



**FABRİKASYON ADIMLARI İÇİN GaN TABANLI
MİKROŞERİT HEMT'LERİN DC
KARAKTERİZASYONU**

Elif ALAGÖZ

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN**

2022

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FABRİKASYON ADIMLARI İÇİN GaN TABANLI MİKROŞERİT
HEMT'LERİN DC KARAKTERİZASYONU**

Elif ALAGÖZ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

22 / 12 / 2022

Elif ALAGÖZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FABRİKASYON ADIMLARI İÇİN GaN TABANLI MİKROŞERİT HEMT'LERİN DC KARAKTERİZASYONU

Elif ALAGÖZ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

GaN tabanlı mikroşerit yüksek elektron hareketlilikli transistörler (HEMT'ler) yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik ve yüksek bozulma gerilimi gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler sayesinde, GaN tabanlı HEMT'ler, radar ve uzay araştırma sistemlerinde ve savunma sanayi uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında, akış-kaynak (D-S) arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm boyutunda tükenme modu AlGaIn/GaN HEMT'lerin fabrikasyon adımları için doğru akım (DC) ölçümleri gerçekleştirilmiş ve üretilen HEMT'lerin performansları karşılaştırılmıştır. Bu ölçümler sayesinde fabrikasyonların başarımı takip edilebilmiş ve D-S arası mesafenin HEMT performansı üzerine etkisi gözlemlenmiştir. HEMT'lerin DC karakterizasyonu ile, iletim direnci, bükülme gerilimi, maksimum akış-kaynak akımı, eşik gerilimi, geçiş iletkenliği, bozulma gerilimi, kapı kaçak akımı ve akış kaçak akımı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in maksimum akış-kaynak akımının daha düşük, iletim direncinin daha yüksek ve kaçak akım değerlerinin daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm olan HEMT'in, kapı baş uzunluğu ve alan levhası uzunluğunun, D-S arası mesafesi 3 μm olan HEMT'ten daha fazla olması ile açıklanabilir. Sonuç olarak, D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin yüksek güç uygulamalarına ve D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin ise yüksek frekans uygulamalarında tercih edilmesi gerektiği görülmektedir. Düşük kaçak akımlara ve iletim direncine ve yüksek maksimum akış-kaynak akımı ve geçiş iletkenliğine sahip yüksek güç ve yüksek frekanslarda çalışabilen HEMT'lerin elde edilebilmesi için çalışmalara devam edilmelidir. Bunun için simülasyonlar ile uygun HEMT yapısının tayin edilmesi ve sonrasında fabrikasyonunun gerçekleştirilmesi gerekir.

2022, 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: AlGaIn/GaN HEMT, DC karakterizasyon, proses kontrol monitörü, HEMT fabrikasyonu

ABSTRACT

MS. Thesis

DC CHARACTERIZATION OF GaN-BASED MICROSTRIP HEMT FOR FABRICATION STEPS

Elif ALAGÖZ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Çağlar DUMAN

GaN based microstrip high electron mobility transistors (HEMTs) have superior properties such as high-power density, high efficiency and high breakdown voltage. Thanks to these features, GaN-based HEMTs are more preferred in radar and space research systems and defense industry applications. In this thesis, direct current (DC) measurements were performed for the fabrication steps of $2 \times 125 \mu\text{m}$ depletion mode AlGaIn/GaN HEMTs with a drain-source (D-S) distance of $3 \mu\text{m}$ and $6 \mu\text{m}$, and the performances of HEMTs were compared. Thanks to these measurements, the performance of the fabrications could be followed and the effect of the distance between D-S on HEMT performance was observed. From DC characterization of HEMTs, conduction resistance, knee voltage, maximum drain-source current, threshold voltage, transconductance and breakdown voltage have been obtained. The results showed that $2 \times 125 \mu\text{m}$ HEMT with a distance between D-S of $6 \mu\text{m}$ has higher maximum drain-source current and conduction resistance and lower leakage currents. The obtained results can be explained by the fact that the $2 \times 125 \mu\text{m}$ HEMT with a D-S distance of $6 \mu\text{m}$ has a greater gate head length and field plate length than the HEMT with a D-S distance of $3 \mu\text{m}$. As a result, it is seen that $2 \times 125 \mu\text{m}$ HEMT structures with a D-S distance of $6 \mu\text{m}$ should be preferred for high power applications, and $2 \times 125 \mu\text{m}$ HEMT structures with a D-S distance of $3 \mu\text{m}$ should be preferred in high frequency applications. New studies should be continued to obtain HEMTs structures which can operate at high power and high frequencies owing to its low leakage currents, conduction resistance, high maximum leakage current and transconductance. Thus, it is necessary to determine the appropriate HEMT structure with simulations and to come true the fabrication.

2022, 65 page

Keywords: AlGaIn/GaN HEMT, DC characterization, process control monitoring, HEMT fabrication

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmaları kapsamında bana her türlü konuda destek olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN'a, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nin tüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasındaki bana karşı vermiş olduğu sonsuz destek ve göstermiş olduğu üstün sabır için Dr. Doğan YILMAZ'a, aygıt üretimi ve karakterizasyonu konusunda bilgi birikimlerini esirgemeyen Dr. Ahmet TOPRAK'a, bütün sorularımı içtenlikle cevaplayan ve yardımlarını asla esirgemeyen Gurur SALKIM'a teşekkür borçluyum.

Süreç boyunca her türlü desteklerini ve güzel dileklerini eksik etmeyen değerli arkadaşlarım Merve AKÇAY'a, Khubaib ULLAH'a, Ferdi AYDIN'a ve Ali YAĞIZ'a teşekkür ederim.

İçten tebessümlerini esirgemeyen her türlü yardıma her an hazır olan AB Mikro Nano çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim çok değerli babam Nurettin ALAGÖZ'e, annem Hatice ALAGÖZ'e ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan kardeşlerim Betül ALAGÖZ DEMİR'e, Fatma ALAN'a ve Muhammed İkbal ALAGÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Elif ALAGÖZ
Aralık 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	11
3.1. Yarıiletkenler, İletkenler ve Yalıtkanlar.....	11
3.2. Galyum Nitrat	12
3.3. Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistörler (HEMT)	15
3.4. GaN Temelli HEMT Yapılarda Kutuplanma	16
3.4.1. Kendiliğinden kutuplanma	17
3.4.2. Piezoelektrik kutuplanma	17
3.5. GaN Temelli Çoklu Yapılarda 2DEG Oluşumu	18
3.6. HEMT Epitaksiyel Yapısı	19
3.7. GaN tabanlı HEMT'lerin Üretimi	22
3.8. GaN tabanlı HEMT'lerin DC Karakterizasyonu.....	23
3.9. Direnç Ölçümü.....	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	27
4.1. RTP Adımı Sonrası TLM Deseni Üzerinde Yapılan Ölçümler	31
4.2. Kapı Metalizasyon Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları	33
4.3. Birinci Metalizasyon Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları	38
4.4. İkinci Metalizasyon Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları	44
4.5. Arka Yüz Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları	50
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

$\text{\AA}$	Angstrom
d	Epitaksiyel katman kalınlığı
d_{AlGaN}	AlGaN katman kalınlığı
ϵ_r	Dielektrik katsayısı
E_{br}	Elektrik kırılma alanı
E_c	İletkenlik bandı enerjisi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_G	Yasak enerji aralığı
g_m	Geçiş iletkenliği
I_{ds}	Akaç-kaynak akımı
I_{DSS}	Maksimum Akaç-kaynak akımı
L_g	Kapı uzunluğu
μ	Hareketlilik
n_s	Tabaka taşıyıcı yoğunluğu
P_{SP}	Doğal kutuplanma
P_{PZ}	Piezoelektrik kutuplanma
V_{br}	Aygıt bozulma gerilimi
V_{ds}	Akaç-kaynak gerilimi
V_{gs}	Kapı-kaynak gerilimi
V_{knee}	Bükülme gerilimi
V_{th}	Eşik Gerilimi

Kısaltmalar

AlGaN	Alüminyum Galyum Nitrür
AlN	Alüminyum Nitrür
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
EBL	Elektron Demeti Litografisi
FET	Alan Etkili Transistör

GaN	Galyum Nitrür
HEMT	Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistör
ICP-RIE	İndüklenmiş elektron çiftli plazma reaktif iyon aşındırma
I-V	Akım-Gerilim
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
RTP	Hızlı Isıl İşlem
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiN _x	Silikon Nitrat
TLM	İletim Hattı Modeli
2DEG	2-Boyutlu Elektron Gazı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İlk nokta temaslı transistör.....	1
Şekil 2.1. Bir MMC AlGaIn/GaN HEMT'in üstten görünümü	7
Şekil 3.1. Maddelerin iletkenlik derecesine göre değişen elektronik bant yapıları.....	12
Şekil 3.2. GaN'ın tercih edilme nedenleri.....	14
Şekil 3.3. Doğru akım çıkış karakteristiği.....	16
Şekil 3.4. Kendiliğinden kutuplanma durumu.....	17
Şekil 3.5. Piezoelektrik kutuplanma durumu	17
Şekil 3.6. AlGaIn/GaN katmanlarındaki 2DEG (a) ve 2DEG iletkenlik bandı (b) gösterimi	19
Şekil 3.7. İki kontak arası okunan direnç değeri	25
Şekil 3.8. 4 prob TLM ölçüm şematığı	26
Şekil 4.1. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan kontrol HEMT'leri.	28
Şekil 4.2. PCM noktalarının konumu	30
Şekil 4.3. Ölçüm düzeneği	30
Şekil 4.4. Problanmış kontrol transistörü.....	31
Şekil 4.5. TLM deseni.....	32
Şekil 4.6. R_c sonuçlarının yonga üzerinde dağılımı.....	32
Şekil 4.7. (a) Kapı kontaktlarının şematik gösterimi ve (b) bir aygıtın açılı SEM fotoğrafı	33
Şekil 4.8. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{ds} değişimi.....	34
Şekil 4.9. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{gs} değişimi.....	35
Şekil 4.10. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in ileri I-V ölçümü	36
Şekil 4.11. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in bozulma gerilimi ölçümü	37
Şekil 4.12. (a) Birinci metalizasyon sonrası kontaktlarının şematik gösterimi (b) aygıtın optik fotoğrafı	39
Şekil 4.13. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{ds} değişimi.....	40

Şekil 4.14. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{gs} değişimi.....	41
Şekil 4.15. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in ileri I-V ölçümü	42
Şekil 4.16. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in bozulma gerilimi ölçümü	43
Şekil 4.17. (a) Ön yüz sonu HEMT'in şematik gösterimi (b) aygıtın fotoğrafı	45
Şekil 4.18. Ön yüz sonu kontrol HEMT	45
Şekil 4.19. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{ds} değişimi.....	46
Şekil 4.20. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{gs} değişimi.....	47
Şekil 4.21. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in ileri I-V ölçümü	48
Şekil 4.22. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in bozulma gerilimi ölçümü	49
Şekil 4.23. Tüm üretim sonu elde edilen mikroşerit HEMT	51
Şekil 4.24. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{ds} değişimi.....	52
Şekil 4.25. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in I_d - V_{gs} değişimi.....	53
Şekil 4.26. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in ileri I-V ölçümü	54
Şekil 4.27. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için 2x125 μm HEMT'in bozulma gerilimi ölçümü	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Si, GaAs ve GaN'ın bazı özelliklerinin karşılaştırması.....	13
Çizelge 3.2. AlGaIn/GaN HEMT kristal yapı katmanları	20
Çizelge 3.3. AlGaIn'ın bazı özellikleri.....	21
Çizelge 3.4. AlGaIn malzemelere ait avantajlar ve dezavantajlar	22
Çizelge 4.1. AlGaIn/GaN HEMT epitaksiyel yapısı ve kalınlıkları	27
Çizelge 4.2. RTP sonrası TLM deseni üzerinde yapılan ölçüme ait sonuçlar.....	32
Çizelge 4.3. Kapı metalizasyon adımı sonrası D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için DC ölçüm sonuçları	38
Çizelge 4.4. Birinci metalizasyon adımı sonrası D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için DC ölçüm sonuçları.....	44
Çizelge 4.5. İkinci metalizasyon adımı sonrası D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için DC ölçüm sonuçları.....	50
Çizelge 4.6. Arka yüz sonrası D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) için DC ölçüm sonuçları.....	56

1. GİRİŞ

Transistörler, en temel yarıiletken elektronik devre elemanlarından biridir. Anahtarlama ve kazanç sağlama yetenekleri sayesinde teknolojinin gelişiminde önemli bir rol oynadıklarından ve 20. yüzyılın en değerli buluşlarından biri olarak görülürler. 1947 yılındaki ilk transistörün icadından günümüz teknolojisine kadar çok büyük gelişmeler yaşanmıştır (Mimura 2002).

Şekil 1.1’de gösterilen ilk nokta temaslı Germanyum (Ge) transistör, 1947 yılında W. H. Brottain ve Y. Borden tarafından yapılmıştır. Bu transistör yapısında tek PN eklemi bulunmaktadır. Günümüzde nano boyutlarda transistörlerin üretilbildiği teknolojiler kullanılmaktadır (Lojek 2007). Transistör teknolojilerindeki gelişmeler devam ederken, kullanılan malzemeler de bu gelişime ayak uydurabilmek için değişmektedir.



Şekil 1.1. İlk nokta temaslı transistör

Ge ile yapılan transistör oda sıcaklığında istekleri karşılayan bir performans göstermesine rağmen ısıdan çok fazla etkilenmektedir. Transistörün temel davranışı olan sabit akım çıkışı bu transistörlerde sağlanamamıştır. Sıcaklık arttıkça Ge malzemesindeki serbest elektronlar arttığı için akım artışı gözlenir. Elektrotların arasındaki kapasitelerin büyük olması ise salınımlara sebep olmaktadır (Arns 1998). Daha sonraki yıllarda silisyum yapılı transistör üretimine başlanmıştır. Silisyum transistörler, germanyum transistörlerin birçok dezavantajını ortadan kaldırmıştır.

Günümüzde birçok elektronik cihazda silisyum tabanlı elektronik devreler kullanılmaktadır. Konu transistörün güç uygulamalarına gelindiğinde ise sırasıyla Ge, Si, Silisyum Germanyum (SiGe) ve Galyum Arsenid (GaAs) gibi yarıiletken malzeme tabanlı transistörler kullanılmıştır. Fujitsu laboratuvarlarında 1979 yılında Takashi Mimura'nın bulduğu ilk GaAs tabanlı yüksek elektron hareketlilikli transistör (High Electron Mobility Transistor, HEMT) teknolojisi, katkılama olmayan yeni bir transistör teknolojisini trendini başlatmıştır (Mimura 2002). GaAs tabanlı HEMT'ler kısa bir zamanda Si ve Ge transistörlere göre üstün özellikleriyle ön plana çıkmış fakat yüksek güç, yüksek frekans gerektiren uygulamalarda zamanla yetersiz kalmaları nedeniyle yeni malzemelerin kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Geniş bant aralıklı malzemelerden biri olan Galyum Nitrat (GaN), üstün özelliklere sahip olduğu için HEMT teknolojisinde GaN ön plana çıkmıştır (Khan et al. 1994).

GaN tabanlı alan etkili transistör 1991 yılında üretilmiştir. Geniş bant aralıklı yarıiletken olan GaN malzemesinin kullanılmasıyla yüksek akım ve yüksek gerilimlerde çalışabilen transistörler üretilmiştir. GaN malzemesi yüksek kazanç, güç ve verim kombinasyonuna sahip radyo frekanslı uygulamaları için en uygun malzeme olmuştur (Bozdemir 2019). GaN tabanlı HEMT'ler özellikle radar ve uydu iletişimde yaygın olarak kullanılmaktadır (Toprak 2014). 1994 yılında ilk kez AlGaN/GaN yapılarında 2-boyutlu elektron gazı (Two Dimensional Electron Gas, 2DEG) oluşumu gösterilmiştir (Khan et al. 1992). GaN tabanlı HEMT, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik, yüksek doygunluk taşıyıcı hızı, yüksek bozulma gerilimi ve yüksek ısıl iletkenlik gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler sayesinde, GaN tabanlı HEMT'ler, uzay alanında yapılan çalışmalarda, karbon salınımsız cihazlarda, temiz enerji uygulamaları ve savunma sanayi uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir (Mishra et al. 2002).

Bu tezde, Silisyum Karbür (SiC) alttaş üzerine üretilen AlGaN/GaN Mikroşerit (MS) tipi HEMT'ler ele alınmıştır. Mikroşerit yapısında toprak bağlantısı için spesifik boyutlara sahip arka yüz delikleri ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, fabrikasyon adımları için GaN tabanlı mikroşerit HEMT'lerin doğru akım (Direct Current, DC) karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve HEMT'lerin akaç-kaynak (Drain-Source, D-S) mesafesinin transistör performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. DC karakterizasyonlar sayesinde transistörlerin üretim basamaklarında elektriksel isterlerin karşılanıp karşılanmadığı ve

elektriksel parametrelerin yonga üzerindeki dağılımları kontrol edilebilmektedir. Ayrıca üretimde meydana gelebilecek sorunlar erkenden belirlenerek gereksiz zaman ve maddi kaybın önüne geçilebilir.

D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan iki farklı HEMT yapısının fabrikasyonları sırasında DC ölçümleri gerçekleştirilmiş ve D-S arası mesafenin DC karakteristik üzerine etkisi incelenmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan aygıt yapısında, D-S arası mesafesi 3 μm olan aygıt yapısına nazaran elektrik alanda iyileştirmeler ve kontaklar arasındaki direnç artışı gerçekleşir. Direnç artışı kaçak akımlarını iyileştirir ancak aynı zamanda transistörlerin iletim direncinin artmasına ve buna bağlı olarak da maksimum akım yoğunluğunun ve geçiş iletkenliği değerlerinin düşmesine yol açar. DC ölçümlerde D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT için, ortalama akaç akım kaçağı 3363 $\mu\text{A/mm}$ ve kapı akım kaçağı ortalama 3052 $\mu\text{A/mm}$ olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in, akaç kaçak akımı ortalama 487 $\mu\text{A/mm}$ ve kapı akım kaçağı ortalama 541 $\mu\text{A/mm}$ olarak elde edilmiştir.

Tez beş ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, transistörün tarihçesi, GaN malzemesinin avantajları ve güncel uygulamalarına yer verilmiştir. Kaynak Özetleri bölümde, literatürde HEMT'lerin fabrikasyonunda gerçekleştirilen DC karakterizasyon ve fabrikasyonu hakkında yapılmış akademik çalışmalardan öne çıkanlar sunulmuştur. Materyal ve Yöntem bölümünde, yarıiletkenler, GaN malzemesi, HEMT'in yapısal ve karakteristik özellikleri ve son olarak da gerçekleştirilen DC ölçümler hakkında bilgiler yer almaktadır. Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümde, ölçüm sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Sonuç ve Öneriler bölümünde ise üretilen aygıtların performansları elde edilen sonuçlar ışığında incelenmiş ve gelecekte konu ile ilgili olarak yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, literatürde AlGaIn/GaN tabanlı HEMT'lerin fabrikasyonunda gerçekleştirilen DC karakterizasyon ve fabrikasyon süreçleri hakkında yapılmış olan önemli akademik çalışmalara yer verilmiştir.

Khan et al. (1991) tarafından yapılan çalışma ile ilk defa AlGaIn/GaN yapılarında 2DEG oluşumu gösterilmiştir. 1993 yılında ilk GaN Metal yarıiletken alan etkili transistör (metal semi-conductor field effect transistor-MESFET) yine M. Khan et al. (1993) tarafından üretilmiştir. 1994 yılında da ilk GaN temelli HEMT yapılarının üretilmesiyle de geniş bant aralıklı yarıiletken malzeme grubu içerisinde oldukça üstün özelliklere sahip GaN yarıiletkenin ön plana çıkmasını ve HEMT teknolojisinde GaN devrinin başlamasını sağlamıştır.

Mizutani et al. (2003) tarafından yapılan çalışmada AlGaIn/GaN HEMT'lerde akaç akımı çökmesi (current collapse), ön gerilimleme stresi uygulanarak incelenmiştir. Akaç akımının çöküşü, yüzey durumlarından kaynaklanmaktadır. Negatif kapı gerilimi uygulanarak ciddi bir akım çökmesi gözlemlenmiştir. Çöküş, bant aralığından daha küçük bir enerjiye sahip ışık aydınlatmasıyla bastırılmıştır. Akaç akımını geri kazanmak için aydınlatma miktarı kapı-akaç bölgesinde, kapı-kaynak bölgesinde uygulanan aydınlatma miktarından daha büyük tutulmuştur. Yüzey potansiyelinin etkisini incelemek için ön gerilimleme stresinden sonra seri kaynak ve akaç dirençleri ölçülmüştür. Kaynak direncinde çok az değişiklik gözlemlenmesine rağmen, ön gerilimleme stresinden sonra akaç direncinde büyük bir artış gözlenmiştir. Transistör yüzeyi Silisyum Nitrür (Si_3N_4) ince film ile pasive edilerek mevcut çökme ortadan kaldırılmıştır. Bu sonuçlar, çöküşün, kapıdan enjekte edilen elektronları yakalayan ve dikey yük nötrlüğü nedeniyle 2DEG yoğunluğunda bir azalmaya neden olan kapı ve akaç elektrotları arasındaki yüzey durumlarından kaynaklandığını göstermektedir.

Xu et al. (2007) tarafından yapılan çalışmada, AlGaIn/GaN hetero yapısının mesa kenarındaki Schottky kontağının kaçak akımını değerlendirmek için mesa duvar yapısı adı verilen bir test yapısı kullanmıştır. Bu test ile mesa duvar kaçak akımları, 300 °K ile 500 °K arasındaki farklı sıcaklıklarda ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Mesa kenarındaki

iletim-bant-kenar enerji dağılımı simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları kullanılarak, elektrik alan şiddeti, ters ön gerilimin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, 300 °K ve 500 °K arasındaki sıcaklıklarda mesa-kenar tarafında kaçak akımların hâkim olduğunu göstermiştir.

Coelho et al. (2008) tarafından yapılan çalışmada, N tipi Antimon (Sb) katkılı Germanyum (Ge) üzerine rezistif buharlaştırma, elektron demeti ile buharlaştırma (e-beam) ve saçtırma (sputter) yöntemleri kullanılarak Schottky metal kontaklar oluşturulmuştur. Farklı yöntemlerle oluşturulan metal kontakların üzerinden alınan akım-gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri ile kontakların diyot performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar nedeniyle Ge kristalinde hasarların olduğu sonucuna varılmıştır. Saçtırma yöntemi yapıya daha fazla zarar verdiği için saçtırma yöntemiyle oluşturulan diyotların performansının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Elektron demeti ile buharlaştırma ve saçtırma yöntemleri ile altın (Au) kaplanmış diyotun 200 °K'nin altında ileri ön gerilimleme durumunda alınan I-V ölçümleri farklı sonuçlar göstermiştir. Bu durum iki yöntemin örneğe verdiği zararın farkını göstermiştir. Yüksek enerjili sistemlerde yapılan kaplamada ortamdaki parçacıklar bir araya gelerek bir form oluşturarak, Ge arasındaki boşluklara difüze olmuştur ve Sb ile birleşerek yeni bir kompleks yapı oluşturmuştur. Bu sonuçlar, termal rezistif buharlaştırma ile yapılan Schottky bariyer diyotunun diğer metotlara kıyasla, düşük kaçak akımlara sahip olduğunu, idealite faktörünün daha yüksek olduğunu ve daha yüksek kalitede bir diyot karakteristiğini ortaya çıkardığını göstermiştir. Elektron demeti ile buharlaştırma yapılan diyotlarda da diyot karakteristiklerinde iyileşme görülmüştür. Fakat saçtırma ile yapılan Au Schottky diyot, elektron demeti ile buharlaştırmaya göre daha zayıf bir diyot karakteristiği göstermiştir. Bu durum Ge kristalinin süreç sırasında daha fazla zarar gördüğünü göstermiştir.

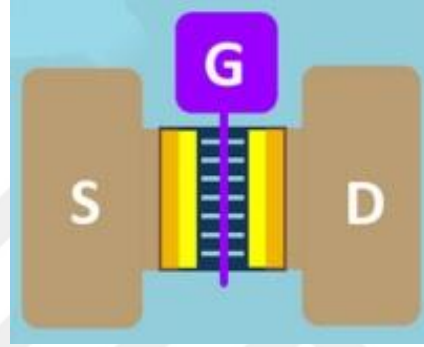
Xiaoling et al. (2009) tarafından yapılan çalışmada, metal/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN (metal/semiconductor/semiconductor-M/S/S) diyot yapısının I-V ve C-V ölçümleri üzerinden yüksek sıcaklıktaki karakteristiği incelenmiştir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN diyot yapısındaki piezoelektrik kutuplanma ve kuantum kuyusundan dolayı, ortam sıcaklığı arttıkça bariyer yüksekliği artmış, ideallik faktörü birim değerine yaklaşmıştır. Fakat bu durum $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ diyotlar için tam tersidir. Ayrıca ters ön gerilimleme kaçak akım ve

ters ön gerilimleme bozulma gerilim değerlerinin $Al_xGa_{1-x}N$ diyotlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda metal elektronları yasak bir bölgede ısısal olarak aktif durumdadır ve yarıiletkenine doğru geçerler. HEMT'lerde yüksek sıcaklıkta kapı kaçağı problemi vardır ve bu sebeple transistörün güç tüketim kapasitesi ve kapı kontrolünü engelleyen durumlar oluşmaktadır. I-V ve C-V ölçümlerinden ters/ileri ön gerilimleme için gerilim düşüşü, bariyer yüksekliği ve doyum akımı tayin edilmiştir.

Lagger et al. (2012) tarafından yapılan çalışmada, eşik geriliminin (V_{th}) geniş bir yakalama ve emisyon zaman sabiti dağılımına sahip tuzaklardan kaynaklandığı bulunmuştur. Bu dağılım, bütünleyici metal oksit yarıiletkenlerde (Complementary Metal Oxide Semiconductor-CMOS) ön gerilimleme ile sıcaklık kararsızlığı (Bias Temperature Instability-BTI) çalışması sayesinde, yakalama emisyon süresi (Capture Emission Time-CET) haritaları kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışma ile CET haritaları kullanan karakterizasyon yaklaşımının kapı yalıtımlı GaN HEMT'lerin eşik gerilimi kararsızlığının araştırılması için uygunluğu gösterilmiştir ve HEMT'lerin geliştirilmeleri için yararlı bir araç olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca çalışmada, zaman sabitlerinin geniş dağılımını açıklayabilecek fiziksel modelleri tartışılmakta ve GaN'nın eşik gerilimi kararsızlıklarından sorumlu dielektrik ara yüzünde yakalama ve ayırma fenomenlerinin ayrıntılı bir fiziksel analizi gerçekleştirilmektedir. Transistörler, kapı uzunluğu (L_g) 2 μm ve kapı genişliği 200 μm olacak şekilde 4 inç GaN-SiC alttaşlar üzerinde üretilmiştir. HEMT yapısının bariyer katmanı, 3 nm'lik bir GaN başlığı ve 25 nm'lik bir $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ katmanından oluşturulmuştur. Bu durumda, içsel 2DEG, kapı kontağı için bir karşı elektrot görevi görür ve bariyer üzerinde neredeyse homojen bir elektrik alanı dağılımı elde edilir. Akaç akımı bozulması, transfer karakteristiğinin eğilimini takip eden eşik gerilimi değişimi (ΔV_{th}) ile doğrudan ilişkilidir. Çalışma, kapı ön gerilimlemenin, erişilebilir tuzakların toplam sayısını belirlediğini göstermiştir. Elli yılı aşkın bir süredir eşik gerilimi geçişlerinin araştırılması ve bunun ön gerilimleme ve sıcaklık bağımlılığının analizi, silisyum MOS'lardaki BTI fenomeninden bilindiği gibi benzer eğilimlere sahip geniş bir tuzak zaman sabitleri dağılımını ortaya koymuştur.

Ohi et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada yalnızca kapı elektrotunun hemen altında üretilen çoklu mesa kanallı (Multi-Mesa-Channel-MMC) AlGaIn/GaN HEMT'ler geliştirilmiş ve karakterize edilmiştir. Şekil 2.1'de MMC AlGaIn/GaN HEMT'lerin üstten

görünümü verilmektedir. MMC yapısında alan etkisi ile, standart düzlemsel HEMT'ten daha küçük bir eşik gerilimi elde edilmiştir. MMC HEMT, düşük bir bükülme gerilimi göstermiştir. MMC HEMT, periyodik bir hendek yapısı oluşturarak, kapı elektrotu ile çevrili 2DEG ile paralel mesa şekilli kanallara sahiptir. Eşik geriliminin daha pozitif yöne kayması sonucunda yanal alan etkisi ile iyi bir kapı kontrolü sağlanmaktadır. Mesa kanalının üst genişliği azaltılarak eşik gerilim kayması arttırılabilmektedir. Ayrıca, MMC yapısının daha düşük stres kaynaklı akım çökmesi gösterdiği bulunmuştur.



Şekil 2.1. Bir MMC AlGaIn/GaN HEMT'in üstten görünümü

Lee et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada, P-GaN/AlGaIn/GaN HEMT yapılarında farklı kapı metallerinin kaplanmasıyla oluşan transistörlerin performansına bakılmıştır. P-GaN/AlGaIn/GaN transistörlerde farklı kapı metallerinin akaç akımı, eşik gerilimi ve bozulma gerilimine katkıları incelenmiştir. Nikel/Altın (Ni/Au), Titanyum/Altın (Ti/Au) ve Molibden/Titanyum/Altın (Mo/Ti/Au) metallerinden oluşan üç çeşit kapı tipi incelenmiştir. Ni/Au ve Mo/Ti/Au yapılarından 1600 V'dan daha yüksek bozulma gerilimi elde edilmiştir. Mo/Ti/Au kapı yapısının Ni/Au kapı yapısına kıyasla %32 bozulma geriliminde iyileşme oluştururken, çalışma akımında %11'lik bir azalma oluşturmuştur. Bu çalışmada denenen farklı kapı metali arasında HEMT'ler için en uygun metalizasyonun Ni/Au olduğu görülmüştür. Üç kapı arasında en düşük eşik gerilim değerine sahip olan Ti/Au kapı kontaklıdır ve en düşük bariyer yüksekliğine sahip olan Ti/Au kapı yapısı en az akım kaçağına da sahip olan kontak yapısıdır. Bu durum Schottky bariyer ile akım kaçaqları arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Kapı metalinin türüne bağlı olmaksızın bozulma geriliminin, kapı-akaç uzunluğuna bağlı olarak arttığı görülmüştür.

2014 yılında Hacettepe Üniversitesinde yapılan bir tez çalışmasında kapı uzunluğunun GaN HEMT aygıtlarının güç performansına etkisi incelenmiştir. 12x12 mm² boyutundaki 4 farklı epitaksiyel yapılar için kapı uzunluğu 300 nm, 600 nm, 800 nm ve 1000 nm olarak değiştirilmiştir ve üretilen HEMT'lerin DC ve RF (Radyo Frekans) karakterizasyon sonuçları sunulmuştur. Kapı uzunluğu arttıkça güç performansının da arttığı görülmüştür (Toprak 2014).

Lee et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada, kapı uzunluğu 300 nm ve kapı genişliği 100 nm olan AlGaIn/GaN HEMT'lerin yüksek ısı işlem sonrası DC ve RF ölçümlerden elde edilen sonuçları araştırılmaktadır. 400°C'de 20 dakikalık tavlama sonrasında, safir (Al₂O₃) alttaşı üzerindeki transistörlerin bozulma gerilimleri, 7,5 V'tan 187 V'a dikkat çekici bir şekilde artmıştır. Eşik gerilimi ise 3,3 V'tan 2,7 V'a kaymıştır. Bu durum tavlama sırasında GaN tamponundaki tuzakların kaldırılmasına atfedilmektedir. Bu sonuçlar ile bozulma geriliminde çok fazla artış olduğu görülmüş, kazanç ve çıkış gücünde iyileşme sağlanmış ve GaN tabanlı HEMT'ler için eşik geriliminin ayarlanmasının mümkün olduğu görülmüştür.

Saito et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada, yüksek gerilimli GaN tabanlı HEMT'in bozulma mekanizması, deneysel I-V karakteristikleri ve iki boyutlu aygıt simülasyon sonuçları kullanılarak araştırılmıştır. Yüksek güvenilirlik sağlamak için aygıt tasarımıyla ilgili kilit noktalar tartışılmıştır. Özellikle kaynak akımının artışına odaklanılmıştır. Çalışmada iki boyutlu aygıt simülatör programı olan Sentaurus Device of Synopsys kullanılmıştır. Kapalı durumdaki üç tip kaçak akım yolu ele alınmıştır. Kapı potansiyel bariyeri üzerinden akan kaynak elektron akımı, boşluk birikmesi ile artmıştır. Kapı altındaki boşluk birikimi ile kaynak akımının artması, sonunda bozulmaya neden olmuştur. Bu nedenle, yüksek bozulma gerilimi için boşluk birikimi bastırılmalıdır. Kaynak-kanal bölgesinde P-tipi katman, kaynak ve kanal arasındaki elektron akışını açık durumda bloke etmiştir. Sonuç olarak, P-tipi katman kullanmak yüksek bozulma geriliminde kaynak akımının artmasını engellemiştir.

Arenas et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada AlGaIn/GaN HEMT'lerin kendi kendine ısınma etkilerinin elektron hareketliliğini önemli ölçüde azaltabileceğini ve güvenilirlik endişeleri oluşturabileceğini göstermektedir. Bu durumu ele almak için

elektro termal karakterizasyon yönetimi kullanılmıştır. Bu yöntem, GaN HEMT'lerin kanal sıcaklığının (T_{ch}) çoklu ön gerilimleme koşullarında iyi bir doğrulukla ölçümüne dayanır. Ölçümler, AlGaIn/GaN HEMT'lerde entegre mikro direnç termometre dedektörü (μ RTD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Entegre μ RTD'ler ile elde edilen termal dirençler, benzer çalışma koşulları için karşılaştırılmıştır. Ölçülen verilerin tutarlı olduğu ve teori ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel yöntem basit olsa da transistörlerin elektro termal tepkisini tek bir akaç akımı-akaç gerilimi-kanal sıcaklığı ($I_{ds}-V_{ds}-T_{ch}$) taraması ile haritalamak güç olmuştur.

2018 yılında Gazi Üniversitesinde yapılan bir tez çalışmasında AlGaIn/GaN HEMT'ler için T profilindeki kapıların aygıt performansına etkisi incelenmiştir. Geleneksel kapı profili yerine T profilde kapı tercih edildiğinde bozulma gerilimlerinin arttığı görülmüştür (Köroğlu 2018). Yine aynı yıl içerisinde SiN pasivasyonu öncesi ön işlemlerin GaN HEMT'lerin performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları DC ölçümler ile değerlendirilmiştir. Karakterizasyon hem ön işlem öncesinde hem de sonrasında yapılmıştır. DC ölçümler sonucunda nitrojen plazma ön işlemleri kapı ve akaç kaçaklarının azalmasını sağlandığı görülmüştür (Asan 2018).

Türkiye'de ilk kez 2019 yılında mikroşeritli AlGaIn/GaN HEMT üretimi gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada GaN tabanlı transistörlerde ara yüzey geçiş deliği aşındırma süreçlerinin incelemesi yapılmıştır. Geçiş deliklerinin dirençleri ölçümlerinin, yonga boyunca homojen dağılıma sahip olduğu ve literatür ile yakın sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir (Haliloğlu 2019).

Visvkarma et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada Au ve Ni/Au kapılı HEMT'lerin elektriksel olarak karşılaştırması yapılmıştır. Au ve Ni/Au için hesaplanan Schottky bariyer yüksekliği sırasıyla 1,29 eV ve 0,74 eV olarak ifade edilmiştir. Au ve Ni/Au kapılı HEMT, AlGaIn/GaN tabanlı HEMT epitaksiyel tabakası üzerinde üretilmiştir. Alınan elektriksel ölçüm sonuçlarında, Au'nun Schottky bariyer yüksekliği daha yüksek olduğu için ters sızıntı akımı açısından daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.

Mukherjee et al. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada, transistörlerdeki bozulmayı göstermek için HEMT'ler üzerinde termal ve elektriksel stres oluşturmuştur. Oluşan sızıntı yolları, uygulanan gerilmeler nedeniyle ortaya çıkan kusurlardan kaynaklanmaktadır ve bu yollar yüksek sızıntı akımları oluşturmaktadır. Çalışmada AlGaN/GaN HEMT'lerdeki stres nedeniyle sızıntı akımındaki artış açıklamaktadır. Ayrıca, transistörde görsel olarak herhangi bir yapısal hasar meydana gelmediği gözlemlenmiştir.

GaN HEMT üretimi ve karakterizasyonu konusunda yakın zamanda yapılan bir çalışma, 2022 yılında yapılan yüksek güç elektriği uygulamalarında GaN tabanlı FinFET yapılarının optimizasyon çalışmasıdır. Bu çalışmada HEMT üretim süreçleri hem proses kontrol monitöründeki kontrol HEMT'lerde hem de büyük aygıtlar üzerinden tamamlanmıştır. Aygıt üretimi ve elektriksel performansı incelenmiş ve aygıtların DC ölçümleri ve ölçüm metotları detaylı biçimde anlatılmıştır. Mevcut tükenme modunda çalışan transistörlere nanokanal yapılar oluşturarak aygıtın geliştirme modunda çalışmasını sağlanmıştır. Ayrıca kapı kontrollünü arttırılarak, düşük kaçak akım elde edilmiştir. Geleneksel HEMT'lere göre daha doğrusal DC geçiş iletkenliği sağlanmıştır (Yılmaz 2022).

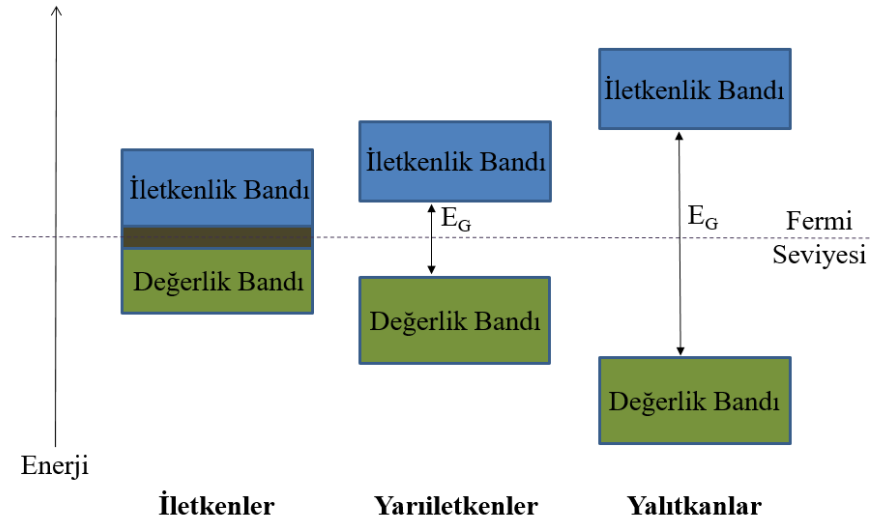
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Yarıiletkenler, İletkenler ve Yalıtkanlar

Yarıiletkenler hakkında günümüze kadar yapılan çalışmalar büyük gelişmeler yaşanmasına neden olmuştur. Fotodedektörler, diyotlar, fotovoltaiik piller ve transistörler yarıiletkenler kullanılarak üretilen elektronik cihazlardan bazılarıdır (Kundakçı 2007).

Elektriksel iletkenlikleri bakımından yarıiletkenler, iletken ile yalıtkan malzemelerin arasında yer alır (Wilson et al. 2000). Yarıiletken malzemelerin iletkenlikleri, iletkenlerden yaklaşık olarak 10^{-10} kat az, yalıtkanlardan yaklaşık olarak 10^{14} kat fazladır (Peter et al. 2010). Yarıiletken malzemeler mutlak sıcaklıkta yalıtkan olup, ısı, ışık, manyetik etki, elektriksel gerilim vb. uyarılma durumlarında ise değerlik elektronlarını serbest bırakarak iletken olurlar. Dışarıdan uygulanan uyarıma ortadan kaldırıldığında ise tekrar yalıtkan duruma geçerler. Son yörüngedeki elektron sayısı 4'den büyük maddeler yalıtkan madde, 4'den küçük olan maddeler ise iletken maddelerdir. Soygazların, valans yörüngeleri tümüyle doludur. Bu tip yörüngeler doymuş yörünge sınıfındadır ve soygazların elektron alıp verme istekleri yoktur. Yalıtkan maddeler, elektrik devrelerinde genellikle iletkenlerin yalıtımında kullanılırlar (Neamen 2003).

Elektriksel özellikler maddenin elektronik bant yapısı ile yakından ilgilidir. Değerlik (valans) elektronları belirli bir enerji seviyesinde bulunurlar. İletkenlerin değerlik bantı enerji seviyesi ile iletkenlik bantı enerji seviyesi bitişiktir. Bu nedenle, verilen küçük bir enerji ile pek çok değerlik elektronu serbest hale geçebilir. Yarıiletkenlerin değerlik bantı enerji seviyesi ile iletkenlik bantı enerji seviyesi bitişik değildir. Aradaki bölge yasak bant aralığı olarak adlandırılır. Değerlik elektronların, iletkenlik bandına çıkabilmesi için yasak bant aralığı enerjisi (E_G) kadar bir ek enerjiye ihtiyaçları vardır. Yalıtkanlarda oldukça büyük bir yasak bant aralığı bulunur. Bu yüzden değerlik elektronlarını iletkenlik bandına çıkarmak için verilmesi gereken enerji yüksektir (Asan 2018). Şekil 3.1'de maddelerin iletkenlik derecesine göre değişen elektronik bant yapıları gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Maddelerin iletkenlik derecesine göre değişen elektronik bant yapıları

Elektronik devre elemanlarının üretiminde sıklıkla katkılanmış yarıiletkenlere ihtiyaç duyulur. Katkılama tipine bağlı olarak yarıiletkenler, N-tipi ve P-tipi yarıiletken olarak adlandırılırlar. İletkenlik elektron ya da boşluk katkısının arttırılması ile artar, azalması ile azalır (Xiao 2001). N tipi katkılanmış yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar elektronlarken, P tipi katkılanmış yarıiletkende ise çoğunluk taşıyıcılar boşluklardır.

3.2. Galyum Nitrat

Si, GaAs ve GaN yarıiletkenleri çok farklı ve eşsiz özelliklere sahiptirler. Güç elektroniğinde kullanılan transistörlerin çoğu, düşük maliyetle üretilebilen ve neredeyse hatasız üretilebilen bir yarıiletken olan silisyum teknolojisine dayanmaktadır. Oysa silisyumun teorik performansı, sınırlı gerilim engelleme ve sınırlı ısı transfer yetenekleri ve ihmal edilemez iletim kayıplarından dolayı artık sınırlarına ulaşmıştır. Silisyum malzemesinin sahip olduğu sınırlı elektron hareketliliği, düşük bant aralığı, düşük çalışma sıcaklığı gibi kısıtlamaları onu, yüksek çalışma gerilimi, yüksek çalışma frekansı ve yüksek çıkış gücü gibi isterler gerektiren modern güç elektroniği uygulamalarında yetersiz bırakmıştır.

III-V grubu bileşik yarıiletkenlerden olan GaN, çok sert ve mekanik olarak kararlı olan bir yarıiletkendir. Yüksek bozulma gerilimine ve geniş bant aralığına sahiptir. 2DEG oluşturarak yüksek iletkenlik göstermesi sonucunda yüksek sıcaklık, yüksek güç ve

yüksek frekans uygulamalarında kullanılmaktadır. GaN normal şartlar altında en kararlı olan Wurtzite kristal yapısı ile hegzagonal sıkı paket yapısındadır (Visalli 2011). GaN gibi geniş bant aralıklı yarıiletkenler, daha yüksek anahtarlama frekansı, verimlilik, daha yüksek çalışma sıcaklığı ve daha yüksek çalışma gerilimi ile silisyuma göre üstün performans sağlamaktadır. Si, GaAs ve GaN'ın bazı özellikleri, Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

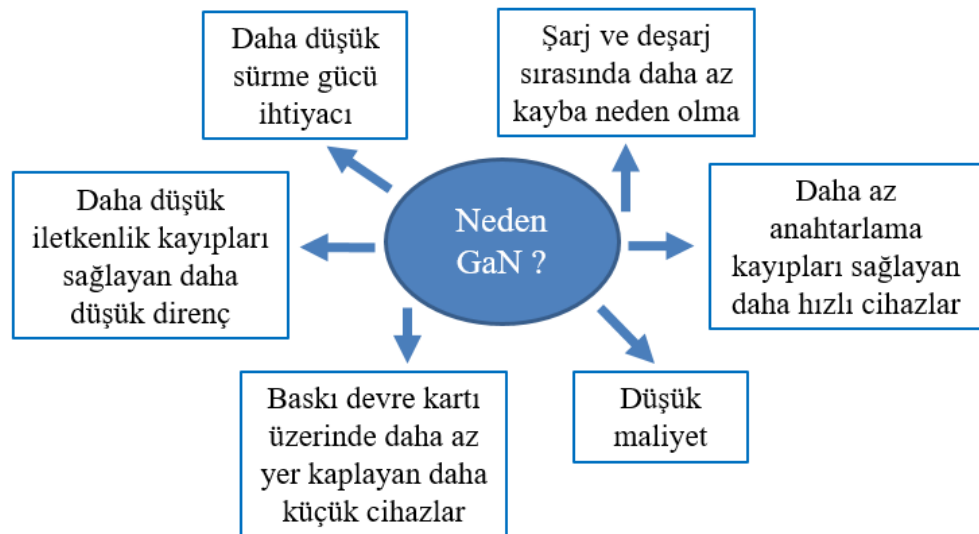
Çizelge 3.1. Si, GaAS ve GaN'ın bazı özelliklerinin karşılaştırması

Yarıiletkenler		Si	GaAs	GaN
Karakteristik	Birim			
Bant aralığı, E_G	eV	1,11	1,43	3,42
Elektron mobilitesi, μ_e	cm ² /V.s	1.350	6.000	1.000
Doyum elektron hızı, v_{sat}	x10 ⁷ cm/s	1,0	1,3	2,5
Kritik elektrik alan, E_{br}	MV/cm	0,3	0,4	3,3
Dielektrik katsayısı, ϵ_r	-	11,8	12,8	9,0

GaN, 1,11 elektron volt (eV) bant aralığına sahip Si'nin yaklaşık üç katı olan 3,42 elektron voltluk bir bant aralığına sahiptir. Bu durum, yarıiletkenin iletken bandında bir değerlik elektronunu uyarmak için daha fazla enerji gerektirdiği anlamına gelmektedir. Bu özellik, ultra düşük gerilimi uygulamalarında GaN kullanımını sınırlarken, daha yüksek sıcaklıklarda daha büyük bozulma gerilimlerine ve daha fazla termal stabiliteye izin verme avantajına sahiptir. Bir GaN kristali üzerine ince bir AlGaIn tabakası büyütülerek, ara yüzde dengeleyici bir 2DEG indükleyen bir gerilim oluşturulabilir. 2DEG, elektronların ara yüzde çok küçük bir bölgeye hapsedilmesi nedeniyle iletkenliği oldukça artırır ve 2DEG, elektronları verimli bir şekilde iletmek için kullanılabilir. 2DEG bölgesinde hapsedilen elektronların hareketliliği 1500-2000 cm²/V.s'ye kadar yükselmektedir. Bu yüksek hareketlilik, Si teknolojisine göre daha yüksek bozulma mukavemeti, daha hızlı anahtarlama hızı, daha yüksek termal iletkenlik ve daha düşük

direnç sunan transistörler ve entegre devreler üretilebilmesini mümkün kılar. GaN yarıiletken teknolojisi daha yüksek kırılma elektrik alanı ve dolayısıyla daha yüksek bozulma gerilimi sunmaktadır. GaN'ın kırılma elektrik alanı 3,3 MV/cm iken Si'nin kırılma elektrik alanı 0,3 MV/cm'dir. Bu durum GaN'ın yüksek gerilim ve yüksek güç uygulamalarında hasar görmeden çalışma kapasitesini on kattan fazla artırmaktadır. GaN, Si'dan daha düşük termal iletkenliğe sahiptir ve bu nedenle GaN, devre tarafından oluşturulan termal yükler azaltarak daha iyi ısı yönetimi sağlar. GaN transistörlerin boyutları, Si transistörlerden çok daha küçük yapılabildiğinden, yonga (wafer) başına çok daha fazla sayıda GaN transistör elde edilebilir. Bu nedenle, GaN transistörlerin üretim maliyeti, muadilleri olan Si transistörlerin üretim maliyetinden daha düşüktür.

Bu özellikler, GaN transistörlerin ve entegre devrelerin, verimliliği artırmak, boyutu küçültmek ve çok çeşitli güç dönüştürme sistemlerinin maliyetini azaltmak için devrelerde kullanılmasına neden olmaktadır. GaN'ın üstün malzeme özelliklerinin bir sonucu olarak GaN tabanlı HEMT teknolojisi yarıiletken sektöründe büyük önem kazanmıştır (Jones 1999). GaN HEMT'ler RF cihazları, yükselteçler, dönüştürücüler, güç kaynakları ve şarj cihazları gibi yüksek güç ve yüksek yoğunluklu uygulamalarda kullanılmaktadır (Pullabhatla et al. 2020). GaN teknolojisinin yüksek güç gerektiren uygulamalarında tercih edilmesinin arkasında yatan ana nedenler özet olarak Şekil 3.2'de gösterilmektedir (Moore ve Jimenez 2014).



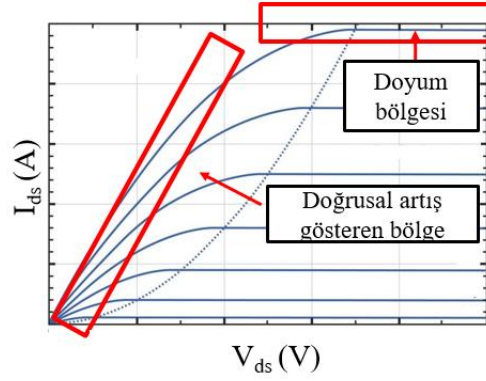
Şekil 3.2. GaN'ın tercih edilme nedenleri (Moore ve Jimenez 2014)

3.3. Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistörler (HEMT)

Hetero yapılı FET veya modülasyon katkılı FET olarak da bilinen HEMT, farklı bant aralıklarına sahip iki malzemenin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

Transistörlerin çoğunluğunda akımın iletim yolu N-tipi ve/veya P-tipi katkılı yarıiletkenlerden meydana gelirken, III-Nitrür yarıiletkenlerde bu durum farklıdır. HEMT’lerde, üst üste büyütülen farklı bant aralıkları iki malzemenin birbirine temas ettiği sınırdaki kuantum kuyusu ve 2DEG meydana gelmektedir. Elektronlar belirli bir hat boyunca daha hızlı ve daha hareketli olduğundan, yüksek hareketlilik ve yüksek taşıyıcı yoğunlukları elde edilebilmektedir (Toprak 2014). AlGaIn/GaN tabakalarında meydana gelen kutuplanma alanları sayesinde 2DEG oluşumu katkılama yapılmadan sağlanmaktadır (Ambacher et al. 1999).

HEMT’ler üç terminali olan aktif devre elemanlarıdır. Akaç ve kaynak elektrotları omik yapıdayken kapı elektrotu ise Schottky kontaklıdır. Kaynak ve akaç omik kontaktları arasındaki akım, 2DEG boyunca oluşturulan kapı elektrotu yani bir Schottky kontak sayesinde kontrol edilebilmektedir. Uygulanan kapı gerilimine bağlı olarak kapı elektrotunun hemen altında bulunan taşıyıcı yoğunluğu değişmektedir. Kapı gerilimi belli bir eşik değerin üzerindeyken akaç ile kaynak arasındaki akım akışı devam etmektedir. Kapı gerilimi azaldıkça, taşıyıcı yoğunluğu azalır. Akaç gerilimi arttırıldığında, akaç akımı belli bir değere kadar doğrusal olarak artar ve belirli bir akaç geriliminden sonra akım doyuma ulaşır. 2DEG yoğunluğunun artmasıyla maksimum akım da artış meydana gelir (Malik et al. 2019). Çalışma prensibine göre HEMT için elde edilen karakteristik davranış doğrusal artış gösteren bölge ve doyum bölgesinden oluşmaktadır. DC ölçüm sonunda elde edilen çıkış karakteristik eğrisi Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Doğru akım çıkış karakteristiği

HEMT teknolojisi, otomotiv endüstrisi, yüksek gerilim elektroniği, yüksek frekans monolitik mikrodalga entegre devrelerinde (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), kablosuz baz istasyonlarında, yüksek güçlü yükselteçlerde, radar ve uzay araştırma uygulamalarında, savunma ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır (Toprak 2014).

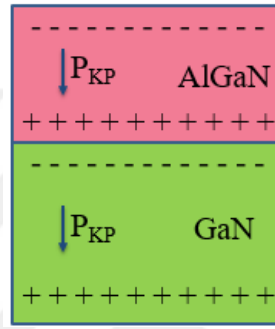
2DEG elektron yoğunluğu arttığında yapının hareketliliği düşmektedir. Bariyer kalınlığı arttığında da elektron yoğunluğu artar fakat hareketlilik düşmektedir. Elektron yoğunluğunun arttığı her durumda ise yüzey direnci düşmektedir. Öte yandan literatürde HEMT tasarımlarında yüksek bozulma alanı (breakdown field) gerekli olduğu için tampon tabaka optimizasyonu önem taşımaktadır. Akım yoğunluğunun artırılması için kaçakların azaltılması ön görülmektedir. GaN temelli aygıtta maksimum akaç akımı hız limitli değil ancak elektrik alan limitlidir. Bu nedenle düşük iletim direnci için $n_s \times \mu$ çarpımı daha önem arz etmektedir. 2DEG altı epitaksiyel tabakalarda alt eşik gerilimi, akım kaçak noktalarının minimize edilmesi gerekmektedir (Khandelwal et al. 2011).

3.4. GaN Temelli HEMT Yapılarda Kutuplanma

HEMT'lerde meydana gelen kutuplanmalar, 2DEG oluşumuna neden olur. Hekzagonal kristal yapıya sahip AlGaN'da doğal kutuplanma (P_{sp}) ve piezoelektrik kutuplanma (P_{pz}) olmak üzere iki farklı kutuplanma oluşur. Toplam kutuplanma, dışarıdan elektrik alanı uygulanmadığı sürece bu iki kutuplanmanın toplamıdır.

3.4.1. Kendiliğinden kutuplanma

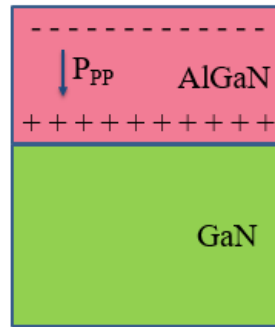
Yapıda doğal olarak meydana gelen kutuplanma durumudur. Güçlü bir iyonik etkileşmeye bağlı olarak yapının içinde, kristalin bir tarafı pozitif diğer tarafı negatif olarak kutuplanmaktadır. Kristallerde gerçekleşen bu kutuplanmaya kendiliğinden kutuplanma denir. AlGaN, GaN ve AlN yapılarında elektron bulutu nitrojen tarafına doğru kayar, bu nedenle elektronegatif olan kısım nitrojendir. AlGaN/GaN epitaksiyel yapıda kendiliğinden kutuplanma durumu Şekil 3.4’de gösterilmektedir (Dahmani 2011).



Şekil 3.4. Kendiliğinden kutuplanma durumu (Dahmani 2011)

3.4.2. Piezoelektrik kutuplanma

Üst üste büyütülen epitaksiyel yapıların örgü parametrelerinin farklı oluşu ve katmanların termal genişleme katsayılarındaki farklılıklar nedeniyle katmanlar arasında gerilme oluşur. Farklı katmanların arasında meydana gelen bu gerilmeler nedeniyle oluşan kutuplanmaya piezoelektrik kutuplanma denir. Şekil 3.5’de piezoelektrik kutuplanma gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Piezoelektrik kutuplanma durumu (Dahmani 2011)

Katmanların her biri kendiliğinden kutuplanmaya sahiptir ve katmanlar arasındaki gerilme piezoelektrik kutuplanma oluşturmaktadır. Kutuplanmada etkili olan parametreler, AlGa_N kalınlığı, AlGa_N/Ga_N epitaksiyel yapısının N-yüzeyli ya da Ga-yüzeyli olması ve Al_xGa_{1-x}N içerisindeki Al miktarıdır.

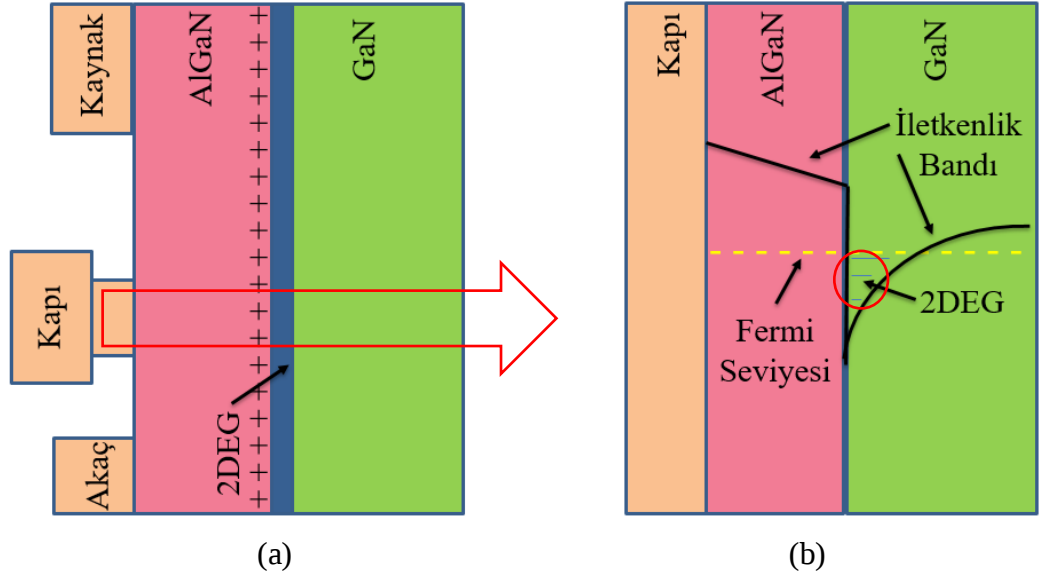
Kendiliğinden kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanma sayesinde yapıya katkılama yapılmadan, Al_xGa_{1-x}N/Ga_N ara yüzeylerinde elektron birikebilir ve uygulanan elektrik alan etkisi ile elektronların iki boyutta serbestçe hareket etmesi sağlanabilir. Sistemdeki toplam kutuplanma, kendiliğinden kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanmanın toplamıdır (Dahmani 2011).

3.5. GaN Temelli Çoklu Yapılarda 2DEG Oluşumu

2DEG adından da anlaşılacağı gibi, elektronların iki boyutta serbestçe hareket edebildiği ve üçüncü boyutta ise hapsedildiği bir elektron gazıdır. Bu fenomen, iletim bandının kenarlarının elektron gazlarını sınırlamak için bir kuantum kuyusu oluşturduğu yarıiletken hetero yapılarda yaygın olarak bulunmaktadır. 2DEG, hetero yapıdaki epitaksiyel yapının oluşturduğu bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Farklı hetero yapılar için 2DEG'nin yoğunluğu ve elektron hareketliliği farklıdır.

HEMT'lerin çalışma performansı için 2DEG kanal iletkenliği önemli bir parametredir. 2DEG kanalının iletkenliği kanalda bulunan elektron yoğunluğu ve bunların hareketliliği ile ilişkilidir. AlGa_N/Ga_N HEMT'lerde 2DEG elektron yoğunluğu $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 'dir (Lenka and Panda 2011). İki boyutlu sistemlerde değişik saçılma mekanizmaları etkin olacağından taşıyıcı yoğunluğu ile elektron hareketlilik arasında ters orantı vardır. HEMT yapıların yüzey kalitesi de çalışma performansı için önemlidir. Birçok iç ve dış faktör yapının yüzey kalitesini etkilenebilmektedir. Epitaksiyel yapı dizaynı ve büyütme yöntemi, yüzey niteliklerini belirlemede en önemli faktörlerdir (Kelekçi 2011).

Şekil 3.6'da AlGa_N ve Ga_N katmanların bir araya geldikleri yerde kendiliğinden ve piezoelektrik kutuplanma sonucu oluşan 2DEG ve 2DEG'e ait iletkenlik bandı gösterilmektedir.



Şekil 3.6. AlGaIn/GaN katmanlarındaki 2DEG (a) ve 2DEG iletkenlik bandı (b) gösterimi.

AlGaIn/GaN'nın eklem bölgesi aslında bir kuantum kuyusu gibi davranmaktadır. AlGaIn/GaN'da iletkenlik bandının, Fermi enerji düzeyinin altında kaldığı bölümler vardır. HEMT, kapı elektrotu altındaki Schottky bariyeri sayesinde akım kontrolü sağlanabilir. Tabakalar arasında bulunan üçgen biçimli potansiyel kuyunun iletim bandı enerjisi uygulanan kapı gerilimi ile yükseltilebilir ve bölgedeki elektronların bir kısmı bölgeyi terk eder. Böylelikle kontrollü bir biçimde değiştirilen 2DEG yoğunluğu ile akı-kaynak arasındaki akım kontrolü sağlanır. Yeterince yüksek genlikte negatif bir kapı gerilimi uygulanarak, AlGaIn/GaN tabakaları arasında bulunan 2DEG kanalında elektron sayısının oldukça düşmesi sağlanabilir. 2DEG yoğunluğunun ihmal edilebilecek düzeye düşmesi ile akım kanalı kısılmış (pinch-off) olacaktır. Kısılmaya neden olan en düşük kapı gerilimine eşik gerilimi ya da kısılma gerilimi denir (Kelekçi 2011).

3.6. HEMT Epitaksiyel Yapısı

Örnek bir AlGaIn/GaN HEMT yapısının katmanları Çizelge 3.2'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.2. AlGaIn/GaN HEMT kristal yapı katmanları

Sıra Numarası	Tabaka İsimleri
1	GaN Kapak Tabakası
2	Al _{0.20-0.30} GaN Bariyer Tabakası
3	AlN Ara Plaka Tabakası
4	GaN Tampon Tabakası
5	AlN Geçiş Tabakası
6	AlN Çekirdeklenme Tabakası
7	SiC Alttaş

GaN kapak tabakası epitaksiyel yapıda en üstte yer alan tabakadır. Yaklaşık 2-3 nm kalınlığındadır. Oksit oluşumunu bu tabaka engellemektedir. Ayrıca düşük dirençli omik kontak oluşmasında da rol oynamaktadır. AlGaIn bariyer tabakası üstten ikinci katmandır. 2DEG elektron yoğunluğu ile yapı içerisindeki Alüminyum (Al) miktarı doğru orantılıdır. Al miktarı arttıkça 2DEG elektron yoğunluğu artar. AlGaIn tabaka kalınlığı 2DEG için önemli bir parametredir. 2DEG oluşabilmesi için AlGaIn tabaka kalınlığı belli bir kritik kalınlığın üstünde olmalıdır. Diğer yandan, AlGaIn tabakasının çok kalın olması durumunda GaN tabakası ile arasındaki örgü kusurları artacaktır. Ara yüzey kusurları saçılmalara neden olmaktadır. AlN ara plaka tabakası üçüncü katmandır. GaN ile AlGaIn arasında AlN ara tabakası bir geçiş katmanı görevi üstlenir. 1-2 nm gibi oldukça ince büyütülen katman, ara yüzey pürüzlülüğünü düşürmekte ve taşıyıcı hareketliliğini artırmaktadır. GaN tampon tabakası epitaksiyel yapının dördüncü katmanıdır. Kalınlığı yaklaşık 2000 nm'dir. Bu katman sayesinde alt tarafta kalan bölgelerde 2DEG tuzaklanması olmaması sağlanır. Ayrıca, akım kaçaklarının da azaltılabilmesi için tabakanın daha yüksek dirençli olmasını sağlar. AlN geçiş tabakası sayesinde AlN çekirdeklenme tabakası ile GaN tampon tabakası arasındaki geçiş, en düşük örgü uyumsuzluğu oluşacak biçimde gerçekleşir. Çekirdeklenme tabakasından sonra kristalleşmenin başladığı katman olduğu için bu tabakada Al konsantrasyonu yüksek tutulmaktadır. AlN çekirdeklenme tabakası alttaş ile üstüne büyütülecek bir katman arasında örgü uyumunu sağlayan tabakadır. Geçiş tabakası ile aynı olmasına karşın daha düşük sıcaklıkta büyütülebilmektedir ve bu nedenle yapısal farklılıklar içermektedir. Çekirdeklenme katmanı büyütülecek olan üst katmana ve alttaşa bağlı olarak seçilir (Asan 2018).

Alttaştan başlayarak her bir katmanın ara yüzündeki kristal yapı uyumu epitaksiyel tabakalar büyütülürken oldukça önemlidir. GaN temelli heteroepitaksi için kullanılan yaygın alttaşlar Al_2O_3 , Si ve SiC'dir. Genellikle düşük maliyetinden dolayı, Si ya da Al_2O_3 alttaşlar tercih edilir. Bu alttaşların bazı özellikleri Çizelge 3.3'de gösterildiği gibidir (Javorka 2004). Si yarıiletken malzemeler arasındaki önemini korumaktadır ve halen elektronik uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Var olan Si tabanlı teknoloji ile uyumluluğu ve ucuz olması nedeniyle Si alttaş, GaN HEMT yapıları için önemli alttaş malzemelerinden biridir (Ikeda et al. 2009).

Çizelge 3.3. Alttaşların bazı özellikleri (Javorka 2004)

Özellikler	Alttaş		
	Al_2O_3	Si	SiC
Örgü Parametresi (Å)	4,76	3,84	3,08
GaN ile örgü uyumsuzluğu (%)	16	17	3,5
Termal genleşme katsayısı ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	7,3	2,6	4,5
Termal iletkenlik ($\text{Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	0,4	1,3	4,9
Erime Sıcaklığı (K)	2.303	1.412	3.102

Örgü uyumsuzluğunun düşük olmasının yanı sıra, malzemenin erime sıcaklığı ve termal iletkenliği önem arz eden parametrelerdendir. Al_2O_3 , Si ve SiC arasında AlN'a termal genleşme katsayısı en uygun olan SiC'dür. SiC, çok iyi termal iletkenliğe sahip olduğundan, aygıtların çok ısınmasını ve arızalanmasını önlemektedir. SiC yüksek sıcaklarda daha güvenirdir. Yüksek sıcaklıklarda performans kaybı yaşamadan çalışması gereken transistörler için SiC çok iyi bir seçim olmuştur (Mishra et al. 2008; Pullabhatla et al. 2020). GaN ile yaygın olarak kullanılan alttaşlara ait avantajlar ve dezavantajlar Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. Alttaş malzemelere ait avantajlar ve dezavantajlar (Koçan 2003)

Alttaş	Avantajları	Dezavantajları
Safir (Al_2O_3)	➤ Düşük maliyet ➤ Yaygın olarak bulunabilme ➤ Yüksek sıcaklıklarda kararlılık ➤ Kolay Temizleme	➤ Çok zayıf termal iletkenlik ➤ GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu
SiC	➤ Yüksek termal iletkenlik ➤ GaN ile düşük örgü uyumsuzluğu	➤ Yüksek maliyet ➤ Yüksek kusur yoğunluğu (mikroborular ve vida türü kusurlar)
Si	➤ Düşük maliyet ➤ Yaygın olarak bulunabilme ➤ Si temelli mikro elektronik transistörlerle uyumlu olabilme ➤ İletken ve yalıtkan formlarda bulunabilme	➤ GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu ➤ GaN ile yüksek termal uyumsuzluk ➤ Zayıf termal iletkenlik

3.7. GaN tabanlı HEMT'lerin Üretimi

Transistörlerin üretimi için yarıiletken aygıtların üretiminde de yaygın olarak kullanılan mikro ve nano fabrikasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler fotolitografi, elektron demeti litografi (EBL), fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition, PVD), kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD), indüklenmiş elektron çiftli plazma reaktif iyon aşındırma (Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching, ICP-RIE), kimyasal ıslak (wet) aşındırma ve kimyasal temizlik işlemleridir.

GaN tabanlı HEMT yapabilmek için uygun bir mikro ve nano üretim süreci geliştirilmiştir. Geleneksel AlGaIn/GaN HEMT üretimi, sırasıyla omik temas, mesa izolasyon, yüzey pasivasyonu, kapı metali ve arka yüzey delik adımlarını içermektedir. Doğru bir mikro ve nano fabrikasyon proses akışı tanımlamak için tüm prosesler uyumlu olmalıdır.

3.8. GaN tabanlı HEMT'lerin DC Karakterizasyonu

Proses sürecinde bazı adımlar için transistörler elektriksel olarak karakterize edilerek, prosesin gidişatı kontrol edilir. Tek bir yonga üzerinde birden fazla sayıda transistör üretilir. Tüm transistörlerin ölçümü çok zaman alacağı için belirli noktalarda prosesi kontrol etmek için üretilmiş olan transistörlerden ölçümler alınır. Bu transistörler kontrol HEMT'ler olarak adlandırılır. Fabrikasyon proseslerinin başarısını takip edebilmek için DC karakterizasyona ihtiyaç duyulur. Kontrol noktalarındaki DC ölçümler, omik kontak oluşturulduktan sonra, kapı metalizasyonu sonrası, birinci ve ikinci metalizasyon adımları sonrası ve son olarak fabrikasyon sonunda gerçekleştirilebilir.

DC karakterizasyonda, kontakların I-V karakteristikleri elde edilir. I-V karakteristiklerine göre metal/yarıiletken kontaklar iki sınıfa ayrılır. Doğrultucu karakteristiğe sahip olanlar Schottky kontak, lineer karakteristiğe sahip olanlar ise omik kontak olarak adlandırılır. İyi bir performans elde etmek için transistörün omik kontakları düşük dirençli olmalıdır. Düşük direnç değerine sahip bir GaN HEMT kullanmak, iletim kayıplarını azaltmaktadır ve verimliliği artırmaktadır. İyi bir omik kontakın öz direnci 10^{-5} ohm.cm' den küçük olmalıdır. Omik kontaklar lineer karakteristiğe sahip olmalı, karakteristiği zamanla değişmemelidir.

GaN tabanlı HEMT'lerin DC karakterizasyonu, ileri-ön gerilim karakteristikleri ve transfer karakteristiklerinden oluşmaktadır. İleri-ön gerilim işleminde, kapı kontağına bir ön gerilim (veya sıfır gerilim) uygulanır ve transistör açık (eşik geriliminden büyük) veya kapalı (eşik geriliminden küçük) gerilim değerlerine ayarlanmaktadır. Akaç-kaynak arasında akaç-kaynak gerilimi ile akan akım, transistörlerin değerlendirilmesi için önemli bir niceliktir. Kapalı durumda transistörlerin akaç-kaynak akımları mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır, çok yüksek ise transistörlerde kaçak sorunu vardır veya arızalıdır. Transistörlerin bozulma limitini test etmek için akaç ve kaynak arasına yüksek bir gerilim uygulanır. Transfer karakteristiği için, akaç-kaynak arasında sabit bir ön gerilimi uygulanır ve farklı kapı gerilimlerinde değişen akaç akımları ölçülür.

HEMT'lerin DC karakterizasyonu ile transistörün, iletim direnci (R_{on}), bükülme gerilimi (V_{knee}), maksimum akaç-kaynak akımı (I_{DSS}), eşik gerilimi (V_{th}), geçiş iletkenliği (g_m), bozulma gerilimi (V_{br}), kapı kaçak akımı ($I_{g,leak}$) ve akaç kaçak akımı ($I_{d,leak}$) elde edilir.

R_{on} direnci, bir transistörün çalışması esnasında meydana gelen iletim kayıplarını tanımlayan önemli bir parametre olup, transistörlerin yüksek güç kapasitelerinin ve verimliliklerinin bir ölçütü olarak kullanılmaktadır. Yüksek güç uygulamaları için bozulma geriliminin büyük bir değer çıkması beklenmektedir.

DC I_d - V_{ds} ölçümünden I_{DSS} , V_{knee} ve R_{on} değerleri elde edilir. DC I_d - V_{ds} ölçümlerinde, farklı sabit kapı-kaynak (V_{gs}) gerilimi için akaç-kaynak gerilimi (V_{ds}) değiştirilir ve her bir V_{gs} gerilimi için I_{DSS} değeri elde edilir. I_{DSS} akımının doyuma ulaştığı noktada ölçülen V_{ds} gerilimi, V_{knee} bükülme gerilimidir. V_{ds} gerilimi 0,1 V civarındayken elde edilen I_{DSS} değeri kullanılarak R_{on} değeri hesaplanır.

DC I_d - V_{gs} ölçümlerinden g_m ve V_{th} değerleri elde edilir. Akaç akımının, yatay eksen ile kesiştiği noktada okunan V_{gs} gerilimi, V_{th} gerilimini verir. Sabit bir V_{ds} gerilim değerinde V_{gs} gerilim değişimine karşılık elde edilen I_d akımındaki değişim belirlenerek g_m elde edilir. I_d akımının V_{gs} gerilimine göre türevi g_m değerini verir.

DC ileri I-V ölçümü ile transistörün kapı eklemesinin Schottky davranışı incelenerek kapı açılma gerilimi ölçülür. Bu ölçümlerde V_{gs} gerilimi eşik geriliminin altındaki bir gerilim değerinden yeterince yüksek pozitif bir gerilim değerine kadar pozitif yönde artırılır. V_{gs} geriliminin değişimine bağlı olarak kapı akımı elde edilir. Kapı akımı 1mA/mm değerine ulaştığında, kapı açık olarak kabul edilir ve bu gerilim kapının açılma gerilimidir.

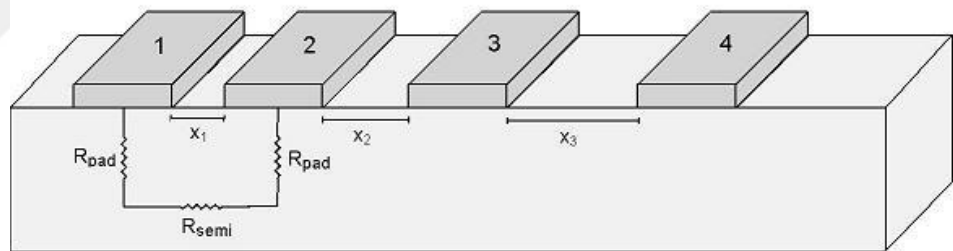
DC bozulma gerilimi ölçümlerinde, kapı sabit V_{gs} gerilimi ile kapalı durumda tutulurken, V_{ds} gerilimi sıfırdan pozitif yönde değiştirilir ve yeterince yüksek V_{ds} gerilimi için elde edilen kapı ve akaç akımları sırasıyla $I_{g,leak}$ ve $I_{d,leak}$ akımlarıdır.

3.9. Direnç Ölçümü

İletim hattı modeli sayesinde, omik kontakların temas direnci ve epi katmanının yüzey direnci belirlenebilmektedir. TLM deseni, farklı aralıklara ve aynı boyuta sahip omik kontakların yan yana gelerek birleştirilmesi ile oluşturulur. Omik kontak padleri arasındaki mesafe soldan sağa doğru artmaktadır. Bu nedenle bitişik padler arasındaki direnç ölçüldüğünde toplam dirence katkı giderek artacaktır.

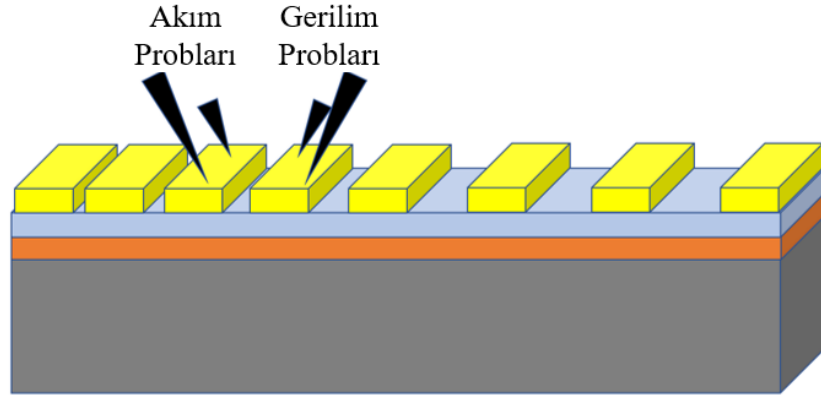
Akaç ve kaynak terminallerinde iyi kalitede kontaklar oluşturmak, yüksek akım yoğunluğu ve düşük direnç gibi belirgin özelliklere sahip transistörleri elde etmek için gerekli olan ön koşullardır.

TLM deseninde iki bitişik ped arasında ölçülen direnç değerleri dikkate alınır. Ölçülen direnç, iki kontak direncinin ve yüzey direncinin toplamıdır. Şematığı, Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. İki kontak arası okunan direnç değeri

Probların etkilerini en aza indirmek için dört noktalı bir problama tercih edilir. Dört noktalı bir problama Kelvin bağlantısı olarak adlandırılır. Bu problama yöntemiyle iğne probleminin dirençleri elimine edilmiştir. Bu sayede asıl ölçülmek istenen direnç değeri parazit dirençlerden ayrılmış olur. Akım, ardışık iki omik kontak ped arasında uygulanır ve karşı iki omik kontak ped arasında gerilim ölçümü alınır, ardından direnç değeri gerilimin akıma bölünmesiyle hesaplanmaktadır. TLM ölçüm şematığı, Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. 4 prob TLM ölçüm şematığı

Tüm ardışık desenler tek tek ölçülür ve hesaplanan direnç değerleri, mesafeye bağlı olarak çizdirildiğinde bir doğru elde edilir. Epi katmanın yüzey direnci, elde edilen doğrunun eğiminden hesaplanır. Elde edilen doğrunun, direnç eksenini kestiği nokta ise omik kontakların direncini gösterir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada HEMT’de kullanılacak olan alttaş SiC olarak belirlenmiştir. GaN tabanlı HEMT’i geliştirmek için kullanılan epitaksiyel yapı ve tabakaların kalınlık bilgileri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. AlGaIn/GaN HEMT epitaksiyel yapısı ve kalınlıkları

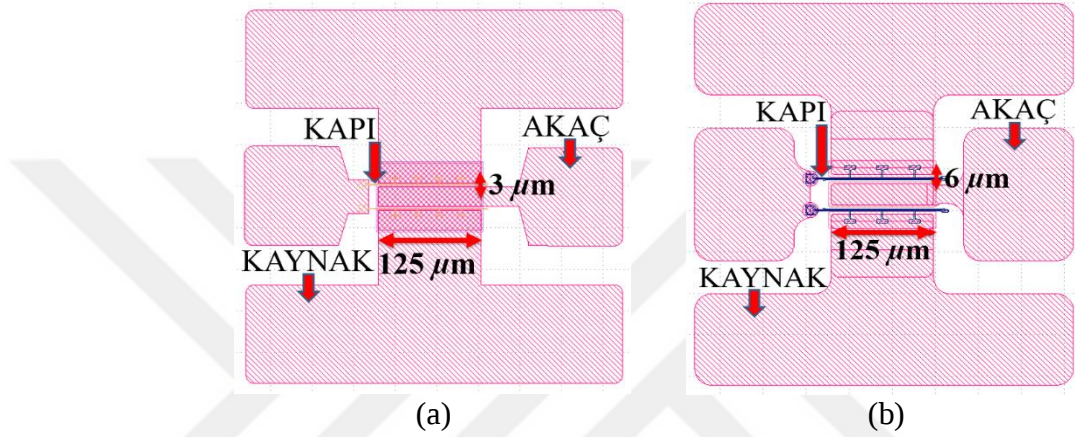
Sıra Numarası	Tabaka İsimleri	Kalınlık (nm)
1	GaN Kapak Tabakası	~ 2
2	Al _{0.20-0.30} GaN Bariyer Tabakası	~ 30
3	AlN Ara Plaka Tabakası	~ 1-2
4	GaN Tampon Tabakası (3)	~ 1.400
5	GaN Tampon Tabakası (2)	~ 400
6	GaN Tampon Tabakası (1)	~ 200
7	AlN Geçiş Tabakası	~ 290
8	AlN Çekirdeklenme Tabakası	~ 16
9	SiC Alttaş	~ 330.000

Transistörün en önemli kısmını oluşturan bölgeler ise ilk 35-40 nm’lik bölümdür. Burada 2DEG’i oluşturan AlGaIn ve GaN tabakaları bulunmaktadır. Alüminyum yüzdesi ise aygıtların akış akımlarından, geçiş iletkenliğine kadar birçok parametreyi belirlemektedir (Çakmak 2021).

Tez kapsamında büyütülen epitaksiyel katmanın çıktıları aşağıdaki gibidir.

- 2DEG Mobility > 1.850 cm² /V.s
- Hareketlilik Değişimi < % 5
- Taşıyıcı Elektron Yoğunluğu (N_s) > 1,0 E+13 cm⁻²
- N_s Değişimi < % 5
- Yüzey Direnci (R_s)
- R_s Değişimi < % 3
- Diğer Yüzey Özellikleri : Çatlaksız

HEMT yapıların üretimi sırasında transistörler elektriksel olarak karakterizasyonu yapılarak üretim adımlarının başarısı hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Bu tez kapsamında akaç-kaynak (Drain-Source, D-S) arası mesafe farklı olan transistörlerde ölçüm yapılmıştır. D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm olan iki farklı transistör yapısı dikkate alınmış ve bu transistörlerin üretimi sırasında gerçekleştirilen DC ölçümler incelenmiştir. Şekil 4.1’de ölçümlerin gerçekleştirildiği kontrol HEMT’lerin üstten görünümü gösterilmektedir.



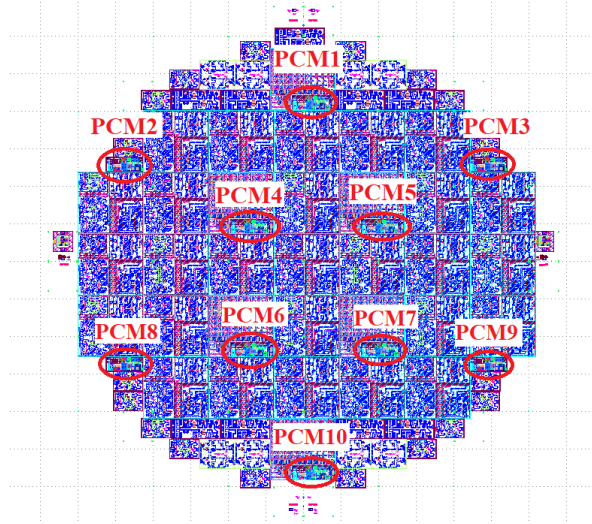
Şekil 4.1. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan kontrol HEMT’leri

Ölçümü yapılan kontrol HEMT’ler 2x125 μm boyutuna sahiptir. Kapı genişliği 125 μm ’dir ve iki adet kapısı vardır. Aygıt boyutu hesaplanırken bu iki parametre göz önünde bulundurulmaktadır. Kapı genişliği ile kapı sayı adedinin çarpım sonucu aygıt boyutunu vermektedir. Bu transistörler tükenme modu (Depletion mode, D-mode) tipi transistörlerdir. Transistörlerin fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir.

- D-S arası mesafe 3 μm olan kontrol HEMT için kapı ayak uzunluğu 250 nm, kapı baş uzunluğu 500 nm ve alan levhası uzunluğu 700 nm’dir.
- Kapı-kaynak kontak mesafesi 1 μm ve kapı-akaç kontak mesafesi 1,75 μm ’dir.
- D-S arası mesafesi 6 μm olan kontrol HEMT için kapı ayak uzunluğu 500 nm, kapı baş uzunluğu 1.300 nm ve alan levhası uzunluğu 1.550 nm’dir.
- Kapı-kaynak kontak mesafesi 1,5 μm ve kapı-akaç kontak mesafesi 4 μm ’dir.
- Tez kapsamında incelenen her iki transistör yapısının boyutları 2x125 μm ’dir.

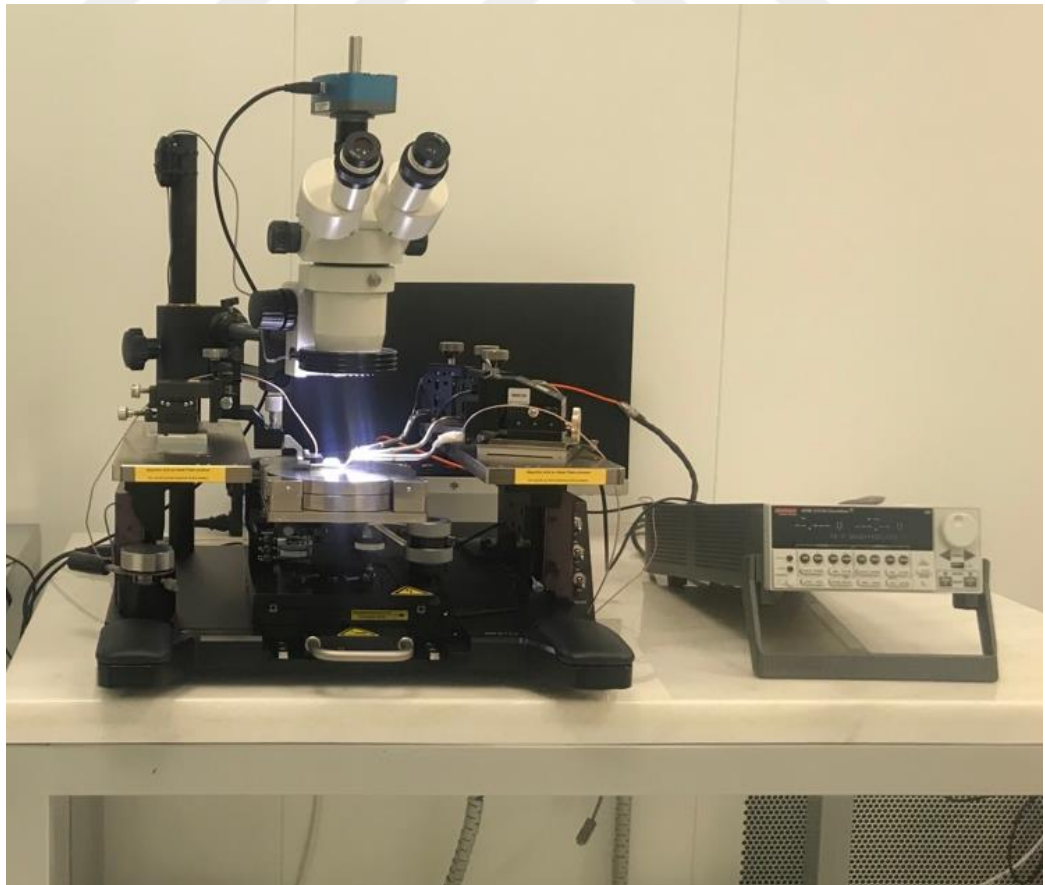
Proses sürecinde bazı proses adımlarında transistörler elektriksel olarak karakterize edilerek, prosesin gidişatı kontrol edilmektedir. Bu tez kapsamında sadece DC ölçümler dikkate alınmıştır. Yonga üzerinde çok fazla sayıda transistör yer aldığı için tüm transistörlerin ayrı ayrı ölçümleri çok zaman alır ve pratik olmayacaktır. Bu nedenle ölçümler az sayıdaki proses kontrol monitöründe gerçekleştirilir. Her PCM noktasından ölçümler alınırken sırasıyla her adım için ayrı ayrı kontrol HEMT'lerine giderek karakterizasyonlar gerçekleştirilir. Bunun için toplamda dört tane kontrol HEMT'i mevcuttur. Bu kontrol HEMT'lerinden ilki kapı metalizasyonu sonrasında, ikincisi birinci metalizasyon adımı sonrasında, üçüncü kontrol HEMT'i ise ikinci metalizasyon adımı sonrasında ve dördüncü kontrol HEMT'i ise fabrikasyon tamamlandıktan sonraki adımda ölçüm için kullanılır. RTP adımı sonrası kapı kontağı oluşturulmadığı için sadece akaç ve kaynak kontakları mevcuttur ve ilk DC ölçüm, RTP adımı sonrasında oluşan omik kontakların direnç değerlerini belirlemek için yapılır. Sonraki fabrikasyon basamaklarında kapı kontağı oluşturulur ve transistör karakteristikleri ölçülebilir. Kapı metalizasyonu sonrasında I_d-V_{ds} değişimi, I_d-V_{gs} , ileri $I-V$ ölçümü ve son olarak bozulma gerilimi ölçümleri gerçekleştirilir. I_d-V_{ds} değişimi, I_d-V_{gs} , ileri $I-V$ ölçümü ve bozulma gerilimi ölçümleri birinci metalizasyon adımı, ikinci metalizasyon adımı ve fabrikasyon tamamlandıktan sonra tekrarlanır. İlerleyen kısımlarda bu ölçüm sonuçları ayrıntılı olarak sunulmakta ve tartışılmaktadır.

Fabrikasyon akışında ölçümler için belirlenmiş olan PCM noktalarından alınan tüm sonuçlar bu kısımda açıklanmaktadır. Bu tez kapsamında 10 adet proses kontrol monitörü (Process Control Monitoring, PCM) noktası belirlenmiştir. Bu noktalar PCM1, PCM2, PCM3, PCM4, PCM5, PCM6, PCM7, PCM8, PCM9 ve PCM10 olarak adlandırılmış ve 3 inç için yonga maskesi üzerindeki konumları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



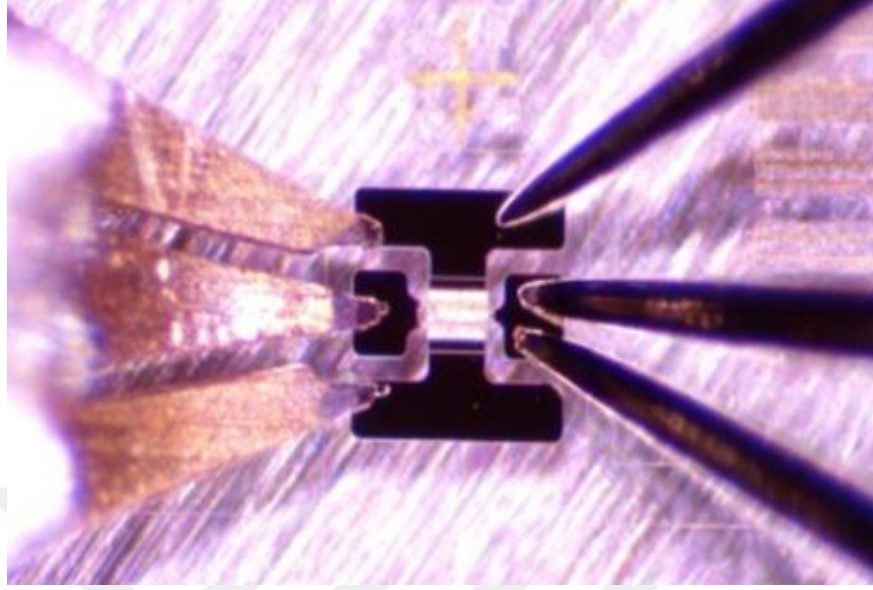
Şekil 4.2. PCM noktalarının konumu

DC karakterizasyonu gerçekleştirmek için bir Keithley 2612B SMU Akım/Gerilim Kaynağı ve bir Cascade M150 prob istasyonu kullanılmıştır. DC ölçüm sisteminin fotoğrafı Şekil 4.3’da gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Ölçüm düzeneği

Şekil 4.4’de problemlenmiş ölçüme hazır bir HEMT yapısı gösterilmektedir.

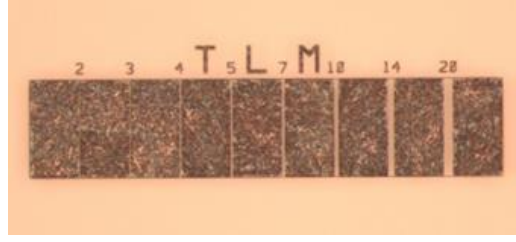


Şekil 4.4. Problemlenmiş kontrol transistörü

Ölçüm sonuçları sunulurken fabrikasyonun ara adımlarında gerçekleşen DC ölçüm sonuçlarına ait grafiklere de yer verilmiştir. PCM5 ve PCM6 ölçüm noktaları merkeze çok yakın oldukları için en uygun ölçüm kontrol izleme noktaları PCM5 ve PCM6 olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında incelenen iki transistör tasarımı için bu noktalardan yapılan ölçümlere ait grafiklerden birine yer verilmiştir. Tüm PCM noktalarından elde edilen sonuçlar ise ilgili adıma ait çizelgede gösterilmiştir. Çizelgelerde yer almayan PCM noktalarında HEMT yapısı oluşmadığı için ölçüm alınamamıştır. Çizelgelerdeki ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri, en küçük ve en büyük ölçüm sonuçları dikkate alınmadan, diğer ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

4.1. RTP Adımı Sonrası TLM Deseni Üzerinde Yapılan Ölçümler

RTP sonrasında TLM deseni üzerinde yapılan ölçümde kontak direnci (Contact Resistance, R_c) ve yüzey direnci (Sheet Resistance, R_s) değerleri elde edilir. Şekil 4.5’de üretimde kullanılan TLM deseni görülmektedir.



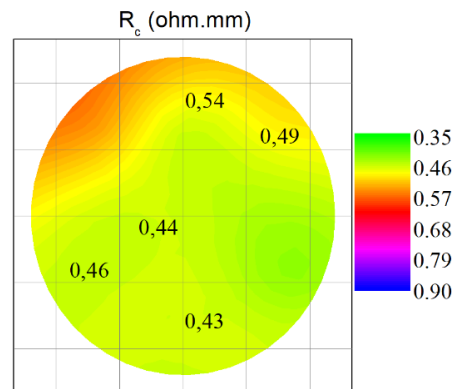
Şekil 4.5. TLM deseni

Çizelge 4.2’de TLM desenleri üzerinden gerçekleştirilen ölçümlerden alınan sonuçlar ve hesaplanan ortalama değerler gösterilmektedir. Ölçüm süresinin kısa tutulabilmesi için bu ölçümler yalnızca beş noktada gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların birbirine yakın çıktığı gözlemlenmiştir yani homojen bir dağılım söz konusudur. Ortalama R_c değeri 0,46 ohm.mm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar HEMT fabrikasyonuna devam edilebileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.2. RTP sonrası TLM deseni üzerinde yapılan ölçüme ait sonuçlar

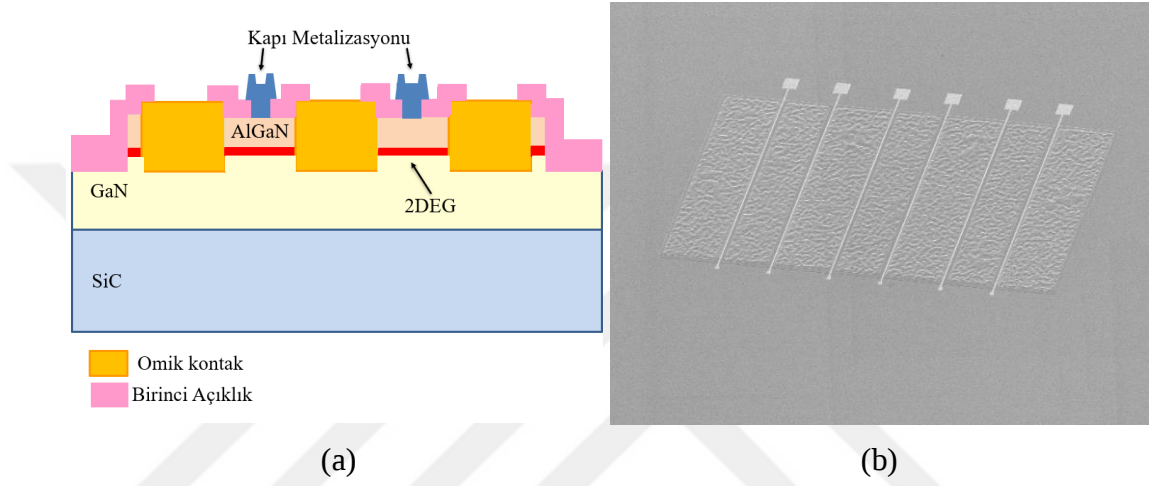
PCM Numarası	R_s (ohm/sq)	R_c (ohm.mm)
PCM1	212	0,54
PCM3	212	0,49
PCM6	206	0,44
PCM8	211	0,46
PCM10	210	0,43
Ortalama	211	0,46

PCM noktalarından gerçekleştirilen TLM ölçümüne ait kontak dirençlerin sonuçları yonga haritası üzerinde dağılımı renklendirilerek Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Şekil 4.6. R_c ölçüm sonuçlarının yonga üzerinde dağılımı

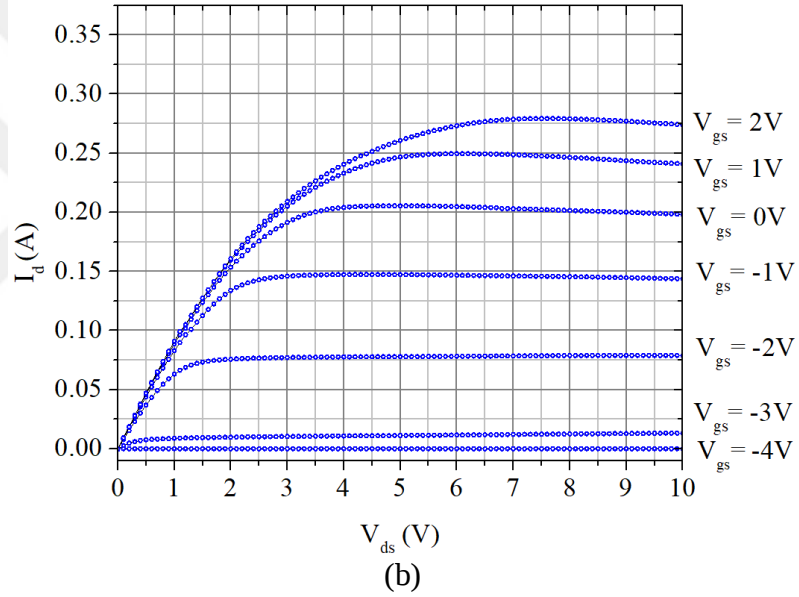
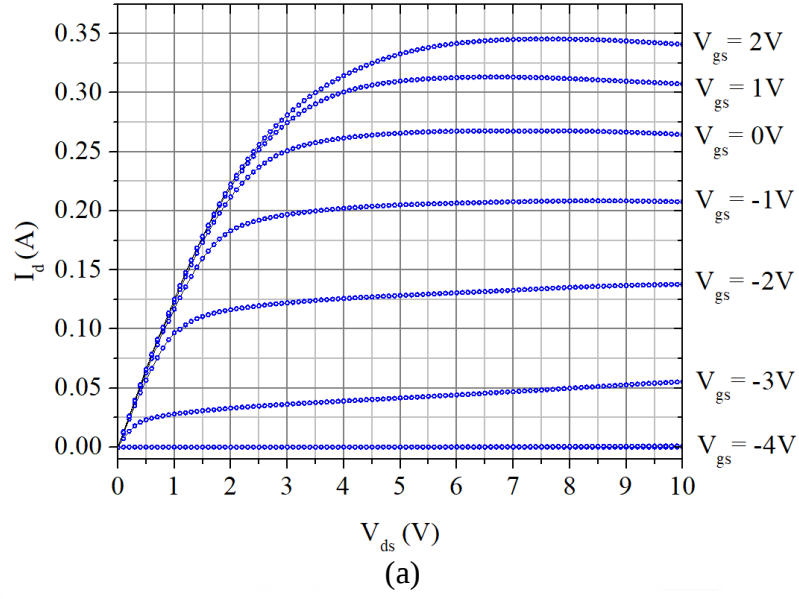
4.2. Kapı Metalizasyon Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları

Yonga üzerinde yer alan kontrol HEMT'lerin ilk DC ölçümleri bu adımda gerçekleştirilir. DC I_d - V_{ds} ölçümlerinde, sabit V_{gs} gerilimi (2 V) için V_{ds} gerilimi değiştirilir ve I_{DSS} değişimi elde edilir. Şekil 4.7'de kapı kontaktlarının metalizasyonu sonrası şematik gösterimi ve bir aygıtın açılı SEM fotoğrafı gösterilmektedir. Burada kapı kontağı sonrası ilk DC ölçümler alınmıştır.



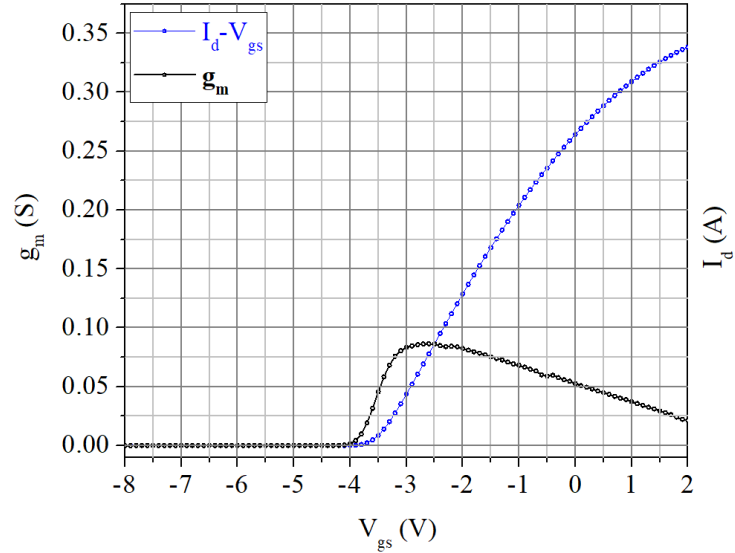
Şekil 4.7. (a) Kapı kontaktlarının şematik gösterimi ve (b) bir aygıtın açılı SEM fotoğrafı

Şekil 4.8'de, D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM6 noktasındaki karakteristik eğrileri (I_d - V_{ds} değişimi) gösterilmektedir. Bu şekilde V_{gs} gerilimi -8 V'dan 2 V'a 1'er V artırılarak, V_{ds} gerilimi ise 0 V'dan 10 V'a kadar değiştirilmiştir. Çizelge 4.3'de, PCM noktalarından alınan DC I_d - V_{ds} ölçüm sonuçlarından elde edilen I_{DSS} , V_{knee} ve R_{on} değerleri yer almaktadır. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT için ortalama I_{DSS} 1,39 A/mm, V_{knee} 4,6 V ve R_{on} 1,87 ohm.mm olarak bulunmuştur. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT için ortalama I_{DSS} 1,10 A/mm, V_{knee} 5,5 V ve R_{on} 2,88 ohm.mm olarak bulunmuştur.

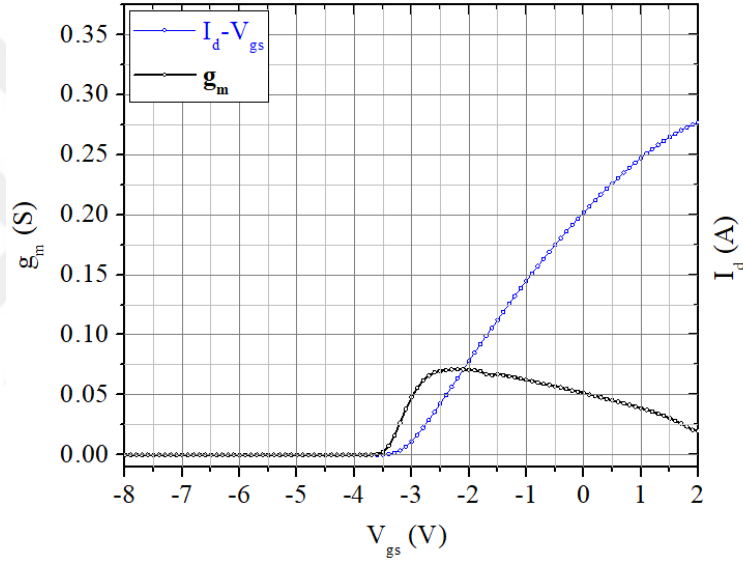


Şekil 4.8. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT’lerin I_d - V_{ds} değişimi.

Şekil 4.9’da D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’in PCM5 noktasındaki I_d - V_{gs} ölçüm eğrileri gösterilmektedir. V_{gs} gerilimi -8 V’den 2 V’a değiştirilirken V_{ds} gerilimi ise 7 V’da sabit tutularak ölçüm gerçekleştirilmiştir ve akçe gerilimi 7 V iken g_m ve V_{th} değerleri elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT’in ortalama maksimum geçiş iletkenliği 355 mS/mm ve V_{th} değeri -3,48 V olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin ortalama maksimum geçiş iletkenliği 280 mS/mm ve V_{th} değeri -3,12 V olarak elde edilmiştir. PCM noktalarında alınan DC I_d - V_{gs} ölçüm sonuçlarından elde edilen g_m ve V_{th} değerleri Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.



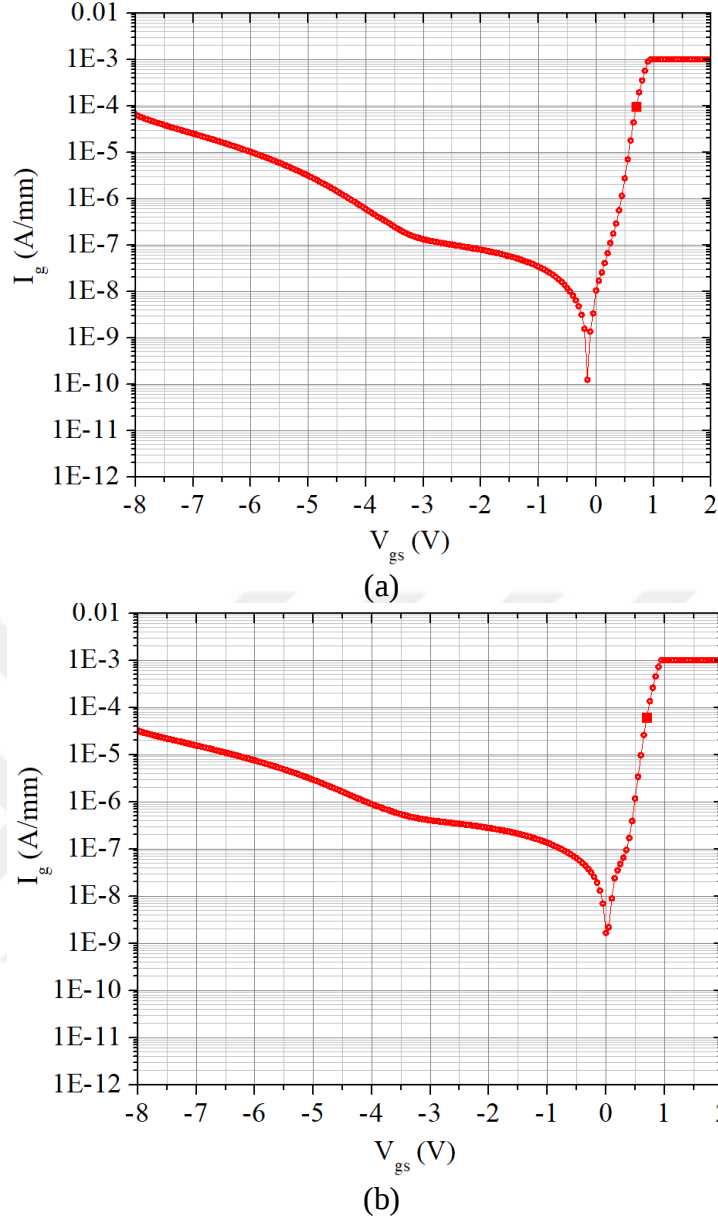
(a)



(b)

Şekil 4.9. D-S arası mesafe 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin I_d - V_{gs} değişimi.

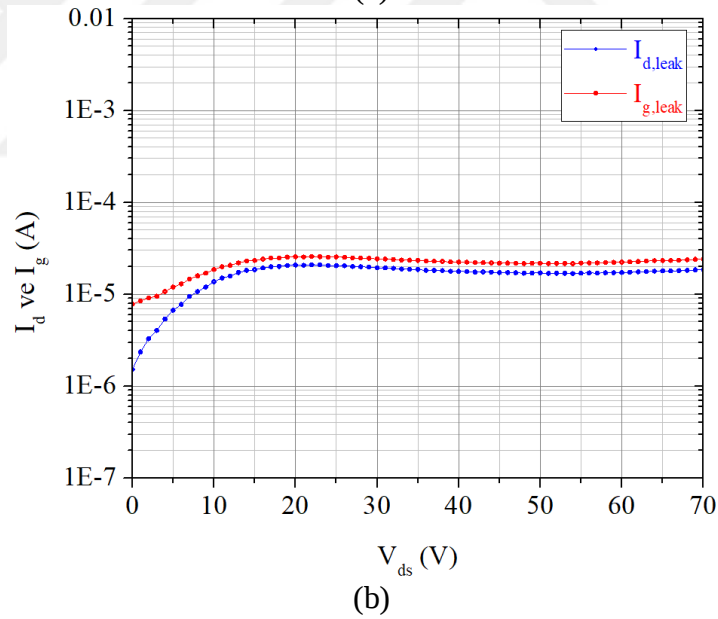
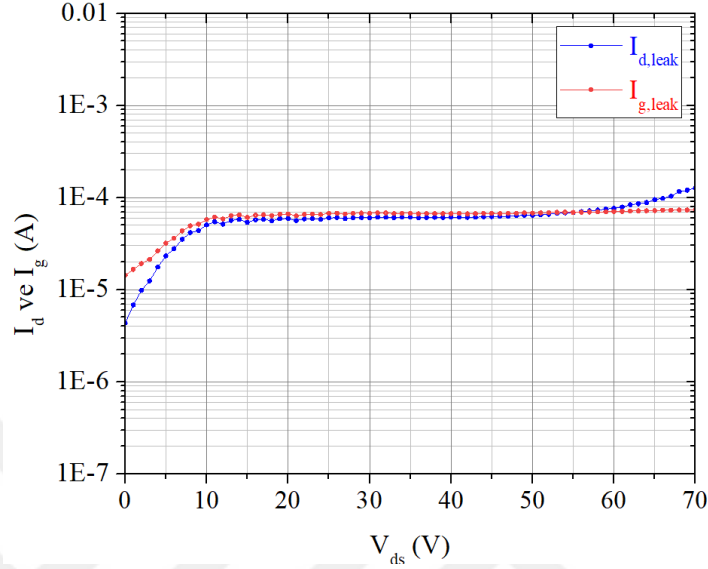
Şekil 4.10'de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM5 noktasından alınan ileri I-V eğrileri gösterilmektedir. DC ileri I-V ölçümü ile transistörün kapı eklemesinin Schottky davranışı incelenerek kapı açılma gerilimi ölçülür. I-V eğrileri çizdirilirken V_{ds} gerilimi 0 V'da sabit tutulmuş ve V_{gs} gerilimi -8 V'dan 2 V'a artırılmıştır. Kapı akımı 1mA/mm değerine ulaştığında, kapı açık olarak kabul edilir ve bu gerilim kapının açılma gerilimidir.



Şekil 4.10. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT’lerin ileri I-V grafiği.

DC bozulma gerilimi ölçümlerinde ise kapı sabit V_{gs} gerilimi ile kapalı durumda tutulurken, V_{ds} gerilimi sıfırdan pozitif yönde değiştirilir ve yeterince yüksek V_{ds} gerilimi için elde edilen kapı ve akaç akımları sırasıyla $I_{g,leak}$ ve $I_{d,leak}$ akımlarıdır. Ölçümlerde V_{gs} -8 V’da (kapalı durumda) tutulurken, V_{ds} gerilimi ise 0 V’dan 70 V’a kadar artırılmıştır. V_{ds} geriliminin 70 V olması durumundaki kapı ve akaç akım kaçakları dikkate alınmıştır. Şekil 4.11’de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin PCM5 noktasındaki ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, D-S arası mesafesi 3 μm olan transistör için kaçak akım daha yüksek, D-S arası mesafesi 6

μm olan transistör içinse kaçak akım daha düşük elde edilmiştir. Çizelge 4.3’de D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin PCM noktalarından alınan DC bozulma gerilim sonuçları ile elde edilen $I_{g,leak}$ ve $I_{d,leak}$ kaçak akımları gösterilmiştir.



Şekil 4.11. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT’lerin bozulma gerilimi değişimi.

Çizelge 4.3’de D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm için PCM noktalarından kapı metalizasyon adımı sonrası alınan DC ölçüm sonuçları yer almaktadır. Akaç kaçak akımları, D-S arası mesafesi 3 μm olan transistörde ortalama 484 $\mu\text{A}/\text{mm}$ ve D-S arası mesafesi 6 μm olan transistörde ise ortalama 77 $\mu\text{A}/\text{mm}$ olarak bulunmuştur. Kapı kaçak

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

akımı ise D-S arası mesafe 3 μm olan transistör için ortalama 257 $\mu\text{A}/\text{mm}$ ve D-S arası mesafesi 6 μm olan transistör içinse ortalama 97 $\mu\text{A}/\text{mm}$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.3. Kapı metalizasyon adımı sonrası D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin DC ölçüm sonuçları.

(a)

PCM Numarası (D-S 3 μm)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V
PCM1*	2,97	1,17	5,2	3,36	274	554	150
PCM2	1,89	1,41	4,6	3,32	360	794	353
PCM3	1,69	1,41	4,5	3,49	362	559	271
PCM4*	3,19	0,94	4,7	3,28	212	349	132
PCM5	1,96	1,38	4,7	3,51	346	507	293
PCM6	1,84	1,38	4,6	3,49	353	385	207
PCM9	1,88	1,38	4,6	3,47	352	224	180
Ortalama	1,87	1,39	4,6	3,48	355	484	257

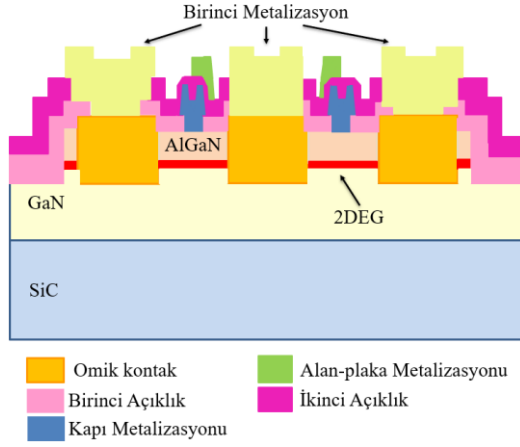
*Diğer ölçüm noktalarında elde edilen sonuçlara benzer çıkmadığından ortalama hesaplanırken PCM1 ve PCM4 satırları dikkate alınmamıştır.

(b)

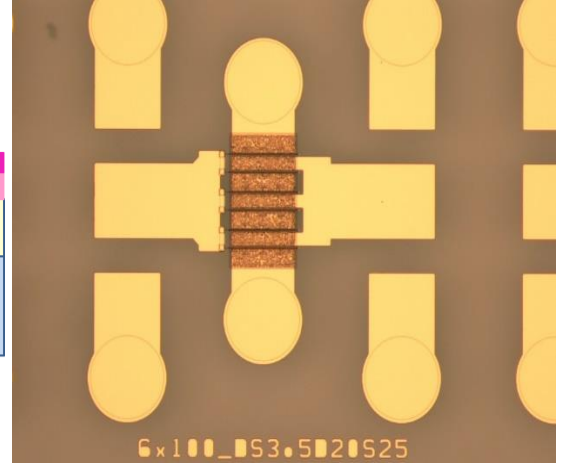
PCM Numarası (D-S 6 μm)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V
PCM1	3,02	1,09	5,5	3,08	273	81	99
PCM4	2,86	1,10	5,4	3,15	279	74	91
PCM5	3,01	1,09	5,5	3,11	275	78	99
PCM6	2,75	1,12	5,3	3,11	285	74	97
PCM7	2,89	1,10	5,5	3,15	281	54	66
PCM10	2,77	1,11	5,4	3,12	285	96	118
Ortalama	2,88	1,10	5,5	3,12	280	77	97

4.3. Birinci Metalizasyon Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.12'de birinci metalizasyon sonrası kontaklarının şematik gösterimi ve aygıtın optik fotoğrafı gösterilmektedir.



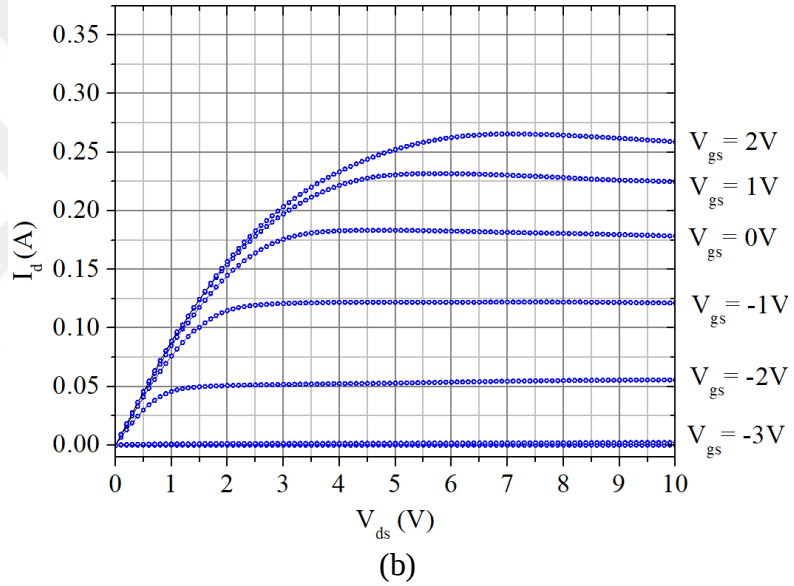
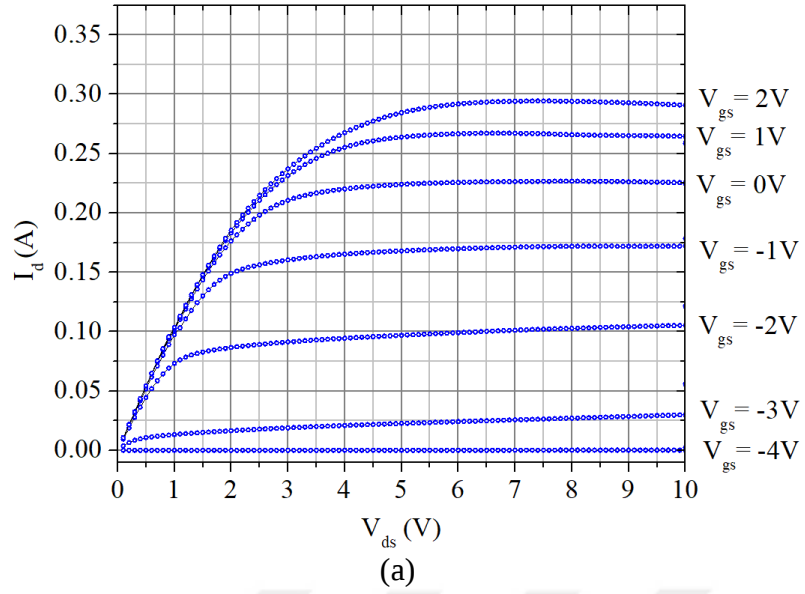
(a)



(b)

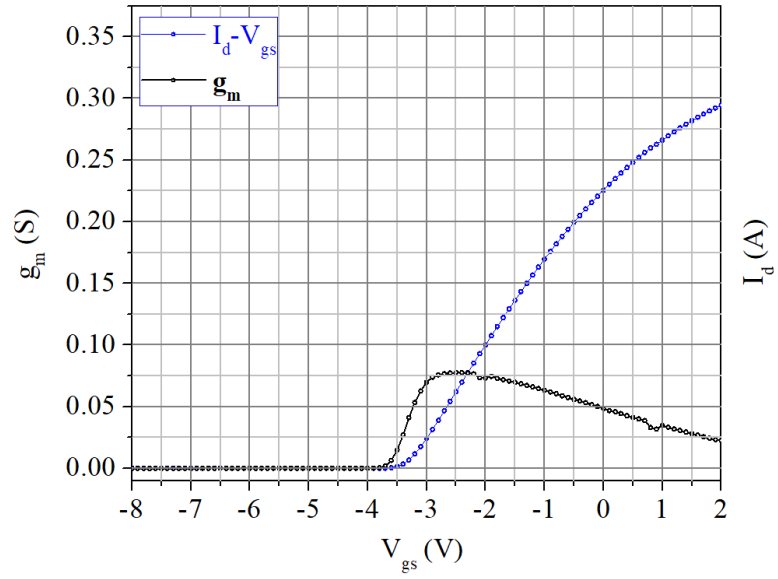
Şekil 4.12. (a) Birinci metalizasyon sonrası kontaklarının şematik gösterimi ve (b) aygıtın optik fotoğrafı.

Şekil 4.13’de, D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin birinci metalizasyon adımı sonrası PCM6 noktasındaki I_d - V_{ds} değişimi gösterilmektedir. Bu şekilde V_{gs} gerilimi -8 V’den 2 V’a, V_{ds} gerilimi ise 0 V’den 10 V’a kadar değiştirilmiştir. PCM noktalarında alınan DC I_d - V_{ds} ölçüm sonuçları kullanılarak bulunan I_{DSS} , V_{knee} ve R_{on} değerleri Çizelge 4.4’de gösterilmektedir. Birinci metalizasyon adımı sonrası I_{DSS} ve R_{on} değerlerinde artış meydana gelmiş ve V_{knee} değeri azalmıştır. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT için ortalama I_{DSS} 1,17 A/mm, V_{knee} 4,7 V ve R_{on} 2,44 ohm.mm olarak bulunmuştur. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT için ortalama I_{DSS} 1,05 A/mm, V_{knee} 5,1 V ve R_{on} 2,94 ohm.mm olarak bulunmuştur.

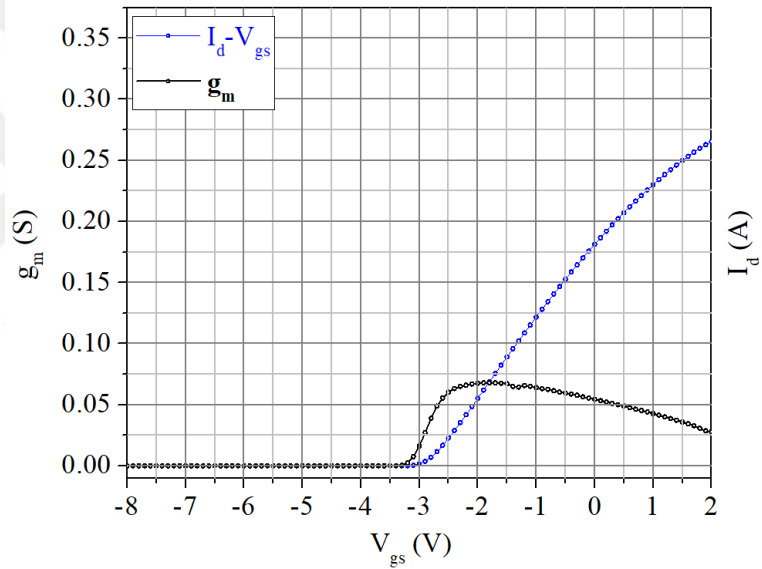


Şekil 4.13. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT’lerin I_d - V_{ds} değişimi.

Şekil 4.14’de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin birinci metalizasyon adımı sonrası PCM5 noktasındaki I_d - V_{gs} ölçüm eğrileri gösterilmektedir. D-S arası mesafe 3 μm için 2x125 μm HEMT’in ortalama maksimum geçiş iletkenliği 305 mS/mm ve V_{th} değeri -3,33 V olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT’in ortalama maksimum geçiş iletkenliği ise 268 mS/mm ve V_{th} değeri -2,82 V olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.4’de D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin PCM noktalarından alınan DC I_d - V_{gs} ölçüm sonuçları ile elde edilen g_m ve V_{th} değerleri gösterilmiştir.



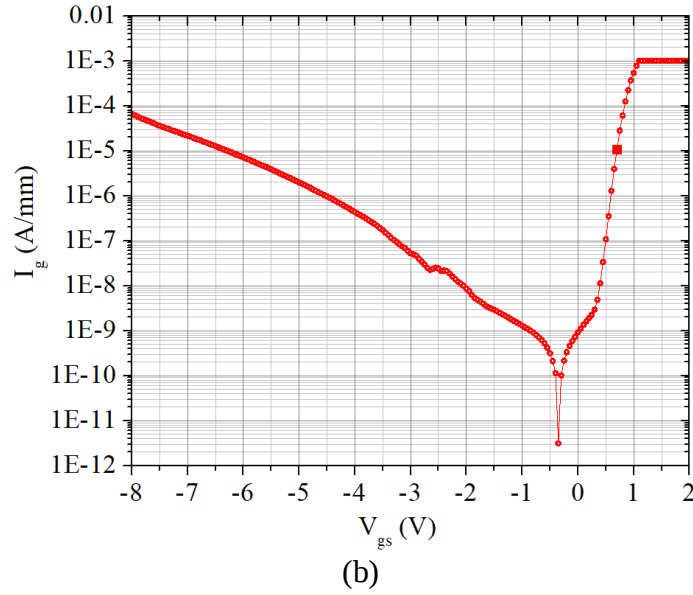
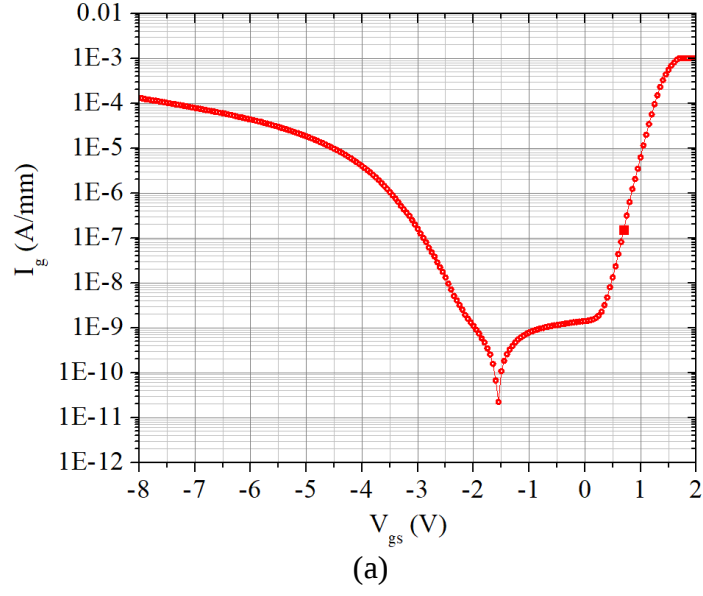
(a)



(b)

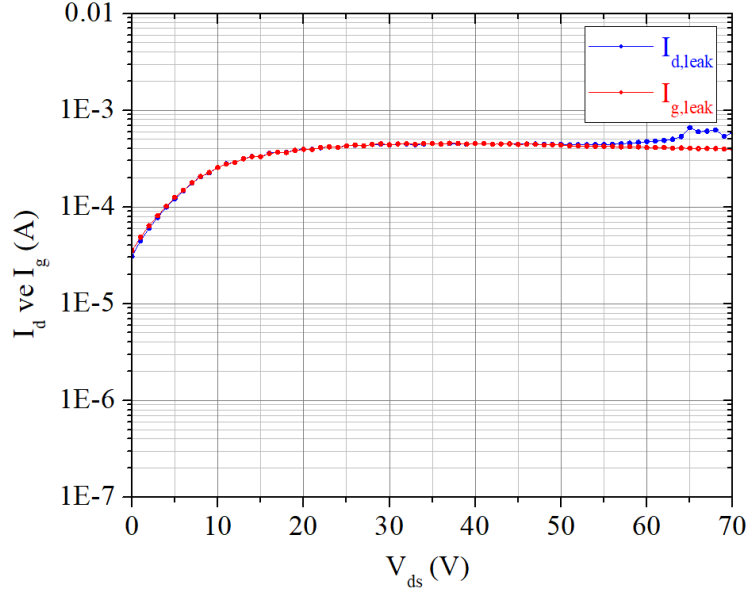
Şekil 4.14. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin I_d - V_{gs} değişimi.

Şekil 4.15'de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM5 noktasından alınan ileri I-V eğrileri gösterilmektedir.

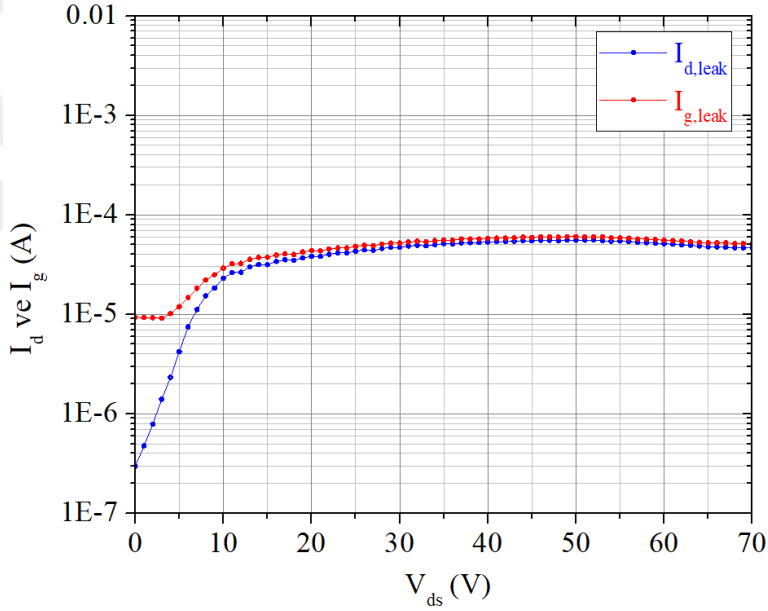


Şekil 4.15. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin ileri I-V grafiği.

DC bozulma gerilimi ölçümlerinde kapı sabit V_{gs} gerilimi ile kapalı durumda tutulurken, V_{ds} gerilimi sıfırdan pozitif yönde değiştirilir ve yeterince yüksek V_{ds} gerilimi için elde edilen kapı ve akaç akımları sırasıyla $I_{g,leak}$ ve $I_{d,leak}$ akımlarıdır. Şekil 4.16'da D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM5 noktasındaki ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Çizelge 4.4'de D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM noktalarından alınan DC bozulma gerilim sonuçları ile elde edilen $I_{g,leak}$ ve $I_{d,leak}$ kaçak akımları gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.16. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin bozulma gerilimi değişimi.

Çizelge 4.4'de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM noktalarında gerçekleştirilen birinci metalizasyon sonrasına ait DC ölçüm verileri yer almaktadır. Akaç ve kapı kaçak akım değerleri 70 V'da okunan değerlerdir. Bu işlem sonrasında kaçak akım değerlerinde bir artış olduğu görülmüştür. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT'in, akaç kaçak akımı kapı metalizasyon sonrası ölçümünde ortalama 484 $\mu\text{A/mm}$ iken birinci metalizasyon sonrası ortalama 3.516 $\mu\text{A/mm}$ ve kapı akım kaçağı ortalama 257 $\mu\text{A/mm}$ iken birinci metalizasyon sonrası ortalama 2.439

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

$\mu\text{A/mm}$ olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi $6\ \mu\text{m}$ olan $2\times 125\mu\text{m}$ HEMT'in, akaç kaçak akımı kapı metalizasyon sonrası ölçümünde ortalama $77\ \mu\text{A/mm}$ iken birinci metalizasyon sonrası ortalama $277\ \mu\text{A/mm}$ ve kapı akım kaçağı ortalama $97\ \mu\text{A/mm}$ iken birinci metalizasyon sonrası ortalama $296\ \mu\text{A/mm}$ olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Birinci metalizasyon adımı sonrası D-S arası mesafe $3\ \mu\text{m}$ (a) ve $6\ \mu\text{m}$ (b) olan $2\times 125\mu\text{m}$ HEMT'lerin DC ölçüm sonuçları.

(a)

PCM Numarası (D-S $3\mu\text{m}$)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @ 70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @ 70V
PCM1	2,57	1,17	4,8	3,33	297	1.654	2.095
PCM2	2,46	1,17	4,5	3,29	303	6.960	3.428
PCM3	2,29	1,16	4,4	3,14	303	3.232	1.300
PCM4	2,35	1,18	4,6	3,31	310	2.362	1.589
PCM5	2,53	1,16	5,1	3,37	309	2.077	1.778
PCM6	2,30	1,19	4,5	3,31	316	4.600	2.054
PCM7	2,42	1,17	4,7	3,36	308	5.240	4.480
PCM8*	2,75	1,15	4,6	3,33	289	39.720	>40.000
PCM9	2,54	1,16	4,8	3,41	297	2.792	3.311
PCM10	2,35	1,19	4,6	3,37	311	4.560	2.777
Ortalama	2,44	1,17	4,7	3,33	305	3.516	2.439

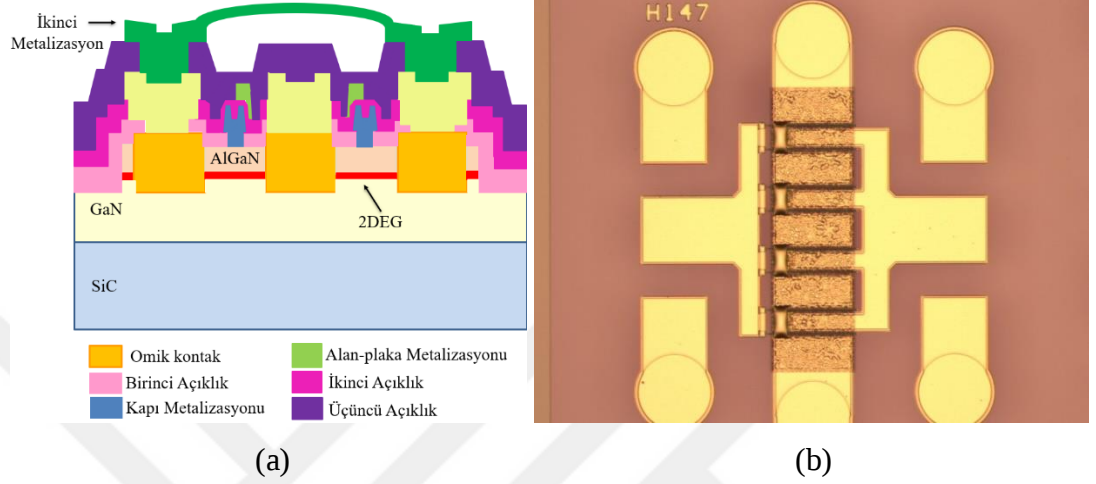
*Kapı kaçak akımı ölçüm cihazının limitinden (40mA/mm) büyük olduğundan ortalama hesaplanırken PCM8 satırı dikkate alınmamıştır.

(b)

PCM Numarası (D-S $6\mu\text{m}$)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @ 70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @ 70V
PCM1	3,08	1,03	5,0	2,77	260	349	369
PCM4	2,91	1,05	5,1	2,90	267	281	303
PCM5	3,08	1,04	5,1	2,80	262	217	224
PCM6	2,81	1,06	5,0	2,82	272	186	205
PCM7	2,93	1,05	5,1	2,81	274	272	289
PCM10	2,82	1,05	4,9	2,82	269	338	376
Ortalama	2,94	1,05	5,1	2,82	268	277	296

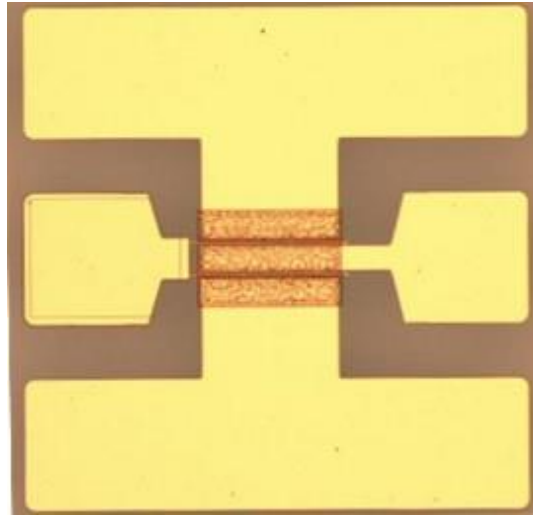
4.4. İkinci Metalizasyon Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.17’de ikinci metalizasyon sonrası yani ön yüz sonu HEMT’in şematik gösterimi ve aygıtın fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 4.17. (a) Ön yüz sonu HEMT’in şematik gösterimi ve (b) aygıtın fotoğrafı

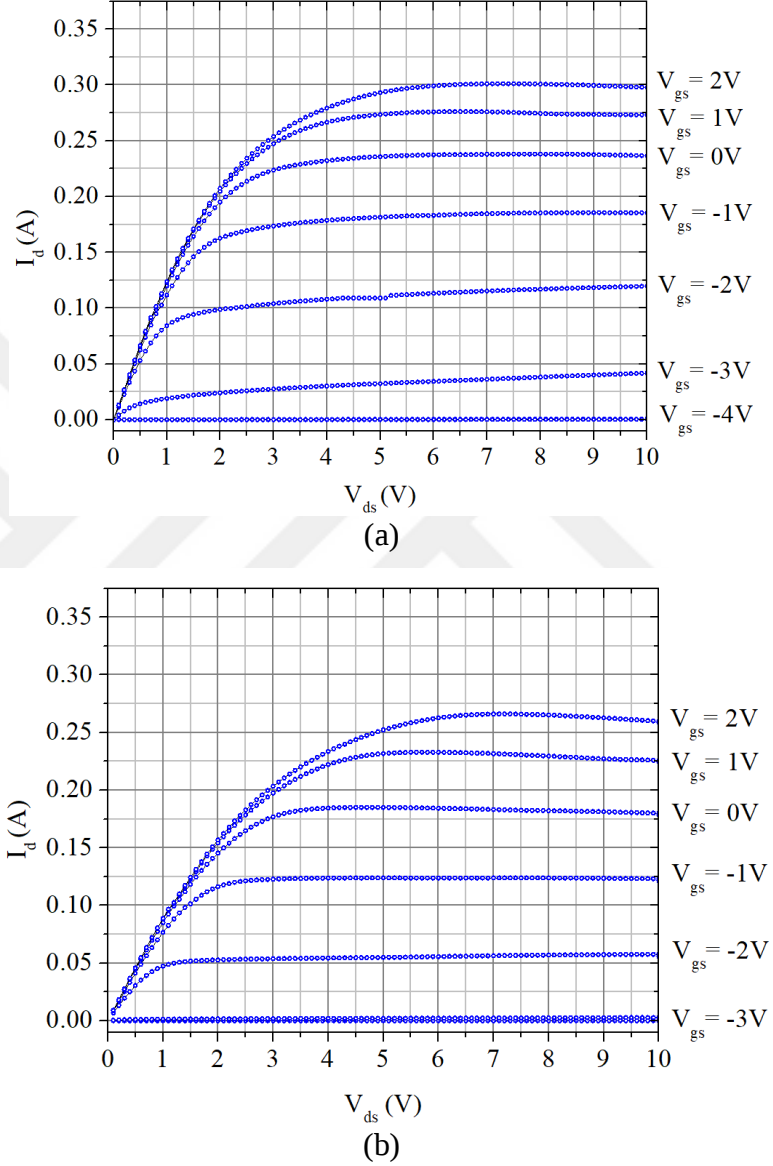
Ön yüz sonunda DC ölçümlerin yapıldığı kontrol transistörü ise Şekil 3.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18. Ön yüz sonu kontrol HEMT

Şekil 4.19’da D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin ikinci metalizasyon adımı sonrası için PCM6 noktasındaki I_d - V_{ds} değişimi gösterilmektedir. I_d -

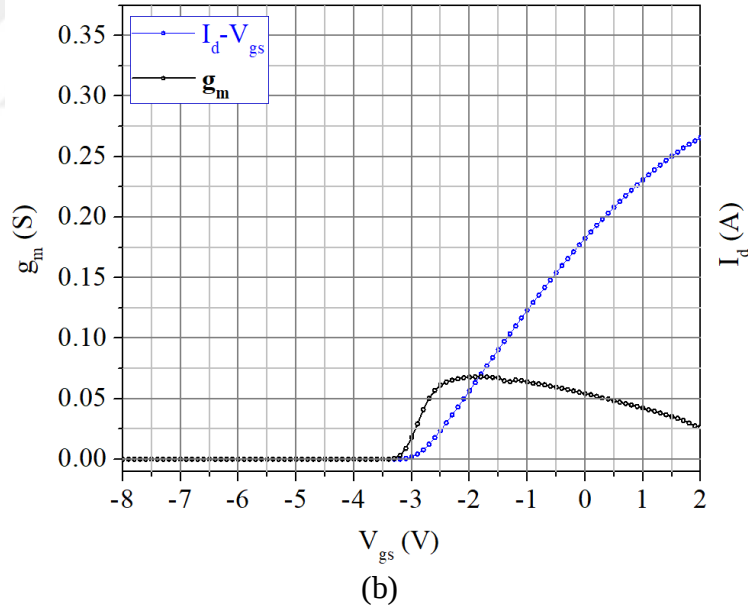
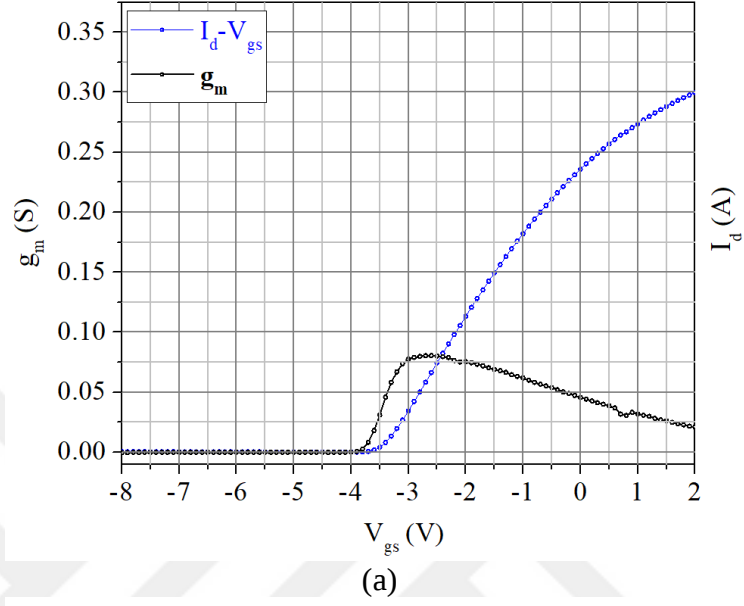
V_{ds} değişimi elde edilirken V_{gs} gerilimi -8 V'dan 2 V'a, V_{ds} gerilimi ise 0 V'dan 10 V'a kadar değiştirilmiştir. Çizelge 4.5'de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin DC I_d - V_{ds} ölçüm sonuçları ile elde edilen I_{DSS} , V_{knee} ve R_{on} değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.19. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin I_d - V_{ds} değişimi.

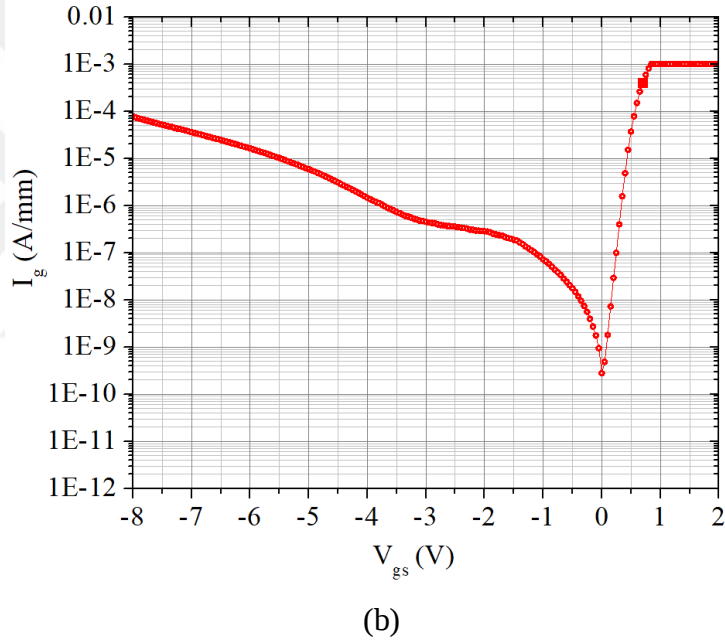
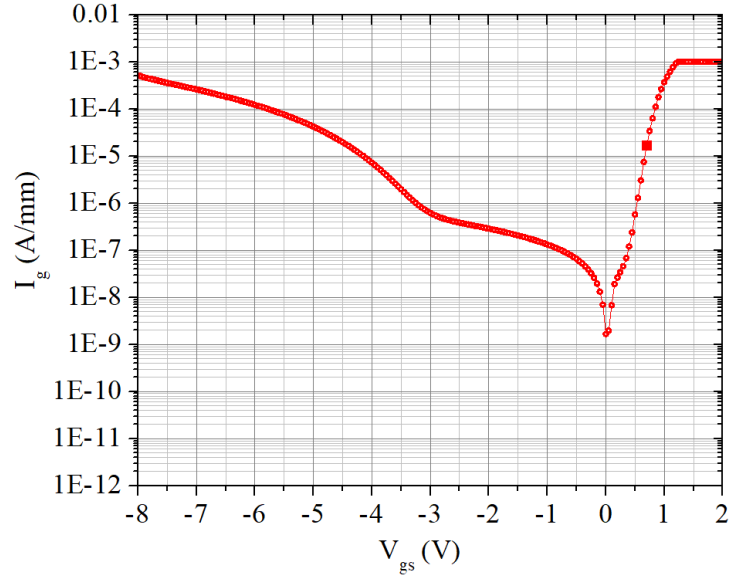
Şekil 4.20'de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM5 noktasındaki I_d - V_{gs} ölçüm eğrileri gösterilmektedir. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama maksimum geçiş iletkenliği 325 mS/mm ve V_{th} değeri -3,37 V olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama

maksimum geçiş 267 mS/mm ve V_{th} değeri -2,92 V olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.5’de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan HEMT’lerin PCM noktalarından alınan DC I_d-V_{gs} ölçüm sonuçları ile elde edilen g_m ve V_{th} değerleri gösterilmiştir.



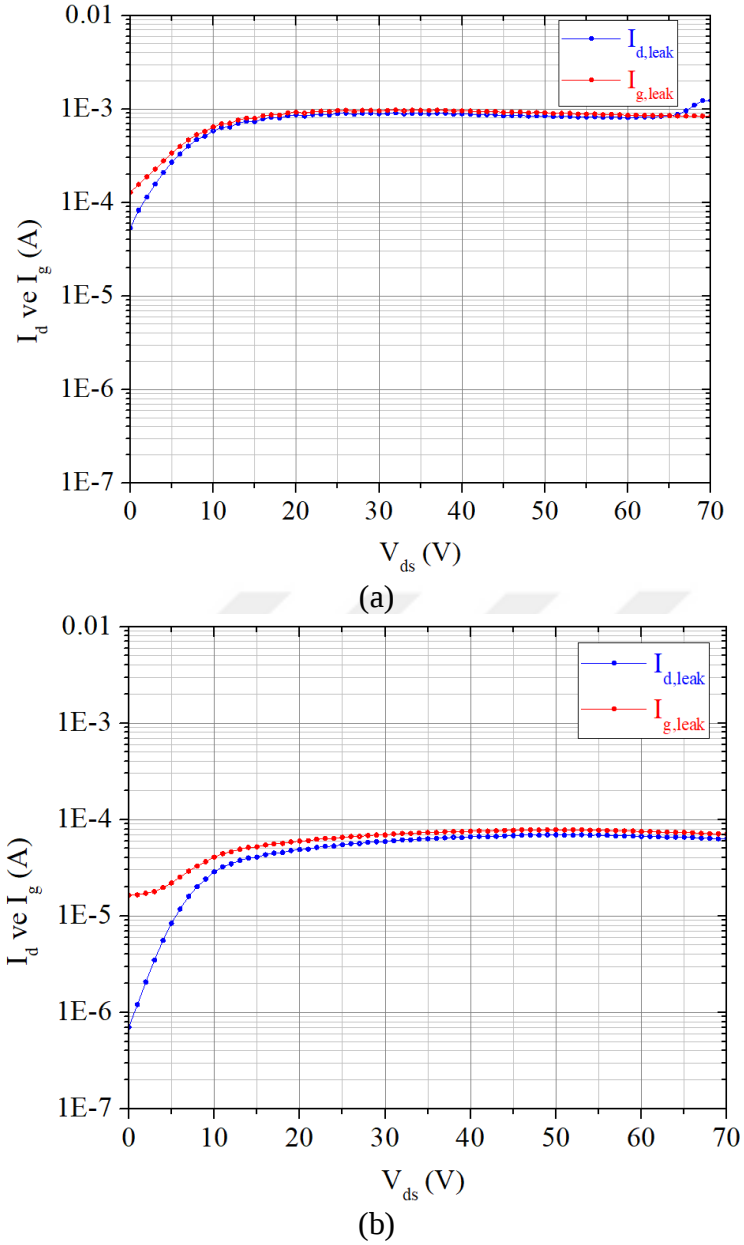
Şekil 4.20. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT’lerin I_d-V_{gs} değişimi.

Şekil 4.21’de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin PCM5 noktasından alınan ileri I-V eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.21. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT’lerin ileri I-V grafiği.

Şekil 4.22’de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin PCM5 noktasındaki ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Çizelge 4.5’de D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin PCM noktalarından alınan DC bozulma gerilim sonuçları ile elde edilen $I_{g,leak}$ ve $I_{d,leak}$ kaçak akımları gösterilmiştir.



Şekil 4.22. D-S arası mesafesi 3 µm (a) ve 6 µm (b) olan 2x125 µm HEMT’lerin bozulma gerilimi değişimi.

Çizelge 4.5’de sırasıyla D-S arası mesafesi 3 µm ve 6 µm olan 2x125 µm HEMT’lerin PCM noktalarında gerçekleştirilen ikinci metalizasyon sonrasına ait DC ölçüm verileri yer almaktadır. Akaç kaçak akım değerleri, ölçüm verileri değerlendirildiğinde, D-S arası mesafesi 3 µm olan 2x125 µm HEMT için ortalama 3.854 µA/mm ve D-S arası mesafesi 6 µm olan 2x125 µm HEMT içinse ortalama 409 µA/mm olarak elde edilmiştir. Kapı kaçak akım değerleri, ölçüm verileri değerlendirildiğinde, D-S arası mesafesi 3 µm olan 2x125 µm HEMT için ortalama 3.084 µA/mm ve D-S arası

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT için ise ortalama 497 $\mu\text{A/mm}$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5. İkinci metalizasyon adımı sonrası D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT’lerin DC ölçüm sonuçları.

(a)

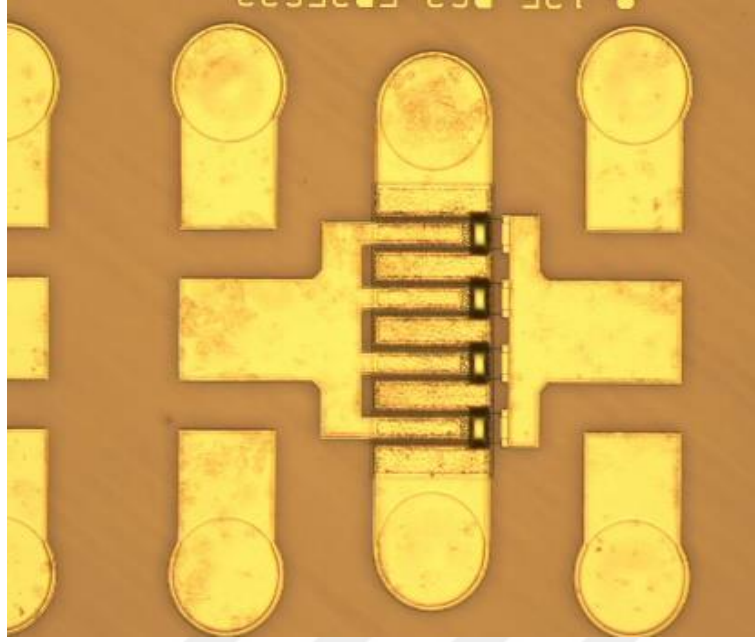
PCM Numarası (D-S 3 μm)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @70V
PCM1	2,12	1,19	4,5	3,26	318	2.659	1.828
PCM2	1,97	1,19	4,2	3,32	328	5.000	2.884
PCM3	2,06	1,17	4,3	3,20	310	3.444	3.098
PCM4	1,91	1,20	4,4	3,43	322	4.920	3.362
PCM5	2,01	1,20	4,4	3,36	317	5.120	3.026
PCM6	1,85	1,20	4,2	3,39	328	3.520	3.390
PCM7	1,96	1,19	4,4	3,40	318	2.890	2.976
PCM8	2,04	1,19	4,3	3,38	330	2.809	2.853
PCM9	2,04	1,18	4,4	3,41	314	38.960	131
PCM10	1,91	1,21	4,3	3,35	331	4.400	4.000
Ortalama	1,98	1,19	4,3	3,37	325	3.854	3.084

(b)

PCM Numarası (D-S 6 μm)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A/mm}$) @70V
PCM1	3,08	1,03	5,1	2,77	260	527	567
PCM4	2,91	1,05	5,2	2,94	267	455	506
PCM5	3,08	1,03	5,2	2,82	262	346	471
PCM6	2,81	1,06	5,0	2,84	272	253	284
PCM7	2,92	1,05	5,2	2,80	270	306	443
PCM10	2,82	1,06	5,0	2,90	266	768	921
Ortalama	2,93	1,05	5,1	2,92	267	409	497

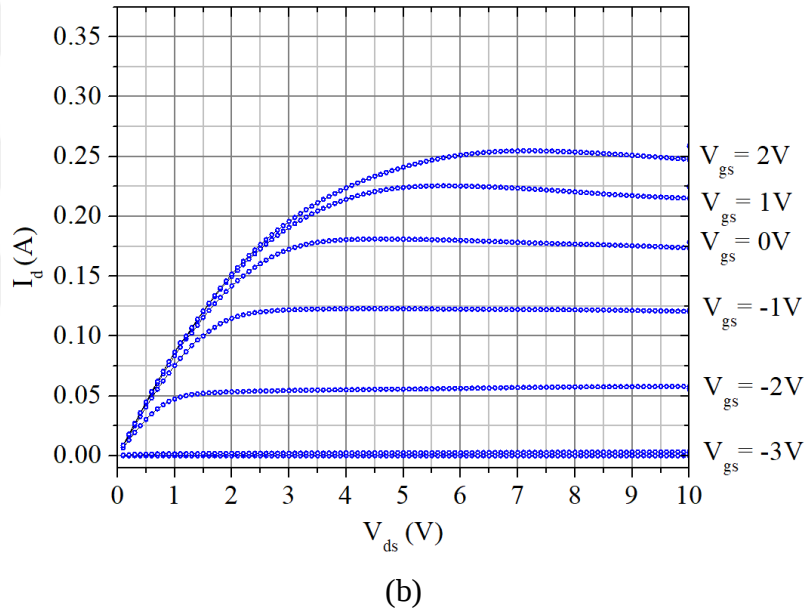
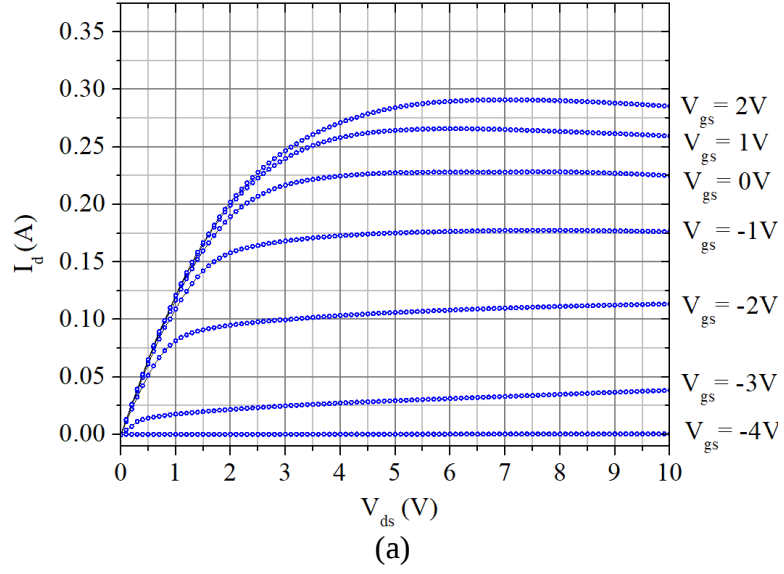
4.5. Arka Yüz Adımı Sonrası Elde Edilen DC Ölçüm Sonuçları

Arka yüz adımı fabrikasyonun son adımıdır. Şekil 4.23’de tüm fabrikasyonu tamamlanmış mikroşerit HEMT’in fotoğrafı gösterilmektedir.



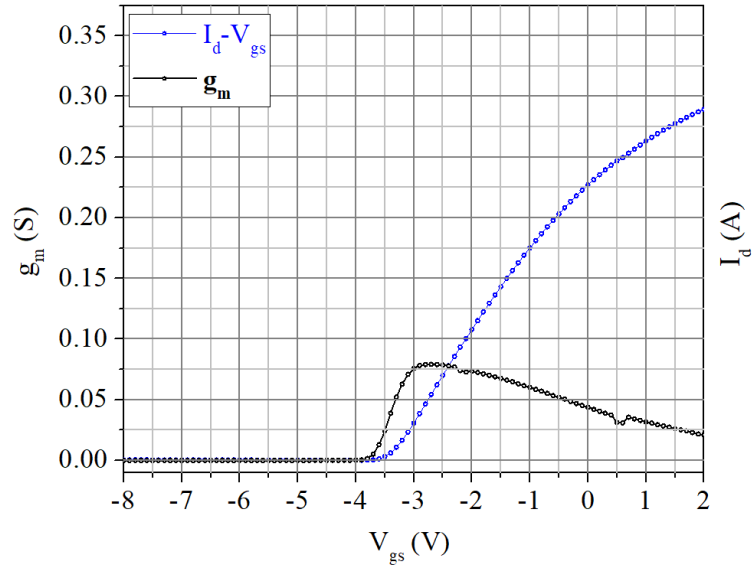
Şekil 4.23. Tüm üretim sonu elde edilen mikroşerit HEMT

Şekil 4.24’de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin tipik bir arka yüz adımı sonrası PCM6 noktasındaki I_d - V_{ds} değişimi gösterilmektedir. V_{gs} gerilimi -8 V’dan 2 V’a, V_{ds} gerilimi ise 0 V’dan 10 V’a kadar değiştirilmiştir. Çizelge 4.6’da, D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT’lerin PCM noktalarında alınan DC, I_d - V_{ds} ölçüm sonuçlarından elde edilen I_{DSS} , V_{knee} ve R_{on} değerleri gösterilmektedir. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT için ortalama I_{DSS} 1,16 A/mm, V_{knee} 4,3 V ve R_{on} 2,04 ohm.mm olarak bulunmuştur. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT için ortalama I_{DSS} 1,01 A/mm, V_{knee} 5,1 V ve R_{on} 2,98 ohm.mm olarak bulunmuştur.

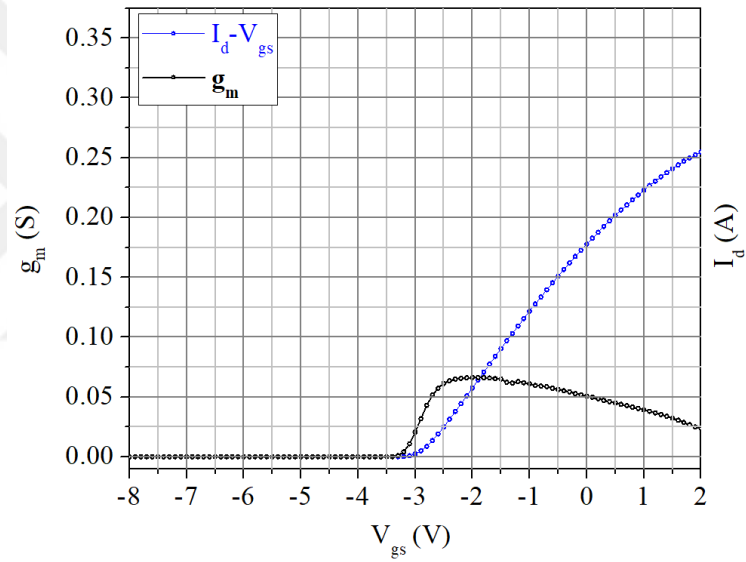


Şekil 4.24. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin I_d - V_{ds} değişimi.

Şekil 4.25'de D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM5 noktasındaki I_d - V_{gs} ölçüm eğrileri gösterilmektedir. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama maksimum geçiş iletkenliği 318 mS/mm ve V_{th} değeri -3,37 V olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama maksimum geçiş iletkenliği 262 mS/mm ve V_{th} değeri -2,89 V olarak elde edilmiştir. HEMT'lerin PCM noktalarından alınan DC I_d - V_{gs} ölçümlerinden elde edilen g_m ve V_{th} değerleri, Çizelge 4.6'da sunulmaktadır.



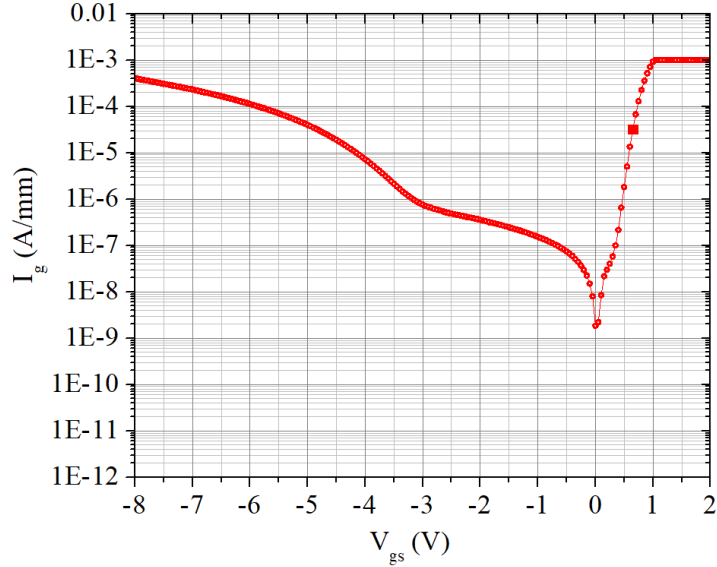
(a)



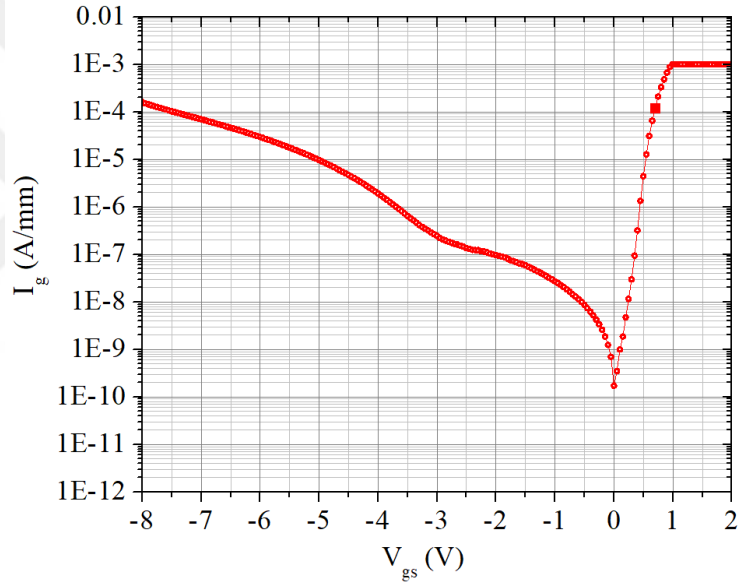
(b)

Şekil 4.25. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan $2 \times 125 \mu\text{m}$ HEMT'lerin I_d - V_{gs} değişimi.

Şekil 4.26'da D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan $2 \times 125 \mu\text{m}$ HEMT'lerin PCM5 noktasından alınan ileri I-V eğrileri gösterilmektedir.



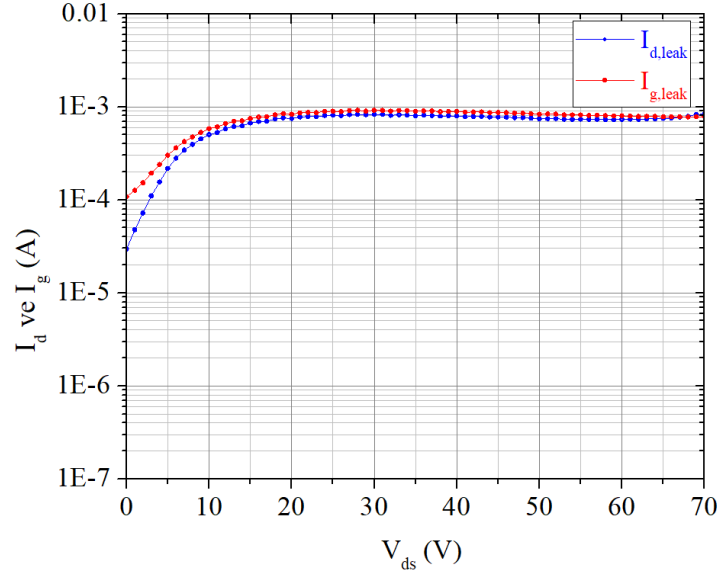
(a)



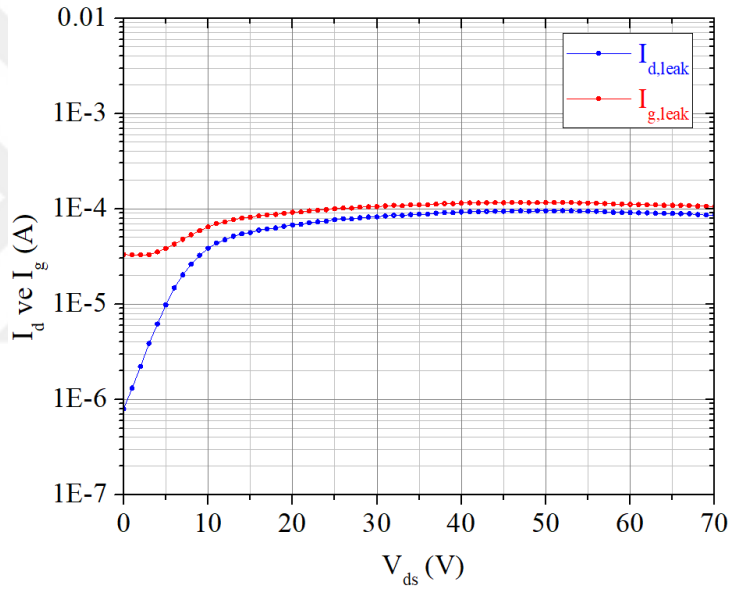
(b)

Şekil 4.26. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin ileri I-V grafiği.

Şekil 4.27'da D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM5 noktasındaki ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Çizelge 4.6'da D-S arası mesafe 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM noktalarından alınan DC bozulma gerilim sonuçları ile elde edilen $I_{g,leak}$ ve $I_{d,leak}$ kaçak akımları gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.27. D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin bozulma gerilimi değişimi.

Çizelge 4.6'da D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm HEMT'lerin PCM noktalarında gerçekleştirilen arka yüz sonrasına ait DC ölçüm verileri yer almaktadır. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT için, akaç kaçak akımı ikinci metal sonrası ölçümünde ortalama 3.854 $\mu\text{A/mm}$ iken arka yüz sonrası ortalama 3.363 $\mu\text{A/mm}$ ve kapı akım kaçağı ortalama 3.084 $\mu\text{A/mm}$ iken arka yüz sonrası ortalama 3.052 $\mu\text{A/mm}$ olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in, akaç kaçak akımı ikinci metal sonrası ölçümünde ortalama 409 $\mu\text{A/mm}$ iken arka yüz sonrası

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

ortalama 487 $\mu\text{A}/\text{mm}$ ve kapı akım kaçağı ortalama 497 $\mu\text{A}/\text{mm}$ iken arka yüz sonrası ortalama 541 $\mu\text{A}/\text{mm}$ olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. Arka yüz sonrası D-S arası mesafesi 3 μm (a) ve 6 μm (b) olan 2x125 μm HEMT'lerin DC ölçüm sonuçları.

(a)

PCM Numarası (D-S 3 μm)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V
PCM1	2,15	1,16	4,4	3,38	310	4.960	3.668
PCM2	2,10	1,16	4,2	3,33	326	3.410	2.892
PCM3	2,08	1,15	4,3	3,25	307	2.827	2.470
PCM4	1,96	1,16	4,3	3,40	316	3.332	3.126
PCM5	2,07	1,16	4,4	3,37	315	2.800	2.232
PCM6	1,90	1,17	4,2	3,39	327	3.679	2.861
PCM7	1,97	1,16	4,3	3,42	314	3.902	3.391
PCM8	2,06	1,16	4,2	3,33	327	1.873	1.804
PCM9	2,13	1,14	4,4	3,43	308	3.136	3.772
PCM10	1,96	1,18	4,2	3,36	325	3.816	4.240
Ortalama	2,04	1,16	4,3	3,37	318	3.363	3.052

(b)

PCM Numarası (D-S 6 μm)	R_{on} (ohm mm)	I_{DSS} (A/mm)	V_{knee} (V)	V_{th} (V) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	g_{m} (mS/mm) @ $V_{\text{d}} = 7,0\text{V}$	$I_{\text{d,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V	$I_{\text{g,leak}}$ ($\mu\text{A}/\text{mm}$) @ 70V
PCM1	3,13	1,00	5,1	2,81	257	660	698
PCM4	2,96	1,01	5,2	2,94	264	467	497
PCM5	3,12	1,00	5,1	2,85	261	478	507
PCM6	2,87	1,02	5,1	2,87	265	344	424
PCM7	2,96	1,01	5,2	2,93	262	315	461
PCM10	2,88	1,02	5,0	2,91	262	917	1.089
Ortalama	2,98	1,01	5,1	2,89	262	487	541

D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in, kapı baş uzunluğu ve alan levhası uzunluğu arttırılarak kapı altında akaç tarafına doğru oluşan keskin elektrik alan piklerinin daha düzgün bir form alacak şekilde oluşturulması sağlanmıştır.

Kapı-kaynak (G-S) arası mesafe arttırılarak kapı metali ile kaynak metali arasında oluşan elektrik alanın şiddeti azaltılmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte D-S arası mesafe

arttırılarak kapı metalinin akaç metaline olan uzaklığı arttırılmış ve bu şekilde de kapı metali ile akaç metali arasında oluşan elektrik alan şiddeti azaltılmıştır. Ancak gerek G-S arası mesafenin gerekse de D-S arası mesafenin artışı, 2DEG boyunca hem G-S kontak dirençleri hem de G-D kontak dirençleri arasında kalan yüzeyin direncinin artmasına neden olmuştur.

Kapı uzunluğunun artışı kapı metalinin direncini düşürse de kapı altında yer alan kanal boyunca kanal direncinin artmasına neden olmuştur. Tüm bu etkiler göz önünde bulundurulduğunda D-S arası mesafesi 3 μm olan aygıt yapısından D-S arası mesafesi 6 μm olan aygıt yapısına geçildiğinde her ne kadar elektrik alandaki iyileştirmeler ve kontaklar arasındaki direnç artışı kaçak akımları iyileştirmiş olsa da söz konusu direnç değerlerindeki artışla aynı zamanda transistörlerin R_{on} direncinin artmasına ve buna bağlı olarak da maksimum akım yoğunluğunun ve g_m değerlerinin düşmesine de yol açılmıştır (Yadav et al. 2020).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Fabrikasyon adımları için DC karakterizasyonla elde edilen sonuçlar üretim kaynaklı sorunların belirlenebilmesi açısından değerlidir. İlerleyen fabrikasyon adımları sırasında transistör parametrelerindeki değişimler adım adım incelenmelidir. Bu nedenle her bir kontrol HEMT'inin DC karakterizasyonu büyük bir öneme sahiptir. HEMT yapıların üretimi sırasında transistörlerinin elektriksel olarak DC karakterizasyonu yapılarak üretim adımlarının başarısı hakkında bilgi sahibi olunabilir ve sürecin devam edip etmeyeceğine karar verilir. Bu tez çalışmasında, AlGaIn/GaN mikroserit HEMT'lerde fabrikasyon adımları için DC karakterizasyon yapılmıştır. Ölçümü yapılan kontrol HEMT'leri D-S arası mesafesi 3 μm ve 6 μm olan 2x125 μm boyutunda tükenme modu transistörlerdir.

Direnç ölçümü ile TLM desenleri üzerinden R_c ve R_s direnç değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların birbirine yakın çıktığı gözlemlenmiştir yani homojen bir dağılım söz konusudur. Ortalama R_c değeri 0,46 ohm.mm ve R_s değeri 211 ohm/sq olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar HEMT fabrikasyonuna devam edilebileceğini göstermiştir.

Transistörlerin DC karakterizasyonu için belirli fabrikasyon adımlarında DC ölçümler yapılmıştır. Ölçümler, PCM noktalarında bulunan kontrol HEMT'leri üzerinde gerçekleştirilmiştir. PCM noktalarında dört adet fiziksel boyutları aynı olan HEMT'lerden sırasıyla kapı metalizasyon adımı sonrası, birinci metalizasyon adımı sonrası, ikinci metalizasyon adımı sonrası ve son olarak arka yüz işlemleri sonrasında ölçümler alınmıştır. Ölçümler sonucunda HEMT'in başarı ile üretildiği gözlemlenmiştir.

PCM noktalarında gerçekleştirilen DC ölçümlerde D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama I_{DSS} değeri 1,16 A/mm ve ortalama R_{on} direnci 2,04 ohm.mm olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama I_{DSS} değeri 1,01 A/mm ve ortalama R_{on} direnci 2,98 ohm.mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT için I_{DSS} daha düşük ve R_{on} ise daha büyüktür.

PCM noktalarında gerçekleştirilen DC ölçümlerde D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama maksimum geçiş iletkenliği 318 mS/mm olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in ortalama maksimum geçiş iletkenliği ise 262 mS/mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in geçiş iletkenliği 56 mS/mm daha düşüktür.

Ayrıca, D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT'in akaç kaçak akımı ortalama 3.363 $\mu\text{A/mm}$ ve kapı kaçak akımı ortalama 3.052 $\mu\text{A/mm}$ olarak elde edilmiştir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'in akaç kaçak akımı ortalama 487 $\mu\text{A/mm}$ ve kapı kaçak akımı ortalama 541 $\mu\text{A/mm}$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre D-S arası mesafesi arttıkça kaçak akımlar düşmektedir.

Elde edilen sonuçlar, D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm olan HEMT'in, kapı baş uzunluğu ve alan levhası uzunluğunun, D-S arası mesafesi 3 μm olan HEMT'ten daha fazla olması ile açıklanabilir. D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT'e, kapı altından akaç tarafına doğru oluşan keskin elektrik alan pikleri daha düzgün bir form alır. D-S arası mesafe arttırılarak kapı metalinin akaç metaline olan uzaklığı arttırılmış ve bu şekilde kapı metali ile akaç metali arasında oluşan elektrik alan şiddeti azalmıştır. D-S arası mesafesi 6 μm olan aygıt yapısında, her ne kadar elektrik alanda iyileştirmeler sağlanmış ve kontaklar arasındaki direnç artarak, kaçak akımları iyileştirilmiş olsa da söz konusu direnç değerlerindeki artış aynı zamanda transistörlerin R_{on} direncinin artmasına ve buna bağlı olarak maksimum akım yoğunluğunun ve g_m değerlerinin düşmesine yol açılmıştır.

DC karakterizasyon sonucunda, D-S arası mesafesi 6 μm olan 2x125 μm HEMT yapılarında kaçak akımların daha düşük olduğu ve bu nedenle yüksek güç uygulamalarında kullanım için daha uygun olduğu görülmüştür. D-S arası mesafesi 3 μm olan 2x125 μm HEMT yapılarında ise yüksek I_{DSS} ve geçiş iletkenliği elde edildiği için yüksek frekans uygulamalarında daha çok tercih edilmesi gerektiği görülmektedir.

Düşük kaçak akımlara ve iletim direncine ve yüksek I_{DSS} ve geçiş iletkenliğine sahip HEMT yapıları ile yüksek güç ve yüksek frekans uygulamaları için uygun HEMT yapıları elde edilir. Bu HEMT'lerin elde edilebilmesi için çalışmalara devam edilmelidir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu amaçla öncelikle simülasyonlar gerçekleştirilerek uygun HEMT yapısının tayin edilmesi ve bu yapının fabrikasyonun gerçekleştirilmesi gereklidir.



KAYNAKLAR

- Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J. R., Weimann, N. G., Chu, K., Murphy, M., Schaff, W. J., Eastman, L. F., Dimitrov, R., Wittmer, L. ve Stutzmann, M., 1999. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N-and Ga-face AlGa_N/Ga_N heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 85(6), 3222-3233.
- Arenas, O., Al Alam, É., Aimez, V., Jaouad, A., Maher, H., Ares, R. ve Boone, F. 2014. Electrothermal mapping of AlGa_N/Ga_N HEMTs using microresistance thermometer detectors. *IEEE Electron Device Letters*, 36(2), 111-113.
- Arns, R. G. 1998. The other transistor: early history of the metal-oxide semiconductor field-effect transistor. *Engineering Science & Education Journal*, 7(5), 233-240.
- Asan, K. E. 2018. Si₃N₄ pasivasyonu öncesi ön işlemlerin Ga_N HEMT'lerin performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 98, Ankara.
- Bozdemir, S. A. 2019. S bant radar uygulamaları için iki katlı 50 watt Ga_N HEMT f sınıfı güç kuvvetlendiricisi tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 111, İstanbul.
- Coelho, S. M., Auret, F. D., Janse van Rensburg, P. J., Nyamhere, C., Nel, J. M. ve Hayes, M. 2008. IV and CV measurements of Schottky diodes deposited on Ge by electron beam and sputter deposition. *Physica Status Solidic*, 5(2), 626-629.
- Çakmak, H., Öztürk, M., Özbay, E. ve Imer, B. 2021. Nonalloyed Ohmic Contacts in AlGa_N/Ga_N HEMTs With MOCVD Regrowth of InGa_N for Ka-Band Applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68(3), 1006-1010.
- Dahmani, S. 2011. Large-Size AlGa_N/Ga_N HEMT Large-Signal Electrothermal Characterization and Modeling for Wireless Digital Communications. Doktora Tezi, Kassel Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 180, Almanya.
- Haliloğlu, M. T. 2019. Ga_N tabanlı alan etkili transistörlerde SiC arka-yüzey geçiş deliği aşındırma uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, 79, Ankara.
- Ikeda, N., Tamura, R., Kokawa, T., Kambayashi, H., Sato, Y., Nomura, T. ve Kato, S. 2011. Over 1.7 kV normally-off Ga_N hybrid MOS-HFETs with a lower on-resistance on a Si substrate. In 2011 IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 284-287.
- Javorka, P. 2004. Fabrication and Characterization of AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors. Doktora Tezi, Fakultät für Elektrotechnik und

Informationstechnik der Rhienisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 127, Germany.

- Jones, A. C. ve Hitchman, M. L. 2009. Overview of chemical vapour deposition. Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications, 1, 1-36.
- Jones, S. K., Marsh, S. P. ve Phillips, W. A. 1999. TCAD evaluation of AlGaIn/GaN device performance for high power applications, In 1999 Symposium on High Performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, (EDMO), 65-70, London, United Kingdom.
- Kelekçi, Ö. 2011. GaN temelli yüksek elektron mobiliteli transistör (HEMT) tasarımı, fabrikasyonu ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 184, Ankara.
- Khandelwal, S., Goyal, N. ve Fjeldly, T. A. 2011. A physics-based analytical model for 2DEG charge density in AlGaIn/GaN HEMT devices. IEEE Transactions on Electron Devices, 58(10), 3622-3625.
- Khan, M. A., Kuznia, J. N., Bhattarai, A. R. ve Olson, D. T. 1993. Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. Applied Physics Letters, 62(15), 1786-1787.
- Khan, M. A., Kuznia, J. N., Krishnankutty, S., Skogman, R. A., Olson, D. T., Schaff, W. J., Burn, J. W., Shur, M. S. ve George, T. 1994. Electronic and Optoelectronic Devices Based on GaN-AlGaIn Heterostructures. MRS Online Proceedings Library, 339, United Kingdom.
- Khan, M. A., Kuznia, J. N., Van Hove, J. M., Pan, N. ve Carter, J. 1992. Observation of a two-dimensional electron gas in low pressure metalorganic chemical vapor deposited GaN-Al_xGa_{1-x}N heterojunctions. Applied Physics Letters, 60(24), 3027-3029.
- Khan, M. A., Van Hove, J. M., Kuznia, J. N. ve Olson, D. T. 1991. High electron mobility GaN/Al_xGa_{1-x}N heterostructures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition. Applied Physics Letters, 58(21), 2408-2410.
- Kočan, M. 2003. AlGaIn/GaN MBE 2DEG heterostructures: interplay between surface-, interface-and device properties. Doktora Tezi, Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 219, Slovakia.
- Köroğlu, U. 2018. AlGaIn/GaN HEMT'ler (yüksek elektron mobiliteli transistörler) için T profilinde kapıların fabrikasyon yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, 105, Ankara.

- Kundakçı, M. 2007. In₂S₃, CdS ve In_{1-x}Cd_xS yarı iletken ince filmlerinin Sıkar Metodu ile büyütülmesi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 107, Erzurum.
- Lagger, P., Ostermaier, C., Pobegen, G. ve Pogany, D. 2012. Towards understanding the origin of threshold voltage instability of AlGa_N/Ga_N MIS-HEMTs. In 2012 International Electron Devices Meeting, 13-1.
- Lee, F., Su, L. Y. ve Huang, J. 2014. The effects of gate metals on the performance of p-Ga_N/AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors. 153-156.
- Lee, J., Liu, D., Kim, H. ve Lu, W. 2004. Post-annealing effects on device performance of AlGa_N/Ga_N HFETs. Solid-State Electronics, 48(10-11), 1855-1859.
- Lenka, T. R., ve Panda, A. K. 2011. Characteristics study of 2DEG transport properties of AlGa_N/Ga_N and AlGaAs/GaAs-based HEMT. Semiconductors, 45(5), 650-656.
- Lojek, B. 2007. Grown Junction and Diffused Transistors. History of Semiconductor Engineering, 41-66, Germany.
- Malik, A., Jain, N., Mishra, M., Kumar, S., Rawal, D. S. ve Singh, A. K. 2019. Nanoscale structural parameters based analytical model for Ga_N HEMTs. Superlattices and Microstructures, 130, 267-276.
- Mimura, T. 2002. The early history of the high electron mobility transistor (HEMT). IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 50(3), 780-782.
- Mishra, U. K., Shen, L., Kazior, T. E. ve Wu, Y. F. 2008. Ga_N-based RF power devices and amplifiers. Proceedings of the IEEE, 96(2), 287-305.
- Mishra, U. K., Parikh, P. ve Wu, Y. F. 2002. AlGa_N/Ga_N HEMTs-an overview of device operation and applications. Proceedings of the IEEE, 90(6), 1022-1031.
- Mizutani, T., Ohno, Y., Akita, M., Kishimoto, S. ve Maezawa, K. 2003. A study on current collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs induced by bias stress. IEEE Transactions on Electron Devices, 50(10), 2015-2020.
- Moore, A. ve Jimenez, J. 2015. Ga_N RF Technology for dummies. TriQuint Special Edition Published by John Wiley & Sons, 111, United States.
- Mukherjee, J., Chaubey, R. K., Rawal, D. S. ve Dhaka, R. S. 2022. Analysis of the post-stress recovery of reverse leakage current in Ga_N HEMTs. Materials Science in Semiconductor Processing, 137, 106222.
- Neamen, D. A. 2003. Semiconductor physics and devices: basic principles. McGraw-hill, 784, United States.

- Ohi, K., Asubar, J. T., Nishiguchi, K. ve Hashizume, T. 2013. Current stability in multi-mesa-channel AlGa_N/Ga_N HEMTs. IEEE Transactions on Electron Devices, 60(10), 2997-3004.
- Peter, Y. U. ve Cardona, M. 2010. Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties. Springer Science & Business Media, 387-774, Germany.
- Pullabhatla, S. K., Bobba, P. B., ve Yadlapalli, S. 2020. Comparison of GAN, SIC, SI Technology for High Frequency and High Efficiency Inverters. 2nd International Conference on Design and Manufacturing Aspects for Sustainable Energy (ICMED 2020), vol 184, Hyderabad, India.
- Saito, W., Suwa, T., Uchihara, T., Naka, T. ve Kobayashi, T. 2015. Breakdown behaviour of high-voltage Ga_N-HEMTs. Microelectronics Reliability, 55(9-10), 1682-1686.
- Toprak, A. 2014. Gate uzunluğunun Ga_N HEMT aygıtlarda güç performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanoteknoloji ve Nanotıp Ana Bilim Dalı, 80, Ankara.
- Visalli, D. 2011. Optimization of Ga_N-on-Si HEMTs for high-voltage applications. Doktora Tezi, Ku Leuven Üniversitesi, 191, Belçika.
- Visvkarma, A. K., Sharma, C., Laishram, R., Kapoor, S., Rawal, D. S., Vinayak, S. ve Saxena, M. 2019. Comparative study of Au and Ni/Au gated AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors. AIP Advances, 9(12), 125231.
- Yadav, Y. K., Upadhyay, B. B., Jha, J., Ganguly, S. ve Saha, D. 2020. Impact of relative gate position on DC and RF characteristics of high performance AlGa_N/Ga_N HEMTs. IEEE Transactions on Electron Devices, 67(10), 4141-4146.
- Yılmaz, D., Odabaşı, O., Salkım, G., Urfali, E., Akoğlu, B. Ç., Özbay, E. ve Altındal, Ş. 2022. DC and RF performance of lateral AlGa_N/Ga_N FinFET with ultrathin gate dielectric. Semiconductor Science and Technology, 37(8), 085008.
- Wilson, R. G. 2000. SIMS Analysis of Wide Bandgap Semiconductors. In Processing of wide band gap semiconductors, William Andrew Publishing, 393-428, United States.
- Wu, Y. F., Saxler, A., Moore, M., Smith, R. P., Sheppard, S., Chavarkar, P. M., Wisleder, T., Mishra, U.K. ve Parikh, P. 2004. 30-W/mm Ga_N HEMTs by field plate optimization. IEEE Electron Device Letters, 25(3), 117-119.
- Xiao, H. 2001. Introduction to semiconductor manufacturing technology. Prentice Hall, 647, United States.
- Xiaoling, Z., Fei, L., Changzhi, L., Xuesong, X., Ying, L. ve Mohammad, S. N. 2009. High-temperature characteristics of Al_xGa_{1-x}N/Ga_N Schottky diodes. Journal of Semiconductors, 30(3), 034001.

Xu, C., Wang, J., Chen, H., Xu, F., Dong, Z., Hao, Y. ve Wen, C. P. 2007. The leakage current of the Schottky contact on the mesa edge of AlGaIn/GaN heterostructure. IEEE Electron Device Letters, 28(11), 942-944.

