošovi, DrSc. a Dr. M. Mikulicsovi z Výskumného Centra Jülich, Nemecko. Práca bola podporená projektom VEGA 1/0689/09.

7. Odkazy na literatúru

1. LUNDSKOG, Anders: Characterization of advanced AlGaN HEMT structures. [online] Dostupné z <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:24121/FULLTEXT01>
2. FIEGER, Michael: Technology and Characterization of GaN - based Heterostructure Field Effect Transistors. [online] Dostupné z <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2011/3487/pdf/3487.pdf>
3. KLEIN, P.B., BINARI, S.C., IKOSSI, K., KOLESKE, D.D., WICKENDEN, A. E., HENRY, R.

L.: Traps in GaN-based Microwave Devices [online] Dostupné z
<http://www.nrl.navy.mil/content.php?P=02REVIEW122>

Katedra mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská republika
