

# DÖRT TON KÜÇÜK İŞARET GİRİŞLİ GaN HEMT TRANSİSTÖRÜN FARKLI SICAKLIKLARDAKİ ASİMETRİK GENLİK DEĞİŞİMİ

Levent GÖKREM<sup>1</sup>, Fatih V. ÇELEBİ<sup>2</sup>, Remzi YILDIRIM<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Gazi Osman Paşa Üniversitesi Mühendislik Fakültesi TOKAT

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Beşevler-ANKARA.

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Gölbaşı-ANKARA

[leventgokrem@gop.edu.tr](mailto:leventgokrem@gop.edu.tr), [fcelebi@eng.ankara.edu.tr](mailto:fcelebi@eng.ankara.edu.tr), [remzi@gazi.edu.tr](mailto:remzi@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 24.12.2009; Kabul/Accepted: 26.04.2010)

## ÖZET

Bu çalışmada, GaN HEMT transistörün sıcaklığa bağlı analizi yapılarak Volterra güç serisi üçüncü dereceye kadar açılmış ve küçük işaret transfer fonksiyonları ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ) elde edilmiştir. Birinci çekirdek küçük işaret transfer fonksiyonu ( $H_1$ ) kullanılarak 100K, 300K ve 600K sıcaklık değerlerinde dört-tonlu küçük işaret girişinden elde edilen intermodülasyon (IMD) frekans bileşenleri, geçit-kaynak (Gate source, Vgs) gerilimine bağlı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada IMD frekans bileşenleri iki grupta irdelenmiş; birinci grup bileşenler (1-6) ve ikinci grup bileşenler ise (7-17) olarak alınmış ve gruplar arası ve grup içi asimetrik genlik değişimi, kritik frekans bölgesi, bant genişliği ve IMD haberleşme de değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** HEMT, Asimetri, Volterra Serisi, Sıcaklık, Distorsiyon, Harmonik.

## ASYMMETRIC AMPLITUDE VARIATION FOR FOUR TONE SMALL SIGNAL INPUT GaN HEMT AT DIFFERENT TEMPERATURES

### ABSTRACT

In this study, temperature dependence of GaN HEMT is analyzed by Volterra power series expansion up to third order by obtaining the small signal transfer functions  $H_1$ ,  $H_2$  and  $H_3$ . By using the first order-kernel small signal transfer function ( $H_1$ ) at different temperature values of 100K, 300K and 600K (Kelvin, K) of four-tone small signal input, The intermodulation (IMD) frequency components are analyzed with respect to gate to source voltage Vgs. In the study, the IMD frequency components are examined in two groups which are (1-6) and (7-17) respectively. The asymmetric amplitude changes between and inside the groups, critical frequency region, bandwidth and IMD communications are also evaluated.

**Keywords:** HEMT, Asymmetry, Volterra Series, Temperature, Distortion, Harmonics.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

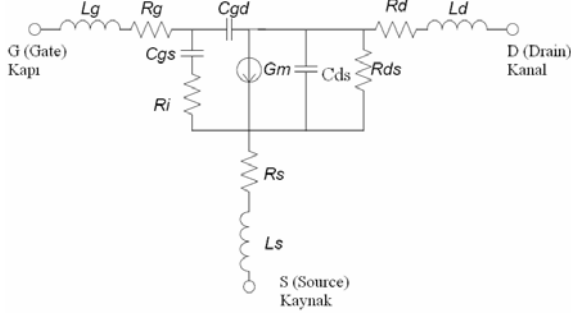
Yüksek hareketli elektron taşıyıcı transistör (High Electron Mobility Transistor, HEMT) bir çeşit alan etkili transistör olup düşük gürültü ve yüksek frekanslarda çalışmaları nedeniyle değişik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu temel alanların başlıcaları analog, sayısal ve kablosuz haberleşme sistemleridir. HEMT transistörlerin çalışma frekansı kullanılan malzeme türüne göre değişmekte olup 10–110 GHz arasında bir değer almakta ve bu

transistörlerin bir çok özellikleri ilgili kaynaklarda verilmektedir [1-25]. Analizi yapılan GaN tabanlı HEMT transistörün kesim frekansı 101GHz, maksimum osilasyon frekansı ise 155GHz dir [17,18].

### 2. GaN HEMT TRANSİSTÖRÜN VOLTERRA SERİSİYLE ANALİZİ (VOLTERRA SERIES ANALYSIS OF GaN HEMT)

HEMT transistörün kullanılan birçok değişik eşdeğer devre modeli olup bunların en çok kullanılanları

yüksek ve alçak frekans, büyük ve küçük işaret eşdeğer devreleridir. Bu nedenle analize başlamadan önce amaca uygun eşdeğer devre modeli seçilmelidir. Şekil 1. de ise kullanılan HEMT transistörün Campbell Brown eşdeğer devre modeli verilmiştir [17-19].



**Şekil 1.** Campbell Brown eşdeğer devre modeli. (Campbell Brown equivalent circuit model)

Şekil.1 deki değişkenler: geçit endüktansı  $L_g$ , kanal endüktansı  $L_d$ , kaynak endüktansı  $L_s$ , geçit direnci  $R_g$ , kaynak direnci  $R_s$ , kanal direnci  $R_d$ , Kapı-kaynak kapasitansı  $C_{gs}$ , kapı yüklemeye direnci  $R_i$ , taban kapasitansı  $C_{ds}$ , kanal kapı geri besleme kapasitansı  $C_{gd}$ , çıkış iletkenliği  $g_m$ , kanal direnci  $r_{ds}$  yi temsil etmektedir [17-18].

HEMT'in doğrusal olmayan çıkış akımı

$$i_d(v_g, v_d) = \frac{\partial I_d}{\partial V_g} v_g + \frac{\partial I_d}{\partial V_d} v_d + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_d}{\partial V_g^2} v_g^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_d}{\partial V_g \partial V_d} v_g v_d + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 I_d}{\partial V_g^3} v_g^3 + \frac{1}{2} \frac{\partial^3 I_d}{\partial V_g^2 \partial V_d} v_g^2 v_d + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 I_d}{\partial V_d^3} v_d^3 + \frac{1}{2} \frac{\partial^3 I_d}{\partial V_d^2 \partial V_g} v_d^2 v_g \quad (1)$$

olarak verilmiştir [22,23]. HEMT'in farklı sıcaklıklarındaki devre parametrelerinin değişimleri de ilgili kaynaklarda verilmiştir [17,18].

Frekans düzleminde Volterra transfer fonksiyonları  $H_1(\omega_1)$ ,  $H_2(\omega_1, \omega_2)$  ve  $H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü çekirdeği temsil etmektedir. Bunlar;

$$H_1(\omega) = \frac{-g_m}{Y_o(\omega)} H_{1C}(\omega) \quad (2)$$

$$H_2(\omega_1, \omega_2) = -\frac{H_{1C}(\omega_1)H_{1C}(\omega_2)}{Y_o(\omega_1)} \left[ \frac{-g_{m1} \left( \frac{1}{Z_{gs2}} \right)}{Y_i(\omega')} + g_{m2} + \frac{Y_{ds2} g_{m1}^2}{Y_o(\omega_1)Y_o(\omega_2)} \right] \quad (3)$$

$$H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \frac{-1}{Y_i(\omega')} [H_{1C}(\omega_1)H_{1C}(\omega_2)H_{1C}(\omega_3)\{A\} + H_{1C}(\omega_1)H_{2C}(\omega_1, \omega_2)\{B\} + 2Y_{o2}H_1(\omega_1)H_2(\omega_1, \omega_2)] \quad (4)$$

$$A = \left\{ g_{m3} - \frac{g_{m1} \left( \frac{1}{Z_{gs3}}(\omega') \right)}{Y_i(\omega')} - \frac{Y_{o3} g_{m1}^3}{Y_o(\omega_1)Y_o(\omega_2)Y_o(\omega_3)} \right\}$$

$$B = \left\{ 2g_{m2} - \frac{2g_{m1} \left( \frac{1}{Z_{gs2}}(\omega') \right)}{Y_i(\omega')} \right\}$$

eşitlikte geçen diğer terimler ise;

$$H_{1C}(\omega) = \frac{Y_s(\omega)}{Y_s(\omega) + Y_E(\omega)} \quad (5)$$

$$H_{2C}(\omega_1, \omega_2) = -\frac{\left( \frac{1}{Z_{gs2}} \right)}{Y_i(\omega')} H_{1C}(\omega_1)H_{1C}(\omega_2) \quad (6)$$

$$H_{3C}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \frac{-1}{Y_i(\omega)} \left[ 2 \left( \frac{1}{Z_{gs2}} \right) H_{1C}(\omega_1)H_{2C}(\omega_1, \omega_2) + \left( \frac{1}{Z_{gs3}} \right) H_{1C}(\omega_1)H_{1C}(\omega_2)H_{1C}(\omega_3) \right] \quad (7)$$

$$Y_s(\omega) = \frac{1}{Z_s(\omega) + (R_g + j\omega L_g)} \quad (8)$$

$$Y_E(\omega) = \frac{1}{Z_{gs}(\omega)} \quad (9)$$

$$Y_i(\omega) = Y_s(\omega) + Y_E(\omega) \quad (10)$$

$$Y_o(\omega) = Y_{ds}(\omega) + \frac{1}{(R_d + j\omega L_d) + Z_L(\omega)} \quad (11)$$

$$Y_{ds}(\omega) = g_{ds}(\omega) + j\omega C'_{ds} \quad (12)$$

$$Z_{gs} = \frac{1 + j\omega C_{gs} R_i}{j\omega C_{gs} + j\omega C'_{gd} - \omega^2 C_{gs} R_i C'_{gd}} \quad (13)$$

$$Z_{gs2} = \frac{1 + j\omega' C_{gs2} R_i}{j\omega' C_{gs2} + j\omega' C'_{gd} - \omega'^2 C_{gs2} R_i C'_{gd}} \quad (14)$$

$$Z_{gs3} = \frac{1 + j\omega'' C_{gs3} R_i}{j\omega'' C_{gs3} + j\omega'' C'_{gd} - \omega''^2 C_{gs3} R_i C'_{gd}} \quad (15)$$

$$Y_{o2} = (g_{ds2} + j\omega_2 C'_{ds}) + \frac{1}{(R_d + j\omega_2 L_d) + Z_L(\omega_2)} \quad (16)$$

$$Y_{o3} = (g_{ds3} + j\omega_3 C'_{ds}) + \frac{1}{(R_d + j\omega_3 L_d) + Z_L(\omega_3)} \quad (17)$$

$$g_m = g_{m1} + g_{m2} V_{gs} + g_{m3} V_{gs}^2 \quad (18)$$

$$r_{ds} = r_{ds1} + r_{ds2} V_{gs} + r_{ds3} V_{gs}^2 \quad (19)$$

$$C_{gs} = C_{gs} + C_{gs2} V_{gs} + C_{gs3} V_{gs}^2 \quad (20)$$

$$C'_{ds} = C'_{ds} + C''_{gd} \quad (21)$$

şeklinde [17,18]. Volterra serisiyle ilgili ayrıntılı bilgiler kaynaklarda verilmiştir [26-28].

Sistemin girişine uygulanan dört ton küçük işareti

$$I_g, \quad I_g(t) = I_o(t) + I_1(t) + I_2(t) + I_3(t) + I_4(t) \quad (22)$$

biçimindedir. Eşitlikteki  $I_o, I_1, I_2, I_3$  ve  $I_4$  giriş işaretlerini temsil etmektedir. Taşıyıcı işaret  $I_o = u_o \cos(\omega_o t + \delta_o)$  olmak üzere diğer ton girişleri ise  $I_1 = u_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1), I_2 = u_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2), I_3 = u_3 \cos(\omega_3 t + \delta_3)$  ve  $I_4 = u_4 \cos(\omega_4 t + \delta_4)$  şeklindedir. İfadelerde geçen  $u_o, u_1, u_2, u_3$  ve  $u_4$  işaretlerin genliklerini,  $\omega_o, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  ( $\omega_o \neq \omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3 \neq \omega_4$ ) frekansları ve  $\delta_o, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$  ise fazları temsil etmektedir. Bu işaretlerden elde edilen IMD frekans bileşenlerinin bazıları çeşitli teknik nedenlerden dolayı kullanılmamakta veya tercih edilmemektedir [26-28]. Haberleşme sistemlerinin bant genişliğini artırmak için kullanılabilir muhtemel IMD frekans bileşenleri sırasıyla aşağıda verilmiştir. Bunlar:

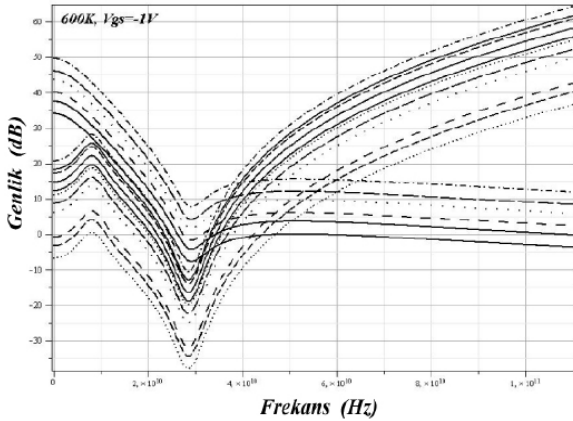
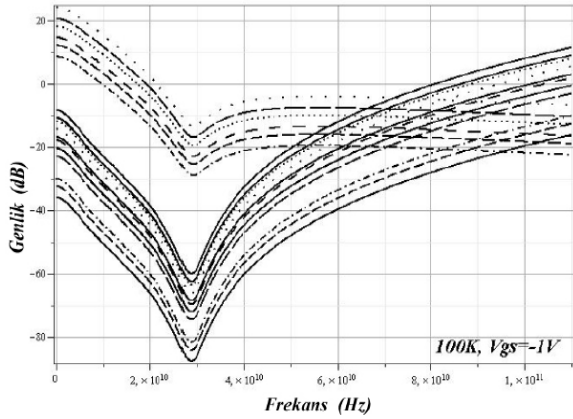
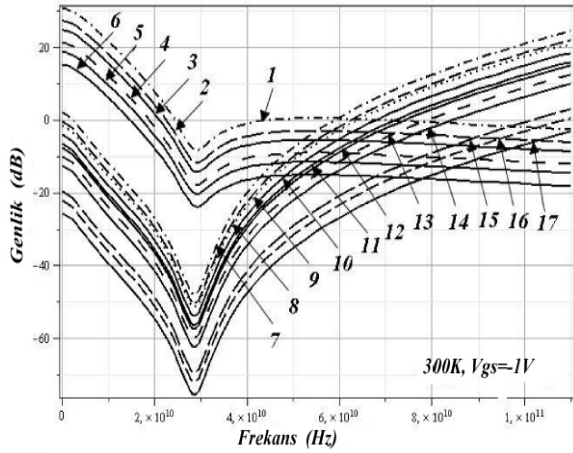
1.  $(\omega_1 + \omega_2),$     2.  $(\omega_1 + \omega_3),$     3.  $(\omega_2 + \omega_3),$
4.  $(\omega_1 + \omega_4),$     5.  $(\omega_2 + \omega_4),$     6.  $(\omega_3 + \omega_4)$
7.  $(2\omega_1 + \omega_2),$   $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3),$     8.  $(2\omega_2 + \omega_1),$

9.  $(2\omega_1 + \omega_3),$     10.  $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_4),$     11.  $(2\omega_2 + \omega_3),$
12.  $(2\omega_1 + \omega_4),$   $(2\omega_3 + \omega_1),$   $(\omega_1 + \omega_3 + \omega_4),$
13.  $(\omega_2 + 2\omega_3),$   $(\omega_2 + \omega_3 + \omega_4),$     14.  $(2\omega_2 + \omega_4),$
15.  $(2\omega_3 + \omega_4),$   $(\omega_1 + 2\omega_4),$     16.  $(\omega_2 + 2\omega_4),$
17.  $(\omega_3 + 2\omega_4)$

olarak sıralanır ve bunlara simetrikleri de ilave edilebilir [29-32]. Bu IMD frekans bileşenlerinin Şekil. 2 ve diğer şekillerdeki sıralamaları da aynıdır.

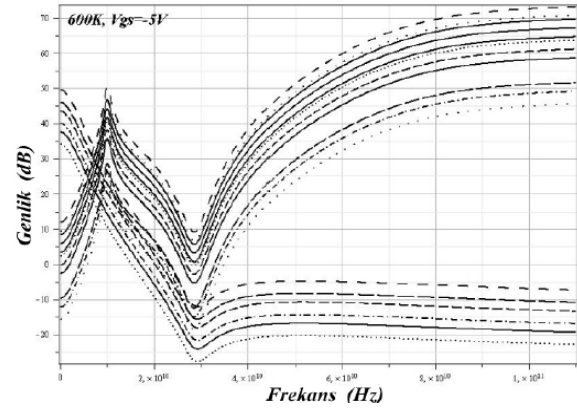
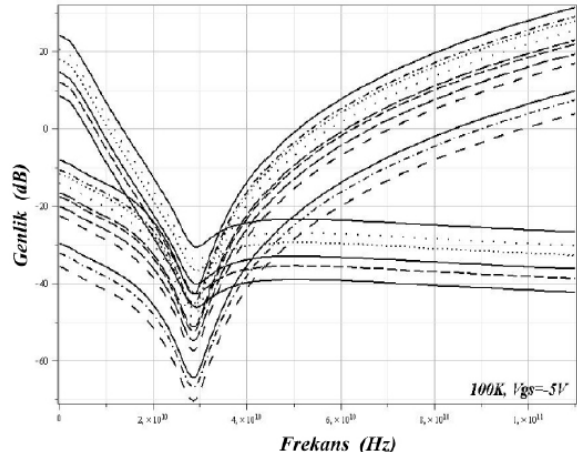
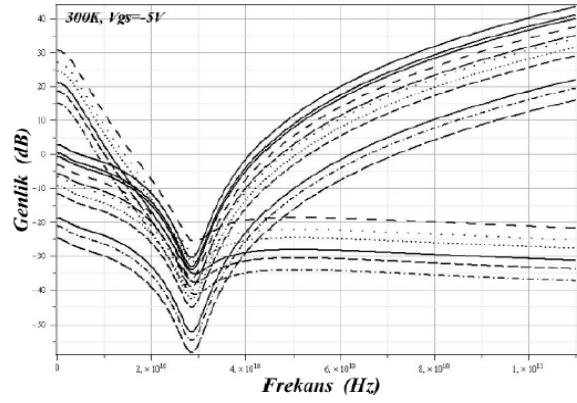
Şekil 2. de  $H_1$  birinci çekirdek küçük işaret transfer fonksiyonundan elde edilen sistemin 100K, 300K ve 600K için her iki grupta ((1-6) ve (7-17)) frekans cevabı görülmektedir. Bu gruplama tamamen IMD frekans bileşenlerinin davranışına göre yapılmıştır. Birinci grup IMD frekans bileşenlerinin 300K,  $V_{gs} = -1V$  için en büyük genlik değeri yaklaşık 15-32 dB arasında değişmektedir. Bu grubun -3dB için toplam bant genişliği yaklaşık 30,858GHz olarak bulunmuştur. En düşük genliğe karşılık gelen değeri veya bükülme noktası frekansı yaklaşık 28,6GHz civarında olup bu değer de sağa ve sola küçük kaymalar görülmektedir. Bu bölge 100K, 300K ve 600K için sıcaklıktan en fazla etkilenen ve kazancın en düşük olduğu frekans bölgesidir. Her iki grup için bu bölge 200K, 400K ve 500K sıcaklıkları içinde geçerlidir. İkinci grup IMD frekans bileşenlerinde (7-17) ise düşük frekans değerleri için genlik değişimi 2 ile -25dB arasında olup en düşük genlik değeri ise -78dB dir. Ancak yaklaşık 60GHz den sonra bazı IMD frekans bileşenlerinin kazanç değerleri artmaktadır. Bu grup 60-100GHz arası haberleşme sistemlerinde kullanılabilir. Fakat bu frekans değeri HEMT kesim frekansına yakındır. Bu grup için toplam bant genişliği teorik olarak 69,138 GHz bulunmuştur. Bu frekans bölgesinde yeterli genliğin elde edilmesi pratik uygulamalarda mümkün olmayabilir. 100K, 300K ve 600K sıcaklıkları için birinci grup düşük frekans değerleri 9dB ile -25dB arasında ve ikinci grup ise sırasıyla -8dB, -35dB ve -88dB, 600K için ise birinci grup 34-50 dB, ikinci grup 1-28 dB, en düşük genlik değeri -37dB ve en büyük genlik değeri ise 65dB ye yükselmiştir.

Şekil 3. te ise birinci grup IMD frekans bileşenlerinin 300K ve  $V_{gs} = -5V$  için en büyük genlik değeri yaklaşık 10-31 dB arasında görülmektedir. Bu grubun -3dB toplam bant genişliği yaklaşık 30,858GHz olarak bulunmuştur. En düşük genliğe karşılık gelen değeri veya bükülme noktası frekansı yaklaşık 28,6GHz civarında olup bu değer sağa ve sola küçük kaymalar göstermektedir. İkinci grup IMD frekans bileşenlerinde (7-17) ise düşük frekans değerleri için 5,-25 dB arasında ve en düşük genlik değeri -58dB, en büyük genlik değeri ise 45dB dir. Birinci grubun -3dB deki toplam bant genişliği ise 18,35GHz dir.



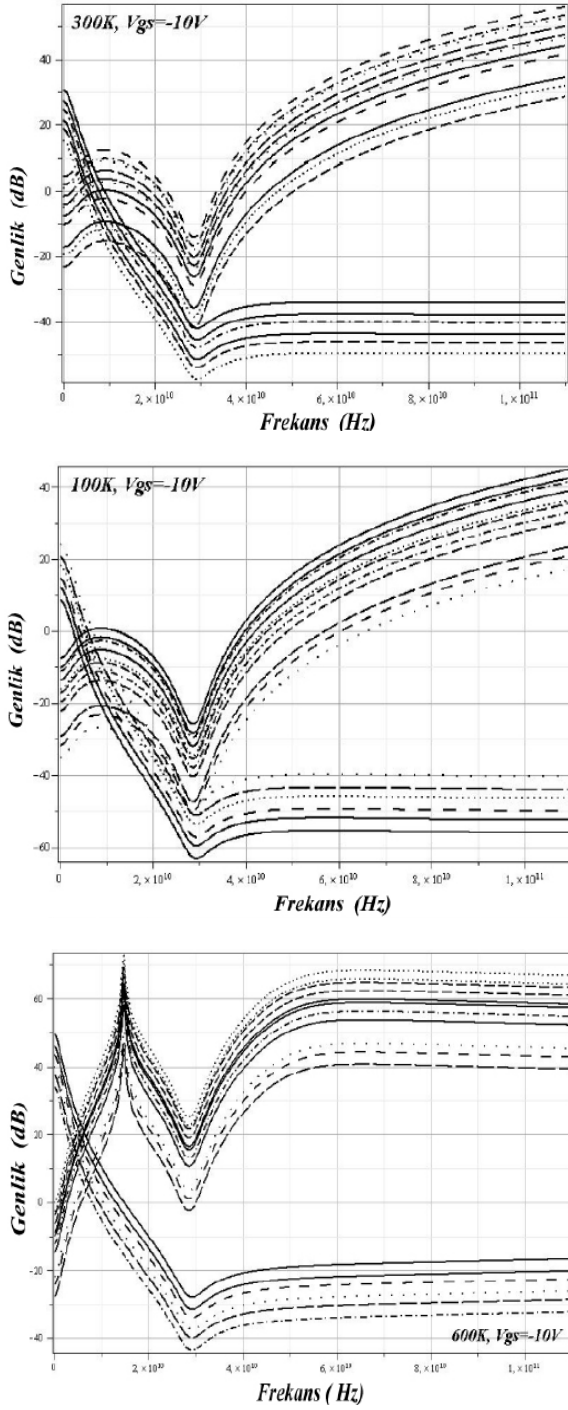
Şekil 2. Frekans cevabı. (Frequency response)

Şekil 4. te birinci grup IMD frekans bileşenlerinin 300K de ve  $V_{gs} = -10V$  için eğrileri elde edilmiştir. Bu değer uç değer olup teorik olarak IMD bileşenlerinin davranışını analiz etmek amacıyla yapılmıştır. -3dB bant genişliği birinci grup IMD bileşenleri için yaklaşık 6,35GHz, ikinci grup genlikleri yeteri kadar yükseltirse 3-20GHz arasında ilave olarak 133,287GHz ile 28GHz'lik bant genişliği elde edilebilir. Toplamda teorik olarak 139,63GHz bant genişliği bulunmuştur.



Şekil 3. Frekans cevabı. (Frequency response)

Sıcaklık ve  $V_{gs}$  gerilim değerlerine göre IMD frekans bileşenlerinin genlik değişimleri Tablo.1 de görülmektedir [33]. Bu tablodan  $V_{gs} = -2, -3V$  şartlarında 100K-300K arasındaki genlik farkı birinci grup için yaklaşık 6dB, ikinci IMD grubu için ise yaklaşık 12 dB genlik değişimi tespit edilmiştir. Bu tablodan 300K-600K arasındaki geçiş için ise birinci grup için yaklaşık 19dB, ikinci grup için ise yaklaşık 40dB civarında genlik değişimi belirlenmiştir.



Şekil 4. Frekans cevabı. (Frequency response)

Vgs=-4V için 100K-300K arasında birinci grup için yaklaşık 6dB, ikinci IMD grubu için ise yaklaşık 12 dB genlik değişimi belirlenmiştir. Bu tablodan 300K-600K arasındaki geçiş için ise birinci grup için yaklaşık 19dB, ikinci IMD grubu için ise yaklaşık 35dB civarında genlik değişimi tespit edilmiştir. Sıcaklık değerini 100K ve Vgs=-2V değerini temel aldığımızda, Vgs=-3V için ikinci grup bileşenler arasında 4,6-7,8dB genlik değişimi ve Vgs=-4V için ise ikinci grup bileşenleri arasında ise 7,55-10,16 dB genlik değişimi belirlenmiştir. Birinci grup IMD genliklerin de ise bir değişime olmamaktadır.

Tablo.1 IMD frekans bileşenlerinin genlik değişimleri. (Amplitude changes of the frequency components of IMD)

100 KELVIN				300 KELVIN			600 KELVIN				
Vgs	IMD Fr.	Genlik (dB)	Kritik Fr.(GHz)	Vgs	IMD Fr.	Genlik (dB)	Kritik Fr.(GHz)	Vgs	IMD Fr.	Genlik (dB)	Kritik Fr. (GHz)
-2V	1	24.75	29.093	-2V	1	31.00	29.201	-2V	1	49.81	29.293
	2	20.98	29.093		2	27.32	29.201		2	46.33	29.293
	3	18.37	29.093		3	24.94	29.201		3	43.86	29.293
	4	14.60	29.093		4	21.47	29.201		4	40.38	29.293
	5	12.58	29.093		5	18.88	29.201		5	37.71	29.293
	6	8.81	29.093		6	15.41	29.201		6	34.22	29.293
	7	17.30	28.525		7	29.80	28.543		7	70.00	28.577
	8	14.80	28.525		8	27.40	28.543		8	67.60	28.577
	9	13.70	28.525		9	26.30	28.543		9	66.60	28.577
	10	11.00	28.525		10	23.90	28.543		10	64.00	28.577
	11	8.55	28.525		11	21.50	28.543		11	61.30	28.577
	12	7.73	28.525		12	20.40	28.543		12	60.60	28.577
	13	5.27	28.525		13	18.00	28.543		13	58.10	28.577
	14	2.54	28.525		14	15.20	28.543		14	55.60	28.577
	15	-4.20	28.525		15	8.40	28.543		15	48.50	28.577
	16	-7.00	28.525		16	6.00	28.543		16	45.80	28.577
	17	-10.0	28.525		17	2.48	28.543		17	42.20	28.577
-3V	1	24.75	29.260	-3V	1	31.00	29.239	-3V	1	49.81	29.324
	2	20.98	29.260		2	27.32	29.239		2	46.33	29.324
	3	18.37	29.260		3	24.94	29.239		3	43.86	29.324
	4	14.60	29.260		4	21.47	29.239		4	40.38	29.324
	5	12.58	29.260		5	18.88	29.239		5	37.71	29.324
	6	8.81	29.260		6	15.41	29.239		6	34.22	29.324
	7	22.60	28.698		7	34.90	28.543		7	75.30	28.671
	8	19.80	28.698		8	32.70	28.543		8	72.80	28.671
	9	18.80	28.698		9	31.10	28.543		9	71.60	28.671
	10	16.20	28.698		10	29.20	28.543		10	69.10	28.671
	11	13.70	28.698		11	26.40	28.543		11	66.60	28.671
	12	12.50	28.698		12	25.70	28.543		12	65.70	28.671
	13	10.30	28.698		13	22.80	28.543		13	63.20	28.671
	14	7.78	28.698		14	20.70	28.543		14	60.70	28.671
	15	0.57	28.698		15	13.60	28.543		15	53.80	28.671
	16	-1.40	28.698		16	10.80	28.543		16	50.90	28.671
	17	-5.20	28.698		17	7.560	28.543		17	47.40	28.671
-4V	1	24.75	29.298	-4V	1	31.00	29.181	-4V	1	49.81	29.261
	2	20.98	29.298		2	27.32	29.181		2	46.33	29.261
	3	18.37	29.298		3	24.94	29.181		3	43.86	29.261
	4	14.60	29.298		4	21.47	29.181		4	40.38	29.261
	5	12.58	29.298		5	18.88	29.181		5	37.71	29.261
	6	8.81	29.298		6	15.41	29.181		6	34.22	29.261
	7	27.20	28.637		7	39.80	28.569		7	75.00	28.612
	8	24.50	28.637		8	37.30	28.569		8	72.70	28.612
	9	23.70	28.637		9	36.20	28.569		9	71.40	28.612
	10	21.00	28.637		10	33.50	28.569		10	69.00	28.612
	11	18.60	28.637		11	31.10	28.569		11	66.70	28.612
	12	17.50	28.637		12	30.10	28.569		12	65.40	28.612
	13	14.80	28.637		13	27.30	28.569		13	63.10	28.612
	14	12.80	28.637		14	25.00	28.569		14	60.60	28.612
	15	5.81	28.637		15	17.80	28.569		15	53.30	28.612
	16	3.16	28.637		16	15.70	28.569		16	51.00	28.612
	17	-0.30	28.637		17	12.10	28.569		17	47.50	28.612

Sıcaklığı 300K ve Vgs=-2V değerini temel aldığımızda, Vgs=-3V için ikinci grup bileşenleri 3,30-5,30dB arasında, Vgs=-4V için ikinci grup bileşenleri 9,3-10,1 dB arasında genlik değişimi göstermiştir. Birinci grup bileşenlerde genlik değişimi yoktur.

600K, Vgs=-2V değerini temel aldığımızda ise, Vgs=-3V için ikinci grup bileşenlerde 10,2dB, Vgs=-4V için ikinci grup bileşenleri 5 dB lik genlik değişimi göstermiştir. Bu şartlarda Vgs gerilimiyle orantılı olarak birinci grubun genlikleri doğrusal olarak değişirken, ikinci grubun genlikleri doğrusal olmayan biçimde değişim olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bunların kendi aralarında da doğrusallık yoktur.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada sıcaklık ve  $V_{gs}$ 'ye bağlı olarak 100K, 300K ve 600K de elde edilen sonuçlar grafik ve tablo olarak verilmiştir. Bunlar dışında 200K, 400K ve 500K içinde çalışma yapılmıştır.

1. IMD frekans bileşenlerinin genlikleri  $V_{gs}$  'den etkilenmektedir. Geçit-kaynak gerilimi arttıkça bant genişliği daralmaktadır.

2. Seçilen IMD frekanslarının tamamında 28,6GHz de en düşük genliğe ulaşılmaktadır. Bu frekans civarı HEMT transistörün sıcaklığa duyarlı olduğu değerdir. Bu dar bölge özel durumlar dışında kullanılmamalıdır.

3. Birinci ve ikinci grup bileşenler arasında ayrışmalar görülmektedir. Birinci grup bileşenlerin düşük frekanslarda ve ikinci grup bileşenlerin ise 40GHz'den sonra kullanılması uygundur.

4. Birinci ve ikinci grup IMD bileşenleri arasında asimetrik ve ters değişim olduğu tespit edilmiştir. Geçit kaynak genliği arttıkça birinci grup bileşenlerin bant genişliği daralmakta ve ikinci grup bileşenlerin ise genlikleri artmaktadır. Eğer ikinci grup bileşenlerin frekans çalışma aralığı 40-80GHz arasında seçilirse bant genişliği ve genlik açısından oldukça büyük değerler elde edilebilir.

HEMT in en iyi çalışma sıcaklığı 300K'dir. Sıcaklık ve  $V_{gs}$  duyarlı değişkenler ise çıkış iletkenliği  $g_m = g_{m1} + g_{m2}v_{gs} + g_{m3}v_{gs}^2$ , çıkış direnci  $r_{ds} = r_{ds1} + r_{ds2}v_{gs} + r_{ds3}v_{gs}^2$  ve kapı-kaynak kapasite değişim  $C_{gs} = C_{gs1} + C_{gs2}v_{gs} + C_{gs3}v_{gs}^2$  olup buna bağlı olarak  $I_d$  akımı etkilenmektedir.

En iyi IMD frekans bileşeni  $(\omega_1 + \omega_2)$ ,  $(2\omega_1 + \omega_2)$  ve  $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$  olduğu tespit edilmiştir. HEMT transistörün kesim frekansı  $V_{gs}$  ve sıcaklıkla ilişkilidir. Özellikle  $V_{gs}$  değeri -10V olduğunda çıkış frekans karakteristiğinde ikinci grup bileşenlerin genlikleri artmakta ve birinci grup bileşenlerin genlikleri artarken bant genişliği daralmaktadır. Bant genişliği 100K ve  $V_{gs} = -1V$  değerinde, birinci grup bileşenlerin toplam bant genişliği -3 dB için 36,994GHz dir. Diğer bileşenlerin genlikleri yeteri kadar yükseltirse toplam bant genişliği 95,67GHz e kadar çıkmaktadır. Bant genişliği 100K ve  $V_{gs} = -4V$  değerinde, birinci grup bileşenlerin bant genişliği 21,321GHz olup diğer bileşenlerin genlikleri yeteri kadar yükseltirse toplam bant genişliği yaklaşık 60,356 GHz e çıkmaktadır.

Bant genişliği 300K ve  $V_{gs} = -1V$  değerinde, birinci grup bileşenlerin bant genişliği 30,384GHz dir. Diğer bileşenlerin genliklerinin yeteri kadar yükseltilmesiyle toplam bant genişliği 86,083GHz e kadar çıkmaktadır. Bant genişliği 300K ve  $V_{gs} = -4V$  değerinde, birinci grup bileşenlerin bant genişliği 30,384GHz dir. Diğer bileşenlerin genliklerinin yeteri kadar yükseltilmesiyle toplam bant genişliği yaklaşık 65,586GHz olarak

hesaplanmıştır. Eğer ikinci grup IMD frekans bileşenleri 60-80GHz arasında kullanılacak olursa teorik olarak toplam bant genişliği 223,86GHz olarak elde edilebilir. Sayısal haberleşme için -20dB lik kadar genlik düşümüyle bant genişliği değerleri oldukça artar.

Bant genişliği 600K ve  $V_{gs} = -1V$  değerinde ise, birinci grup bileşenlerin bant genişliği 32,405GHz'dir. Diğer bileşenlerin genliklerinin yeteri kadar yükseltilmesiyle toplam bant genişliği 91,817GHz e kadar çıkmaktadır. İkinci grup bant genişliği çalışma frekansı bölgesi olarak 60-80 GHz arasında seçilecek olursa teorik olarak 340GHz'in üzerinde toplam bant genişliği elde edilebilir. Sayısal haberleşme için genlik -20dB kadar düşürülerek alınırsa bant genişliği bu değerlerin çok üstünde görülür. 600K ve  $V_{gs} = -4V$  değerinde, birinci grup IMD frekans bileşenlerinin bant genişliği ise 28,02GHz'dir. Diğer bileşenlerin genliklerinin yeteri kadar yükseltilmesiyle toplam bant genişliği yaklaşık 41,568GHz e kadar çıkmaktadır. İkinci grup bileşenleri 40-80GHz arasında çalıştırılırsa teorik olarak 468,19GHz toplam bant genişliği elde edilebilir.

IMD bileşenleri sıcaklık değişiminden aynı derece etkilenmemektedir. En az etkilenen 1 ve 2 no. lu bileşenler ve en fazla etkilenen ise ikinci grup IMD frekans bileşenleridir. 100K ve 300K,  $V_{gs} = -1V$  için 3 no.lu IMD frekans bileşeni % 55,33 ve 4 no.lu bileşen ise %130,3 lük genlik değişimi göstermektedir. 300K ve 600K sıcaklık değişiminde ise bütün IMD bileşenlerinde asimetrik genlik artışları belirlenmiştir. Bu durum tablodaki değerlerde görülmektedir. HEMT bazı frekans bileşenlerinde sıcaklığa son derece duyarlı olarak çalışmaktadır.

Sonuç olarak en büyük bant genişliği 600K de elde edilmiştir. Ancak bu sıcaklık HEMT in çalışma ortamı için oldukça yüksektir. Bu nedenle teorik olarak en iyisidir. Makul oda sıcaklığında kullanılabilecek en iyi bant genişliği 300K ve  $V_{gs} = -4V$  için 223,86GHz olduğu belirlenmiştir. HEMT transistörün 300K ve H1 doğrusal transfer fonksiyonundan  $V_{gs} = -1V$  için elde edilen bant genişliği 5,89GHz olarak bulunmuştur. Bu değer dikkate alındığında IMD bileşenleri kullanılarak bant genişliği gruplar için sırasıyla 30,384GHz ve 86,083GHz olarak elde edilmiştir. Bu değerler doğrusal transfer fonksiyonundan elde edilen bant genişliğine göre teorik olarak %515,85 ve %6146,51 artış göstermekte ve  $V_{gs} = -4V$  için ise 223,86GHz olup %3800,67 bant genişliğini artırmaktadır.

Alt taşıyıcılı haberleşme sistemleri için birinci ve ikinci grup bileşenlerin aynı sistemde kullanılması

kesinlikle önerilmemekte olup aralarında ters genlik ilişkisi ve doğrusal olmayan genlik değişimi vardır.

HEMT in IMD bileşenlerinin analizinde en büyük genlik değeri 600K ve  $V_{gs}=-10V$  şartlarında elde edilmiştir. Ancak bu şartlar HEMT in çalışma ortamı için uygun olmamakta ve sıcaklık değeri arttıkça genlikte artmaktadır. Bu durum yarı iletken malzemeler için geçerli değildir. Diğer 200K, 400K ve 500K sıcaklıkları IMD frekanslarının değişimi ise ara değer olduğundan dolayı, uç değer yönlerinde değişim göstermektedir. Konuyla ilgili ayrıntılı çalışmalar ilgili kaynaklarda verilmiştir [33-34]. Kullanılan eşitliklerde sıcaklığa bağlı olarak değişkenlerin nasıl değiştiği, doyum gerilimi, akımı ve gürültüdeki deki değişimler kullanılan eşitliklerde yoktur. Bu nedenle sıcaklık ve gürültünün değişim etkileri bu analiz de görülmemektedir. Eşitliklere her çeşit gürültü, doyum akımı, gerilim ve sıcaklık terimlerinin ilavesiyle daha gerçekçi sonuçların elde edileceğini düşünmekteyiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Fukuta, M., "History of HEMT Transistor" **Fujitsu Quantum Devices Limited**, 2002.
2. Leong, C.J., Shen, Z. and Tay, L.C., "Small-Signal Modeling of a PHEMT up to 110 GHz Based on The Genetic Algorithm", **Microwave and Optical Technology Letters**, Vol.29, No.6, 2001.
3. Tasic, A., Serdijn, W. A. and Long, J.R., "**Adaptive Low-Power Circuits for Wireless Communications**", Springer, 2006.
4. Wurtz, L.T., "GaAs FET and HEMT Small-Signal Parameter Extraction From Measured S-Parameters", **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Vol.43, No.4, 1994.
5. Crupi, G., Schreurs, D.M.P., Caddemi, A., "On The Small Signal Modeling of Advanced Microwave FETs: A Comparative Study", **Int. Journal of RF And Micr. Comp.-Aided Eng.**, pp. 417–425, May 2008.
6. Crupi, G., Xiao, D., Schreurs, D., Limiti, E., Caddemi, A., De Raedt, W., Germain, M., "Accurate Multibias Equivalent Circuit Extraction for GaN HEMTs", **IEEE Trans Microwave Theory Tech.**, Vol.54, pp. 3616–3622, 2006.
7. Jeon, M.Y., "A Technique to Extract Extrinsic Parameters of HEMTs", **Microwave and Optical Technology Letters**, Vol.44, No.6, pp. 489–492, 2005.
8. Kameche, M., Feham, M., Meliani, M., Benahmet, N., Dali, S., "Intrinsic Small-Signal Equivalent Circuit of GaAs MESFET's", National Centre of Space Techniques, **Algeria Telecom Laboratory**, University of Tlemcen, Algeria, 2006.
9. Tayrani, R., Gerber, J.E., Daniel, T., Pengelly, R.S., Rhode, U.L., "A New And Reliable Direct Parasitic Extraction Method for MESFETs and HEMTs" **European Microwave Conf**, pp.451–453, Spain, 1993.
10. Chalermwisutkul, D.S., "**Large Signal Modeling of GaN HEMTs for UMTS Base Station Power Amplifier Design Taking into Account Memory Effects**", Phd Thesis, 2007.
11. Jarndal, A.H., "**Large-Signal Modeling of GaN Device for High Power Amplifier Design**" Phd Thesis, 2006.
12. Miras, A., Legros, E., "Very High-Frequency Small-Signal Equivalent Circuit for Short Gate Length InP HEMT's", **IEEE Trans. Micr. Theory Tech.**, Vol. 45, pp. 1018–1026, 1997.
13. Liu, Q.Z., "An Accurate and Simple Large Signal Model of HEMT", **Microwave Symposium Digest**, 1989.
14. Jarndal, A. and Kompa, G., "A new Small Modeling Approach to GaN Devices", **IEEE Trans Micr. Theory Tech.**, Vol. 54, pp. 2949–2953, 2006.
15. Kameche, M., Feham, M., "Simple Techniques for Determining The Small-Signal Equivalent Circuit of MESFET's" **Int. Journal of Infrared and Milimeter Waves**, Vol. 27, No. 5, pp. 687–705, 2006.
16. Chen, G., Kumar, V., Schwindt, R.S., Adesida, I., "A Low Gate Bias Model Extraction Technique for AlGaIn/GaN HEMTs", **IEEE Trans Micr. Theory Tech.**, Vol. 54, pp. 2949–2953, 2006.
17. Ahmed, A., Islam, S., Anwar, A.F.M., "A Temperature-Dependent Nonlinear Analysis of GaN/AlGaIn HEMTs Using Volterra Series", **IEEE Trans. On Micr. Theory and Tech.**, Vol. 49, No. 9, 2001.
18. Ahmed, A., Islam, S., Anwar, A.F.M., "Frequency and Temperature Dependent of Gain Compression in GaN/AlGaIn HEMT Amplifiers ", **Solid-State Electronics**, vol.47 pp 339-344, 2003.
19. Fager, C., "Empirical Modeling Of Microwave Devices" **Microwave Electronics Lab. Chalmers University of Technology**, 1-13, 2007.
20. Ladbroke, P.H., "**MMIC Design GaAs FET and HEMT**", Artech House, Boston 1989.
21. Yıldırım, R., Yavuzcan, H.G., and Gökrem, L., "Temperature dependent analysis of HEMT's based on gain, power and Rolletti stability", **Technology**, 12(3), 201–210, 2009.
22. Maas, S.A., "**Nonlinear Microwave and RF Circuits**", Artech House, Second Edition, pp. 26–27, 2003.
23. Wambacq, P., Sansen, W., "**Distortion Analysis of Analog Integrated Circuits**" Kluwer Academic Publishers, 2.Ed., Boston 2001.
24. Srinidhi, E. R., Ma, R., Kompa, G., "Volterra Series-Based Distortion Analysis for Optimization

- of Out-of-Band Terminations in GaN HEMT Devices” **IEEE Elect. Devices Lett.**, 29(1): 24-27, 2008.
25. Pedro, J.C., Carvalho, N.B., “**Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits**”, Artech House, Boston, 2003.
  26. Schetzen, M., “**The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems**”, Malabar, Fla., R.E. Krieger Publishing Co. reprint edition with additional material, 2006.
  27. Bussgang, J.J., and Ehrman, L., “Analysis Of Nonlinear Systems With Multiple Inputs” **Proc. IEEE**, Vol:62, pp.1088-1119, Aug.1974.
  28. Weiner, D.D., and Spina, J.E., “**Sinusoidal Analysis and Modeling of Weakly Nonlinear Circuits**”, Van Nostrand Reinhold Comp. New York, 1980.
  29. Çelebi, F.V., Yıldırım, R., “Distortion System Theory of the Two Tone Small signal input Laser Diode” **J. Fac. Arch. Gazi Univ.**, Vol 20, No 4, pp 373-377, 2005.
  30. Yıldırım, R., “Intermodulation Distortion System Theory of The Three-Tone Small Signal Input Laser Diode With Non-Linear Optoelectronic Feedback” **J. Fac. Arch. Gazi Univ.**, Vol 2, pp 417-430, 2007.
  31. Yıldırım, R., “Selection of Frequency Components for Symmetric and Asymmetric Communication Systems” **J. Fac. Arch. Gazi Univ.**, Vol 23, No 2, 329-341, 2008.
  32. Schetzen, M., Yıldırım, R., Çelebi F.V., “Intermodulation Distortion of the Single-Mode Laser Diode” **Applied Physics B-Lasers and Optics** Vol. 93 Iss. 4, pp 837-847, 2008.
  33. Gökrem, L., **Yüksek Elektron Hareketli Transistör (High Electron Mobility Transistor, HEMT) Distorsiyon Analizi**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
  34. Yıldırım, R., Yavuzcan, H.G., Çelebi, F.V., Gökrem, L., “Temperature Dependent Rolletti Stability Analysis of GaN HEMT” **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications**, Vol. 3, No. 8, p.781 – 786, August 2009.
  35. Yıldırım, R., Çelebi, F.V., Yavuzcan, H.G., Gökrem, L., “Asymmetric Condition Computed From The Four Tone Input GaN HEMT”, **Int. Conf. on Application of Information and Comm. Techn.**, AICT 2009, Azerbaijan.