



**GAN TABANLI TRANSİSTÖRLERDE NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ İLE
ISIL DİRENÇ KARAKTERİZASYONU YAPILMASI**

Didem Cansu İLHAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2016

Didem Cansu İLHAN tarafından hazırlanan “GAN TABANLI TRANSİSTÖRLERDE NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ İLE ISIL DİRENÇ KARAKTERİZASYONU YAPILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Doç. Dr. Cemil YAMALI

Makina Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Hüseyin TOPAL

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 11 / 11 / 2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Didem Cansu İLHAN

11 / 11 / 2016

GAN TABANLI TRANSİSTÖRLERDE NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ İLE ISIL DİRENÇ KARAKTERİZASYONU YAPILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Didem Cansu İLHAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2016

ÖZET

Bu çalışmada, ANSYS-Icepak Sayısal Akışkanlar Dinamiği programı kullanılarak GaN (Galyum Nitrit) tabanlı yüksek elektron hareketli transistör için ısı model oluşturulmuş farklı güç atımlarında, kanal sıcaklığı ve ısı direnç değerleri belirlenmiş ve gerçekleşen ısı transferi 3 boyutlu olarak incelenmiştir. Analiz, farklı değerlerdeki kanal uzunluğu, kanal genişliği, darbe genişliği ve farklı kalınlıklardaki farklı alt tabaka malzemeleri için tekrarlanarak maksimum ısı atımı için optimum değerler belirlenmiştir. Bulunan sonuçlarda transistör kesitlerindeki sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Bahsedilen parametrelere bağlı olarak değişen farklı alt tabakalardaki (Safir, Si, SiC) kanal sıcaklıkları ve ısı direnç değerleri grafiksel olarak ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Bu grafiklerden yola çıkılarak, GaN tabanlı transistörden olan ısı atımını arttıracak faktörler ve uygun çalışma koşulları belirlenmiştir. Çalışmalar sırasında altı parametrenin; güç atımı, darbe genişliği, kanal uzunluğu, kanal genişliği, alt tabaka malzemesi ve alt tabaka kalınlığının ısı transferine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, literatürde bulunan deneysel çalışmalarla doğrulanan model üzerinde parametrik çalışma yapılarak optimum transistör boyutları ve alt tabaka malzemesi tespit edilmiştir. Sonuç olarak yapılan analizler incelendiğinde, kanal sıcaklığının tüm parametrelerle doğru orantılı, ısı direncin ise kanal genişliğiyle ters diğer parametrelerle doğru orantılı olduğu görülmüştür. En iyi ısı performans ve en düşük ısı direnç 26,26°C/W ile SiC alt tabakalı transistörde görülmüştür, bu alt tabakadaki kanal sıcaklıkları ise uygulanan güce bağlı olarak 97,3-151,8°C arasındadır.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : GaN, transistör, yüksek elektron hareketliliği, ısı karakterizasyon, nümerik analiz, ısı direnç

Sayfa Adedi : 135

Danışman : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

THERMAL RESISTANCE CHARACTERIZATION IN GAN BASED TRANSISTORS BY NUMERICAL ANALYSIS

(M. Sc. Thesis)

Didem Cansu İLHAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2016

ABSTRACT

In this study, thermal model was constructed using ANSYS-Icepak computational fluid dynamic program for GaN (Gallium Nitride)-based high electron mobility transistors. Channel temperature and thermal resistance of the transistor were determined, and heat transfer was analyzed as a three dimensional case at different power densities. Numerical analysis was repeated for different values of channel length, channel width, pulse and different substrate materials for different thicknesses to obtain optimum heat transfer in the transistor. Temperature distribution in the cross sections of the transistor was represented in the study. Varying channel temperatures due to mentioned parameters, and thermal resistance in different substrate materials (Sapphire, Si, SiC) were revealed graphically in detail. As it could be figured out from the graphics, factors that increase heat dissipation from GaN-based transistors and optimum working conditions were determined. During the study, it was examined how heat transfer in the transistor was affected by changing six parameters which are power dissipation, pulse width, channel length, channel width, substrate material and thickness of the substrate material. In this study, numerical results were verified with experimental studies in the literature, and optimum dimensions and materials of transistor were determined. After numerical model was verified with the experimental data, optimum dimensions and materials of the substrate were determined by parametrical studies. Finally, as numerical analysis was examined, channel temperature was proportional to all of the parameters, but thermal resistance was inversely proportional to channel width and proportional to other parameters. As can be seen from the results, SiC-based transistors had the best thermal performance, and the lowest thermal resistance with 26,26°C/W, and the channel temperatures on this substrate were between 97,3-151,8°C according to applied power.

Science Code : 91411

Key Words : GaN, transistor, high electron mobility, thermal characterization, numerical analysis, thermal resistance

Page Number : 135

Supervisor : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, başta değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Sayın Prof. Dr.

Şenol BAŞKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Birlikte çok güzel zamanlar geçirdiğim değerli arkadaşlarım Gizem KARADEDE ve

Yasemin Tuğçe TUNÇ'a çok teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen annem Meliha

İLHAN ve babam Hasan İLHAN'a sonsuz kez teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON ...	27
3.1. Problemin Genel Tanımı	27
3.2. Fiziksel Model	27
3.2.1. Varsayımlar	29
3.3. Matematiksel Modelin Tanımlanması.....	30
3.3.1. Korunum denklemleri.....	30
3.3. Sınır Şartları.....	36
4. SAYISAL YÖNTEM VE ÖN SİMÜLASYONLAR.....	39
4.1. ANSYS-Icepak SAD Kodu	39
4.1.1. Sonlu hacimler yöntemi ve hücre yapısı.....	40
4.1.2. Sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma işlemi	42
4.1.3. Çözüm tekniği	42
4.2. Problemin Hücre Yapısı.....	42
4.3. Ön Çalışma ve Deneme Çözümleri	43
4.4. Yakınsama Kriterlerinin İncelenmesi ve Kontrol Edilmesi.....	45

Sayfa

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	55
5.1. Sayısal Çalışmanın Doğruluğunun Kontrol Edilmesi	57
5.2. Sayısal Bulgular.....	60
5.2.1. Alt tabaka kalınlığının ısı transferine etkileri.....	60
5.2.2. Kanal uzunluğunun ısı transferine etkileri	81
5.2.3. Kanal genişliğinin ısı transferine etkileri	83
5.2.4. Isıl gücün ısı transferine etkileri.....	94
5.2.5. Darbe genişliğinin ısı transferine etkileri	99
5.3. Sonuçların Değerlendirilmesi	111
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	115
KAYNAKLAR	121
EKLER.....	127
EK-1. Literatürde bulunan çalışmaların özeti	128
ÖZGEÇMİŞ	135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Malzemelerin ısı iletkenlik değ erleri.....	37
Çizelge 4.1. Malzemelerin oda sıcaklığındaki ısı iletkenlik değ erleri.....	45
Çizelge 5.1. Parametrik ç alışma tablosu	56
Çizelge 5.2. Farklı alt tabakalarda transistörün toplam ısı l direnç değ erleri.....	59



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Transistörün üst görünüşü (ölçüler μm cinsinden verilmiştir).....	28
Şekil 3.2. Transistörün kesit görünüşü (ölçüler μm cinsinden verilmiştir).....	29
Şekil 3.3. Transistörün üç boyutlu temsili görünüşü ve malzemeler	29
Şekil 3.4. İletimle bir boyutlu ısı transferi	31
Şekil 3.5. Kartezyen koordinatlarda diferansiyel eleman	32
Şekil 3.6. Diferansiyel eleman üzerinde enerji transfer hızlarının gösterilmesi	34
Şekil 3.7. Transistörün kesit görünüşü.....	37
Şekil 4.1. Üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde hücre yapısı	40
Şekil 4.2. Üç boyutlu bir hücre için kontrol hacmi.....	41
Şekil 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan SiC alt tabakalı transistör yapısı	44
Şekil 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan SiC alt tabakalı transistör yapısının kesit görünüşü	44
Şekil 4.5. Çözüm sırasında kalıntı değerlerinin düşüşü	46
Şekil 4.6. Çözüm sırasında anlık değerlerin sabit hale gelmesi.....	46
Şekil 4.7. Farklı hücre sayılarında elde edilen kanal sıcaklıkları	48
Şekil 4.8. x-z düzlemi boyunca sıcaklık konturu	49
Şekil 4.9. Transistör modelinin x-z düzleminde hücre dağılımı	49
Şekil 4.10. Transistör modelinin x-y düzleminde hücre dağılımı.....	50
Şekil 4.11. Transistör modelinde üç boyutlu hücre yapısı.....	50
Şekil 4.12. Transistör modelinde üç boyutlu hücre yapısının yakın görünüm	51
Şekil 4.13. Transistör modelinin x-y düzleminde hücre dağılımının yakın görünümü ..	51
Şekil 4.14. Transistör üzerindeki farklı konumlardaki deneysel ve sayısal sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Transistörün en üst noktasından alt tabakanın tabanına kadar ölçülen deneysel ve sayısal sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.16. Farklı güçlerde çeşitli yöntemlerle alınan sıcaklık ölçümlerinin deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılması	54
Şekil 5.1. Çözüm sırasında kalıntı değerlerinin düşüşü	58
Şekil 5.2. Çözüm sırasında anlık değerlerin sabit hale gelmesi.....	58
Şekil 5.3. Farklı hücre sayılarında elde edilen kanal sıcaklıkları	59
Şekil 5.4. 50 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	61
Şekil 5.5. 50 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	61
Şekil 5.6. 50 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm	62
Şekil 5.7. 50 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	62
Şekil 5.8. 50 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm	63
Şekil 5.9. 100 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	63
Şekil 5.10. 100 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	64
Şekil 5.11. 100 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	64
Şekil 5.12. 100 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	65
Şekil 5.13. 100 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	65
Şekil 5.14. 150 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	66
Şekil 5.15. 150 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	66

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. 150 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	67
Şekil 5.17. 150 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	67
Şekil 5.18. 150 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	68
Şekil 5.19. 200 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	68
Şekil 5.20. 200 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	69
Şekil 5.21. 200 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	69
Şekil 5.22. 200 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	70
Şekil 5.23. 200 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	70
Şekil 5.24. 250 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	71
Şekil 5.25. 250 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	71
Şekil 5.26. 250 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	72
Şekil 5.27. 250 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	72
Şekil 5.28. 250 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	73
Şekil 5.29. 250 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	73
Şekil 5.30. 300 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	74
Şekil 5.31. 300 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	74

Şekil	Sayfa
Şekil 5.32. 300 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	75
Şekil 5.33. 300 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	75
Şekil 5.34. 300 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	76
Şekil 5.35. 300 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	76
Şekil 5.36. 350 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	77
Şekil 5.37. 350 µm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	77
Şekil 5.38. 350 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	78
Şekil 5.39. 350 µm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	78
Şekil 5.40. 350 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	79
Şekil 5.41. 350 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	79
Şekil 5.42. AlGaIn/GaN transistörde farklı alt tabakalarda kanal sıcaklığının alt tabaka kalınlığına göre değişimi	80
Şekil 5.43. AlGaIn/GaN transistörde farklı alt tabakalarda ısı direncinin alt tabaka kalınlığına göre değişimi.....	81
Şekil 5.44. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal sıcaklığının kanal uzunluğuna göre değişimi	82
Şekil 5.45. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde ısı direncinin kanal uzunluğuna göre değişimi	83
Şekil 5.46. 50 µm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	84
Şekil 5.47. 50 µm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	84

Şekil	Sayfa
Şekil 5.48. 50 µm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	85
Şekil 5.49. 50 µm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	85
Şekil 5.50. 50 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	86
Şekil 5.51. 50 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	86
Şekil 5.52. 160 µm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	87
Şekil 5.53. 160 µm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	87
Şekil 5.54. 160 µm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	88
Şekil 5.55. 160 µm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	88
Şekil 5.56. 160 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	89
Şekil 5.57. 160 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	89
Şekil 5.58. 300 µm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	90
Şekil 5.59. 300 µm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	90
Şekil 5.60. 300 µm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	91
Şekil 5.61. 300 µm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	91
Şekil 5.62. 300 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı.....	92
Şekil 5.63. 300 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm.....	92

Şekil	Sayfa
Şekil 5.64. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal sıcaklığının kanal genişliğine göre değişimi	93
Şekil 5.65. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde ısı direncinin kanal genişliğine göre değişimi	94
Şekil 5.66. 2 W'lık ısı gücünde Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	95
Şekil 5.67. 2 W'lık ısı gücünde Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde üç boyutlu sıcaklık dağılımı	95
Şekil 5.68. 2 W'lık ısı gücünde Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	96
Şekil 5.69. 2 W'lık ısı gücünde Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde üç boyutlu sıcaklık dağılımı	96
Şekil 5.70. 2 W'lık ısı gücünde SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı	97
Şekil 5.71. 2 W'lık ısı gücünde SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde üç boyutlu sıcaklık dağılımı	97
Şekil 5.72. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal sıcaklığının ısı güce göre değişimi	98
Şekil 5.73. 0,5 µs'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	100
Şekil 5.74. 0,5 µs'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	101
Şekil 5.75. 0,5 µs'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	101
Şekil 5.76. 5 µs'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	102
Şekil 5.77. 5 µs'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	102
Şekil 5.78. 5 µs'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	103
Şekil 5.79. 10 µs'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	103

Şekil	Sayfa
Şekil 5.80. 10 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	104
Şekil 5.81. 10 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	104
Şekil 5.82. 50 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	105
Şekil 5.83. 50 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	105
Şekil 5.84. 50 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	106
Şekil 5.85. 100 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	106
Şekil 5.86. 100 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	107
Şekil 5.87. 100 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	107
Şekil 5.88. 200 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	108
Şekil 5.89. 200 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	108
Şekil 5.90. 200 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	109
Şekil 5.91. 300 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	109
Şekil 5.92. 300 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	110
Şekil 5.93. 300 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi	110

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Mikrodalga birleşik devre örneği.....	1
Resim 1.2. Transistör modelleri.....	2
Resim 1.3. Çok kanallı transistör modeli	3
Resim 1.4. GaN kristali.....	4
Resim 1.5. AlGaN/GaN yüksek elektron hareketli transistör uygulamaları; kablosuz ve uydu iletişim sistemlerinde, katı halli radar ve hibrit ya da yakıt hücreleri için katı halli güç elektroniklerinde kullanılmaktadır	7

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan (m^2)
b	Sabit sayı
c_p	Sabit basınçta spesifik ısı ($J/kg.K$)
$\dot{E}$	Enerji değişim hızı (W)
$\dot{E}_g$	Enerji üretim hızı (W)
$\dot{E}_{in}$	Giren enerji hızı (W)
$\dot{E}_{out}$	Çıkan enerji hızı (W)
$\hat{h}$	Birim kütledeki entalpi (J/kg)
L	Uzunluk (m)
L_K	Kanal Uzunluğu (μm)
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_{taban}	Taban Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{si}	İç duvar sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{so}	Dış duvar sıcaklığı ($^{\circ}C$)
P	Basınç (N/m^2)
k	Isıl İletkenlik (W/mK)
R	Isıl Direnç ($W/^{\circ}C$)
q_x	x-yönünde ısı transfer hızı (W)
q_y	y-yönünde ısı transfer hızı (W)
q_z	z-yönünde ısı transfer hızı (W)
q''_x	x-yönündeki ısı akısı (W/m^2)
q''_y	y-yönündeki ısı akısı (W/m^2)
q''_z	z-yönündeki ısı akısı (W/m^2)
q'''	Birim hacimdeki enerji üretim hızı (W/m^3)

Simgeler**Açıklamalar**

U	x-yönündeki skaler hız (m/s)
V	y-yönündeki skaler hız (m/s)
W	z-yönündeki skaler hız (m/s)
W_K	Kanal Genişliği (μm)
û	Birim kütledeki iç enerji (J/kg)
α	Isıl difüzivite (m ² /s)
φ_P	P düğüm noktasındaki φ değeri

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AlGaN	Alüminyum Galyum Nitrit
AlN	Alüminyum Nitrit
EV	Electric Vehicles
FET	Field Effect Transistor
GaAs	Galyum Arsenit
GaN	Galyum Nitrit
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HEV	Hybrid Electric Vehicles
IT	Information Technology
IR	Infrared
LED	Light Emitting Diodes
InP	Indiyum Fosfat
MESFET	Metal Semiconductor Field Effect Transistor
Mg	Magnezyum
MOCVD	Metalorganic Chemical Vapour Deposition
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PIV	Pulsed Current-Voltage
PV	Photovoltaic Invert

Kısaltmalar**RF****SAD****Si****SiC****UV****Açıklamalar**

Radyo Frekansı

Sayısal Akışkanlar Dinamiği

Silikon

Silikon Karbit

Ultra Viyole



1. GİRİŞ

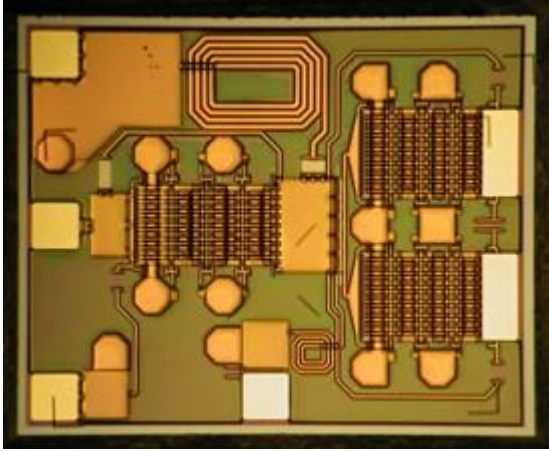
Mikrodalga entegre yongalarda, özellikle güç yükselteç modüllerinde, çalışma sırasında sıcaklık çok yüksek değerlere çıkabilmekte ve bu durum cihaz ömrünü ve verimini önemli oranda düşürmektedir. GaN yüksek elektron hareketli transistör, güç yükselteçlerde aktif bileşen olarak kullanılmaktadır ve diğer alternatiflerine göre daha yüksek güç yoğunluklarında, daha verimli çalışabilmekte, boyut olarak daha küçük olup daha iyi entegre olabilmektedir. GaN yüksek elektron hareketli transistörler, kablosuz ve uydu haberleşme sistemlerinde, hibrit veya yakıt hücre araçları için katı halli radar ve katı halli güç elektroniklerinde kullanılmaktadır. GaN 130 W/mK'lik yüksek ısı iletkenliğe sahiptir, bu da ısıyı diğer alternatiflerine göre (örneğin GaAs için ısı iletkenlik değeri 39 W/mK'dir) kolay atmasını sağlar, ayrıca yüksek sıcaklıklarda ısı olarak stabildir, 600°C'ye kadar malzeme özelliklerini korur [1]. Tüm bu özellikler güç yükselteçlerde yüksek verimlilik açısından önemlidir. Yapılan ölçümlerde maksimum kanal sıcaklığı 175°C civarına çıktığı zaman, cihaz ömrünün ve çalışma veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Transistörü ısı olarak karakterize edebilmek yani ısı direncini belirleyebilmek için maksimum kanal sıcaklığını yüksek hassasiyetle belirlemek gerekir, böylece transistörün yüksek verimlilikle çalışması için uygun çalışma koşulları belirlenebilir ve cihazın kullanım ömrü arttırılabilir. GaN tabanlı transistörlerde alt tabaka olarak çoğunlukla SiC, Si, Safir kullanılır. Resim 1.1.'de mikrodalga birleşik devre örneği gösterilmiştir.



Resim 1.1. Mikrodalga birleşik devre örneği [2]

Transistör nedir ?

Transistör girişine uygulanan sinyali yükselterek gerilim ve akım kazancı sağlayan, gerektiğinde anahtarlama elemanı olarak da kullanılan yarı iletken devre elemanıdır. Transistörler elektronik cihazların temel yapı taşıdır. Günlük hayatta kullanılan cihazlarda birkaç taneden birkaç milyara varan sayıda transistör bulunabilir. Teknolojinin en değerli elektronik devre elemanlarında biridir. Transistör yapısal bakımdan, yükselteç olarak çalışma özelliğine sahip bir devre elemanıdır. Daha yaygın kullanım amacı ise devrede anahtarlama yapmaktır. Elektroniğin her alanında kullanılmaktadır. Dolayısı ile teknolojinin en değerli elektronik devre elemanlarından biridir [3]. Günümüz transistör teknolojisinde AlGaIn/GaN yarı iletkeni yüksek güç gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Resim 1.2.'de transistör modelleri, Resim 1.3.'de ise çok kanallı transistör modeli gösterilmiştir.



Resim 1.3. Çok kanallı transistör modeli [5]

GaN nedir?

Petrol kaynaklarının tükenmesi, sınırlı enerji kaynağı gibi çeşitli çevresel sorunlardan dolayı enerji tüketimi dünya çapında önem arz etmeye başlamıştır. Enerji dönüşümünde elektriksel sistemlerin güç kaynağı rolü çözümünün önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Elektriksel enerji dönüşümünde ve çalışırken, muazzam miktarda güç tüketen kontrol sistemlerinde kullanılan güç cihazları enerji tüketimini azaltmanın anahtar elemanı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle bu cihazların verimliliğini optimize etmek, çalışırken enerji kaybını azaltmak bakımından önemlidir [6].

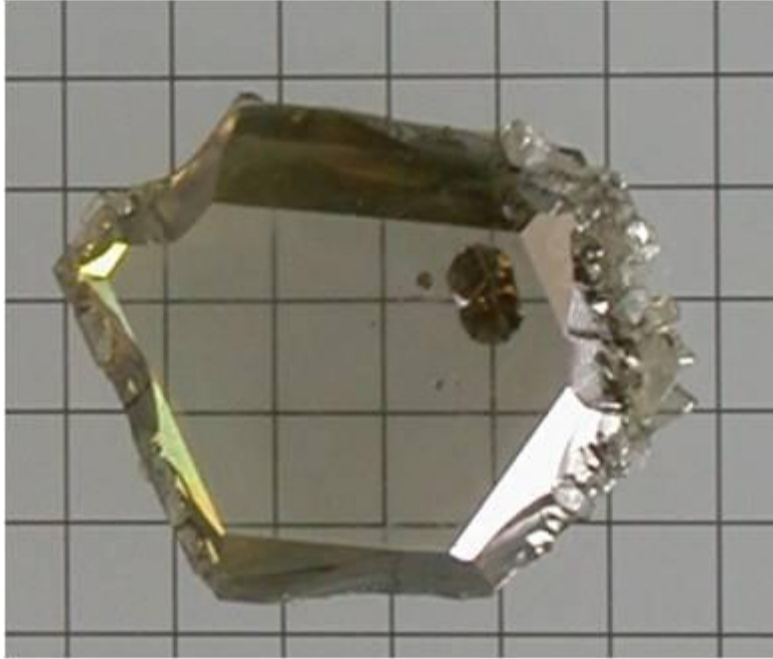
Güç cihazlarında enerji kaybı iki yoldan olmaktadır:

1. Cihazlardaki akım döngüsündeki dirençten kaynaklanan "İletim kaybı"
2. "Açık", "Kapalı" dönüşümü sırasında oluşan "Anahtarlama kaybı"

Bu enerji kayıplarını azaltmak için cihazın akım döngüsündeki direnci azaltmak ve anahtarlama hızını arttırmak gerekir [6].

GaN güç cihazlarında enerji kaybını azaltma potansiyeli vardır. Ga (Galyum) ve N (Azot) bileşiminden oluşan GaN (Galyum Nitrit), yüksek kırılma voltajına, yüksek hızda anahtarlama ve minyatürleştirmeyi sağlayan düşük iletim direnci karakteristiklerine sahiptir. Direnci düşürmek için daha büyük yonga alanına ihtiyaç duyan geleneksel Silikon transistörlerin aksine, küçük boyutlu GaN transistörler (düşük parazitik kapasitanslı) yüksek hızlı anahtarlamaı sağlar ve rahatlıkla minyatürleştirilebilir [6].

Galyum Nitrit (GaN) ikili III/V doğrudan bant aralığında genellikle parlak ışık yayan, 1990'lardan beri diyotlarda kullanılan yarı iletken malzemedir. Bileşiği Wurtize kristal yapısı olan çok sert bir materyaldir. 3.4 eV'luk geniş bant aralığı ile optoelektronikte yüksek güç ve yüksek frekanslı cihazlarda gereken özellikleri sağlayabilir. Örneğin, GaN alt tabaka doğrusal olmayan optik frekans olmadan 405 nm lazer diyotu mümkün kılabilir. Duyarlılığının iyonize radyasyona karşı düşük olması (diğer grup III nitritleri gibi), uydulardaki güneş pil dizilerinde kullanılmak için onu uygun bir materyal yapar. Ayrıca askeri ve uzay uygulamalarında radyasyonlu ortamlarda kararlı olduğu için yarar sağlar. Çünkü GaN transistörler GaAs transistörlere göre daha yüksek sıcaklıkta ve daha yüksek voltajlarda çalışabilirler, bu da onları mikrodalga frekanslarda kullanılabilen ideal güç yükselteç yapar [7]. Resim 1.4.'de GaN kristali gösterilmiştir.



Resim 1.4. GaN kristali [7]

GaN özellikleri ve karakteristikleri

Yüksek voltaj potansiyeli, minyatürleştirme kolaylığı ve yüksek hızlı anahtarlama gibi GaN 'a özgü nitelikler, yüksek kırılma voltajı ve düşük iletim voltajına sahiptir. GaN geniş bant aralığına sahip olduğu için yüksek kırılma voltajına sahiptir. Bant aralığı elektronların bulunmadığı malzemelerin birleşim noktasında oluşan bölgedir. GaN , Silikon'dan daha geniş bant aralığına sahiptir. Bu da GaN 'ın Silikon'dan daha yüksek kırılma voltajına sahip olmasını sağlar. Aynı kırılma voltajında Silikon cihazlardan daha küçük boyutta olan GaN

cihazlar minyatürleştirmeye Silikon cihazlardan daha elverişlidir. Ayrıca minyatürleştirme parazitik kapasitansı düşürdüğü gibi anahtarlama hızının artmasına da yardımcı olur [6].

GaN tabanlı transistörlerde açık/dirençli olan güç cihazları elektriksel kırılmanın küpüyle ters orantılı olduğu için düşük iletim direnci vardır. Diğer bir deyişle, teorik olarak GaN cihazlar Si cihazların limitinden yaklaşık 3 basamak daha düşük açık/dirence sahiptirler. Buna ek olarak, GaN cihazlar onları yüksek hızlı uygulamalar için uygun kılan yüksek elektron doyma hızına sahiptirler [6].

GaN oldukça sert (12 ± 2 GPa) mekanik olarak dayanıklı, geniş bant aralığında çalışabilen yüksek ısı kapasitesine ve ısı iletkenliğe sahip yarıiletken malzemedir. Saf halinde çatlamaya karşı dayanıklı olup kafes sabitlerindeki uyumsuzluğa rağmen ince film şeklinde safir veya SiC üzerine gömülebilir. GaN, Si ile veya oksijenle birleştirilip n-tipi veya Mg ile birleştirilip p-tipi yapılabilir, ancak Si ve Mg atomları GaN kristallerinin büyüme şeklini değiştirir, çekme gerilmesini değiştirerek kırılma hale getirir. GaN bileşikler ayrıca yüksek bozulma yoğunluklu olmaya eğilimlidir, yapısında santimetrekareye yüz milyondan on milyar mertebesine kadar hata içerebilir [7].

GaN teknolojisinde gelişmeler

Yüksek kalite kristal halinde GaN düşük sıcaklıklarda koruyucu tabaka oluşturarak elde edilebilir. Bu tip yüksek kalite GaN, p-tipi GaN ve p-n bağlama tipi mavi/UV-LED'lerin ve oda sıcaklığında uyarılmış emisyonun keşfine yol açtı. Bu da yüksek performanslı mavi LED'lerin, uzun ömürlü viyole lazer diyotların ticarileştirilmesine ve UV detektör gibi nitrit bazlı cihazların, yüksek hızlı alan etkili transistörlerin gelişmesine yol açtı [7].

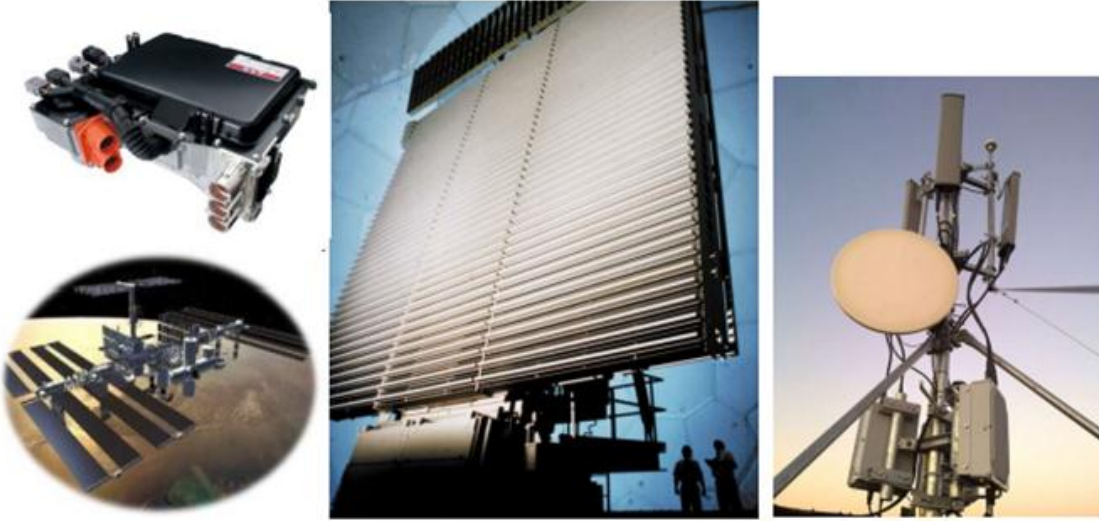
Yüksek parlaklıklı ışık yayan GaN diyotlar yani LED'ler ana renk skalasını tamamladı ve gün ışığında gözle görülür tam renk LED görüntüleri, beyaz LED'leri ve mavi lazer cihazları gibi uygulamaları mümkün kıldı. İlk GaN tabanlı yüksek parlaklıklı LED'ler Safir üzerine MOCVD tekniği ile GaN gömülü ince filmde kullanıldı. Diğer alt tabakalar Çinko Oksit, ve kafes sabitlerindeki % 2 uyumsuzluğa rağmen SiC. Grup III nitrit yarı iletkenleri, genelde görünür kısa dalga boyu ve UV bölgesinde optik üretim araçları içinde en gelecek vadeden yarı iletken ailelerinden biri olarak bilinir [7].

GaN'in çok yüksek kırılma voltajları, yüksek elektron hareketliliği ve doygunluk hızı önemli Johnson'ın figürü ile kanıtlandığı gibi, onu yüksek güçlerde ve yüksek sıcaklıklardaki mikrodalga uygulamaları için ideal bir aday yapar. GaN kullanılan yüksek güçlü, yüksek frekanslı cihazların oluşturduğu pazar potansiyeli mikrodalga radyo frekanslı güç yükselteçleri (yüksek hızlı kablosuz data transferi gibi) ve yüksek gerilim besleme ağlarında kullanılan yüksek voltajda çalışan anahtarlama elemanlarını içerir. GaN tabanlı RF transistörlerin potansiyel toplu pazarlama uygulaması mikrodalga fırınlarda şu an kullanılan magnetron yerine mikrodalga kaynağı sağlamaktır. GaN transistörlerde büyük bant aralığı demek silikon transistörlerin dayandığı sıcaklıktan ($\sim 150^{\circ}\text{C}$) çok daha yüksek sıcaklıklara kadar ($\sim 400^{\circ}\text{C}$) performansını korumak demektir, çünkü herhangi yarı iletken için normal olan ısı üretimi etkilerini azaltır. İlk Galyum Nitrit metal yarı iletken alan etkili transistörler (GaN MESFET) deneysel olarak 1993'te gösterildi ve şu an aktif olarak geliştirilmeye devam ediliyor [7].

2010 yılında GaN transistörlerin ilk geliştirilmiş hali piyasada mevcuttu. Anahtarlama hızı ve güç dönüşüm verimliliği uygulamalarında güç MOSFET'lerin yerini almak üzere tasarlanması bakımından oldukça önemliydi. eGaN FET'ler olarak da bilinen bu transistörler standart silikon tabakasının üzerine ince katman halinde GaN'ın eklenmesiyle oluşturuldu. Böylece eGaN FET'ler, silikon tabanlı MOSFET'ler ile karşılaştırıldığında maliyet bakımından aynı ancak elektriksel performans olarak çok daha üstündü [7].

GaN tabanlı transistörlerin önemi

AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörler mikrodalga frekanslarında yüksek güç, yüksek frekans ve yüksek çalışma sıcaklıkları için oldukça uygun bir adaydır. Özellikler, 100GHz üzeri frekanslarda ve 150°C üzeri sıcaklıklardaki mikrodalga ve milimetre dalga iletişim verici uygulamalarında yüksek RF gücü gereken durumlarda tercih edilir. Ancak, AlGaIn/GaN HEMT'lerin güvenilirliğine ilişkin endişeler vardır. İlk olarak, yüksek kanal sıcaklığı cihaz ömrünü büyük oranda etkilediği için ısıl güvenilirlik dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, AlGaIn/GaN'ların sıcaklığını düşürmeye yönelik çözüm üretmek gerekir [8]. Resim 1.5.'de AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistör uygulamaları gösterilmiştir.



Resim 1.5. AlGaN/GaN yüksek elektron hareketli transistör uygulamaları; kablosuz ve uydu iletişim sistemlerinde, katı halli radar ve hibrit ya da yakıt hücreleri için katı halli güç elektroniklerinde kullanılmaktadır [1]

Yüksek frekans, yüksek voltaj, yüksek sıcaklık, yüksek verimlilik

GaN HEMT'ler 2006'dan beri yasal olarak piyasada bulunmaktadır ve yüksek verimli olup, yüksek voltajda çalışabilmelerinden dolayı kablosuz altyapı uygulamalarında kullanım alanı bulmuştur [7].

Daha kısa kanal uzunluğuna sahip ikinci jenerasyon teknoloji daha yüksek frekanslı telekom ve uzay uygulamalarını gerektirecektir [7].

GaN tabanlı MOSFET'ler yüksek güçlü elektroniklerde özellikle otomotivde ve elektrikli araba uygulamalarında düşük kayıp gibi birçok avantaj sunar [7].

GaN tabanlı elektronikler (pür GaN olmayan) enerji tüketimini önemli oranda kesme potansiyeline sahiptir, sadece tüketici uygulamalarında değil güç iletim hizmetlerinde bile MIT, Cambridge Electronics Inc.'ların transistörlerin direncinin silikon tabanlı transistörlerinkinin en fazla onda biri kadar olduğu iddiasını sürüncemede bıraktı. Bu durum çok daha fazla enerji verimliliği ve büyüklük mertebesinde daha hızlı anahtarlama frekansı sağlıyor. Sadece güç elektroniği sistemlerindeki enerji kullanımından dolayı değil, fiziksel boyut ve kararlılık yönünden de geniş uygulama alanına sahiptir. Güç dalgalanmalarından dolayı kapanan Silikon transistörlerin aksine, GaN transistörler genelde tükenme modundadır (örneğin kanal-kaynak direnci sıfırken açık/dayanıklıdır),

ancak Amerika Hükümeti ve üniversite asistanlığında, malzeme mühendisliği yardımıyla geliştirilen GaN transistörler Silikon tabanlı transistörlerde olduğu gibi artış modunda (genelde kapalı) cihazlar olarak mevcuttur [7].

Uygulamalar

GaN cihazlar cihaz akım döngüsünde çok düşük direnç ve yüksek hızlı anahtarlama sağlayabilen ileri jenerasyon güç cihazlarıdır. Bu özellikler GaN'ın HEV/EV ya da PV uygulamalarında yüksek verimli güç kaynakları için etkili olarak kullanılmasını sağlar [6]. GaN güç cihazları aşağıdaki bazı örneklere uygulanabilir,

- Sürekli artan bilgi veri işleme ile desteklenen sunuculara ve diğer IT ekipmanları için kullanılan güç kaynaklarında,
- Doğal enerji kullanan yüksek verimli ve kararlı güç kaynakları,
- Hızla yaygınlaşan HEV/EV cihazları [6].

GaN tabanlı transistörlerde güvenilirlik

Bütün bu yararlarına rağmen, GaN HEMT'ler güvenilirlik endişesi nedeniyle yüksek güç uygulamalarında geniş kullanım görmemiştir. GaN HEMT'lerin yüksek güçte ve yüksek güvenilirlikte çalıştırılması gerekli olduğu kadar zahmetlidir. Bu nedenle uygun tasarımlar güvenilirliği maksimize etmek için gereklidir. Son 10 yılda AlGaIn/GaN HEMT'lerin bozulma mekanizmasını anlamaya yönelik çok iyi çalışmalar yapılmıştır ancak bu proses halen tam olarak anlaşılabilmiş değildir [1].

Sınırlılıklar

GaN tabanlı transistörler boyutsal olarak çok küçük oldukları için maksimum kanal sıcaklığı deneysel olarak yüksek çözünürlükte tayin edilememektedir. IR kameradaki çözünürlük 3-5 μm ile sınırlı kalırken, aynı zamanda ortamda oluşan titreşimlerden dolayı ışıma haritası da bir miktar hata içermektedir. Düşük çözünürlükten dolayı, maksimum kanal sıcaklığı yerine 3-5 μm çapında bir alanda ortalama sıcaklık değeri ölçülmektedir, bu durum da cihazın beklenenden daha düşük kanal sıcaklıkları göstermesine sebebiyet vermektedir.

GaN tabanlı transistörlerin sayısal analizinde ise yine çok küçük bir geometride yüksek miktarda ısı atılmasından dolayı hücreden bağımsız model elde etmede güçlükler yaşanmakta ve sonuçlarda elektriksel-mekanik etkilerin (gerinimler, manyetik alanlar) sayısal analize dahil edilememesinden doğan yanılsamalar olabilmektedir. Boyutları mikron mertebesinde olduğundan atomik seviyede etkileşimler daha önemli hale gelmekte, ancak bu etkiler hem tam olarak bilinmemekte hemde modele dahil edilememektedir. Daha doğrusu sonuç elde etmek için multi-fiziksel bir yaklaşım gereklidir. Ayrıca sayısal modellemede çok kanallı transistörler hücre sayısını çok fazla arttırdığı için modeli basitleştirmek için analizler tek kanallı transistör için yapılmıştır, bu durumda çok kanallı transistörlerde maksimum kanal sıcaklığına olan bileşke etki ve kanalların kenardan içlere doğru olan sıcaklık dağılımı incelenememiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde AlGaIn/GaN transistörlerle ilgili literatürde yapılan çalışmalar genel hatlarıyla sunulmuştur.

Choi, Heller, Vetury ve Graham AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde mikro-Raman spektroskopisi yöntemini kullanarak sıcaklık ve gerilim ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli Raman sıcaklık ölçüm metotları için fiziksel doğruluk, hassaslık konusunda tartışmalar yapılmıştır. Raman metodunun en yoğun durumda bile cihazın çalışma koşullarında meydana gelen termo-elastik gerilmelerden dolayı kanal sıcaklığını yüksek hassasiyetle verememesi bu ölçüm tekniğini kısıtlamaktadır. Belli bir referans durumuna göre fonon hat genişliğindeki değişimler doğru sıcaklık sonuçlarını vermektedir. Fonon frekansları ve sıcaklık gerilim arasında doğru orantı olduğu varsayılan AlGaIn/GaN yüksek elektron taşıyıcı transistörlerde E_2 (yüksek) ve A_1 (LO) fonon modları için frekans atlamaları kullanılarak doğru ve zaman bakımından verimli sonuçlar elde edilmiştir. GaN tabakalarında fabrikasyon sırasında gerilmelerin gösterilmesi gibi kullanışlı uygulamalar ve AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörler üzerinde Raman ölçüm teknikleri gösterilmiştir [9].

Kuball ve diğerleri AlGaIn/GaN alan etkili transistörlerdeki hataları incelediler, temel olarak bu cihazlarda güvenilir çalışma bölgesini arttırmaya yönelik olarak, yakın zamanda yapılan hataların cihazın ısı karakteristikleri ve güvenilirliği üzerindeki etkilerini araştırdılar. Bu çalışmada, SiC katı daldırma lensleri kullanılarak nanometre bazında kanal sıcaklığı çözünürlüğü üzerindeki gelişmeler, sıcak elektron etkilerindeki sonuçlar ve bozuklukların ve nokta hatalarının cihaz güvenilirliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunlara ek olarak kanalın yan bölgelerinde dinamik iletim ötesi erişim kapanları sunulmuştur. Yaklaşımlar ısı ve elektriksel cihaz simülasyonlarıyla birleştirilmiş, elektriksel optik ve mikro yapı cihaz analizlerinin avantajlarını sunulmuştur [10].

Sommet, Mouginot, Quere, Ouarch ve Camiade darbe akım-voltaj ölçümleriyle ve küçük sinyal parametreleriyle mikrodalga güç AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı davranışını incelediler. Cihazın ısı direncinin doğru olarak belirlendiği yerlerde bindirme etkileri incelenmiştir ve cihazın yakalanma davranışı konusundaki bazı varsayımlar doğrulanmıştır. Elde edilen veriler üç boyutlu sonlu elemanlar simülasyonları

ile kontrol edilmiştir. Sonuç olarak GaN/SiC arasındaki ısı sınır direnci elde edilmiş ve literatürdeki değerler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen ilk sonuçlara ek olarak, büyük bir transistörden elde edilen 3 boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları elde edilmiş ve sıvı kristal ölçüm tekniği ile kontrol edilmiştir [11].

Cho, Bozorg-Grayeli, Altman, Asheghi ve Goodson oda sıcaklığında GaN'ın esas ısı iletkenliğini ve GaN ile alt tabaka arasındaki ısı arayüz direncini çıkartmak için GaN'ın değişen kalınlıklarında GaN-SiC kompozit alt tabakalarda pikosaniye mertebesinde termoreflektans ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. İki tamamlayıcı veri çıkarma sonucunda elde edilen değerler GaN-SiC ısı arayüz direnci için $4-5 \text{ m}^2 \text{ K/GW}$, GaN ısı iletkenliği için $157-182 \text{ W/mK}$ bulunmuştur. GaN-SiC arayüz direnç değerleri sunulmuştur ve deneysel belirsizlikler daha önce bu materyal kombinasyonu için bulunanlardan daha düşüktür [12].

Russo, d'Alessandro, Costagliola, Sasso ve Rinaldi kararlı ve kararsız rejim şartlarında SiC üzerine gömülmüş teknoloji harikası AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı davranışını incelemiştir. Sıcaklık dağılımlarında çeşitli transistör dizilimlerinin ve teknolojik çözümlerin etkisini görmek için otomatik olarak hücre yapısını ayarlayan ticari bir yazılım yardımıyla 3 boyutlu sonlu elemanlar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Cihaz yapısında dinamik ısı dağılımını tanımlamak için Foster/Caurer ağ yapısının uygunluğu değerlendirilmiştir. Isıl direnci belirlemek ve test edilen transistörde zamana karşı ısı empadans değerini görüntülemek için çeşitli deneysel teknikler uygulanmıştır [13].

Darwish, Hung ve Ibrahim AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısınmayı azaltmak için, yeni dağıtılmış yüksek elektron hareketli transistörü her kanal şeridi için ve aktif olmayan bölgeler halinde yapılandırdılar. Yeni yapılandırmanın gelişmiş performansı simülasyonlarla ve deneysel çalışma sonuçlarıyla gösterilmiştir. Yeni haliyle üretilen dağıtılmış kanallı GaN yüksek elektron hareketli transistörler geleneksel versiyonla karşılaştırıldığında kanal sıcaklığında 178°C 'den 150°C 'a varan bir düşüş gözlenmiş, çıkış gücünde 3 dB'lik bir artış ve cihaz ömründe 13 kat artış sağlanmıştır [14].

YaN, Liu, Khan ve Baladin çok iyi ısı iletkenliğe sahip grafen tabakalar eklenmiş ısı atımını kolaylaştıran kanallı GaN transistör modelini geliştirmişlerdir. SiC alt tabakası üzerindeki AlGaIn/GaN transistörün üst katmanına grafen ve grafit ince tabaka halinde

oluşturulmuştur. Mikro-Raman spektroskopisi yöntemiyle 13 W/mm'de çalışan transistörün kanal sıcaklığında 20°C'a varan bir düşüş görülmüştür, bu değer cihaz ömründe artış anlamına gelmektedir. Simülasyonlar grafen eklenmiş GaN transistörün Safir alt tabaka üzerindeki halinden bile daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Amaçlanan bölgesel ısı yayılımı nanometre mertebesinde malzemelerin ısı özelliklerini korurken, ısı yönetiminde önemli değişiklik sağlamıştır [15].

Prejs, Wood, Pengelly ve Pribble SiC üzerine GaN yüksek elektron hareketli güç transistörleri için ısı modelleme ve ölçüm konusunda sistematik ve tutarlı bir yaklaşım geliştirdiler. Geniş bant genişliğine sahip çok katmanlı yapılar ve montajlardaki güç yoğunluğu diğer transistör teknolojileriyle karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu için kanal sıcaklığı ve dolayısıyla cihaz ömrünü tayin etmek oldukça önemlidir. Hem darbeleri hemde sürekli dalgada farklı transistör yapılarında ve boyutlarında güç yoğunluğu, darbe genişliği ve çalışma faktörünün fonksiyonu olarak ısı dirençleri hesaplanmış, ölçülen kanal sıcaklıkları ve RF parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Isı direnç sonuçları yeni ısı atan büyük sinyal modelinde kullanılmış ve böylece transistör kanal sıcaklığı ve kazanç, çıkış gücü, verimlilik gibi RF performans parametrelerinin yükselteç tasarım sürecindeki etkilerine bakılmıştır. Taşıyıcıdaki sıcaklık değişimleri yüksek güçlü Doherty yükseltecindeki maksimum çalışma noktaları gibi bazı pratik örnekler de makalede sunulmuştur [16].

Hosch, Pomeroy, Saura, Kuball, Jung ve Schumacher yüksek güçlü AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısınma davranışını incelemişlerdir. Cihazın sıcaklığını belirlemek için farklı güç ve voltaj seviyeleri cihazlara uygulanmıştır. Kanal yönlendirmesi uygulanarak dağılan güç sabit tutulduğunda direnç voltajının cihaz sıcaklığını etkilediği görülmüştür. Sayısal elektro-termal cihaz simülasyonlarıyla incelenmiş ve açıklanmıştır [17].

Riedel ve diğerleri 3 boyutlu zamana bağlı Raman sıcaklık ölçüm yöntemiyle metal organik kimyasal buhar tortusuyla oluşturulmuş standart AlN çekirdek tabakasından sıcak duvar metal organik kimyasal buhar tortusuyla oluşturulmuş AlN çekirdek tabakasına geçildiğinde oluşturulan SiC epitaksisi üzerindeki GaN transistörde çekirdek tabakayla ilişkili GaN-SiC arasındaki ısı sınır direncini %25 azalttığı ve bunun da AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin çalışma sıcaklığını %10 civarında düşürdüğü

görülmüştür. Cihaz ömrü ve sıcaklık arasındaki eksponansiyel ilişki düşünüldüğünde düşük ısıl sınır direnci AlGaIn/GaN cihazların güvenilirliğini geliştirmede yeni fırsatlar sunabilir [18].

Joh ve diğerleri GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin kanal sıcaklığını tahmin etmek için basit ve güvenilir bir metot geliştirmişlerdir. Teknik, darbeleri I-V test kurulumu ile senkronize edilmiş performansla ilgili olan I_{Dmax} ve R_{ON} elektriksel ölçümlerine dayanmaktadır. Teknik yalnızca elektriksel ölçümleri içerdiği için, cihaz geometrisinde özel bir tasarıma veya paket halinde cihazın ölçülmesine gerek kalmamıştır. Geliştirilen tekniğin sağlamlığı ve hassasiyetini kanıtlamak için bu teknik farklı cihaz yapılarına uygulanmıştır [19].

Chattopadhyay ve Tokekar çalışmalarında n_s (yaprak taşıyıcı konsantrasyonu) ve E_F (bağlantıdaki iletim bandının tabanına göre fermi mertebesinde pozisyon) arasındaki polinomsal ilişkiye dayanan ısıl model sunmuşlardır. Sıcaklık artışının cihazın ısınmasına etkisi, polarizasyon, elektron hareketliliği, hızın doymuş hale gelmesi, düşük alan hareketliliği ve alt tabakanın ısıl iletkenliği gibi çeşitli parametreler üzerinde çalışılmıştır. Parazitik dirençler ve kanal uzunluğu modülasyonu da dikkate alınmıştır. Isınma etkileri ve cihaz parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Model kapalı formda ifadeye dayanmakta ve detaylı hesaplama gerektirmemektedir. Akım voltaj karakteristikleriyle ilgili hesaplamalarda ısınma etkisi sunulduktan sonra sonuçlar yayınlanan deneysel verilerle de uyumluluk göstermiştir [20].

Menozi ve diğerleri çalışmalarında ısıl direnç ve omik seri dirençler cinsinden AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde sıcaklığa bağlı karakterizasyon için basit dc teknikleri uygulamalarını sunmuşlardır. Basitliğine rağmen bu ölçüm teknikleri cihazın geniş bir aralıkta ortam/kanal sıcaklığı hakkındaki davranışı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Deneysel sonuçlar bağımsız ölçümlerle ve nümerik simülasyonlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır [21].

Heller ve Crespo mikrometre mertebesinde alt tabakaya kadar, cihaz için gerçekçi güç dağılımına sahip aktif cihazda elektro-termal cihaz modeli ile 3 boyutlu alt tabaka kombinasyonunu kullanarak, AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün çalışmasını modellemiştir. Cihazda çeşitli noktadaki sıcaklıklar besleme durumlarının,

alt tabaka kalınlığı ve sıcaklığının, kanal sayısının, kanal uzunluğu ve adımının fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Örnek olarak, kullandıkları test tekniğinden önemli oranda etkilenen endüstriyle ilişkili cihazlarda ömür testi sonuçlarını göstermişlerdir [22].

Cappelluti ve diğerleri arkadan monte edilmiş güç GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin alt tabaka ısı tasarımı ile ilgili çalışma gerçekleştirmişlerdir. İlgili malzemelerin ısı özellikleri ve ısı bağılıkları incelendikten sonra, 3 boyutlu ısı simülasyon temelinde tasarım kuralları önerilmiştir; sunulan sonuçlar SiC tabanlı cihazlarda, alt tabakanın inceltilmesinin ısı direnci veya dinamik ısı davranışı geliştirmedeği görülmüştür. III-V GaAs ya da InP tabanlı ayırık ya da entegre cihazlarda olanın aksine, inceltilmiş alt tabakalarda (karşılaştırmalı olarak kalın alt tabakalarda eş düzlemli tasarımın aksine) mikro şerit tasarımı genelde ısı olarak üstün özelliklidir. Bu durum ısı açıdan, eş düzlemli çoklu fonksiyona sahip GaN tabanlı tekli mikrodalga entegre devrelerin çalışmasını mümkün kılar, örneğin; düşük gürültü, güç safhaları sağlar ve delik kullanımı gerektirmez [23].

Sarua ve diğerleri kanalsız AlGaIn/GaN alan etkili cihazlarda 3 boyutlu mikro Raman termografi yöntemiyle sıcaklık dağılımında ısı sınır dirençlerinin etkisi incelenmiştir. SiC, safir ve Si alt tabakalar üzerindeki AlGaIn/GaN cihazlardaki sıcaklık dağılımı, deneysel verileri sonlu farklar ısı simülasyonlar ile karşılaştırılarak ısı sınır dirençlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. SiC ve Si alt tabakalarda cihazların ısınmasında ölçülebilir etkiye sahip olup ölçülen ısı sınır direnci yaklaşık $3.3 \times 10^{-8} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$ iken, düşük ısı iletkenliğinden dolayı safir alt tabakada $1.2 \times 10^{-7} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$ 'e varan bu değer cihazların ısınmasında önemli rol oynamaktadır. Belirlenen efektif ısı sınır direnç GaN/SiC ara yüzünde sıcaklıkla artmakta olup sırasıyla 150°C 'da $3.3 \times 10^{-8} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$, 275°C 'da $6.5 \times 10^{-8} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$ 'dir. Ayrıca düşük ısı iletkenliğe sahip GaN tabakalarının, GaN/alt tabaka ara yüzünde cihazın efektif ısı sınır direncine katkısı ve sıcaklık bağılılığı incelenmiştir [24].

Kuzmik ve diğerleri kararsız rejimde optik-elektriksel metotlar ve 2 boyutlu ısı model kullanarak çok kanallı metal hava köprüsü beş kaynak bağlantılı AlGaIn/GaN/safir yüksek elektron hareketli transistörün ısı davranışını incelemişlerdir. Kanal deseni her biri $50 \mu\text{m}$ genişliğinde $0.3 \mu\text{m}$ uzunluğunda 8 kanalı içerir, kanallar arası $35 \mu\text{m}$ 'dir ve elektrolitik hava köprüsünün kalınlığı $7 \mu\text{m}$ 'dir. Cihazın direnç bağlantısı $\sim 11.9 \text{ W/mm}$ 'lik güç

yoğunluğu sağlayan 10 μ s uzunluğunda 10 V'luk darbelerle sağlanmıştır. Kararsız rejim interferometrik haritalama optik tekniği hava köprüsü yapısının ısı enerjisini $\sim 10\%$ oranında soğutmaya yardımcı olduğunu gösterirken, elektriksel karakterizasyon metodu darbenin sonunda yüksek elektron hareketli transistör kanalında sıcaklık artışının ~ 185 K olduğunu göstermiştir. Yüzey sıcaklık haritası kararsız rejim interferometrik haritalama kullanılarak 2-6 μ s'lik zaman diliminde yapılandırılmıştır. Sıcaklık profilinde asimetri gözlenmiştir, örneğin kaynak bağlantısının $t=6$ μ s'de direnaja bağlantısından $\sim 25\%$ daha soğuk olduğu gözlenmiştir [25].

Vitusevich ve diğerleri safir ve SiC alt tabakalar üzerindeki çöktürel yapıları AlGaIn/GaN transistörlerde ısınma etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Çalışmalar sıcaklık artışının safir ve SiC alt tabakalarda tampon kalınlığı ile ters orantılı olduğunu göstermiştir. Isınma etkisini göstermek için gürültü spektroskopisi metodu da kullanılmıştır. Ayrıca, oda sıcaklığı spektrumu tuzaklardaki aktivasyon etkisini belirlemek için kullanılabilir. Hareketlilikte tersinmez gelişme ve kuantum saçılım zamanı, çöktürel yapıları AlGaIn/GaN ışınlatmasında toplamda ^{60}Co gama ışını 1×10^6 rad olarak kaydedilmiştir [26].

Jardel ve diğerleri çalışmalarında AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde kanal ve direnaja ilişkili yakalanma etkilerini içeren büyük sinyalli elektro-termal model sundular. Bu lineer olmayan model yakınsama kabiliyetini ve simülasyon zamanlarını koruyarak formüle edilmiştir. Yakalanma etkilerini yük çevriminde olduğu kadar I-V (akım-voltaj) karakteristiklerinin şekillerinde de gösteren ölçümler yapılmıştır. Kanal ve direnaja gecikme etkilerinin doğru modelinin önemli bir şekilde büyük sinyal simülasyon sonuçlarını değiştirdiği gösterilmiştir. Bu durum özellikle, çıkış yükü gerçek dünya simülasyonlarına benzer optimum eşleşme durumundan saptığı zaman doğrudur. Bu yeni model ve model yaklaşımı bu çalışmada sunulmuştur. Büyük sinyal simülasyon sonuçları sunulmuş ve yüksek voltajda bekleyen dalga oranında ve iki frekansta çeşitli yük empedansları için büyük sinyal ağ analiz ölçümleri ve çekme yükü ile karşılaştırılmıştır [27].

Oprins, Das, Ruythooren, Vandersmissen, Vandeveld ve Germain AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı performansı yükseltmek için, AlN taşıyıcı alt tabaka üzerine yüksek elektron hareketli transistörün hibrit entegresini yaptılar. Bu çalışmada çok kanallı yüksek elektron hareketli transistör için iki farklı hibrit entegre planı

karşılaştırılmıştır, bunlardan bir tanesi ters yonga entegrasyonu diğeri ise safir alt tabakanın lazer ile kaldırıldığı entegrasyondur. Bu iki yapı sonlu elemanlar analizi yapılarak karşılaştırılmıştır. Modeller deneysel çalışmalarla doğrulandıktan sonra, iki yapı da ısı olarak optimize edilmiştir [28].

Blackburn yaptığı çalışmasında yarı iletkenlerin elektriksel, optik ve fiziksel kontakt kategorilerinde sıcaklık ölçümlerine dair incelemeler yapmıştır ve bu kategoriler içinde çeşitli teknikler hakkında bilgi verilmiştir. Uzaysal, zamansal ve sıcaklık çözünürlüğü gibi sıcaklık ölçüm metotlarının avantaj ve dezavantajları sunulmuştur [29].

Freeman yaptığı çalışmasında genel mikrodalga SiC veya Safir üstündeki AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin kanal sıcaklığını bulmak için basit bir teknik geliştirmiş aynı zamanda ısı iletkenliğinin de sıcaklığa bağlı değişimini incelemiştir. Sonuçlar yakınlarda yayınlanan üç makaledeki mikrodalga cihazlarda ölçülen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Geliştirilen modelin sıcaklık sonuçlarına bakıldığında gerçek ortalama kanal sıcaklığı değerinin %5-10 içinde kaldığı görülmektedir [30].

Park, Shin ve Lee GaN tabanlı çoktürel bağlantılı alan etkili transistörlerin ısı çalışma sonuçlarını sunmuşlardır. Isıl hesaplamada 3 boyutlu modelde sıcaklıkları hesaplamak için PAMICE kodu kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde cihaz üzerindeki maksimum sıcaklıkları ölçmek için nematik sıvı kristal termografi yöntemi kullanılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri birbiriyle uyumlu çıkmıştır. Bu metotlar GaN tabanlı alan etkili transistörlerin özellikle güç cihazlarının ısı performansını değerlendirme konusunda oldukça önem taşımaktadır [31].

Sun ve diğerleri safir üzerindeki GaN tabanlı alan etkili transistörlerin ısı empedansının ısı iletken epoksili ters yonga bağlantısıyla önemli oranda azaltılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca safir tabanlı ters yonga takılı cihazlarda ısının aktif bölgeden GaN tabakası boyunca kanalda yayıldığını ve alt tabakanın toplam empedansta asıl katılımcı olduğunu gösterdiler [32].

Nuttinck ve diğerleri AlGaIn/GaN çoktürel bağlantılı alan etkili güç transistörlerinin ısı analizini gerçekleştirmişlerdir. Yüksek sıcaklıkta AlGaIn-GaN alan etkili transistörlerin

doğru akım, küçük sinyal, büyük sinyal ve gürültü performansları kaydedilmiştir. GaN alan etkili transistör için kaydedilen sıcaklık katsayıları GaAs yüksek elektron hareketli transistörlerinkinden daha küçük çıkmıştır, bu sonuç da GaN'ın yüksek sıcaklıklı uygulamalardaki potansiyel kullanımını desteklemektedir. Buna ek olarak, ısı parametrelerin doğru akım, küçük sinyal ve büyük sinyal karakteristikleri üzerindeki etkisi darbeleri ve sürekli dalga ölçüm kurulumuyla test edilmiştir. Sonuç olarak, GaN alan etkili transistörlerin ısı modelini optimize etmek ve ısınmanın önüne geçmek amacıyla geliştirilmiş ve tasarım kuralları getirilmiştir. Cihaz, devre ve paket perspektiflerinden ayrı incelemeler sunulmuştur [33].

Simms, Pomeroy, Uren, Martin ve Kuball elektriksel analiz ve mikro-Raman termografi yöntemiyle AlGaIn/GaN alan etkili transistörleri incelemişlerdir. Cihazlarda ortalama kanal sıcaklığı değerlerini çıkartmak için iki tipik elektriksel metot uygulanmıştır. Bu elektriksel sıcaklık ölçümlerini doğrulamak için kaynak-direnaj hattı açık cihazda mikron altı sıcaklık çözünürlüğü sağlayan mikro-Raman termografi yöntemi kullanılmıştır. Elektriksel teknikler aktif cihaz bölgesindeki ortalama sıcaklığı gösterdiğinden dolayı bu metotlar maksimum sıcaklığı olduğundan düşük göstermektedir. Sonuçlar elektriksel metotların farklı cihazların birbiriyle karşılaştırılmasında doğru fikir verdiğini gösterirken, maksimum kanal sıcaklığının tespit edilmesinde zorluklar yaşandığını göstermektedir. Bu sonuçlar elektriksel sıcaklık ölçümlerine dayanan ömür testi ve güvenilirlik konularında dikkate alınmalıdır [34].

Ji ve diğerleri katı halli cihazların 3 boyutlu ısı analizinin eş odaklı mikro-Raman spektroskopisi ile ölçülebilirliğini göstermiştir. Bu, ters yonga takılı AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistör üzerinde gösterilmiştir. Isı yayılımını ve cihaz optimizasyonunu daha iyi anlamak için yalnız cihazın aktif bölgesindeki sıcaklık dağılımını değil, alt tabaka üzerindeki sıcaklık dağılımını da görmek gerekir. Bu durum geleneksel ısı görüntüleme teknikleriyle sağlanamaz. 3 boyutlu ısı görüntüleme, eş odaklı mikro-Raman spektroskopisi yöntemi kullanılarak alt tabaka içinde farklı derinliklerde sıcaklığa bağlı Raman atlamalı fononlar gönderilerek sağlanmıştır. Aktif cihaz bölgesini ters yonga taşıyıcıya bağlayan metal bağlantılar üzerinden ısı yayılımı gösterilmiştir. Deneysel sıcaklık sonuçları 3 boyutlu sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarıyla oldukça uyumlu çıkmıştır [35].

Kuball ve diğerleri safir ve SiC alt tabakalar üzerindeki aktif AlGaIn/GaN alan etkili transistörlerde ısınma etkilerini gözlemlemişler ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık haritasını çıkarmada $\approx 1 \mu\text{m}$ uzaysal çözünürlüğe ve 10°C 'tan yüksek sıcaklık hassasiyetine sahip mikro-Raman spektroskopisi tekniğini kullanmışlardır. Cihazın kanal-direnaj hattında 180°C 'ye varan sıcaklık artışı gözlenmiştir. 3 boyutlu ısı yayılım modelinden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle uyumluluk göstermiştir. Safir ve SiC üzerinde üretilen cihazlarda yapılan karşılaştırmalarda, SiC alt tabakaya sahip cihazların ~ 5 kat düşük ısı direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır [36].

Bhunja, Boutros ve Chen paket seviyesinde yüksek güç yoğunluklu GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı yönetimini sıvı mikro jet eklentisiyle ve faz değişikliğiyle sağlamışlardır. 64 kanallı cihazda geliştirilen soğutma tekniğinin geleneksel hava ile soğutmaya göre güç yoğunluğunda % 43'lük bir gelişme sağladığı gözlenmiştir. Cihazın ısı iç direnci daha düşük olan birleşik devrelerdeki performans artışının diğerlerine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Cihazda ısınan bölgeyi keşfetmek için ve maksimum kanal sıcaklıklarını bulmak için yüksek güvenilirlikli hesaplanabilir model geliştirildi. Cihaz sıcaklığını düşürmek için alt tabaka kalınlığını değiştirmek gibi pratik metotlar nümerik simülasyonlarla gösterilmiştir. Örneğin SiC alt tabaka kalınlığını $400 \mu\text{m}$ 'den $75 \mu\text{m}$ 'ye düşürerek maksimum kanal sıcaklığında %24'lük düşüş, güç kazanç yoğunluğunda ise %33'lük bir artış sağlanmıştır. Çeşitli güç seviyelerinde bölgesel mikro boyutlu ısı kaynakları (kanallar), kanal-kanal arası ısı etkileşim ve bunların kombine etkisinden kaynaklanan sıcaklık artışı incelenmiştir [37].

Kuball ve diğerleri çoktörel yapıları AlGaIn/GaN alan etkili transistörler üzerinde birleşik Raman-İnfrared termografi ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. İnfrared termografi hızlı sıcaklık dağılım haritaları çıkarabilirken, mikro-Raman seçilen cihaz bölgelerinde yüksek uzaysal çözünürlükle maksimum sıcaklık değerlerini verebilmektedir. Aktif cihaz bölgesinden alınan Raman sıcaklık ölçüm sonuçları sonlu farklar simülasyonları ile uyumluluk göstermektedir. İnfrared kamera sayesinde geniş cihaz bölgelerinden alınan sıcaklık değerleri Raman verileri ile birleştirilmiştir. İnfrared sıcaklık ölçüm yöntemi küçük aktif cihaz bölgelerinde, sıcaklığın yüzeysel ortalama değerlerini alarak maksimum cihaz sıcaklığını olduğundan küçük gösterirken, sıcaklık profil hat genişliğini olduğundan büyük göstermektedir. İnfrared ölçüm yönteminde cihaz düzenine bağlı olarak, cihaz sıcaklığında derinlik ortalaması alınmaktadır. Yeni geliştirilen yaklaşım mikrodalga

birleşik entegre devrelerinde sıcaklıkların görüntülenmesinin ve güvenilirlik açısından optimizasyonunun sağlanmasında yeni fırsatlar sunmaktadır [38].

Kuball ve diğerleri çalışmalarında Raman termografi konusunda geliştirdikleri yeni teknikleri ve GaN mikro elektroniklere uygulamasını sunmuşlardır. Cihazın ısınması ve elektriksel güç sarfıyatından kaynaklanan sıcaklık artışı cihazın performansı ve güvenilirliğinde önemli rol oynar ancak bunu belirlemek çoğu cihazda mikrometre altı ölçekte oldukça zordur, geleneksel sıcaklık ölçüm yöntemleriyle gözlenemez. Raman ölçüm yönteminin yeni tekniği mikron altı uzay ve nanosaniye zaman çözünürlüğünde cihaz ısınmasında denenmemiş bir bakış açısı sunmaktadır. Farklı düzenlerde ve farklı alt tabakalarda GaN elektronik cihazların ısı dirençleri karşılaştırılmıştır, GaN ve alt tabaka arasındaki ısı direnç belirlenmiştir. Cihaz düzlemindeki ve cihazdan alt tabakaya kadar sıcaklık ölçümleri 3 boyutlu alınan sıcaklık ölçümleri belirlenmiştir. Darbeli çalışan cihazlarda sıcaklık değerleri çalışma çevrimi ve darbe genişliğine bağlı olan zamanın fonksiyonu cinsinden bulunmuştur. Elektriksel metotlarla yapılan sıcaklık ölçüm karşılaştırmalarında maksimum sıcaklık tanımlanırken dikkatli olunmalıdır [39].

Zhang, Zhao ve Yin yüksek güçlü çok kanallı AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ısınma etkilerinin sonucu olarak kararsız rejimde sıcaklık ve ısı gerilim tepkilerini incelemişlerdir. Ticari bir yazılım kullanmak yerine, hibrit zaman sonlu elemanlar metodu baz alınan kendi geliştirdikleri algoritma ile 3 boyutlu yapıda ısı-mekanik simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Malzemelerle ilgili en önemli parametrelerin sıcaklığa bağlı özellikleri, özellikle elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik, ısı yayılım katsayısı ve Young modülü birkaç lineer olmayan polinomsal ifade ile tanımlanmıştır. Geliştirilen algoritma ticari bir yazılım olan COMSOL sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve uyumluluk göstermiştir. Bu çalışmanın yüksek güçlü iletişim sistemleri ve radar sistemlerinde kullanılan AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ve mikrodalga birleşik devrelerin güvenilirlik ve çalışma ömrü hesaplanmasında faydalı olması beklenmektedir [40].

Calame, Myers, Wood ve Binari SiC tabanlı AlGaIn/GaN yüksek hareketli elektron taşıyıcı radyo frekanslı transistörlere mikro kanal tabanlı soğutma teknikleri uygulayarak sonlu elemanlar ısı ve mekanik simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında oksijenli yüksek iletkenlikli bakır ve AlN mikro kanallı soğutucular üzerine konulan standart kalıp

kalınlığı, hibrit elmas/silikon mikro kanal soğutucular üzerine inceltilmiş kalıplar gibi çeşitli sorunlar üzerinde durmuşlardır. Aktif cihaz boyutları ve soğutma stratejileri X bantta çalışan (~ 10 GHz) 50-100 W arası kararlı rejimde ısı yayan yükselteçlere göre seçilmiştir. Kalıp bağlama malzemelerinin cihaz sıcaklığı ve mekanik gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kalıp bağlama malzemelerinin plastik akma davranışları ve paketin diğer mekanik kısımları da analize dahil edilmiştir. X bantla uyumlu bir cihazda kararlı rejimde 100 W'lık ısı çıkışının $140-185^{\circ}\text{C}$ aralığında maksimum transistör sıcaklığına ve önemsiz mekanik gerilmelere sebep olduğu gözlenmiştir [41].

Darwish, Bayba ve Hung GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin kanal sıcaklığını Schottky kanal-diyot karakteristiklerini kullanarak ölçtüler ve simülasyon sonuçları, teorik sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırdılar. Darbeli kanal-diyot direnci ve eşik voltajı kanal sıcaklığını bulmada yardımcı olmuştur, bulunan sonuçlar diğer metotların sonuçlarıyla uyum içindedir. Geliştirilen teknik kanal sıcaklığını tahmin etmede hızlı ve kolay uygulanabilir bir metodoloji sunmaktadır [42].

Kuball ve diğerleri yarı iletken cihazlarda zaman çözünürlüklü Raman termografi yöntemiyle zamana bağlı sıcaklıkları mikrometre altı uzay çözünürlüğüyle ölçmüşlerdir. Bu teknik SiC ve safir üzerindeki AlGaIn/GaN alan etkili transistörlerde ve kanalsız cihazlarda 200 ns'lik zaman çözünürlüğü ile gösterilmiştir. Sıcaklığında ~ 10 ve ~ 140 μs zaman sabitiyle yavaş değişimlere sahip SiC ve safir alt tabakalı AlGaIn/GaN cihazlar açılıp kapandıktan sonra 200 ns'nin altında sıcaklıkta çok hızlı değişimler gözlenmiştir. Ayrıca cihaz alt tabakasında ısı yayılımı da gösterilmiştir [43].

Florian, Santarelli, Cignani ve Filicori hazırladıkları laboratuvar test kurulumu ile bir grup ölçüm ve tanımlama prosedürleriyle, AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı davranışını karakterize ettiler ve mikrodalga yüksek güç yükselteçleri için uygun hale getirdiler. Test kurulumu zamana bağlı pozitif direnç bağlantı darbelerine dinamik tepki veren direnç akımını farklı sıcaklıklarda ve farklı güç yoğunluklarında ölçmeyi sağlamıştır. Amaçlanan ölçüm şartları bu önemli teknoloji için ısı davranışları elektriksel dağıtıcı etkilerden ayırmıştır. Darbeli radar uygulamaları için geliştirilen C bant yüksek güç yükseltecin son evresi olarak tasarlanmış tek hücreli 1 mm'lik cihaz ve 4 mm'lik güç çubuğu için ısı direnç ve zamana bağlı ısı direnç tanımlanmıştır. Kararsız rejimde elde edilen veriler, cihazın çalışırkenki kanal sıcaklığını GaN teknolojilerinde

bilinen darbeleri yüksek güç yükselteçlerin önemli özelliği olan darbe genişliğinin ve çalışma evresinin fonksiyonu olarak hesaplanmasını sağlamıştır. Ölçülen ısı verileri, ısı direncinin sarf edilen güçle ve taban sıcaklığıyla ilişkisinin doğrusal olmadığını göstermiştir ve bu cihazlarda yaşanacak bir sonraki problemin bu tip cihazları bir arada paketlemek olduğunu göstermiştir [44].

Schwitter, Parker, Mahon, Fattorini ve Heimlich kanal metal direnç termometre yöntemi ile Si alt tabaka üzerindeki AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde kanal adımı, kanal sayısı gibi yapıların ve cihaz bağlantılarının ısı etkisini incelemiştir. Geliştirilen teknik, kanaldaki ısı kaynağından direk etkilenen kanal tabakalarının maksimum sıcaklığını bulmak için cihazın kanal metalizasyonunun ısı cevabını karakterize etmiştir. Düşük kanal sızıntı seviyesine sahip GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin kanal metal direnç termometre yöntemi için daha uygun aday oldukları gözlenmiştir. Bağlantıya bağlı ısınma, güç çıkışından bağımsızlık cihazlarda gözlenmiştir. Bu yüzden, farklı cihaz konfigürasyonlarına ait maksimum kanal sıcaklıkları doğruluğu geliştirmek için sabit bağlantı ve sabit güç yoğunluğunda (3,75 W/mm) karşılaştırılmıştır. Yüksek direnç bağlantısında kanal ısı kaynağının kanal alanı kenarına göçünden dolayı maksimum sıcaklıkta azalma gözlenmiştir. Bu da yayınlanmış elektro-termal bir model için bağımsız deneysel doğrulama sağlamıştır. 3 boyutlu ısı model sunulmuştur, çalışma koşullarında ve cihaz konfigürasyon aralığının ~%6 içinde olan sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu çalışma sayesinde ısı sınır direnç tabakasının uygulanması ve kanal metal direnç termometre yöntemiyle sıcaklık değerlerinin çıkarılması mümkün hale gelmiştir [45].

Zhao ve diğerleri açık pakette AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin kanal sıcaklığını infrared mikroskop ile ölçmüşlerdir. Kanal sıcaklığı dağılımının davranışları, maksimum kanal sıcaklığı ve doğru akım bağlantısında ısı dirençler incelenmiştir. Çok kanallı cihazda ısı dirençler belirlenmiştir. Çıkış gücü ve taban sıcaklığı ve farklı cihaz yapılarının maksimum kanal sıcaklığı arasındaki ilişki karşılaştırılmıştır. Güvenilirlik testi sırasında yeterli gerilmeyi uygulamak için görüntüleme koşulları ileri düzeydedir. İnfrared mikroskopu ile cihazda ısı direncinin düşürülmesine yönelik cihaz optimizasyonu ve cihaz parametrelerin güvenilirliği nasıl etkilendiğine yönelik çalışmalar yapılmıştır [46].

Riccio ve diğerleri HR-Si mikro şerit teknolojisi üzerinde AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün elektro-termal davranışını deneysel metotlarla incelemişlerdir. Isıl simülasyonları doğrulamak için infrared ısı doğru akım karakterizasyon metodunu kullanarak HR-Si'un 50 μm aşağı gömüldüğü 1 mm'lik aktif cihaz çevresinde ısınma etkileri ve sıcaklık artışı incelenmiştir. Farklı güç çıkış durumlarında maksimum kanal sıcaklığı ve yapının ısı direnç değerleri elde edilmiştir. Aynı cihaz çevresi için, kanal adımı etkisi deneysel olarak araştırılmış ve kanal sıcaklığıyla ilişkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, maksimum çıkış gücüyle ilgili bilgiler edinilmiş, elektro-termal davranış deneysel olarak gözlenmiştir [47].

Kim yaptığı çalışmada AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün kanal sıcaklığını düşürmek için alt tabaka olarak yüksek ısı iletkenliğe sahip elmas kullanmıştır. Elmas üzerindeki AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin deneysel olarak doğrulanması mikro-Raman spektroskopisi ile yapılmıştır ve sonlu elemanlar analizi ile cihaz tasarımları incelenmiştir. Isıl parametrelerin güvenilirliğe etkisinin yanı sıra çevresel etkiler de cihazın bozulmasında rol oynamaktadır. Yüksek yoğunluklu ve iğne deliği olan ince filmler ve atomik tabaka tortusunun yanı sıra AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörleri, yüksek nemli ve yüksek sıcaklıklı çevre etkilerinden korumak için ultra ince bariyer filmler kullanılmıştır. Sonuçlar yüksek negatif kanal bağlama gerilim testindeki cihazları nemden korumanın mümkün olduğunu göstermiştir, ancak korunmamış cihazlar aynı gerilim testi koşullarına dayanamamıştır. Bu yüzden atomik tabaka tortusu kaplamasının yapılmasının AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin korunmasında ve paketlenmesinde fazlasıyla yararı vardır [8].

Darwish, Bayba ve Hung yaptıkları çalışmada tek kanallı GaN tabakasında, safir, Si ve SiC alt tabakalarda çok kanallı AlGaIn-GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı direnci tanımlayan kapalı formda ifade geliştirmişlerdir. Geliştirilen model GaN tabaka kalınlığına, alt tabaka tabakalarının kalınlıklarına, kanal adımlarına, kanal uzunluğu ve genişliğine, GaN'ın ve alt tabakaların ısı iletkenlik değerlerine bağlıdır. Yapılan çalışma deneysel gözlemlerle doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra geliştirilen model çeşitli cihazlar için yapılan sayısal simülasyonlarla karşılaştırılmış ve %1-2 değeri içinde uyum gözlenmiştir [48].

Yüksek güçlü cihazlara olan ihtiyacın hızla arttığı günümüzde bu cihazlarda sıklıkla tercih edilen AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerle ilgili literatürde birçok sayıda sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda çoğunlukla kanal sıcaklığını belirlemek için 1-2 μm çözünürlüğe sahip mikro-Raman ve 3-5 μm çözünürlüğe sahip infrared kamera kullanıldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, sıvı kristal ölçüm, termoreflektans, gürültü spektroskopisi, kanal metal direnç termometre gibi ölçüm yöntemlerinin kullanıldığı da görülmüştür. Ayrıca AlGaIn/GaN transistörlerde akım-voltaj testleri ve doğru akım ölçümleri gibi elektriksel metotlar içeren çalışmalar da yapılmıştır. Sayısal çalışmalarda genellikle 3 boyutlu transistör modelleri kullanılmış, elektro-ısı analizler hatta mekanik gerilim analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların çoğunda kanal sıcaklık değerleri karşılaştırılmış, bazılarında ise ısı direnç ya da akım-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Literatürde AlGaIn/GaN tabanlı farklı cihaz konfigürasyonlarıyla ilgili çeşitli yaklaşımlar yapılmıştır; elektriksel optik ve mikro yapıli cihaz analizleri yapılmış, ısı karakteristikler ve güvenilirlik üzerine etkiler araştırılmış, farklı ağ yapıları denenerek dinamik ısı dağılımı bulunmaya çalışılmış, kararsız rejimde darbe genişliğine bağlı ısı dirençler hesaplanmış, farklı transistör modellerinde ömür testleri yapılmış ve karşılaştırılmış, elektron seviyesinde etkiler incelenmiş, analitik çalışmalarda farklı parametrelere bağlı kapalı formda ifadeler geliştirilmiş, bazı tasarım kuralları önerilmiş, farklı bağlantı teknikleri denenmiş, kalıp bağlama malzemelerinin cihaz sıcaklığı ve mekanik gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiş, kararsız rejimde transistördeki ısı davranışlar incelenmiş, sıvı mikro jet eklentisiyle veya mikro kanalllar ile cihaz sıcaklığını düşürmeye yönelik çalışmalar yapılmış, farklı algoritmalar geliştirilerek ısı-mekanik simülasyonlar gerçekleştirilmiş, çok kanallı cihazlarda kanal adımının ve kanal sayısının transistörün ısı performansına etkisi gözlenmiş, alt tabaka malzemesi, alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, kanal genişliği, güç, darbe genişliği gibi parametrelerin kanal sıcaklığı veya ısı direnç üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ancak AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı dirence etki eden tüm parametrelerin incelendiği, en etkili ısı transferini sağlayan optimum transistör modeli oluşturmaya yönelik tasarım verilerinin sunulduğu bunun yanı sıra kanal sıcaklıklarının ve ısı dirençlerin bir arada verildiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, literatürde incelenen transistör modellerindeki tüm parametreler ve bu parametrelerin değer aralıkları baz alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. İncelenen parametreler alt tabaka malzemesi, alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, kanal genişliği, ısı güç ve darbe genişliğidir. Tüm bu parametrelerin kanal sıcaklığına ve ısı dirence etkileri incelenmiş,

sıcaklık dağılımları ve grafikler sunulmuş, elde edilen veriler yorumlanarak transistör tasarımında ısıl perfromansı arttırmak için dikkat edilmesi gereken noktalar vurgulanmıştır. Bu çalışmanın yüksek güç gerektiren uygulamalarda ve radar uygulamalarında kullanılan AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ve mikrodalga birleşik devrelerin geliştirilmesinde faydalı olması beklenmektedir.





3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu bölümde incelenen problemin sayısal metotla çözülmesi için gerekli tanımlamalar yapılmış, çözüm alanı ve çözümde kullanılan korunum denklemleri sunulmuştur. Bunlara ek olarak problemin sınır şartları ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Ayrıca çözümlerde kullanılan sayısal akışkanlar dinamiği paket programı ve çözüm yaklaşımı ile ilgili açıklamalar yapılmıştır.

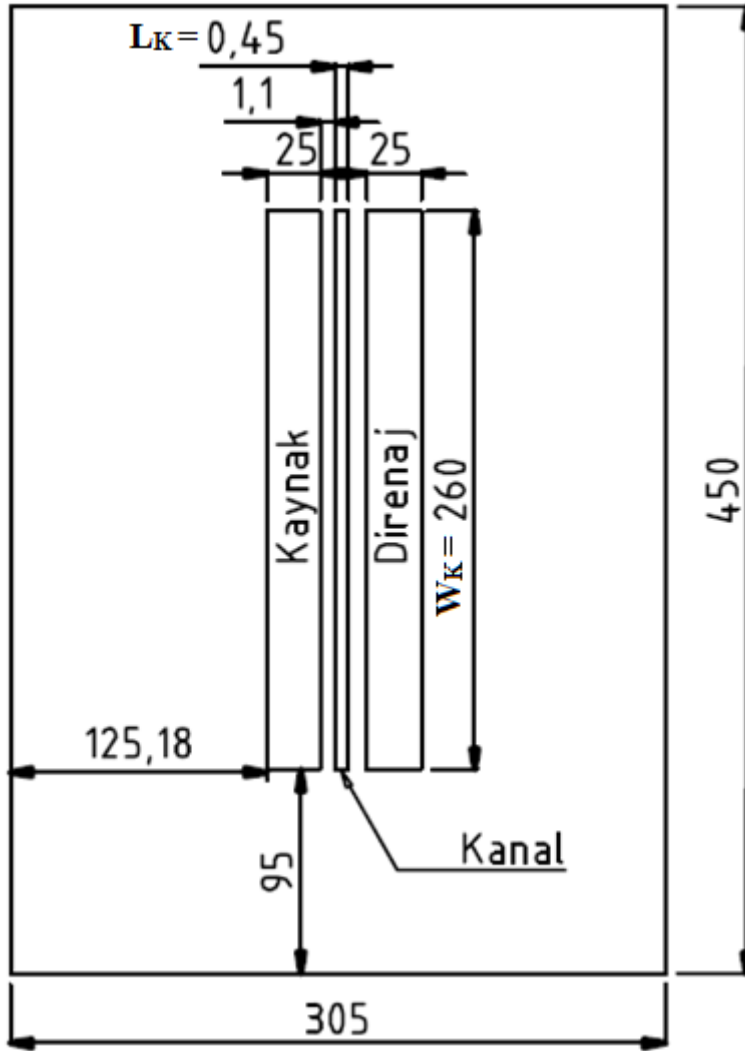
3.1. Problemin Genel Tanımı

Bu çalışmada tek kanallı AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde kararlı rejimde farkı güç atımlarında, farklı alt tabaka malzemelerinde ve bunların farklı kalınlıklarında, farklı kanal uzunluklarında gerçekleşen ısı transferi incelenmiş, maksimum kanal sıcaklıkları ve hesaplanan toplam ısı dirençler karşılaştırılmıştır, kararsız rejimde kanal sıcaklığı değişimleri incelenmiştir. Analiz edilen transistör modelinde kanal uzunluğu 0,45 μm alınmış, alt tabaka olarak 200 μm SiC kullanılmış, kanal genişliği 260 μm olarak alınmış, kaynak direnç genişliği 4,65 μm alınmıştır, taşıyıcı olarak CuW kullanılmıştır, alınan bu değerler literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan değer aralığındadır. Literatürde yapılan çalışmalarda taban sıcaklığı çok hızlı bir şekilde arttığı için 70-80°C arası alınmıştır, bu çalışmada 70°C taban sıcaklığı tanımlanmıştır. En etkili transistör yapısını ve çalışma koşullarını bulmak için parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir, bunun için SiC, Si, Safir alt tabakalarda ısı kaynağına 1-3 W aralığında ısı güç değerleri tanımlanmış, kararsız rejimde 0,5-300 μs aralığında darbe genişliklerinde güç uygulanmış, alt tabaka kalınlığı 50-300 μm aralığında değiştirilmiş, kanal uzunluğu 0,25-1,5 μm arasında değiştirilerek maksimum kanal sıcaklığına ve toplam ısı dirence etkileri gözlenmiştir. Sınır şartları ve malzemelerin sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değerleri tanımlanarak ANSYS-Icepak paket programı yardımı ile sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

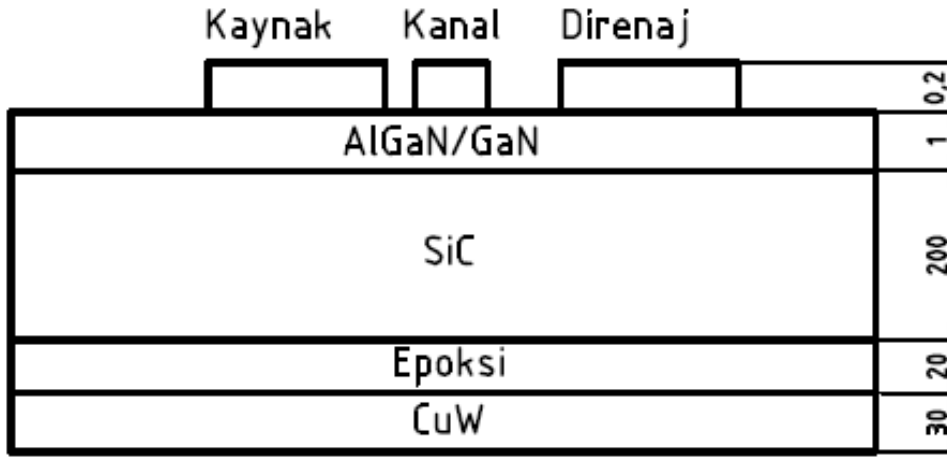
3.2. Fiziksel Model

Sayısal olarak incelenecek transistör modelinin 2 boyutlu desen görüntüsü ve boyutları Şekil 3.1.'de, transistörün kesit görünüşü ve transistör yapısındaki katmanların boyutları

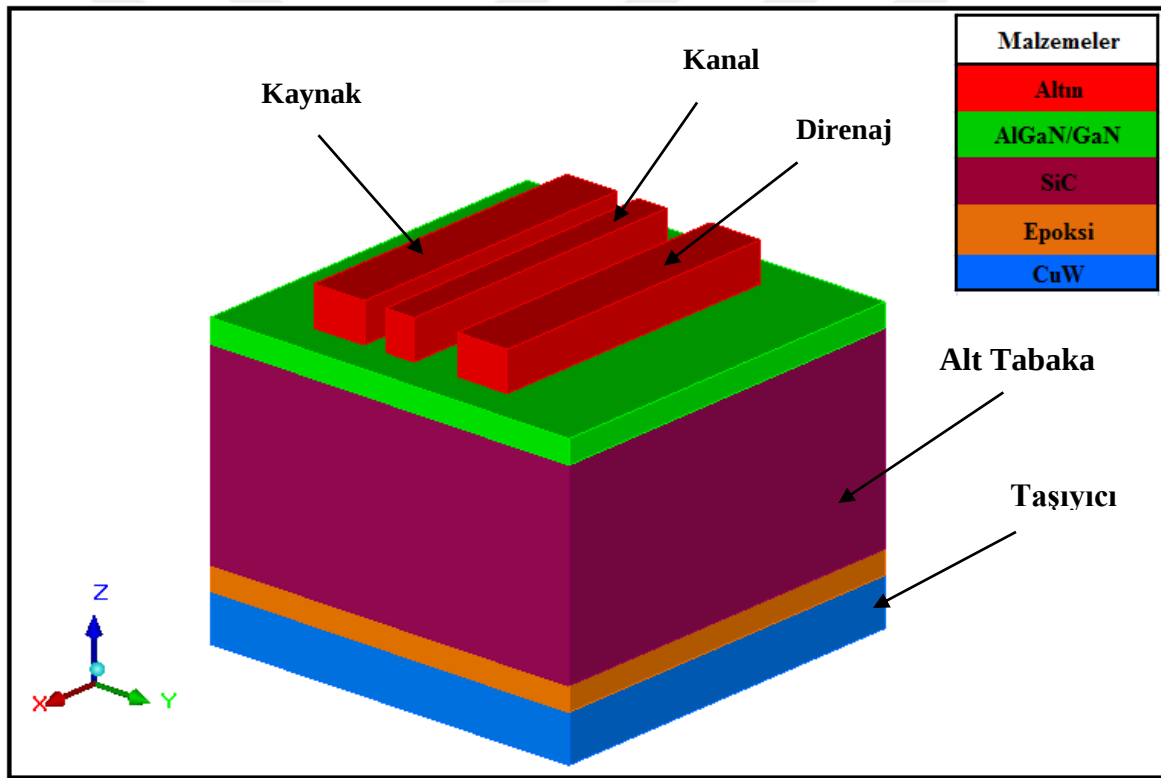
Şekil 3.2.'de verilmiştir. Şekil 3.3.'de ANSYS-Icepak programı yardımıyla hazırlanan üç boyutlu transistör yapısı gösterilmiş, katman malzemeleri sunulmuştur.



Şekil 3.1. Transistörün üst görünüşü (ölçüler µm cinsinden verilmiştir)



Şekil 3.2. Transistörün kesit görünüşü (ölçüler μm cinsinden verilmiştir)



Şekil 3.3. Transistörün üç boyutlu temsili görünüşü ve malzemeler

3.2.1. Varsayımlar

AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün sayısal analizinde çevreye radyasyon ile olan ısı transferi ihmal edilmiş, transistör çalışma koşullarında gaz sızdırmaz modül içerisinde kullanıldığından ve yüzey alanı çok küçük olduğundan (üst yüzey alanı yaklaşık $0,14 \text{ mm}^2$) konveksiyon ile olan ısı transferi de ihmal edilmiştir. Yapılan analizlerde

transistörün yüzeyleri yalıtılmış kabul edilmiş ve yalnızca iletimle ısı transferi olduğu varsayılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar baz alınarak ısınsın yalnızca iletimle aktarıldığı kabul edilmiştir. Yapılan analizler sonucu CuW taşıyıcıda belli bir kalınlıktan sonra sıcaklığın değişmediği gözlenmiş, fazla hücrelerin getirdiği hesaplama yükünden kurtulmak için efektif bir kalınlık değeri kullanılmıştır. Isı kaynağı literatürde AlGaIn/GaN tabakasının üstünden yaklaşık 20-30 nm altta ve 0,5-1,5 µm arası genişlikte, kanal bölgesinin altında tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada ise ısı kaynağı AlGaIn/GaN tabakasının üst katmanından 30 nm aşağıda, 1,5 µm genişliğinde, kanal uzunluğu boyunca tanımlanmıştır. AlGaIn/GaN ve SiC'in ısı iletkenlik değeri sabit kabul edilmiştir. AlGaIn/GaN transistörler metal organik kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile alt tabaka üzerine gömüldüğünden ve problemdeki ölçüler mikro metre mertebesinde olduğundan yapılan analizlerde katmanlar arasına ara yüz direnci konulmamıştır.

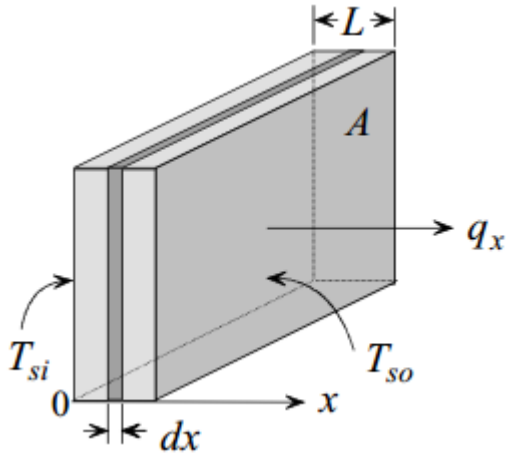
3.3. Matematiksel Modelin Tanımlanması

Bu bölümde problemin çözümünde kullanılan sayısal analizin temelini oluşturan enerji korunum denklemleri ve ısı iletken hesaplanmasında kullanılan toplam ısı iletkenin sıcaklık değişimine bağlı ifadeleri sunulmuştur.

3.3.1. Korunum denklemleri

Bu bölümde öncelikle katılarda moleküler aktiviteden kaynaklanan ısı transferinin formüle edildiği tek boyutta Fourier yasası denklemi çıkarılmış, daha sonra üç boyutta genel diferansiyel denkleme uygulanmıştır. Son olarak da toplam güç ve sıcaklık değişimine bağlı olarak ısı iletken formülü sunulmuştur [49].

Kararlı rejimde, tek boyutta ısı transferi olduğunu varsayalım, Şekil 3.4.'de gösterilen q_x , x-yönünde ısı transfer hızı, L duvar kalınlığı, yüzey alanı A olsun, deneyler q_x 'in yüzey alanı, A ve yüzeylerdeki sıcaklık farkı, $(T_{si}-T_{so})$ ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir [49].



Şekil 3.4. İletimle bir boyutlu ısı transferi [49]

$$q_x \propto \frac{A(T_{si}-T_{so})}{L}$$

Denkleme orantı sabiti k eklersek,

$$q_x = k \frac{A(T_{si}-T_{so})}{L}, \quad (3.1)$$

k ısı iletkenlik olarak adlandırılır ve malzeme özelliğidir, bu denklemde ısı iletkenlik, k'nın sabit olduğu varsayılmıştır. Eşitlik 3.1, Şekil 3.4.'de gösterilen dx kalınlığında difransiyel elemana uygulanırsa T_{si} , $T(x)$, T_{so} da $T(x+dx)$ olur, L yerine de dx yazılırsa, eşitlik aşağıdaki duruma gelir [49],

$$q_x = kA \frac{T(x)-T(x+dx)}{dx} = -kA \frac{T(x+dx)-T(x)}{dx}$$

$T(x+dx)-T(x)=dT$ olduğundan,

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'nin yardımıyla ısı transfer hızının birim alandaki ifadesi olan ısı akısı q_x'' 'i de tanımlayabiliriz [49],

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

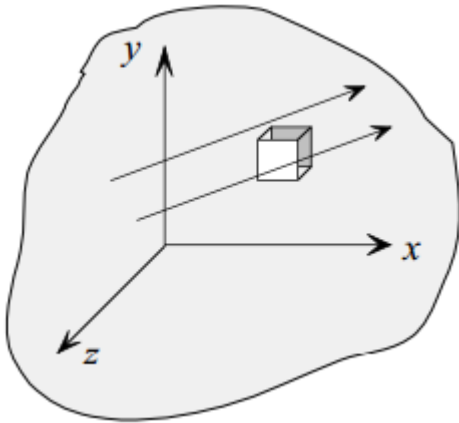
Eşitlik 3.3 bir boyutta ısı iletimini gösterir, üç boyuta ve kararsız rejime uyarlanabilir, bu durumda Eşitlik 3.3'deki adi diferansiyel kısmi diferansiyele dönüşür ve ısı transfer yönünü gösterecek şekilde düzenlenirse [49]:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4 Fourier ısı iletim yasası olarak bilinir. Denklemin başındaki negatif işaret gradyan negatif olduğunda ısı akışının pozitif yönde olduğunu gösterir, yani termodinamiğin ikinci yasasına uygun olarak sıcaklığın azaldığı yöndedir. Isıl iletkenlik k , her yerde eşit olmak zorunda değildir, Eşitlik 3.4 malzemenin tek bir noktasına uygulanmaktadır, sonlu bir bölgeye değil, esasında ısıl iletkenlik sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Ancak, Eşitlik 3.4 yalnızca izotropik malzemeler için geçerlidir, ısıl iletkenlik k , bu malzemelerde bir yön için sabittir. Sıcaklık dağılımı $T(x,y,z)$ biliniyorsa her hangi bir yöndeki ısı akısı, fonksiyonun diferansiyelini alıp Eşitlik 3.4'te yerine konularak rahatlıkla bulunabilir [49].

Enerjinin korunumu

Kartezyen koordinatlarda tanımlanan üç boyutlu ısı transferinin gerçekleştiği Şekil 3.5.'de gösterilen son derece küçük bir elemanı baz alarak diferansiyel formülasyona başlayabiliriz. Formülü genelleştirmek için ele alınan malzemenin hareket ettiği varsayılmıştır, buna ek olarak malzemenin birim hacminde q''' hızıyla enerji üretildiğini varsayalım [49],



Şekil 3.5. Kartezyen koordinatlarda diferansiyel eleman [49]

$dx dy dz$ hacminde üç boyutlu son derece küçük bir eleman alıp enerjinin korunumu (termodinamiğin birinci yasası) uygulanırsa [49],

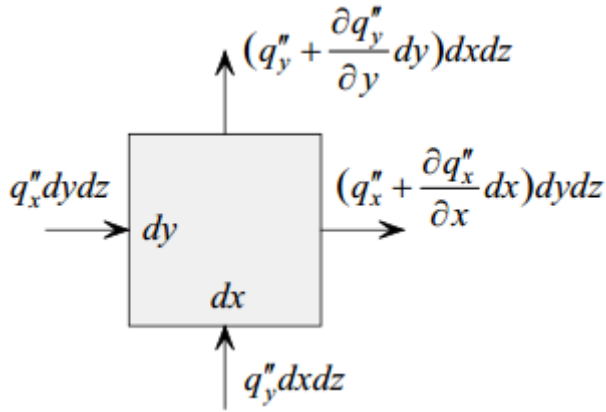
Giren enerji + Üretilen enerji - Çıkan Enerji = Elemandaki enerji değişimi

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E} \quad (3.5)$$

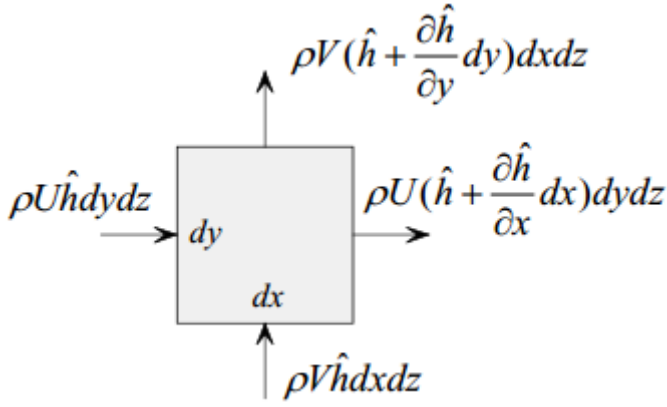
Bir sonraki adımda denklemini çözülebilir hale getirmek için, Eşitlik 3.5 bağımlı değişken T , yani sıcaklık cinsinden ifade edilmelidir. Formülasyonu basitleştirmek için bazı varsayımlar yapılmalıdır, bunlar [49];

1. Hızın her yerde eşit olduğu kabul edilir,
2. Basıncın sabit olduğu kabul edilir,
3. Yoğunluğun sabit olduğu kabul edilir,
4. Potansiyel enerjideki değişimler ihmal edilir,

Enerjideki değişimler iletimden ve kütle hareketinden kaynaklanmaktadır, bu iki enerji transferi Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b'de sırasıyla gösterilmiştir, x - ve y -bileşenleri de benzer şekilde çıkarılabilir. İletimde elemana giren enerjiler sırasıyla x , y , z yönünde, q_x'' , q_y'' , q_z'' 'dir. Bunların her biri elemana birim alanda ve birim zamanda enerji girişini temsil eder. Ayrıca enerji kütle akışıyla da girmektedir, x -yönünde elemana giren kütle akış hızı $\rho U dy dz$ ile gösterilir, burada ρ yoğunluk ve U hızın x -yönündeki bileşenidir. Bu kütleyle taşınan enerji hızı $\rho U \hat{h} dy dz$ 'dir, burada $\hat{h}$ birim kütledeki entalpi değeridir. y - ve z -yönlerindeki bileşenler ise $\rho V \hat{h} dx dz$ ve $\rho W \hat{h} dx dy$ 'dir, burada V ve W , hızın y - ve z -yönündeki bileşenleridir. Sonuç olarak giren enerjiyi ifade edecek olursak [49],



(a)



(b)

Şekil 3.6. Diferansiyel eleman üzerinde enerji transfer hızlarının gösterilmesi [49]

$$\dot{E}_{in} = q_x'' dydz + q_y'' dxdz + q_z'' dxdy + \rho U \hat{h} dydz + \rho V \hat{h} dxdz + \rho W \hat{h} dxdy \quad (3.6)$$

Enerji üretimi $\dot{E}_g$ ise,

$$\dot{E}_g = q''' dxdydz \quad (3.7)$$

Elemandan ayrılan enerji formülü Taylor serisi açılımı yardımıyla yapılır,

$$\begin{aligned} \dot{E}_{out} = & \left(q_x'' + \frac{\partial q_x''}{\partial x} dx \right) dydz + \left(q_y'' + \frac{\partial q_y''}{\partial y} dy \right) dxdz + \left(q_z'' + \frac{\partial q_z''}{\partial z} dz \right) dxdy + \\ & \rho U \left(\hat{h} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} dx \right) dydz + \rho V \left(\hat{h} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} dy \right) dxdz + \rho W \left(\hat{h} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} dz \right) dxdy \end{aligned} \quad (3.8)$$

Eleman içindeki enerji değişimi $\dot{E}$ aşağıdaki gibi gösterilir [49],

$$\dot{E} = \rho \frac{\partial \hat{u}}{\partial t} dx dy dz \quad (3.9)$$

Buradaki u birim kütledeki iç enerjidir, t ise zamandır. Eş. 3.6-3.9, Eşitlik 3.5'te yerine konulursa,

$$-\frac{\partial q_x''}{\partial x} - \frac{\partial q_y''}{\partial y} - \frac{\partial q_z''}{\partial z} - \rho U \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} - \rho V \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} - \rho W \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} + q''' = \rho \frac{\partial \hat{u}}{\partial t} \quad (3.10)$$

Entalpi h , aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\hat{h} = \hat{u} + \frac{P}{\rho}, \quad (3.11)$$

Burada basınç P , sabit kabul edilir, Eşitlik 3.11, Eşitlik 3.10'da yerine konulur ve düzenlenirse,

$$-\frac{\partial q_x''}{\partial x} - \frac{\partial q_y''}{\partial y} - \frac{\partial q_z''}{\partial z} + q''' = \rho \left(\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + U \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} + V \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} + W \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \right) \quad (3.12)$$

Bir sonraki adımda ısı akısı ve entalpi sıcaklık cinsinden ifade edilir. Bunun için ısı akısıyla sıcaklık gradyanı arasındaki ilişkiyi veren Fourier yasası kullanılır. Sabit basınçta entalpi değişimi aşağıdaki gibidir [49],

$$d\hat{h} = c_p dT \quad (3.13)$$

Burada c_p sabit basınçta spesifik ısıdır. Eşitlik 3.4 ve 3.13, Eşitlik 3.12'de yerlerine konulursa [49],

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.14)$$

Ele alınan problemde $U=V=W=0$ olduğundan ve malzemelerin ısı iletkenlik değerleri sabit kabul edildiğinden denklem aşağıdaki gibi düzenlenir [49],

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q'''}{\rho c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.15)$$

Burada α ısı difüzivite olarak bilinen bir malzeme özelliğidir, aşağıdaki gibi tanımlanır [49],

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.16)$$

Şekil 3.3.'de x-yönünde gerçekleşen ısı transferini toplam ısı direnç ve sıcaklık farkı cinsinden ifade edecek olursak,

$$q_x = q_x'' A = k \frac{A(T_{si}-T_{so})}{L} = \frac{T_{si}-T_{so}}{L/kA} = \frac{T_{si}-T_{so}}{\sum R} \quad (3.17)$$

Burada toplam ısı direnç ifadesini çekecek olursak,

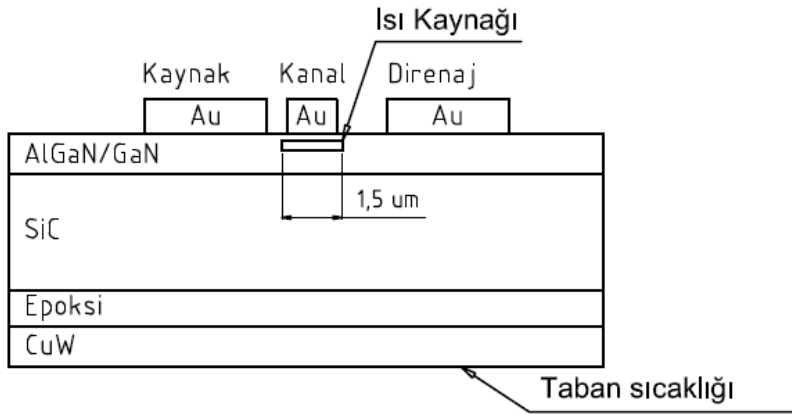
$$\sum R = \frac{L}{kA} = \frac{T_{si}-T_{so}}{q_x} \quad (3.18)$$

İletim için ısı direnç ifadesi Eşitlik 3.18'deki gibidir. Çıkış gücü bilindiğinden, taban sıcaklığı ve maksimum kanal sıcaklığı bilindiği takdirde toplam ısı direnç rahatlıkla hesaplanabilir.

3.4. Sınır Şartları

AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörler ile ilgili sınır şartları, problemin sayısal olarak çözülmesinde girdi olarak kullanılacak parametrelerdir. Bu bölümde transistör yapısındaki malzemelerin ısı iletkenlik değerleri, sabit sıcaklık sınır şartı olarak taban sıcaklığı, ısı transfer hızının tanımlandığı bölge ve değişken güç değerleri verilmiştir.

Ortam sıcaklığı 20°C ve taban sıcaklığı CuW taşıyıcının altından 70°C olarak tanımlanmıştır, ısı kaynağı tanımlanması literatürde yapılan çalışmalarda AlGaIn/GaN tabakasının üst katmanından 20-30 nm altta tanımlanmış ve genelde 0,5-1,5 µm genişliğinde kabul edilmiştir, yapılan çalışmada ise ısı kaynağı AlGaIn/GaN tabakasının üst katmanından 30 nm aşağıda, 1,5 µm genişliğinde, kanal uzunluğu boyunca tanımlanmıştır. Çalışma koşulları göz önünde bulundurularak 1-3 W arası güç değerleri tanımlanmıştır. Transistörün kesit görünüşü Şekil 3.7.'de verilmiştir, transistördeki malzemelerin ısı iletkenlik değerleri ise Çizelge 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Transistörün kesit görünüşü

$z = 0$ 'da, $T_{\text{taban}} = 70^\circ\text{C}$ (sabit sıcaklık sınır şartı),

$z = 250,97 \mu\text{m}$ 'de,

$$q_z = q_z'' A = k \frac{A(T - T_{\text{taban}})}{L} = \frac{T - T_{\text{taban}}}{L/kA} = \frac{T - T_{\text{taban}}}{\sum R} = 1 - 3 \text{ W}$$

Çizelge 3.1. Malzemelerin ısı iletkenlik değeri

Malzeme	Au	Epoksi	CuW	AlGaIn/GaN	SiC	Si	Safir
Isıl iletkenlik (W/mK)	313	60	200	150	420	150	35



4. SAYISAL YÖNTEM VE ÖN SİMÜLASYONLAR

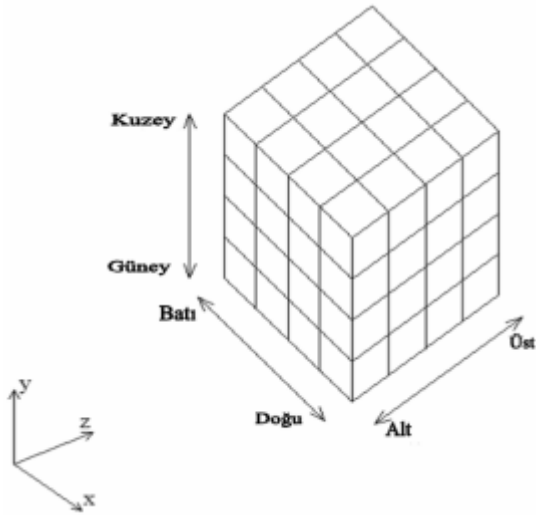
Sayısal akışkanlar dinamiği, akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle transferi problemlerinde sayısal metot ve geliştirilen algoritmalar ile bu problemlerin çözülerek analiz edildiği çeşitli yöntemleri kapsamaktadır. Bu çalışmada AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı analizinde, elektronik cihazların soğutma problemlerinde sıklıkla kullanılan ANSYS-Icepak paket programı kullanılmıştır. Bu konuyla ilgili literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında ANSYS-Icepak paket programının deneysel çalışmalarla oldukça uyumlu sonuçlar verdiği ve iyi bir çözüm yaklaşımı geliştirdiği görülmektedir.

4.1. ANSYS-Icepak SAD Kodu

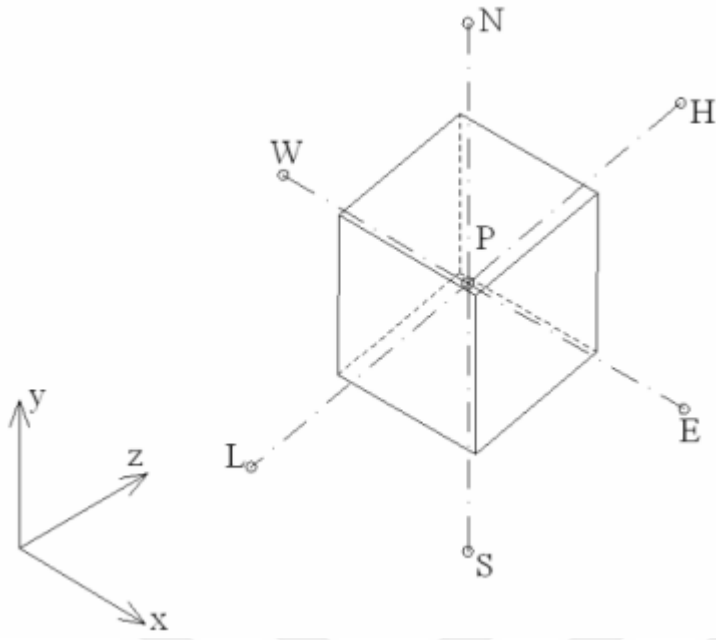
ANSYS-Icepak yazılımı, elektronik cihazların ısı analizinde güvenilir bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programıdır, temelde yapısal olmayan ağ tabanlı sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. ANSYS-Icepak ileri hesaplama teknolojisini güvenilir, otomatik hücre yapısı oluşturma özelliği ile birleştirip bilgisayar, telekomünikasyon ekipmanları, yarı iletken teknolojileri, uzay ve otomotiv uygulamaları gibi çeşitli elektronik problemlerde kolay ve güvenilir çözüm sağlamaktadır. ANSYS-Icepak paket programının ileri seviye ağ yapısı algoritmaları elektronik bileşenlerin gerçek şeklini yansıtan yüksek kaliteli ağ modeli oluşturmaktadır. Otomatik olarak analiz edilecek modellerle uyum sağlayan sayısal ağ yapıları mevcuttur. Kartezyen koordinatlarla uyumlu geometrilere, düzgün olmayan geometrilere ve analiz edilecek modelde çok farklı boyutlar içeren geometrilere uygun dörtgen, üçgen, altıyüzlü, dörtyüzlü, prizma (kama), piramid ve karışık elemanlı sayısal ağ yapıları mevcuttur. Aynı elektronik soğutma modelinde çeşitli bileşen ölçülerini içeren problemlerde, ara yüzlerde uyumluluğu sağlamak için ağ yoğunlaştırılabilir. Bunların yanı sıra büyük modellerde istenilen bölgelerde hesaplama hataları ile çözüm (yakınsama) hatalarını optimize etmeyi sağlayan ağ yapısını düzenlemek için çeşitli parametreleri mevcuttur. Programa tanımlanan yakınsama kriteri sağlandığında program otomatik olarak süpürme işlemini durdurur. ANSYS-Icepak çözümleyicisi tüm akışkanlar mekaniği problemleri ve tüm ısı transfer yöntemlerini (iletim, taşınım, ışıınım) kararlı ve kararsız rejim şartlarında simüle etmektedir. Birleşik ısı transferi problemlerinde çoklu ağ yapısı planı çözümün yakınsamasını hızlandırmaktadır. ANSYS-Icepak paket programının son işlemcisi kaliteli, nitelikli grafikler ve raporlar sunmaktadır [50].

4.1.1. Sonlu hacimler yöntemi ve hücre yapısı

Sonlu hacimler yöntemi, üç ana sayısal çözüm tekniğinden (sonlu farklar, sonlu elemanlar, spektral metotlar) sonlu farklar metodunun özel bir şekli olarak geliştirilmiştir. Şu an mevcut sayısal akışkanlar dinamiği kodlarının ANSYS-Icepak dahil birçoğunda bu yöntem kullanılmaktadır. Sonlu hacimler yönteminin sayısal algoritması aşağıdaki üç basamaktan oluşmaktadır. Birinci basamakta, çözüm alanındaki bütün kontrol hacimlerinde akışı temsil eden korunum denklemlerinin integrasyonu gerçekleştirilir. Daha sonra ikinci basamakta integre edilmiş denklemlerde, taşınım, iletim ve kaynak terimleri gibi akışı temsil eden terimler sonlu farklar tipi yaklaşımlarla yerine konur. Bunun sonucunda integral formundaki denklemler cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülür. Son basamakta cebirsel denklemler iteratif yöntemlerle çözülür. Fiziksel korunum prensipleriyle sayısal algoritma arasındaki belirgin ilişki sonlu hacimler metodunu özellikle mühendisler arasında daha cazip ve anlaşılır kılmıştır. Şekil 4.1’de üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde hücre yapısı ve Şekil 4.2’de üç boyutlu bir hücre için kontrol hacmi görülmektedir [51].



Şekil 4.1. Üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde hücre yapısı [51]



Şekil 4.2. Üç boyutlu bir hücre için kontrol hacmi [51]

P noktasındaki ϕ_P değeri komşu ϕ değerleriyle ilişkilidir. Ayrıca eğer problem zamana bağımlı ise bir önceki zaman dilimindeki ϕ_P ile de ilişkilidir. Bunun sonucunda aşağıdaki lineer cebirsel eşitliği yazmak mümkündür [51]:

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_H \phi_H + a_L \phi_L + a_T \phi_T + b \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de a’lar katsayıları (coefficients), b ise kaynakları (sources) gösterir. Dikkat edilirse her komşu hücrenin ayrı bir katsayısı mevcuttur. Bu katsayının nümerik değeri birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan bazıları [51];

- Hücre geometrisi
- Akışkanın bir hücreden diğerine akış hızı
- Akışkanın yerel özellikleri
- v.b.

Her bir hücre, değişken, zaman dilimi için cebirsel bir denklem yazmak mümkündür. Bunun neticesinde, toplam denklem sayısı = $N_X \times N_Y \times N_Z \times N_\Phi \times N_T$ olur. Burada N_X , N_Y , N_Z sırasıyla x, y ve z yönündeki hücre sayısı, N_Φ değişken sayısı, N_T ise çözümün kararsız olması durumunda zaman dilimi sayısıdır [51].

4.1.2. Sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma işlemi

Sonlu hacimler metodu ile cebirsel denklemleri iki metot ile veya iki yaklaşımla elde etmek mümkündür. Söz konusu cebirsel denklemler ısı ve kütle transferini temsil edebilecek denklemlerdir. Hangi yaklaşım olursa olsun sonlu hacimler metodunun en büyük avantajı ayrıklaştırma işlemi boyunca asıl temel fizik kanunlarının sürekli olarak göz önünde bulundurulmasıdır [51].

- Birinci yaklaşımda; değişik matematik teoremleri kullanılarak diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırması gerçekleştirilir.
- İkinci yaklaşımda; temel fizik kanunları yazılarak ayrıklaştırma işlemleri yapılır.

Sonlu hacimler denklemlerine, lineer cebirsel denklemlerin çözümünde kullanılan teknikleri uygulamak istiyorsak, Eş. 4.1'deki kaynak terim olan 'b' yi de, lineer bir formda ifade etmek gerekir. Kontrol hacmin iç noktalarındaki hücrelerle ilgili sonlu hacim denklemleri elde edildiği gibi, kontrol hacmin sınır şartları içinde sonlu hacim denklemleri uygun formda çıkarılmalıdır. Bir akışın hesabı için sınır şartları belirlenmelidir [51].

4.1.3. Çözüm tekniği

Sayısal olarak analiz edilecek transistör modeli kararlı rejim şartlarında kartezyen koordinat sisteminde çözülmüştür. ANSYS-Icepak yapısal olmayan ağ tabanlı sonlu hacimler metodunu kullanır. Ayrık çözücü, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) ve PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator)'yu içeren basınç tabanlı ayrık çözücü algoritmaları kullanılır. Birinci, ikinci ve n. dereceden "upwind" metodu ve merkezi farklar şemalarını içeren ayrıklaştırma işlemleri ve cebirsel lineer çoklu ağ çözümlemesi yapabilir.

4.2. Problemin Hücre Yapısı

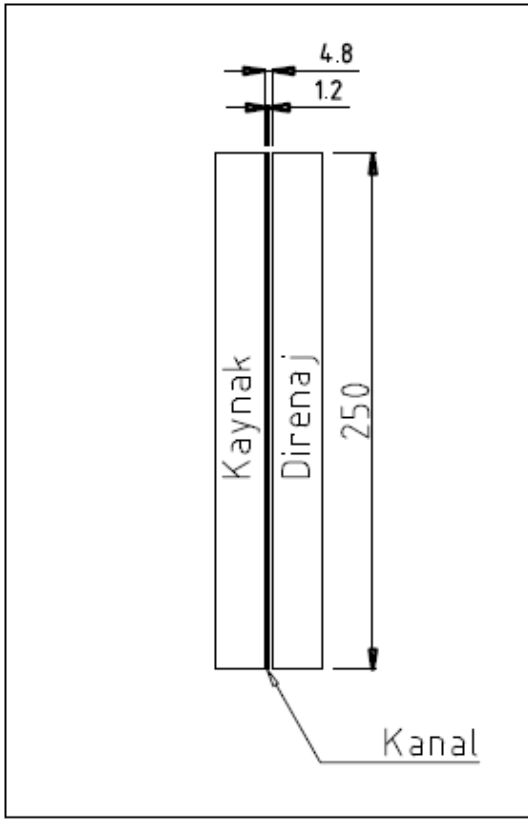
AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün ısı modellenmesinde baskın olan ısı transfer metodu iletim olduğundan, katı model içerisinde ısı kaynağına yakın bölgelerde hücre yoğunluğu artırılmış, maksimum eleman boyutları ve minimum boşluk gibi parametrelerle oynanarak çözümlerde görünen ısı transferinde katmanlar arası yumuşak

geçişler olması sağlanmıştır. Çözüm hücre yapısından bağımsız hale getirilmiş ve hücre kalitesi arttırılmıştır.

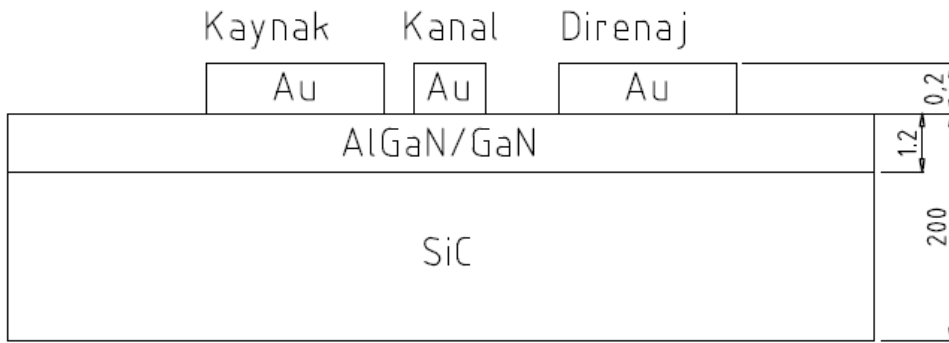
4.3. Ön Çalışma ve Deneme Çözümleri

Kuball ve diğerleri yaptıkları çalışmada Raman termografi konusunda geliştirdikleri yeni teknikle mikro metre çözünürlüğünde ve nano saniye zaman çözünürlüğünde GaN mikro elektronik cihazlardaki ısınmayı farklı bir bakış açısıyla incelemişlerdir. Farklı alt tabakalarda ve farklı yapılardaki GaN mikro elektronik cihazların ısı dirençlerini karşılaştırmışlardır, deneysel olarak GaN ile alt tabaka arasındaki ısı ara yüz direncini belirlemişlerdir. Cihaz yüzeyinden ve cihaz yüzeyinden alt tabakaya doğru üç boyutlu sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Zamanın fonksiyonu olarak darbeli çalışan cihazda, çalışma evresine ve darbe genişliğine bağlı olarak sıcaklık değerleri incelenmiştir [52]. Raman termografi yöntemiyle yapılan sıcaklık ölçümü, cihazda bulunan malzemelerin foton enerjilerinin ölçülmesini temel alır. Foton enerjileri sıcaklığa bağlıdır. Cihazdan akım geçirilerek foton enerjilerindeki değişim ölçülür, bu ölçümle aktif bölgedeki sıcaklık artışı 1-2 μm çözünürlükle saptanmış olur. Çalışmada SiC, Si ve safir alt tabakalar üzerindeki AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli ve kanalsız transistörler incelenmiştir. Kaynak direnç arası boşluk 4-8 μm arası, kanal uzunluğu ise 0,25-1,2 μm arası alınmıştır, kanalsız cihazlarda bağlantılar arası boşluk 15-20 μm arasındadır. Tek kanallı ve çok kanallı cihazlar üzerinde ölçüm yapılmıştır, taban sıcaklığı 70°C olarak alınmıştır. Metal organik buhar biriktirmesiyle standart ve Schottky bağlantılarına sahip 1.2 μm GaN tabakasının üzerine 30 nm'lik $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ yapısı kullanılmıştır [53].

Şekil 4.3'de ve Şekil 4.4'de gösterilen gösterilen AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörü 1 W'lık güçte çalıştırarak Raman termografi yöntemiyle sıcaklık ölçümü gerçekleştirmişlerdir. SiC, Si ve safir alt tabakalarda yapılan ölçümlerde en düşük ısı direncin SiC alt tabakada olduğu daha sonra Si ve Safir alt tabakaların geldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan SiC alt tabakalı transistör yapısı [52]



Şekil 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan SiC alt tabakalı transistör yapısının kesit görünüşü [52]

4 W'ta çalışan kanalsız AlGaN/GaN cihazda Raman yöntemiyle üç boyutlu olarak yüzeyden, alt tabakanın en alt seviyesine kadar lazer ışını göndererek sıcaklık ölçümleri alınmıştır.

AlGaN/GaN çöktürel yapıları alan etkili transistörde kanal-direnaj arası 4 μm, 1 μm'lik kanal uzunluğuna sahip Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilen yapıda SiC alt tabakalı cihazda farklı

güçlerde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Malzemelerin oda sıcaklığındaki ısı iletkenlik değerleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Malzemelerin oda sıcaklığında ısı iletkenlik değerleri

Malzeme	AlGaIn/GaN	SiC	Si	Safir
Isıl iletkenlik (W/mK)	150	420	150	35

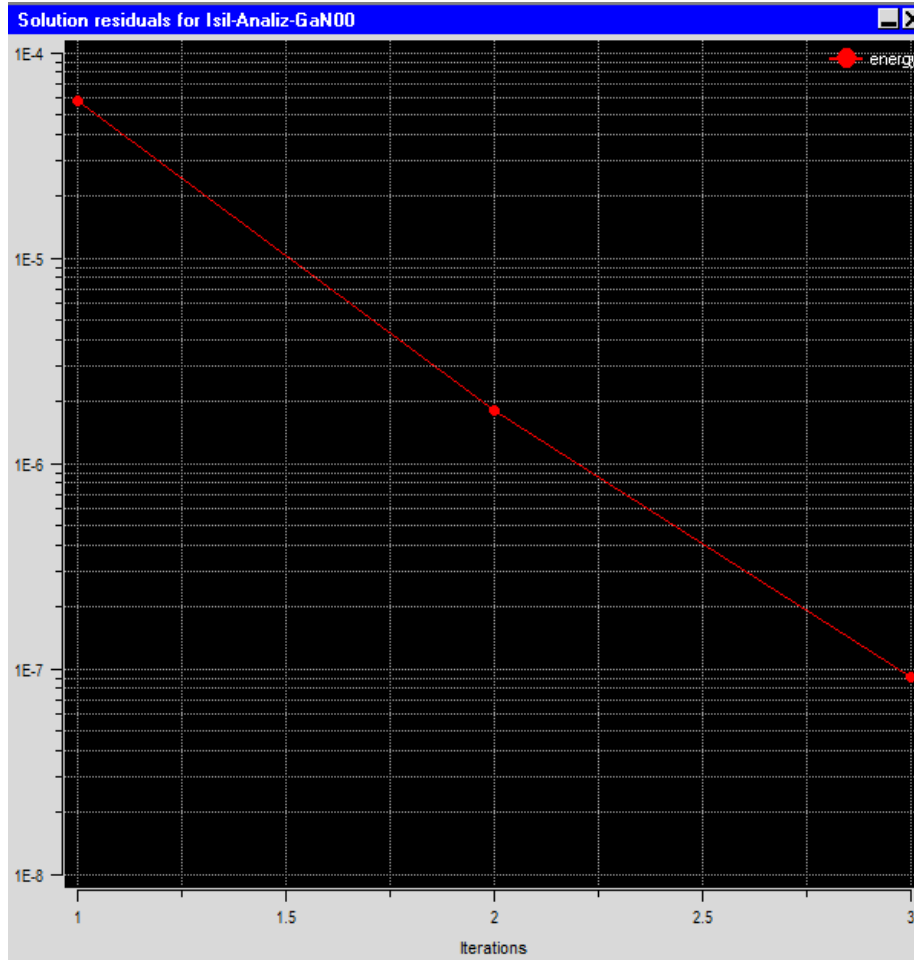
Sayısal akışkanlar dinamiği yöntemiyle elde edilen sonuçların gerçek fiziksel olaylara ve kanunlara uygunluğunun ispatı için belli kontrollerin yapılması gerekmektedir. Sonuçların kontrolü bu bölümde beş ana soruya verilecek cevaplarla sağlanmaya çalışılacaktır.

4.4. Yakınsama Kriterlerinin İncelenmesi ve Kontrol Edilmesi

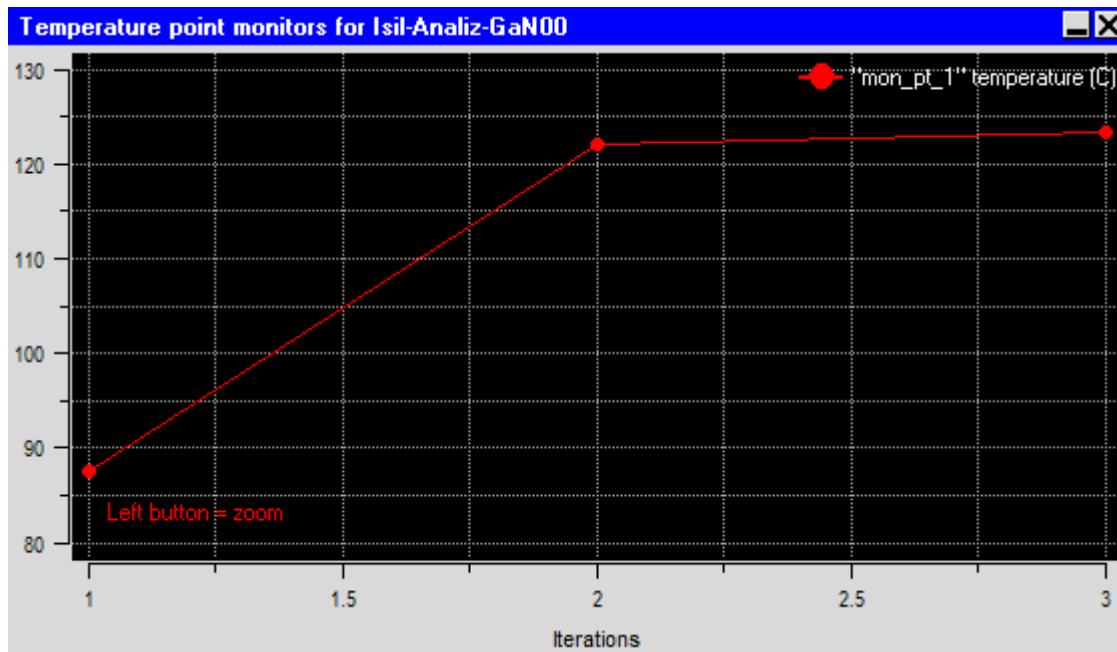
ANSYS-Icepak kodunda elde edilen çözümlerin doğru ve geçerli olabilmesi için aşağıda bahsedilen beş kriteri sağlaması gerekmektedir. Bu beş kriter ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde literatürde yapılmış deneysel bir çalışma baz alınarak tüm yakınsama kriterleri kontrol edilecek ve sonuçlar incelenecektir.

Çözümün yakınsaması

Çözümün yakınsaması için problemin sayısal çözümü boyunca tüm değişkenlerin kalıntıları azalmak zorunda anlık değerleri ise sabit hale gelmek zorundadır. AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün sayısal analizinde akış çözümlemesi yapılmadığından ve sadece iletimle ısı transferi olduğu varsayıldığından dolayı, kalıntı değerleri oldukça düşüktür. ANSYS-Icepak'de kalıntı değeri programda tanımlı olan 10^{-7} değerinin altına düştüğünde süpürme sayısı tamamlanmadan otomatik olarak çözüm sonlanmaktadır. Yapılan tüm analizlerde kalıntı değeri 10^{-7} 'nin altında çıkmıştır. Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da çözüm sırasında alınan ekran görüntüleri sunulmuştur, Şekil 4.5.'de kalıntı değerlerinin kısa bir sürede sıfıra yaklaştığı görülmektedir, Şekil 4.6'da ise anlık değerlerin sabit hale geldiği gözlenmektedir.



Şekil 4.5. Çözüm sırasında kalıntı değerlerinin düşüşü



Şekil 4.6. Çözüm sırasında anlık değerlerin sabit hale gelmesi

Çözümün süpürme sayısından bağımsız olması

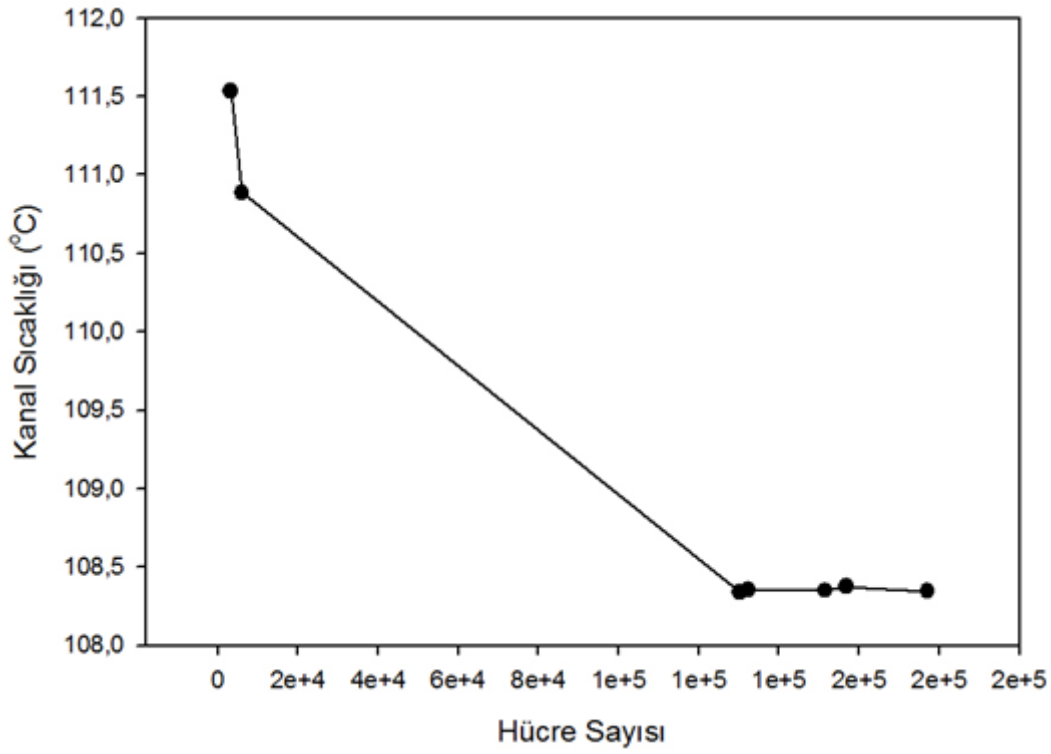
Özellikle karmaşık geometrilerde ve akış içeren problemlerde süpürme sayısına bağlı olarak çözüm değişebilir, yakınsıyormuş gibi görünen çözümler, süpürme sayısı arttırıldığında uzaklaşabilir. Bu yüzden süpürme sayısı arttırılarak çözüm tekrarlanmalı ve yakınsama olup olmadığına bakılmalıdır. ANSYS-Icepak'de yakınsama kriteri sağlandığında çözüm otomatik olarak durduğundan, süpürme sayısı değiştirilse dahi Şekil 4.5.'deki gibi çözümün aynı şekilde küçük süpürme sayılarında yakınsadığı görülmektedir.

Korunum denklemlerinin sağlanması

İlk iki kriter sağlandıktan sonra problemi tanımlayan enerjinin korunumu, momentumun korunumu ve kütlemin korunumu denklemlerinin sağlanıp sağlanmadığına bakılmalıdır. Analizde akış çözümlemesi yapılmadığından momentum ve kütlemin korunumu söz konusu değildir, yalnızca enerjinin korunumuna bakılır. Şekil 4.5'de gösterilen enerjinin kalıntı değerlerindeki hızlı ve düzenli azalmayı Şekil 4.6.'da gösterilen sıcaklıktaki anlık değerlerin sabit hale gelişi göz önünde bulundurularak enerjinin korunduğunu söyleyebiliriz.

Çözümün hücre yapısından bağımsız olması

Çözümün doğru ve geçerli olması için sağlanması gereken dördüncü kriter, çözümün hücre sayısı ve dağılımından bağımsızlığının kontrol edilmesidir. Bunu kontrol etmek için hücre sayısı arttırılarak, hücre dağılımı düzenlenerek çözümler değerlendirilmeli, sonuçlardaki değişiklik önemszenmeyecek derecede küçük olduğunda, elde edilen hücre dağılımıyla çözümlere devam edilmelidir. Burada optimum hücre sayısı 177094 olarak belirlenmiştir. Hücre yoğunluğunun gereksiz arttırılması ise hem hesaplama süresinin uzamasına hem de yuvarlatma hatasının artmasına sebep olmaktadır, bu nedenle optimum hücre sayısı belirlenmeli, katman geçişlerinde ve ısı kaynağına yakın bölgelerde hücreler yoğunlaştırılmalıdır.

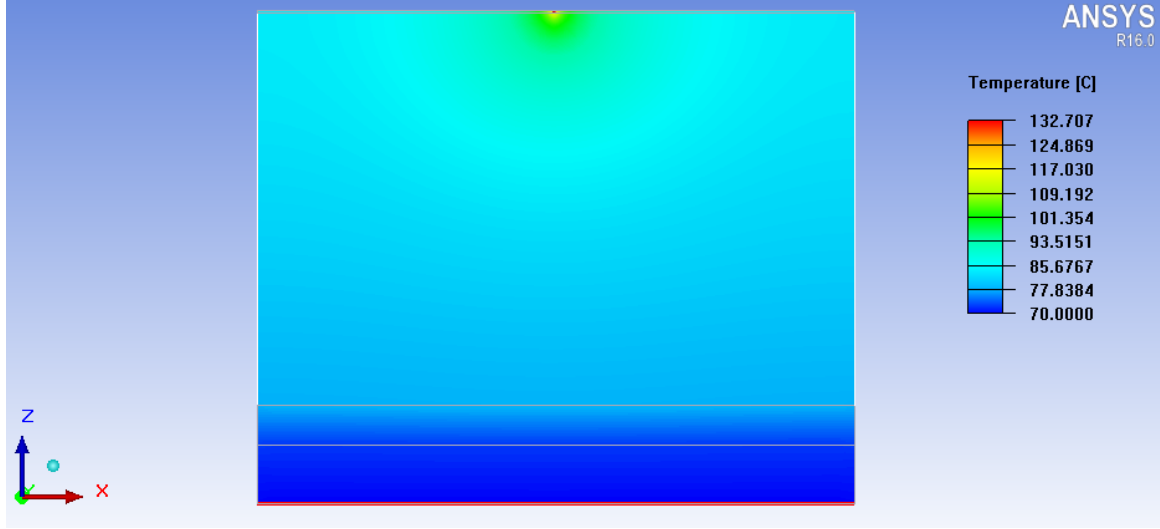


Şekil 4.7. Farklı hücre sayılarında elde edilen kanal sıcaklıkları

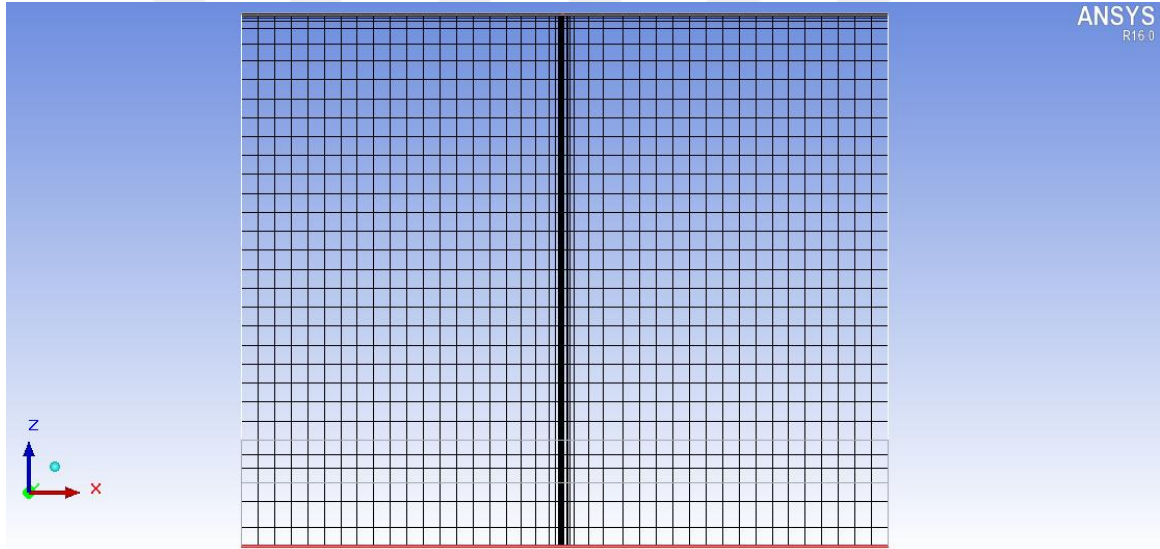
Sonuçların deneysel değerlerle uyumlu olması

Analiz sonuçlarının doğruluğunun ve geçerliliğinin sağlanması için yukarıda bahsedilen kriterler sağlandıktan sonra gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla veya literatürde yapılan deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması gerekmektedir. Literatürde yapılmış deneysel çalışma bulunmuyorsa, bu karşılaştırma kabul görmüş analitik, teorik ya da başka nümerik çözümlerle de yapılabilir.

Bu bölümde Kuball ve diğerlerinin [52] yapmış olduğu deneysel çalışmadaki modeller oluşturulmuş ve deneysel sonuçlar sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da deneysel çalışmayla karşılaştırmak için hazırlanan modelde sırasıyla sıcaklık konturu ve hücre dağılımı gösterilmektedir.

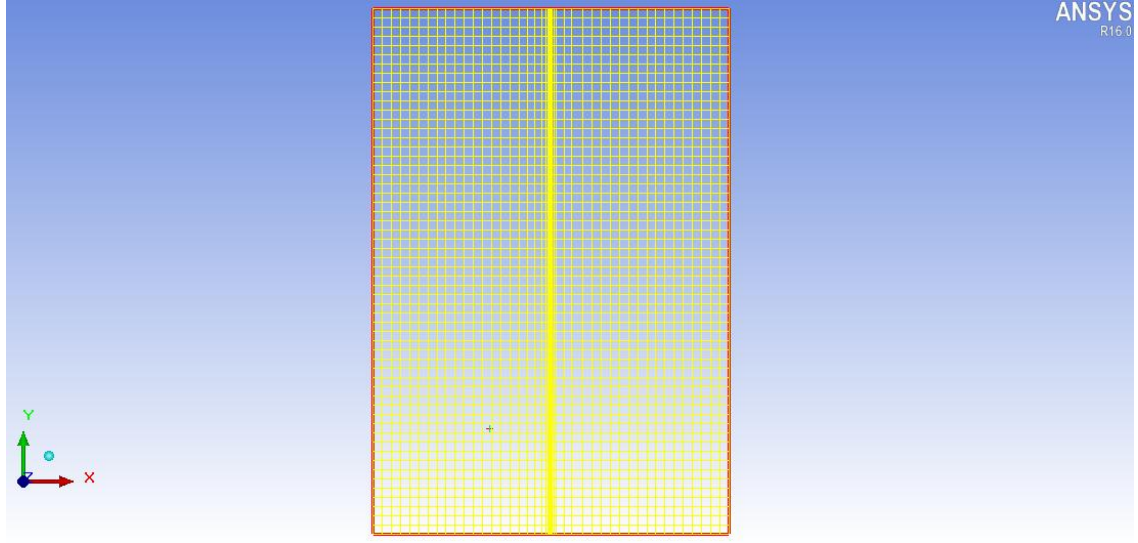


Şekil 4.8. Transistör modelinde x-z düzlemi boyunca sıcaklık konturu

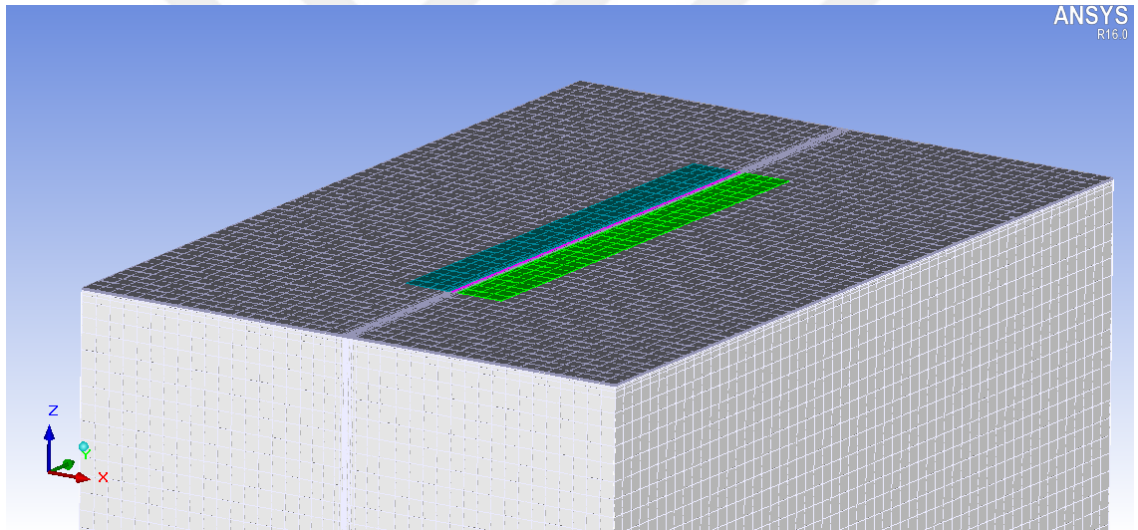


Şekil 4.9. Transistör modelinin x-z düzleminde hücre dağılımı

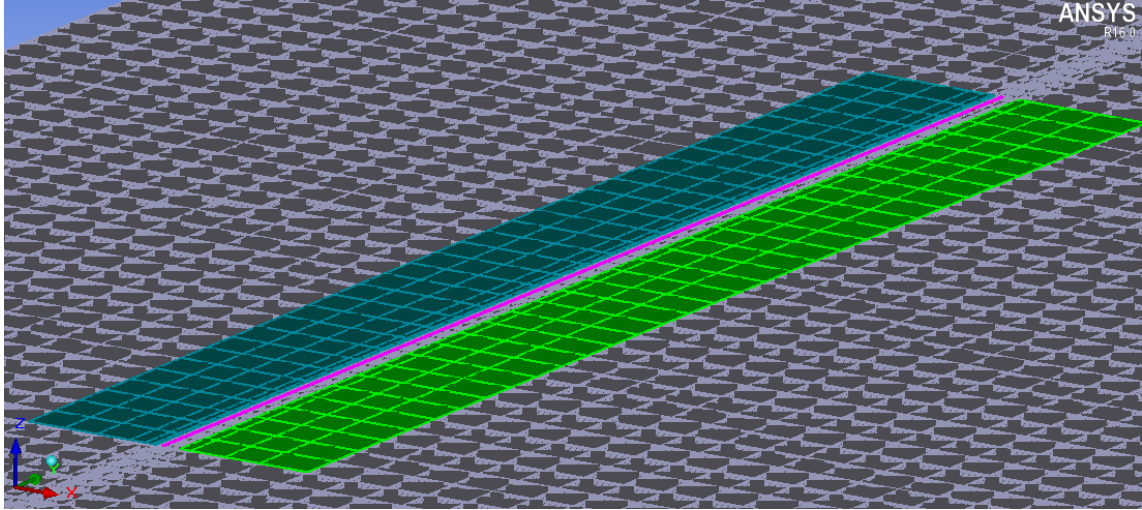
Şekil 4.10.'da transistör modelinin x-y düzleminde hücre dağılımı gösterilmiştir, kanal sıcaklığını yüksek hassasiyetle belirleyebilmek için kanal bölgesinde hücre dağılımı sıklaştırılmıştır. Şekil 4.11.'de ise üç boyutlu transistör yapısı üzerinde hücre dağılımı sunulmuştur. Şekil 4.12.'de kanal bölgesinin hücre dağılımının daha iyi görülebilmesi için üç boyutlu hücre yapısının yakın görünümü verilmiştir.



Şekil 4.10. Transistör modelinin x-y düzleminde hücre dağılımı

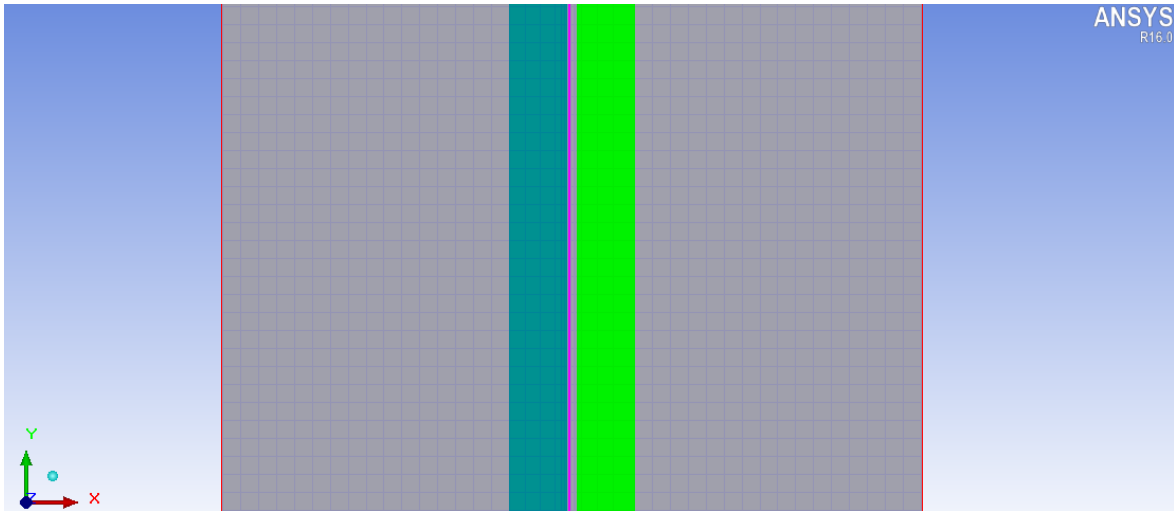


Şekil 4.11. Transistör modelinde üç boyutlu hücre yapısı



Şekil 4.12. Transistör modelinde üç boyutlu hücre yapısının yakın görünümü

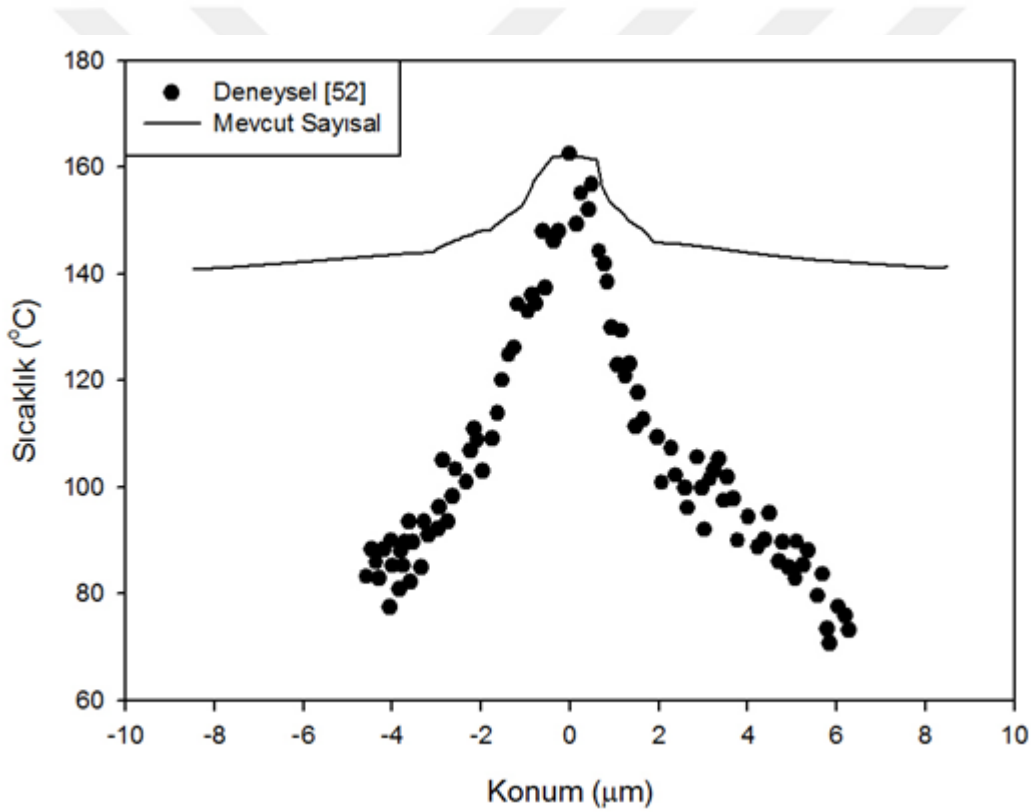
Şekil 4.13.'de transistör modelinin x-y düzleminde hücre dağılımına ait yakın görünüm sunulmuştur. Kanal boyutları transistördeki diğer boyutlara oranla oldukça küçük olduğundan, kanal sıcaklığının yüksek hassasiyetle belirlenmesi için ANSYS-Icepak programı yardımıyla maksimum eleman boyutları, minimum boşluk, maksimum boyut oranı, boşluktaki minimum eleman, kenardaki minimum eleman gibi ağ yapısı parametreleri ayarlanarak istenilen hassasiyette kanal sıcaklığı belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Transistör modelinin x-y düzleminde hücre dağılımının yakın görünümü

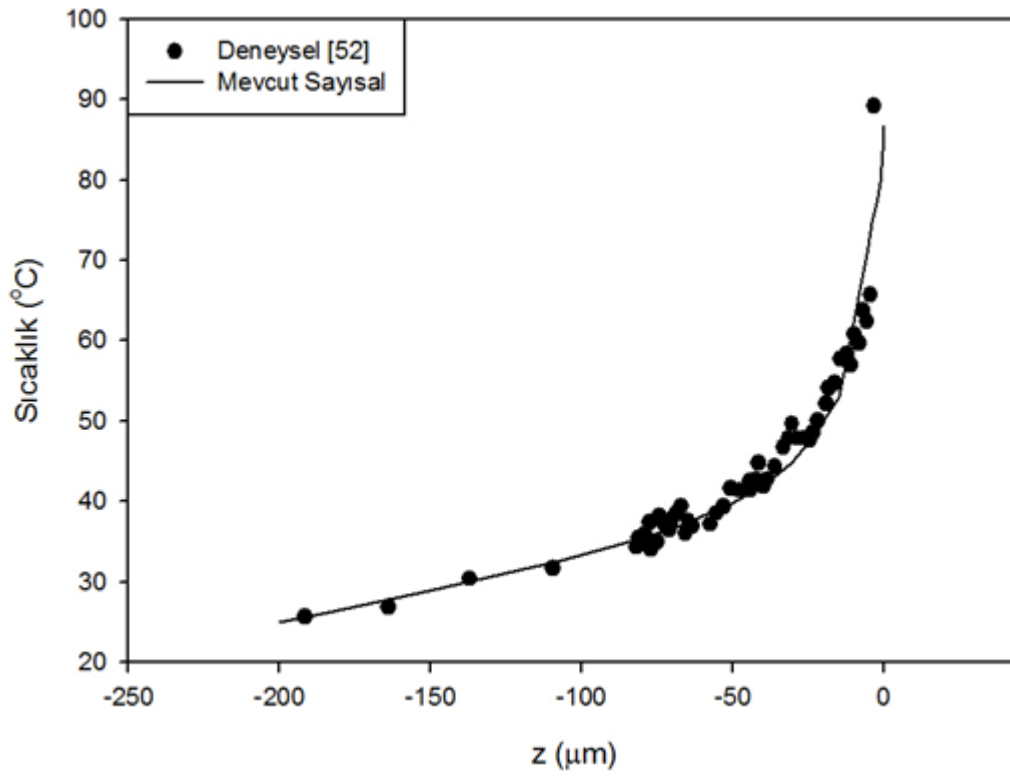
Şekil 4.14'de görülen grafikte SiC alt tabakalı, 1 W'ta çalışan kaynak-direnaj arası 4,8 μm , kanal uzunluğu 1,2 μm olan AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörde Raman termografi yöntemiyle merkezden itibaren yaklaşık 10 μm genişlikte alınan sıcaklık

ölçümleri sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Transistör merkezine doğru deneysel ve sayısal sonuçlar uyumlu gözükürken kenarlara doğru sapma gözlenmiştir. Bunun nedeni mikro-Raman ölçüm yönteminde çözünürlüğün 1-2 μm civarında olmasıdır, yani ölçüm sırasında 1-2 μm çapında bir bölgenin ortalama sıcaklığını almaktadır. Maksimum sıcaklığın gözlemlendiği kanal bölgesi 1,2 μm genişliğindedir, merkezde sıcaklık değerleri birbirine yakinken, merkezden uzaklaştıkça fark artmaktadır, dolayısıyla ortalama etkisi kenarlarda daha çok görülmektedir. Buna ek olarak sayısal çözümde iletimle ısı transferi çoğunlukla -z-yönünde gerçekleşmektedir, çünkü kaynak tanımlaması dışında diğer sınır şartı taban sıcaklığıdır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, deneysel verilerle uyumlu bir sonuç elde edildiğini söyleyebiliriz.



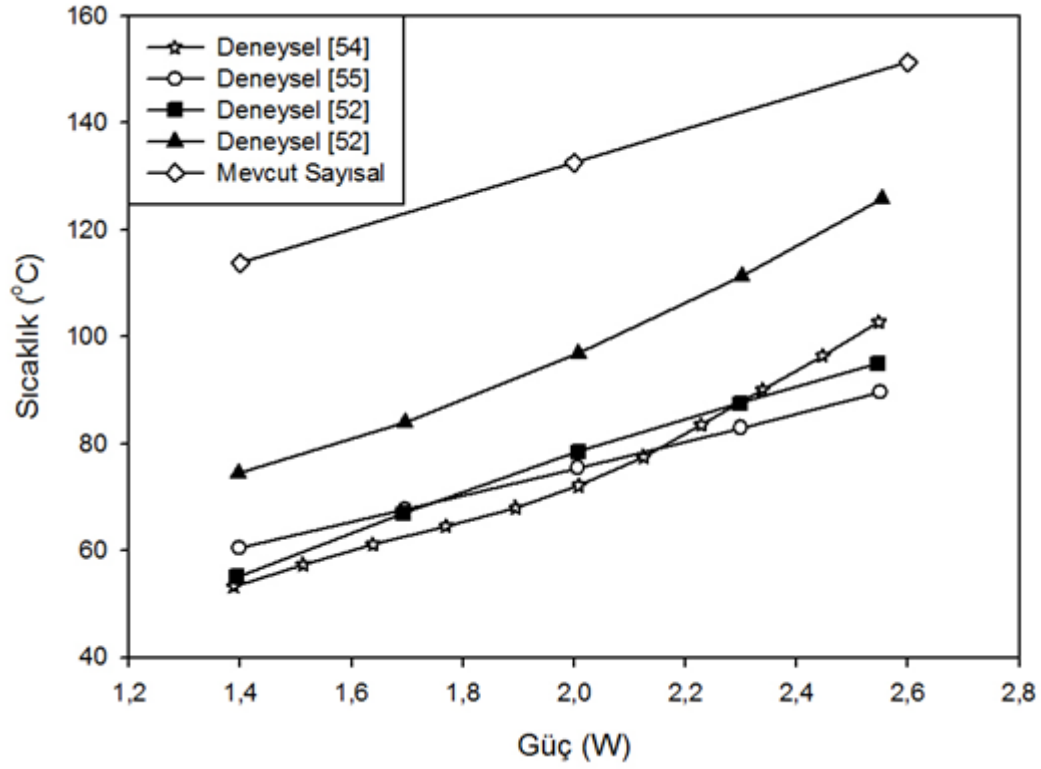
Şekil 4.14. Transistör üzerindeki farklı konumlardaki deneysel ve sayısal sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.15.'de görülen grafikte SiC alt tabakalı, 4 W'ta çalışan kanalsız AlGaIn/GaN transistörde üst yüzeyden alt tabakanın en altına kadar lazer ışınları ile alınan sıcaklık ölçümleri sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kanalsız AlGaIn/GaN transistörde ısı kaynağı, kanal olmadığı için kaynak-direnaj arasına yayılmıştır, dolayısıyla mikro-Raman ölçümünde 1-2 μm çözünürlük olmasına rağmen sayısal değerlerle oldukça uyumlu sonuçlar gözlenmektedir.



Şekil 4.15. Transistörün en üst noktasından alt tabakanın tabanına kadar ölçülen deneysel ve sayısal sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.16.'de kaynak-direnaj arası 4 μm olan ve 1 μm kanal uzunluğuna sahip SiC alt tabakalı cihazda farklı güçlerde Raman termografi ve elektriksel metot ile alınan sıcaklık ölçümleri sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kanal uzunluğu diğer transistör modellerinden küçük olduğundan, Şekil 4.10'daki gibi bir uyum sağlamak pek mümkün değildir, kanal uzunluğu küçüldükçe ortalama değer etkisi artmakta dolayısıyla deneysel ve sayısal sonuç arasındaki fark da artmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında deneysel verilerle sayısal veriler arasında 20-30°C'lık farklar normal kabul edildiği görülmüştür, dolayısıyla sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 4.16. Farklı güçlerde çeşitli yöntemlerle alınan sıcaklık ölçümlerinin deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılması

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerle ilgili yapılan sayısal çözümün doğruluğunun ve geçerliliğinin kontrolünden sonra parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmayla karşılaştırılan sayısal modelden farklı olarak Şekil 3.1.'de üst görünüşü, Şekil 3.2.'de kesit görünüşü verilen transistör modelinde kanal uzunluğu 0,45 μm , kanal kaynak arası 4,65 μm ve kanal genişliği 260 μm olarak alınmıştır, AlGaIn/GaN tabakası 1 μm kabul edilmiştir, alt tabaka olarak SiC, Si ve Safir kullanılmış ve bu alt tabakaların performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı alt tabaka kalınlıklarında ısı transferi incelenmiştir. Isı kaynağına farklı güç değerleri tanımlanarak maksimum kanal sıcaklığındaki ve ısı direnç değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Farklı darbe genişliklerindeki ısı transferi, farklı kanal uzunluğunda ve kanal genişliğindeki sıcaklık değerleri incelenmiştir.

Parametrik çalışmaya geçmeden önce bir önceki bölümde olduğu gibi sayısal çalışmanın doğruluğunun ve geçerliliğinin kontrolü yapılacaktır. Bunun için 200 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'de gösterilen ve yukarıda ölçüleri verilen AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistör modelinde ısı kaynağına 2 W'lık güç değeri tanımlanarak, optimum hücre sayısı bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmanın Bölüm 4'te bahsedilen beş kritere uygunluğu değerlendirildikten sonra parametrik çalışmalara geçilmiştir.

Yapılan çalışmada kullanılan parametrik değerler ve bu değerlerin aralıkları Çizelge 5.1.'de gösterilmiştir.

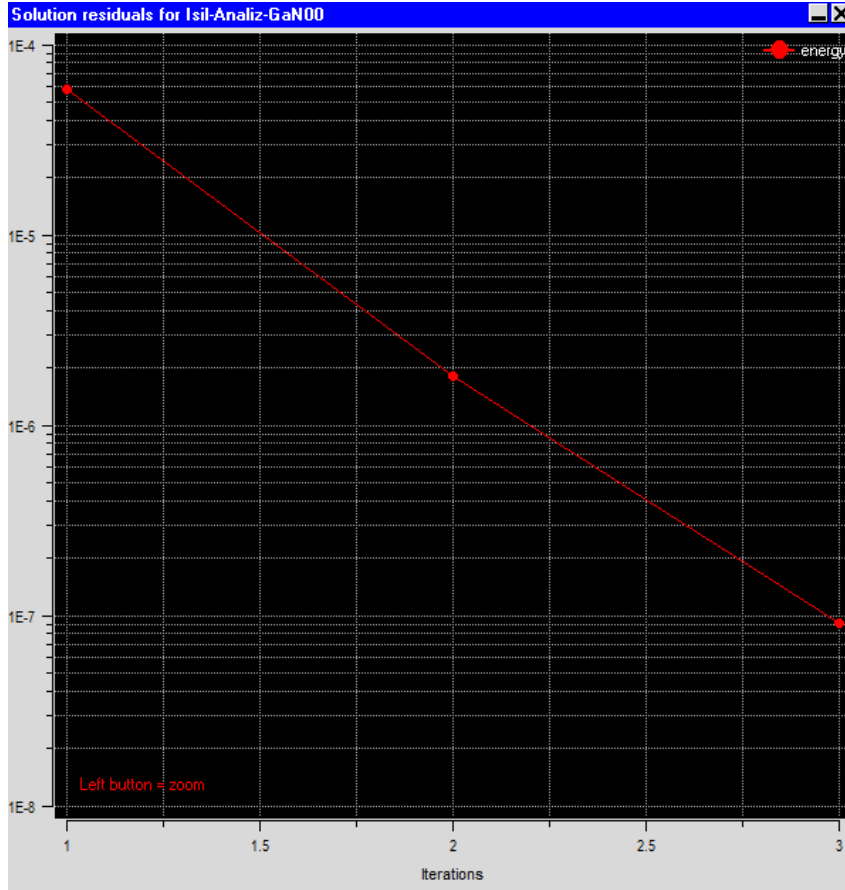
Çizelge 5.1. Parametrik çalışma tablosu

Alt Tabaka	Alt Tabaka Kalınlığı (μm)	Kanal Uzunluğu (μm)	Kanal Genişliği (μm)	Güç (W)	Darbe Genişliği (μs)
Safir Si SiC	50	0,45	260	2	Kararlı Rejim
	100				
	150				
	200	0,1			
		0,3			
		0,45			
		0,5			
		0,7			
		0,9			
		1,1			
		1,3			
	250	0,45			
	300				
	350				
Safir	200	0,45	50	2	Kararlı Rejim
Si			100		
SiC			130		
			160		
			200		
			230		
Safir	200	0,45	260	260	Kararlı Rejim
				300	
				1	
				1,2	
1,4					
1,6					
1,8					
2					
2,2					
2,4					
2,6					
2,8					
3					
Safir	200	0,45	260	2	0,5
5					
10					
50					
100					
200					
Si	200	0,45	260	2	300
SiC					

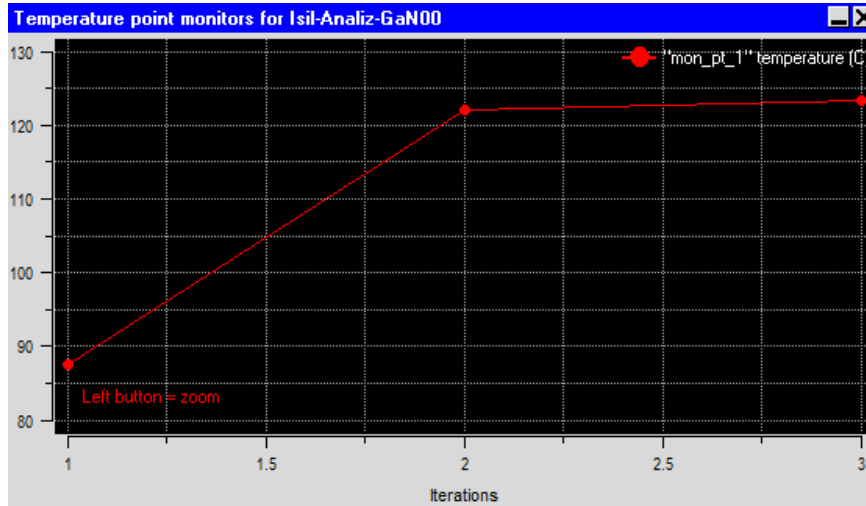
5.1. Sayısal Çalışmanın Doğruluğunun Kontrol Edilmesi

Bu bölümde parametrik çalışma için hazırlanan modelde, sayısal çalışmanın doğruluğu ve geçerliliğinin kontrolü Bölüm 4'te bahsedilen kriterlerle yapılacaktır. Kriterlere uygunluğu değerlendirilen AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistör modelinde 200 μm kalınlığında SiC alt tabaka kullanılmış, ısı kaynağına 2 W değerinde ısı gücü tanımlanmış, Şekil 3.2.'de üst görünüşü, Şekil 3.3.'de kesit görünüşü sunulan model kullanılmıştır. Malzeme özellikleri programa tanımlanırken Çizelge 3.1.'deki değerler kullanılmış, ortam sıcaklığı 20°C, taban sıcaklığı ise 70°C olarak alınmıştır.

Öncelikle sayısal çözümün yakınsayıp yakınsamadığına bakılır. Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de görüldüğü üzere enerji hesaplarındaki kalıntı değeri düzenli olarak azalmış ve 10^{-7} 'nin altına düşmüş, sıcaklık değerleri ise sabit hale gelmiştir. Bölüm 4'te de bahsedildiği üzere AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün ısı analizinde baskın olan ısı transfer metodu iletim olduğundan akış çözümlemesi yapılmamaktadır, çok kaba olmayan problemin geometrisine ve fiziğine uygun bir ağ yapısıyla zaten çok küçük süpürme sayılarında dahi çözümün yakınsaması beklenmektedir.



Şekil 5.1. Çözüm sırasında kalıntı değerlerinin düşüşü



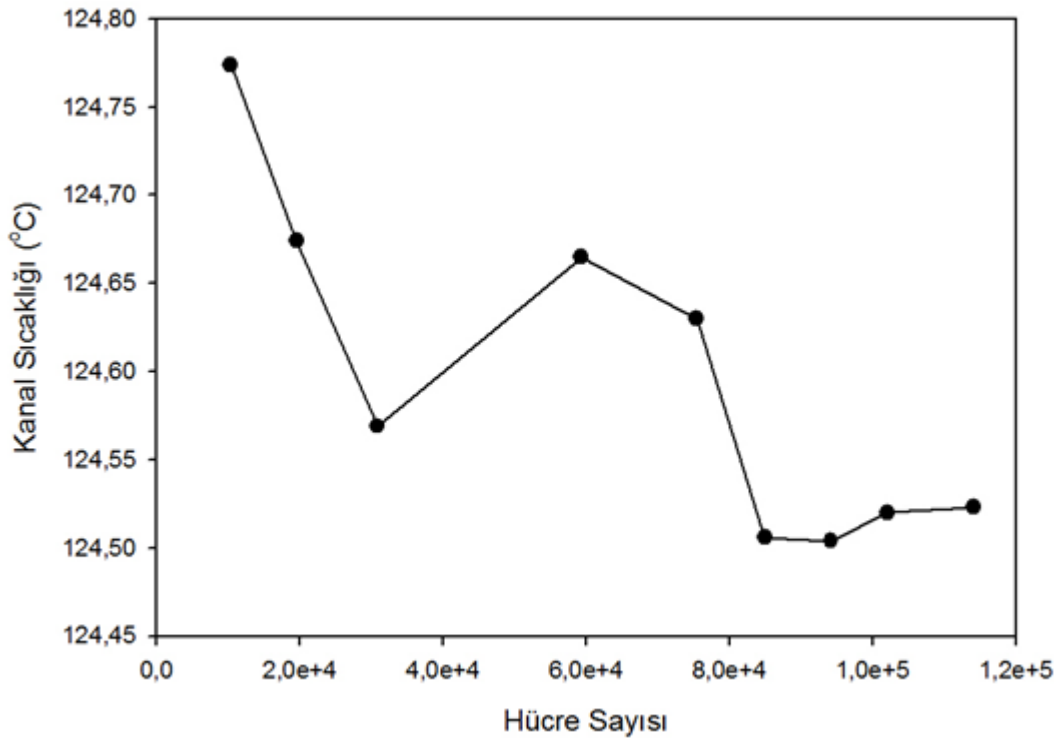
Şekil 5.2. Çözüm sırasında anlık değerlerin sabit hale gelmesi

Sayısal çözümün doğruluğunun ispatı için sağlanması gereken ikinci kriter çözümün süpürme sayısından bağımsız olmasıdır, bunun nedeni karmaşık geometriler ve akış çözümlerinde yakınsıyormuş gibi görünen analizlerde yüksek süpürme sayılarında aniden uzaklaşma görülebilmesidir. ANSYS-Icepak'de tanımlı yakınsama kriteri 10^{-7} 'nin altındaki

yakınsama değeri olduğundan ve model karmaşık olmadığından dolayı, süpürme sayısı ne olursa olsun, çözümün yakınsadığı görülebilir.

Yukarıda bahsedilen kriterler sağlandıktan sonra problemin fiziğini tanımlayan, enerji kütle, momentum gibi değerlerin çözüm sırasında sağlanıp sağlanmadığına bakılır. Bu problemde akış çözümlemesi olmadığından yalnızca enerjinin korunumuna bakılır. Çözüm sırasında enerji değerleri arasındaki fark Şekil 5.1.'de görüldüğü üzere 10^{-7} 'nin altındadır, bu nedenle korunum denklemlerinin sağlandığı söylenebilir.

Son olarak çözümün hücre sayısından bağımsız olup olmadığı kontrol edilir. Bunu kontrol etmek için Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi sayısal çözümler hücre sayısı artırılarak ve hücre dağılımı düzenlenerek tekrarlanmış, sonuçlar arasındaki fark son dört iterasyonda % 0,08'den az olduğundan, optimum hücre dağılımının sağlandığı kabul edilmiştir ve parametrik çözümlere bu hücre dağılımı ile devam edilmiştir. Bu çalışmada optimum hücre sayısı 114165 olarak belirlenmiştir, böylece bilgisayar kapasitesi fazla zorlanmadan güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.3. Farklı hücre sayılarında elde edilen kanal sıcaklıkları

5.2. Sayısal Bulgular

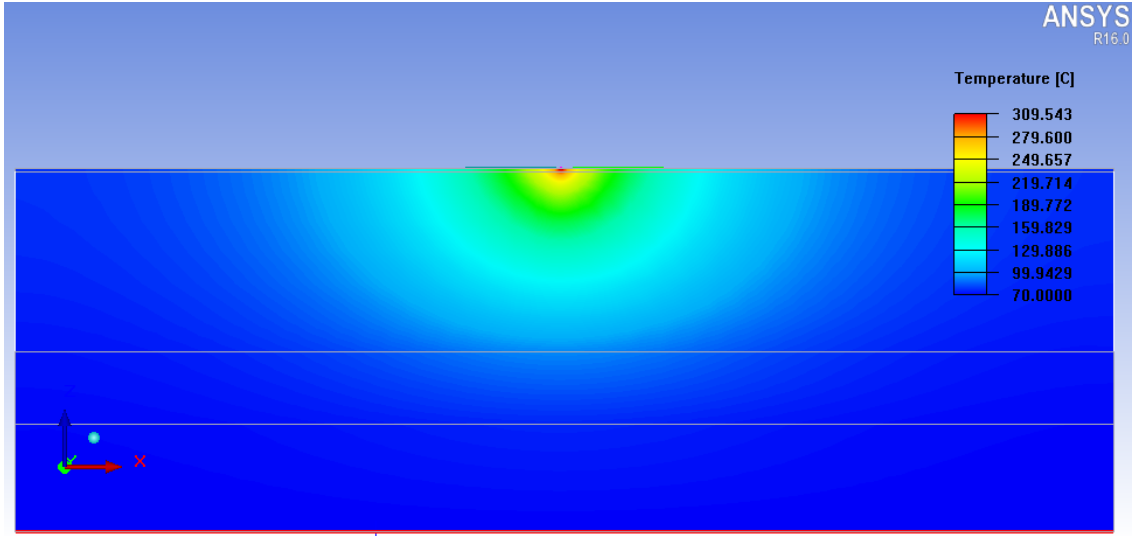
AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörde gerçekleşen ısı transferini etkileyen parametreler arasında alt tabaka malzemesi, alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, kanal genişliği, güç değerleri ve darbe genişliği sayılabilmektedir. Her bölümde Safir, Si ve SiC alt tabaka malzemeleri için gerçekleşen ısı transferi sonuçları sunulmuş ve incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda maksimum kanal sıcaklığı ve toplam ısı direnç değerleri karşılaştırılmış, transistördeki sıcaklık dağılımları sunulmuş ve sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır.

5.2.1. Alt tabaka kalınlığının ısı transferine etkileri

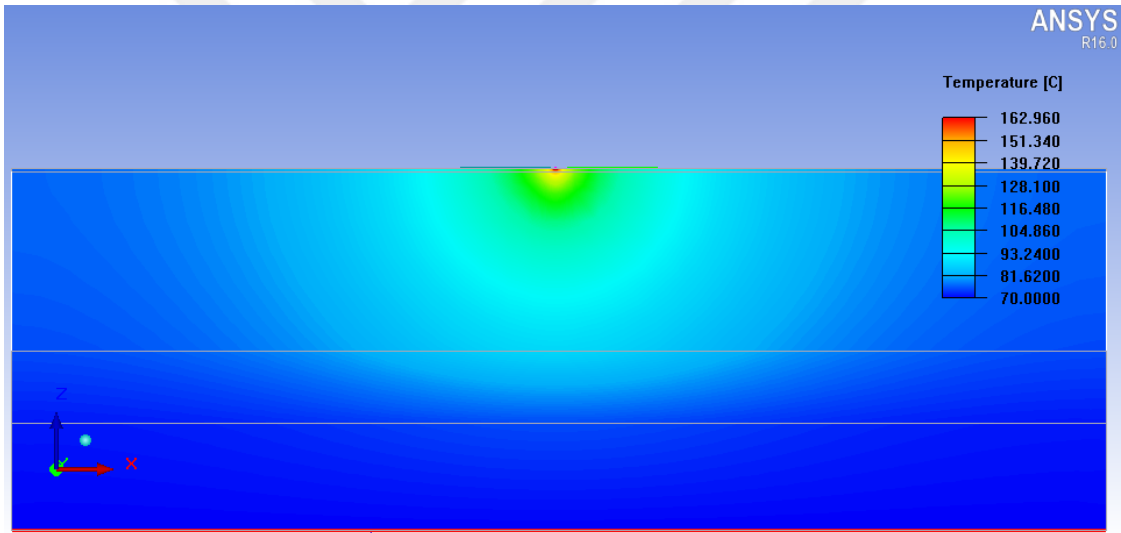
AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı transferini önemli oranda etkileyen parametrelerin biri de alt tabaka kalınlığıdır. Literatürde bununla ilgili birçok deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır [48].

Bu bölümde 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 μm 'lik Safir, Si ve SiC alt tabakalarda 0,45 μm kanal uzunluğunda, 260 μm kanal genişliğinde ve 2 W'lık ısı güç değerinde sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Daha sonra alt tabaka kalınlığının farklı alt tabaka malzemelerinde maksimum kanal sıcaklığına ve ısı dirence etkilerini gösteren grafikler sunulmuş ve açıklanmaya çalışılmıştır.

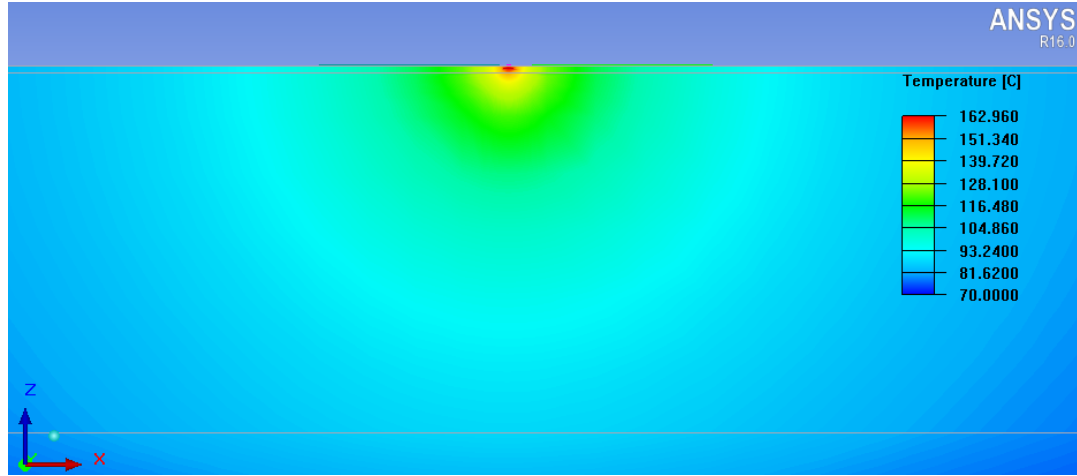
şekil 5.4.-5.41.'de sırasıyla Safir, Si ve SiC alt tabakalarda 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 μm 'lik kalınlıklarda analiz sonucu oluşan sıcaklık dağılımları görülmektedir. En yüksek kanal sıcaklığı 350 μm kalınlıkta görülmektedir. Bunun nedeni artan kalınlıkla birlikte ısı direncin de artmasıdır. şekil 5.4.-5.8'de görülen 50 μm alt tabaka kalınlıklarında ısıнын yayılması için kalınlığın yeterli olmadığı ve diğer kalınlıklardaki gibi sıcaklık dağılımı sağlanamadığı görülmektedir. Değişen alt tabaka kalınlıklarında en fazla sıcaklık farkı % 44,9'la Safir alt tabakalı transistörlerde görülmektedir. Sıcaklık dağılımının en düzgün ve homojen olduğu alt tabaka SiC iken, en kötü sıcaklık dağılımı Safir alt tabakada görülmektedir.



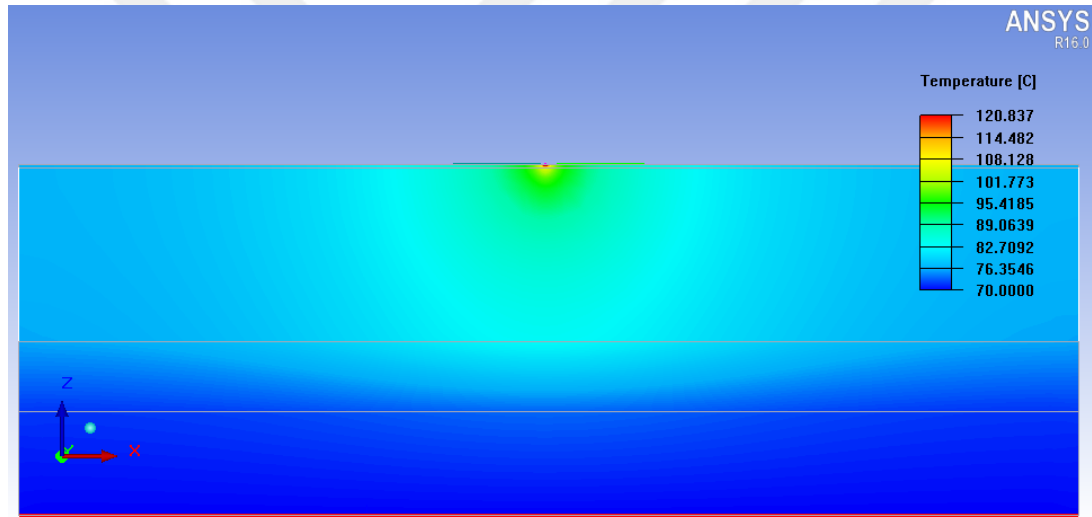
Şekil 5.4. 50 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



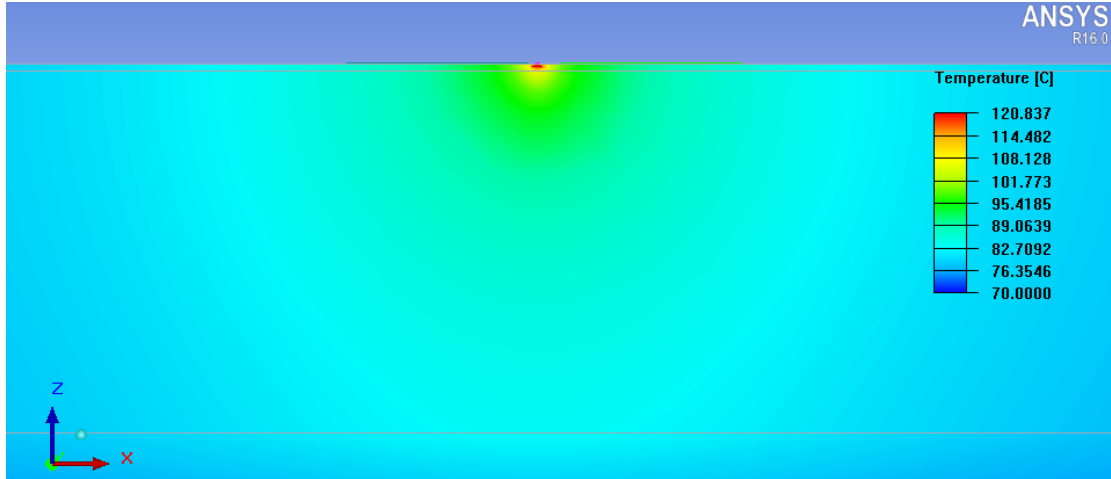
Şekil 5.5. 50 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



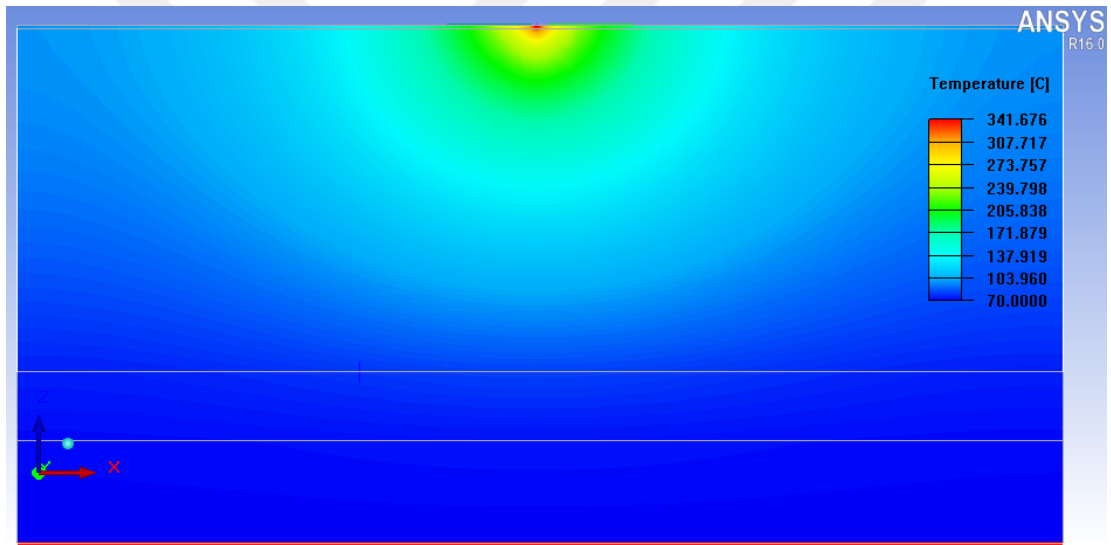
Şekil 5.6. 50 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



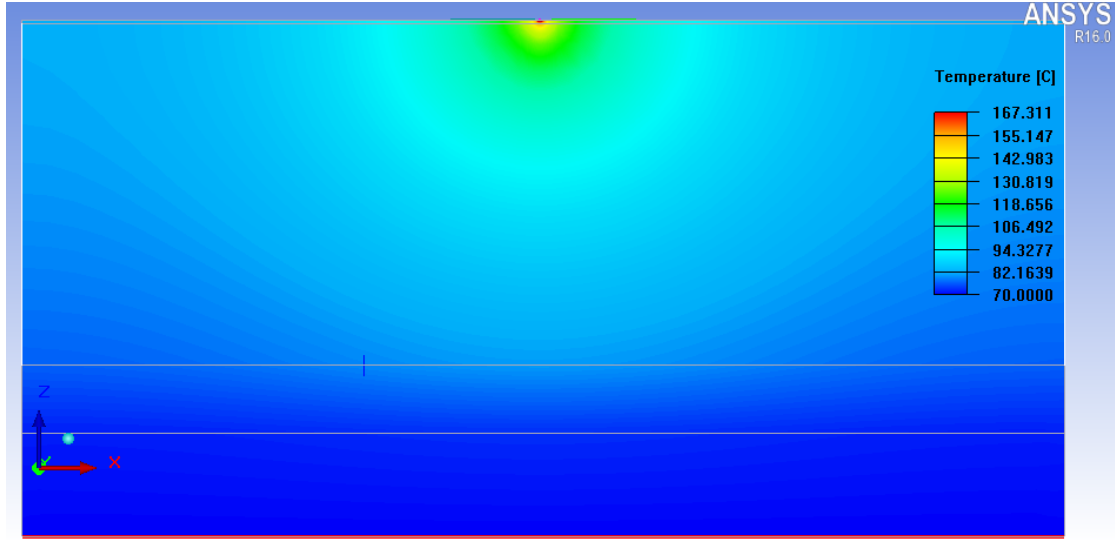
Şekil 5.7. 50 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



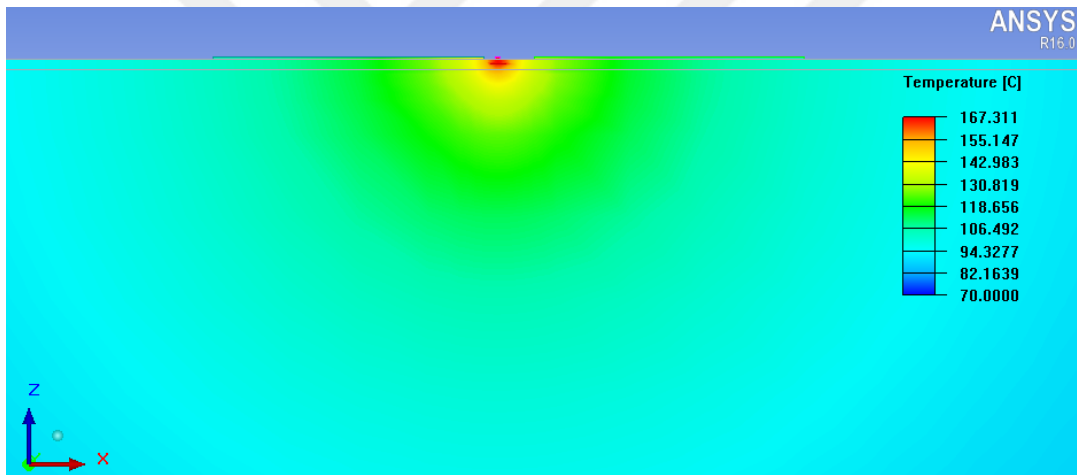
Şekil 5.8. 50 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



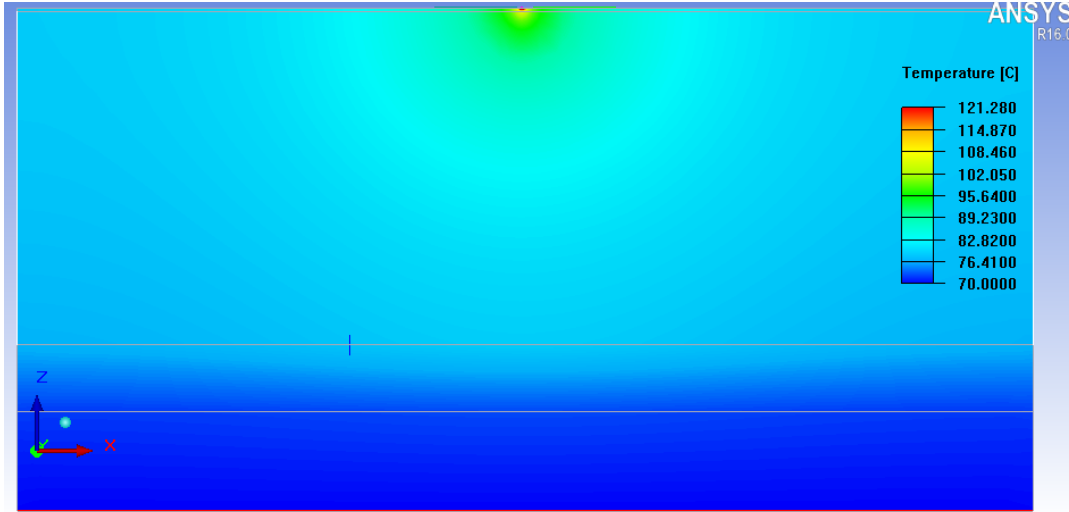
Şekil 5.9. 100 μm kalınlığında Safir alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



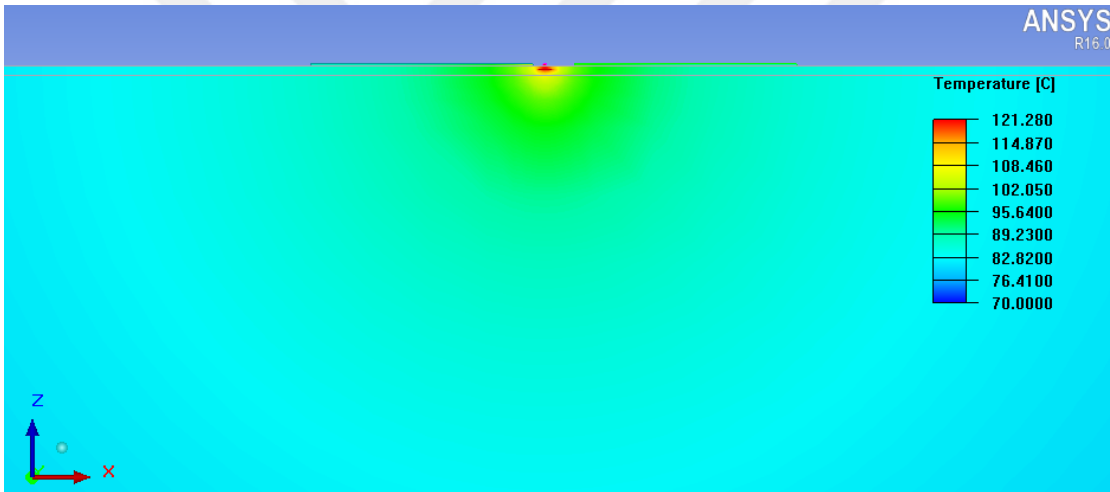
Şekil 5.10. 100 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



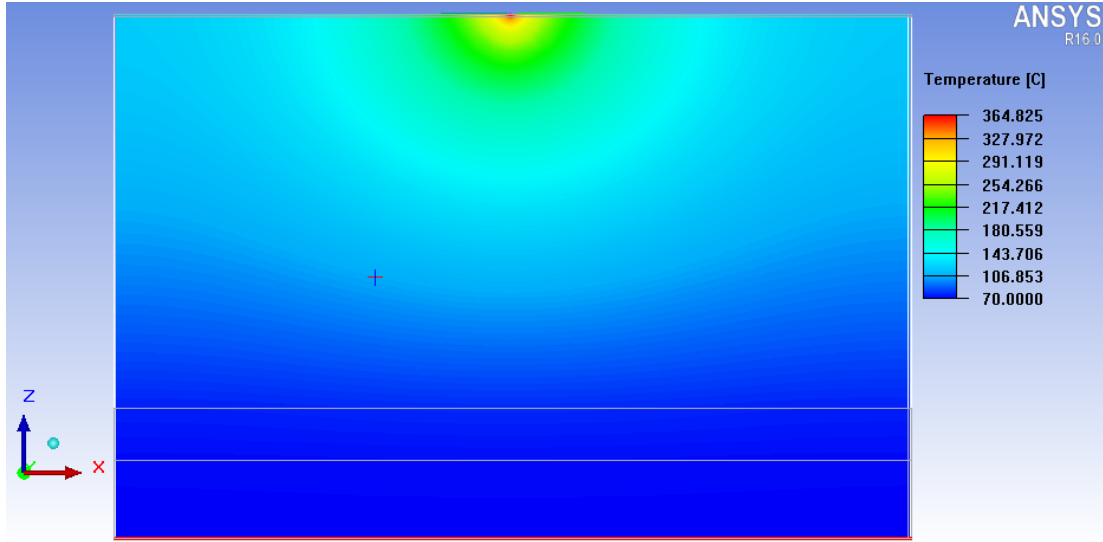
Şekil 5.11. 100 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



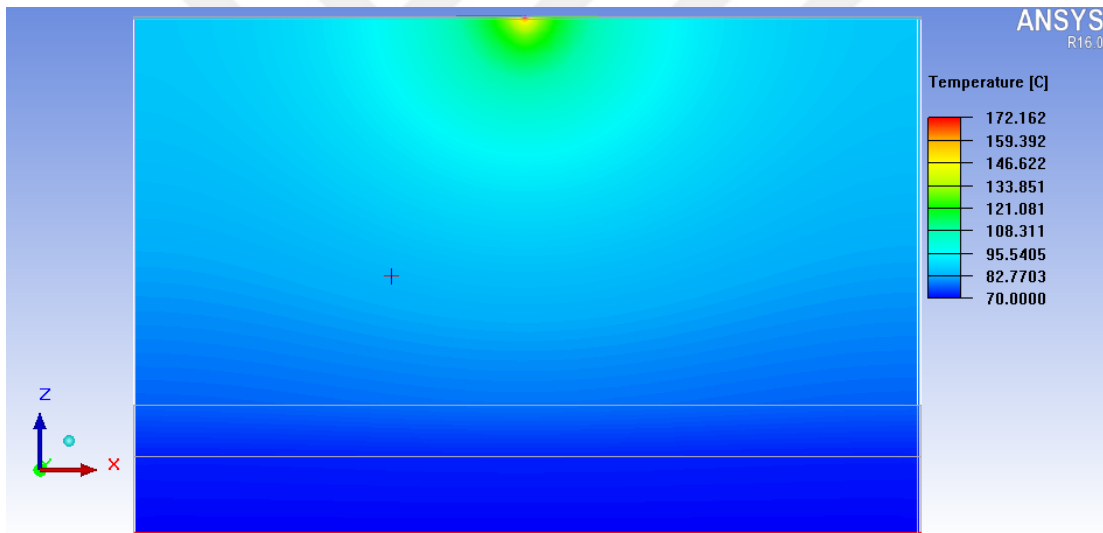
Şekil 5.12. 100 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



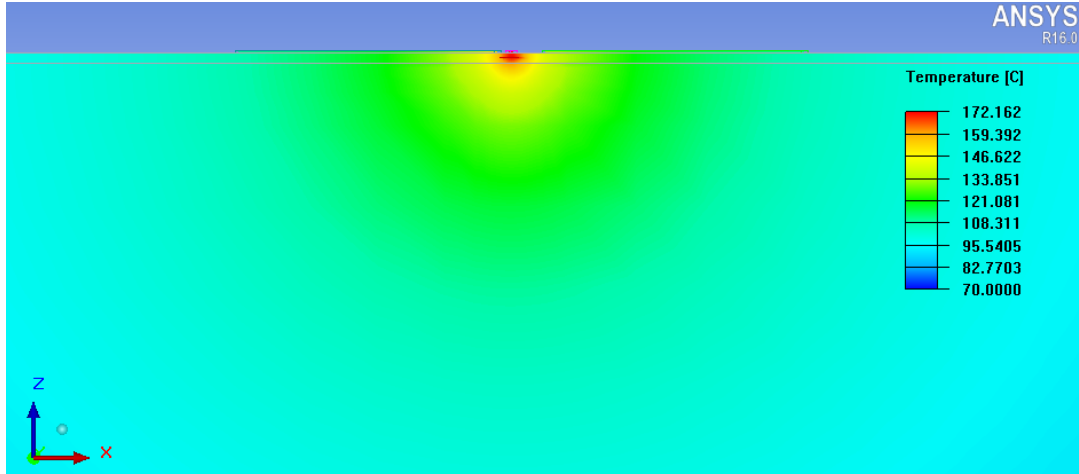
Şekil 5.13. 100 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



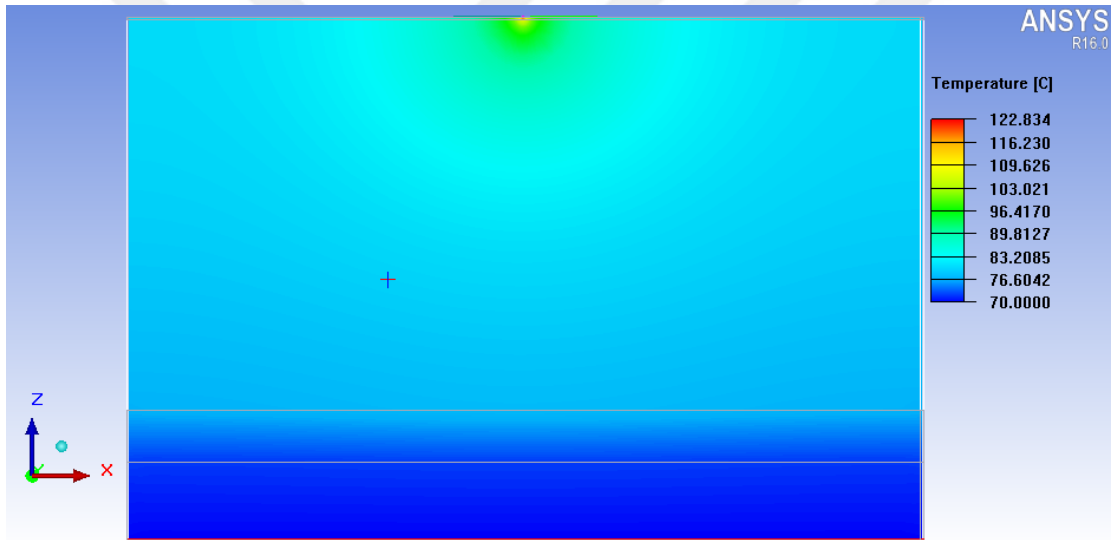
Şekil 5.14. 150 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



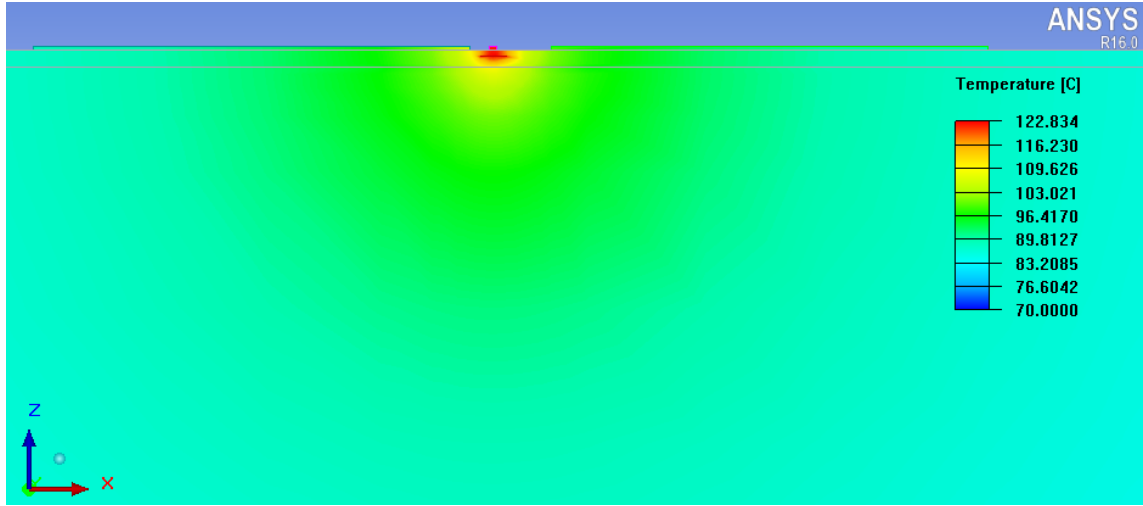
Şekil 5.15. 150 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



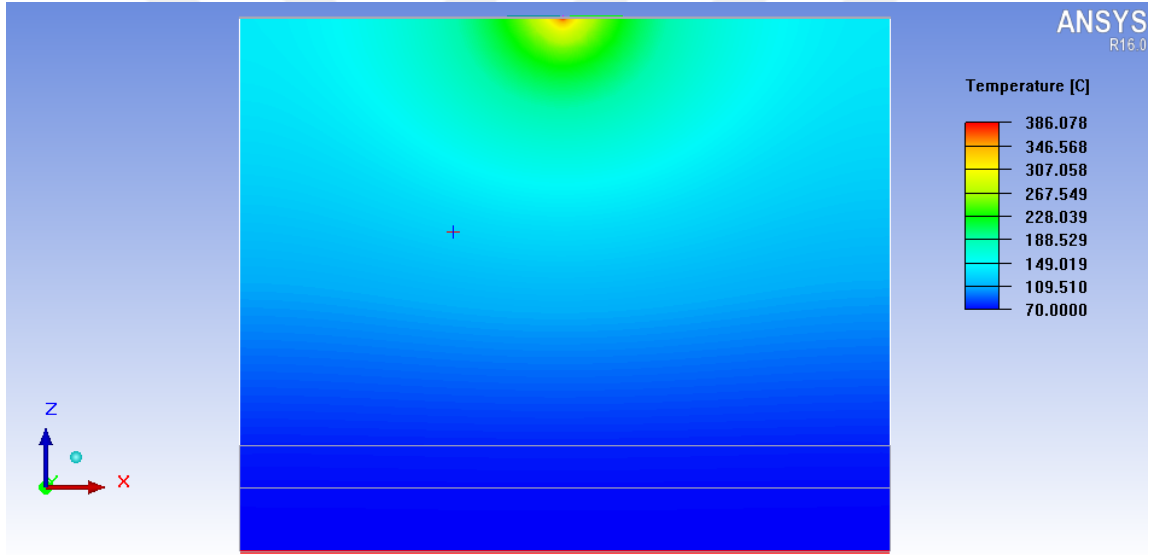
Şekil 5.16. 150 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



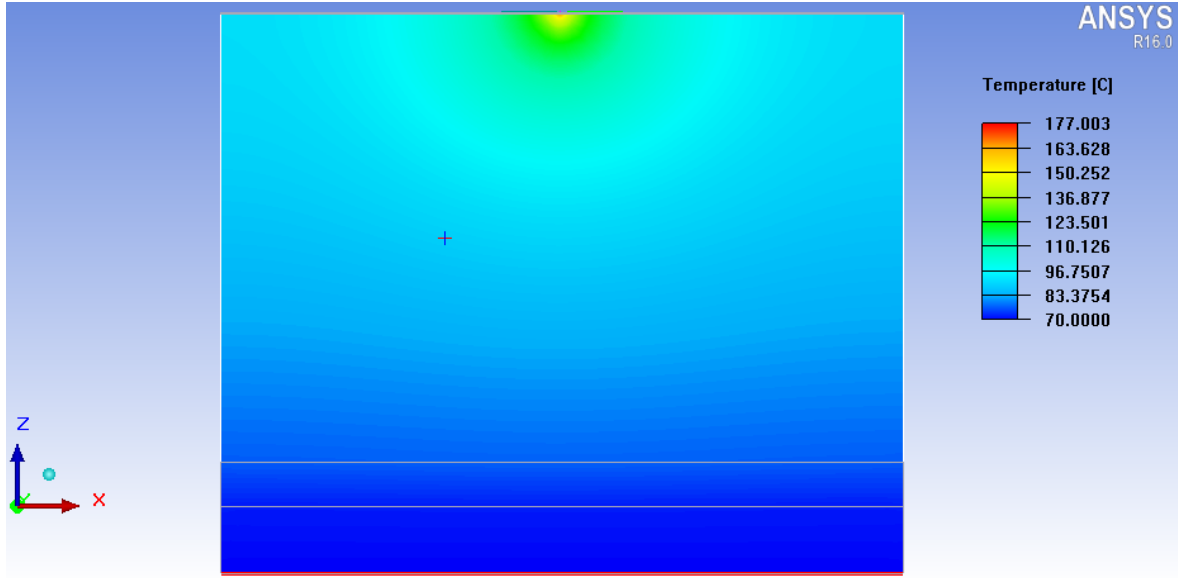
Şekil 5.17. 150 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



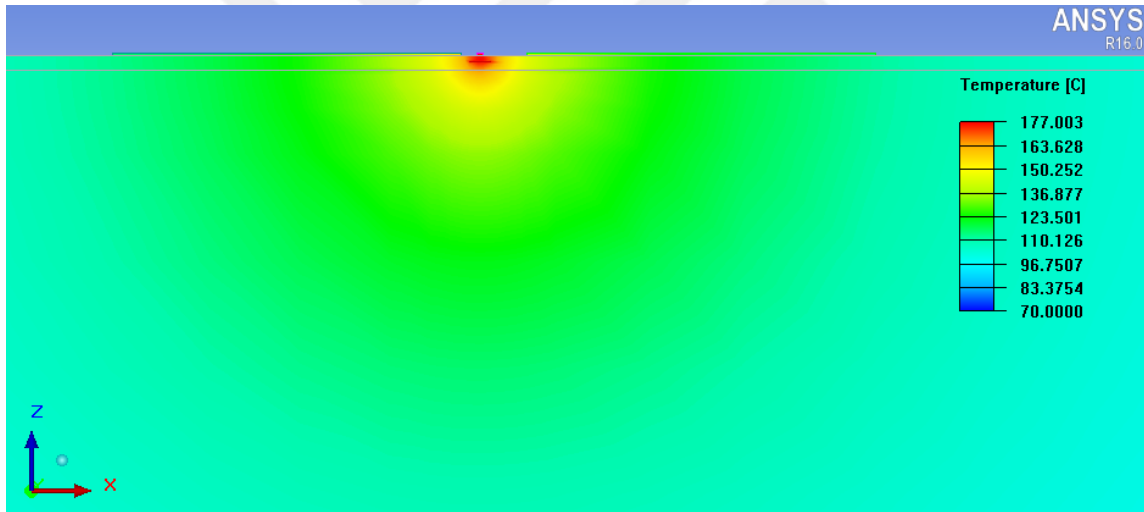
Şekil 5.18. 150 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



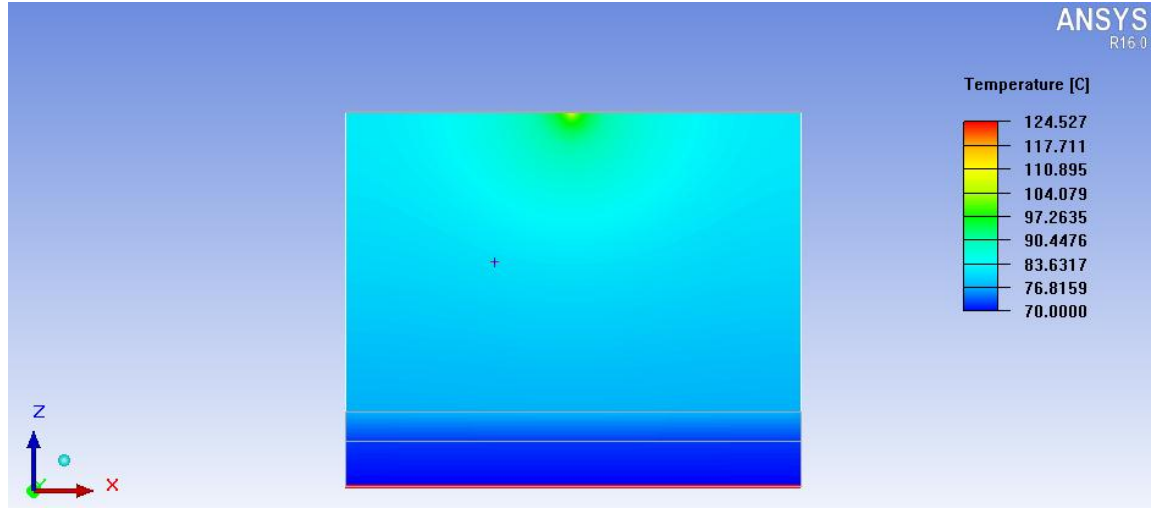
Şekil 5.19. 200 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



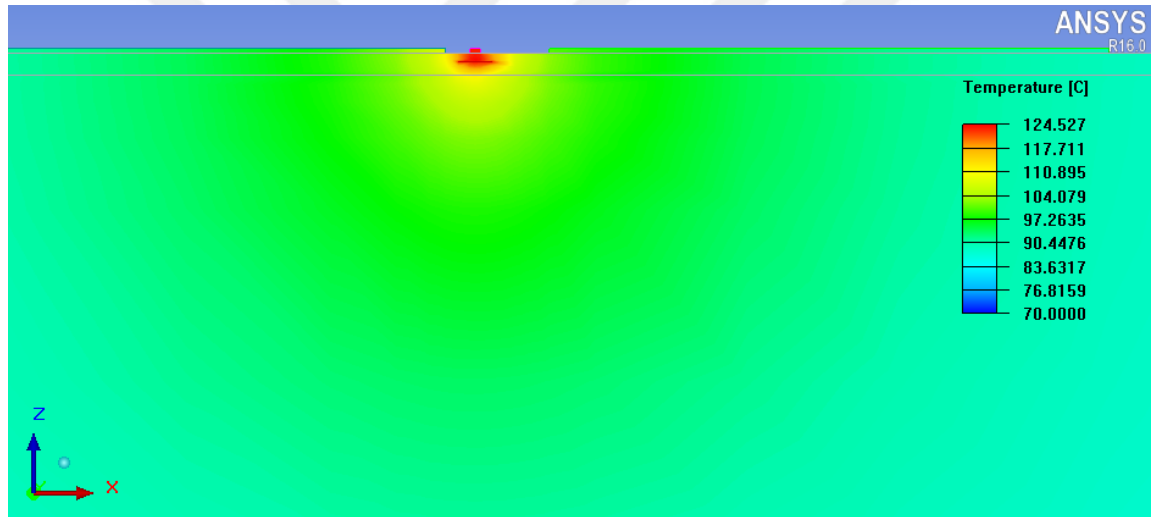
Şekil 5.20. 200 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



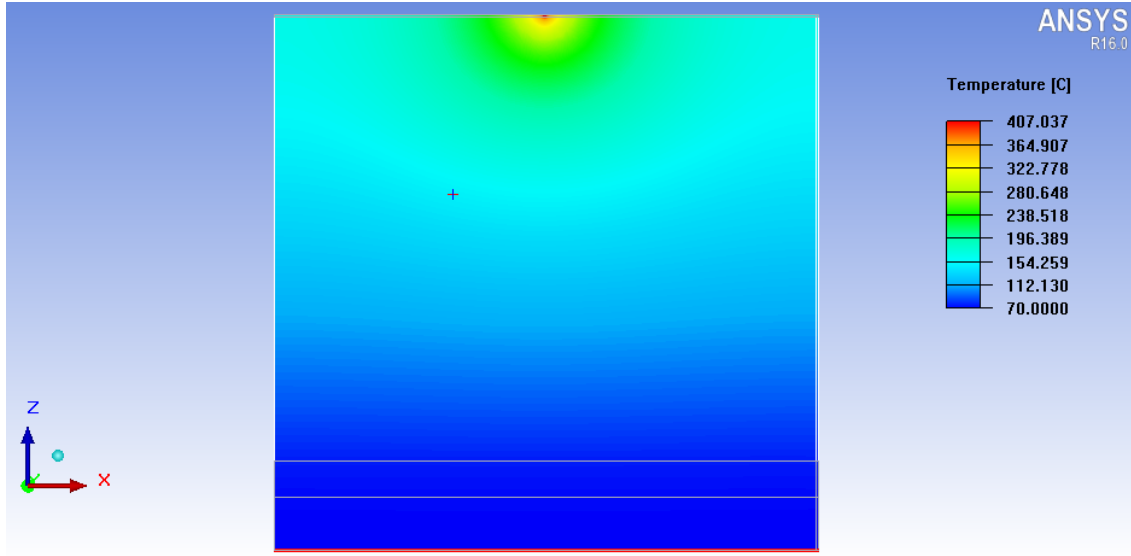
Şekil 5.21. 200 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



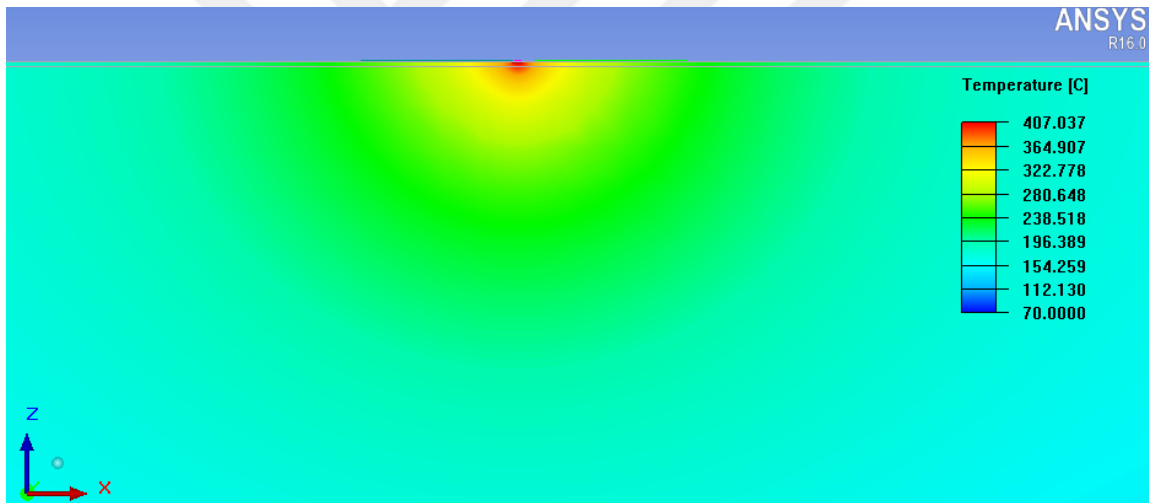
Şekil 5.22. 200 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



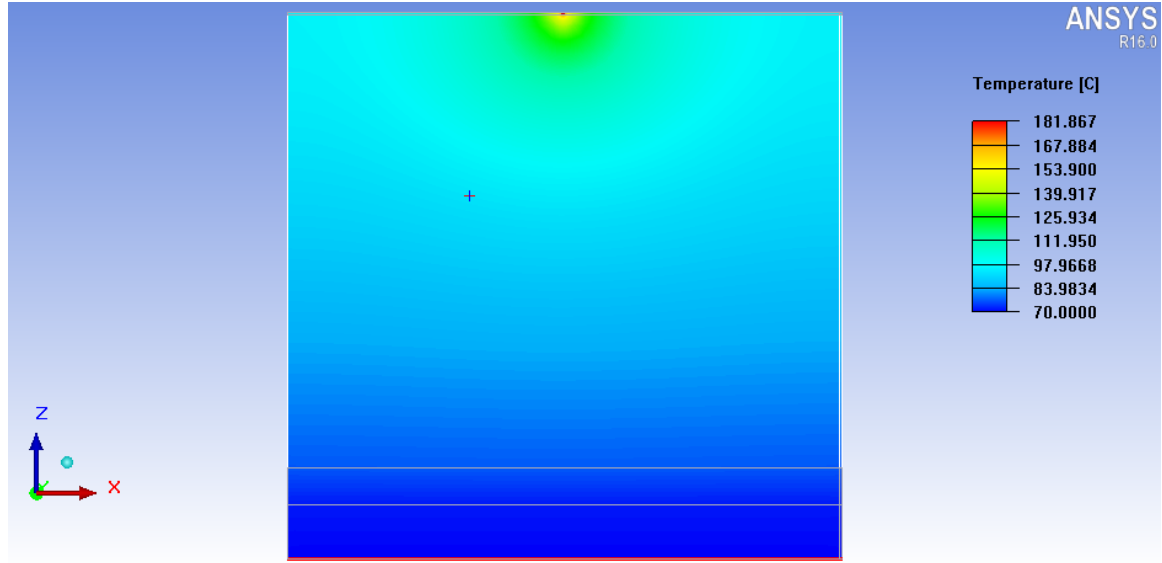
Şekil 5.23. 200 µm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



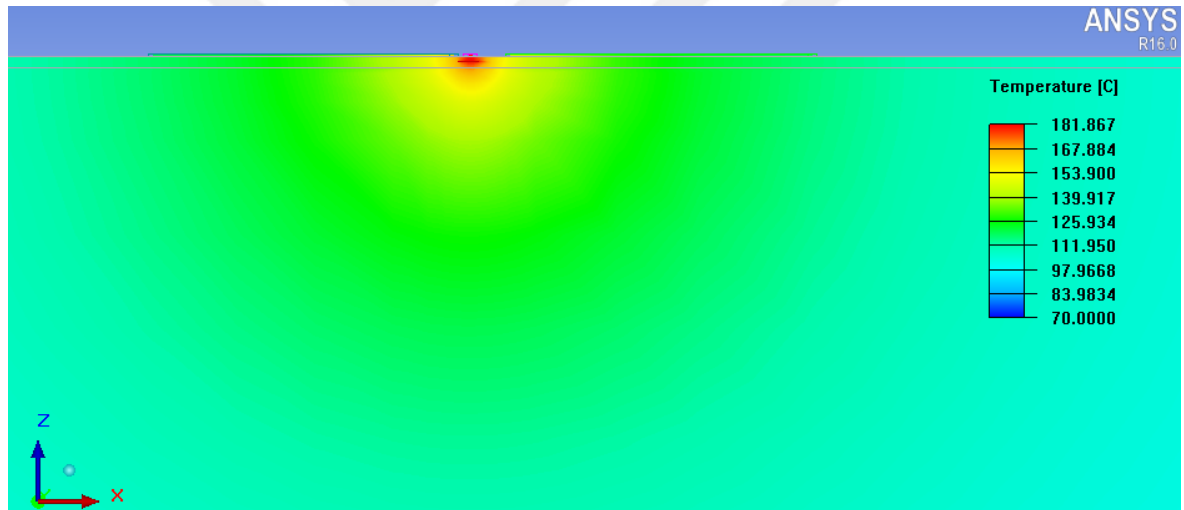
Şekil 5.24. 250 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



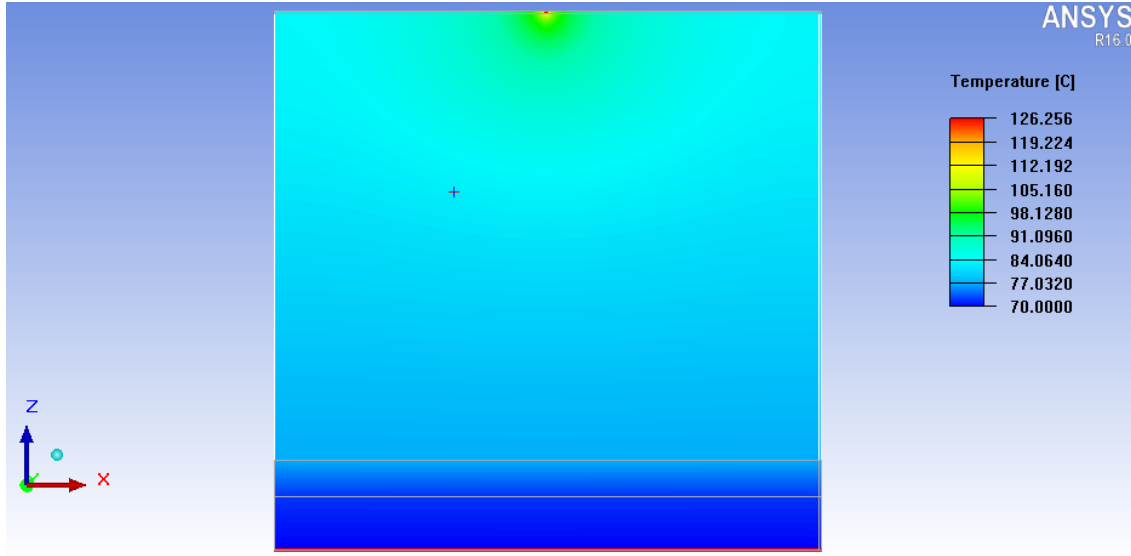
Şekil 5.25. 250 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



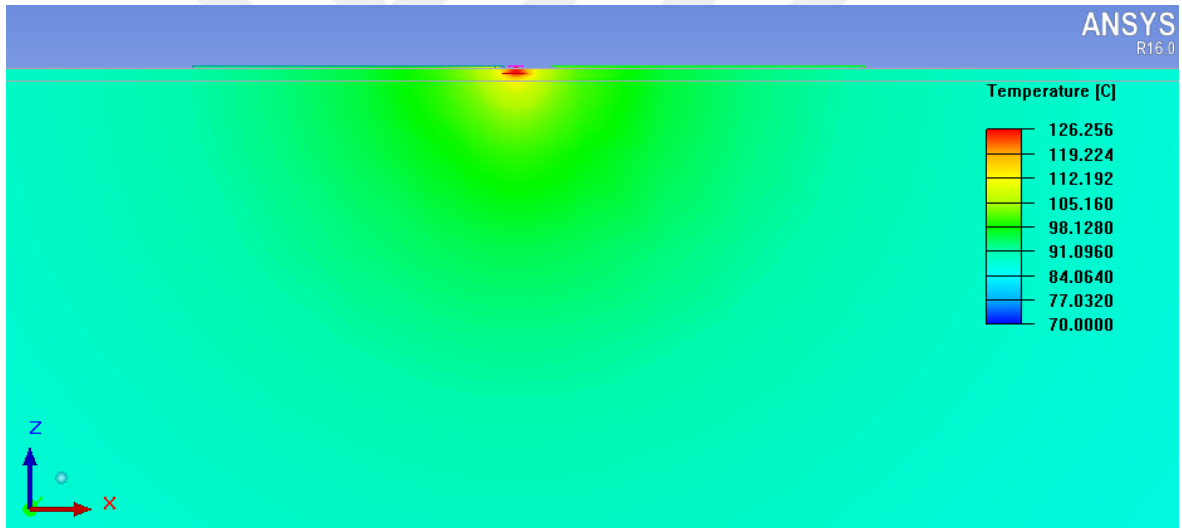
Şekil 5.26. 250 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



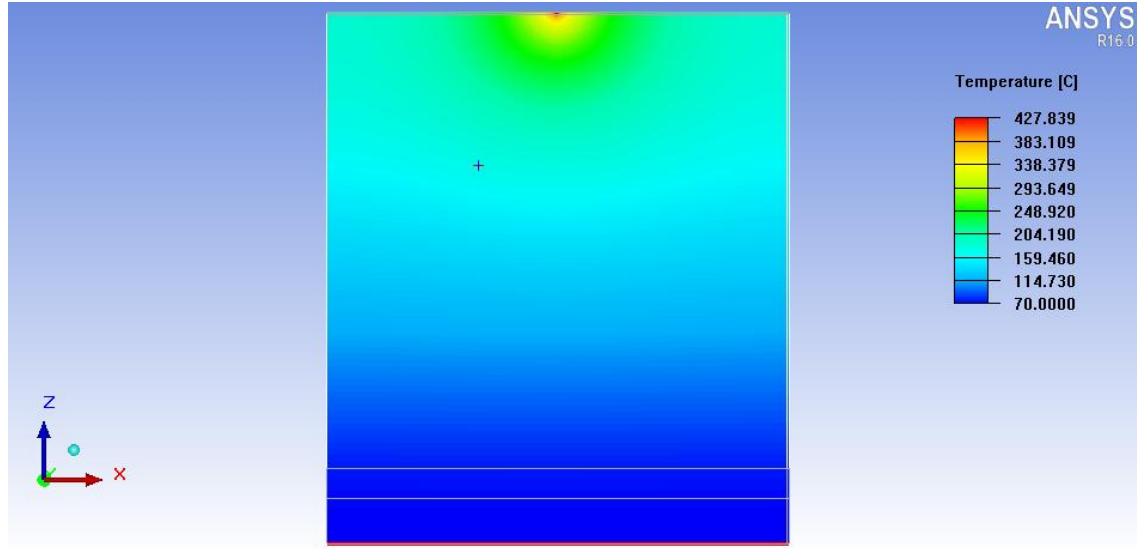
Şekil 5.27. 250 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



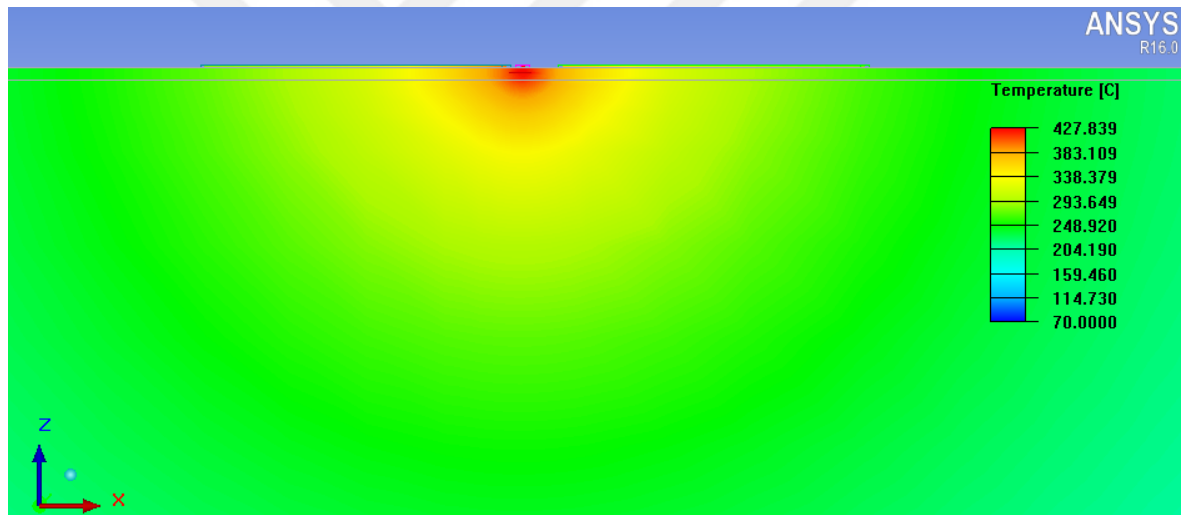
Şekil 5.28. 250 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



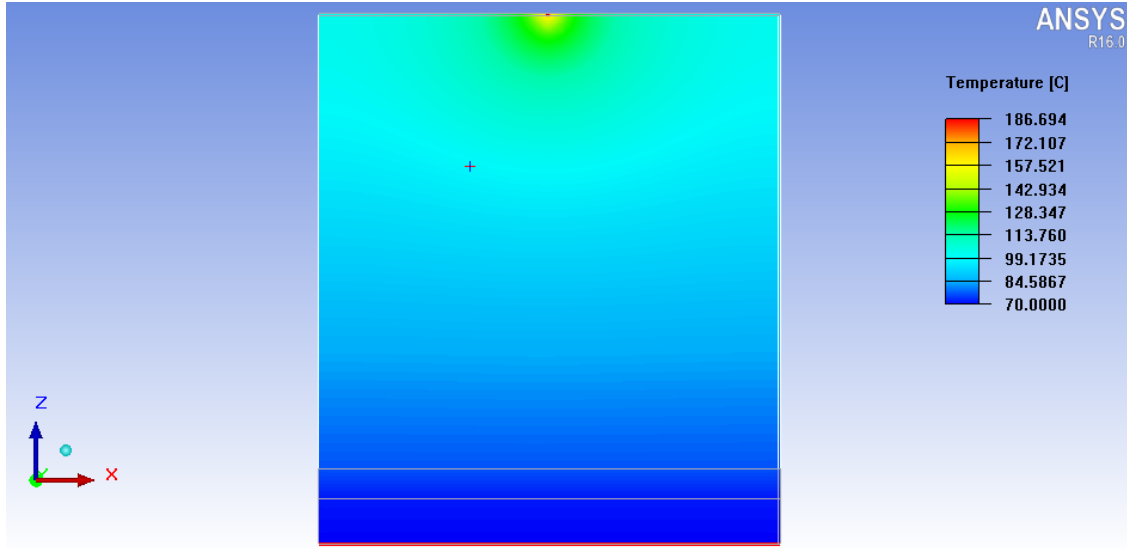
Şekil 5.29. 250 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



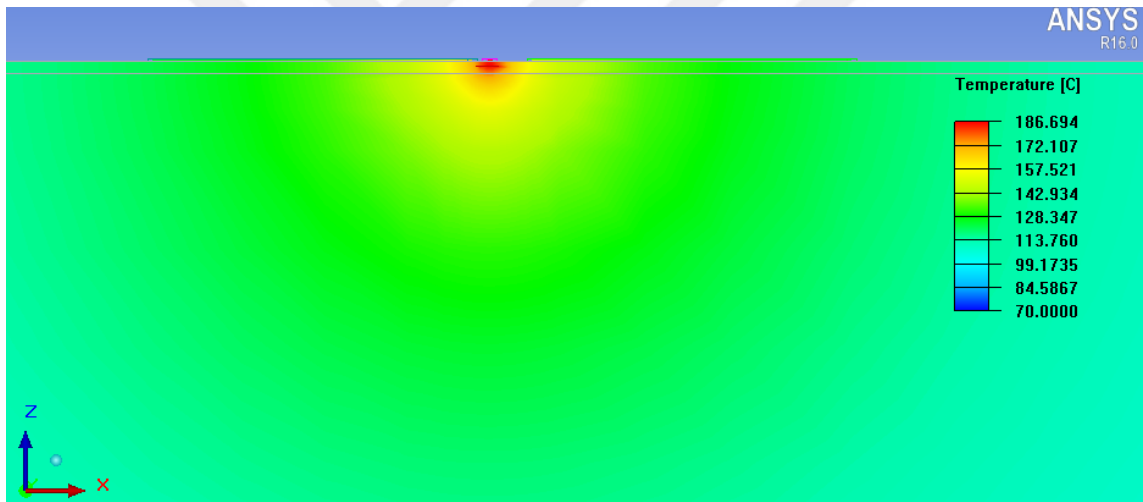
Şekil 5.30. 300 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



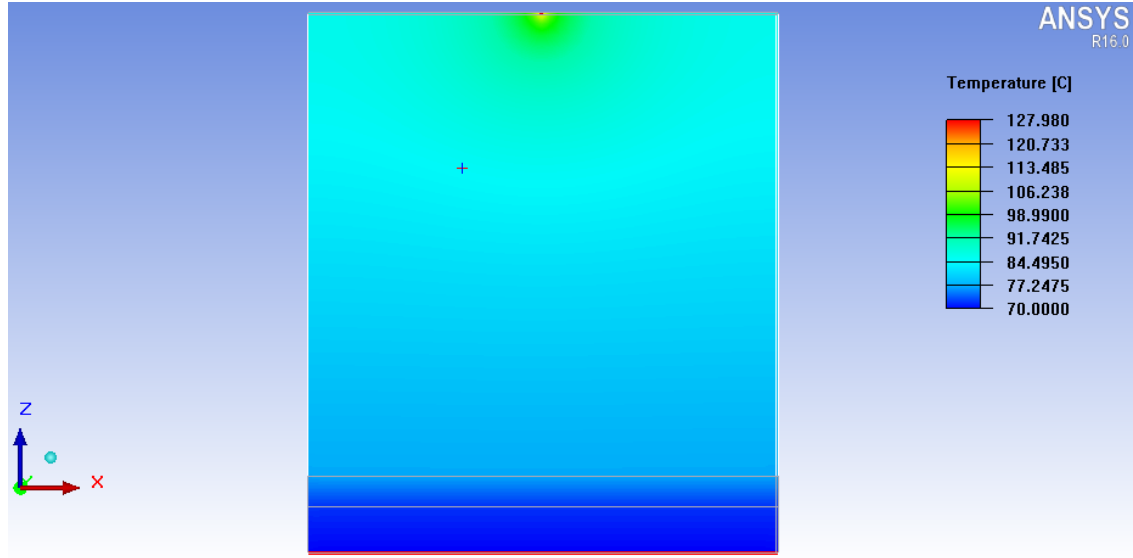
Şekil 5.31. 300 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



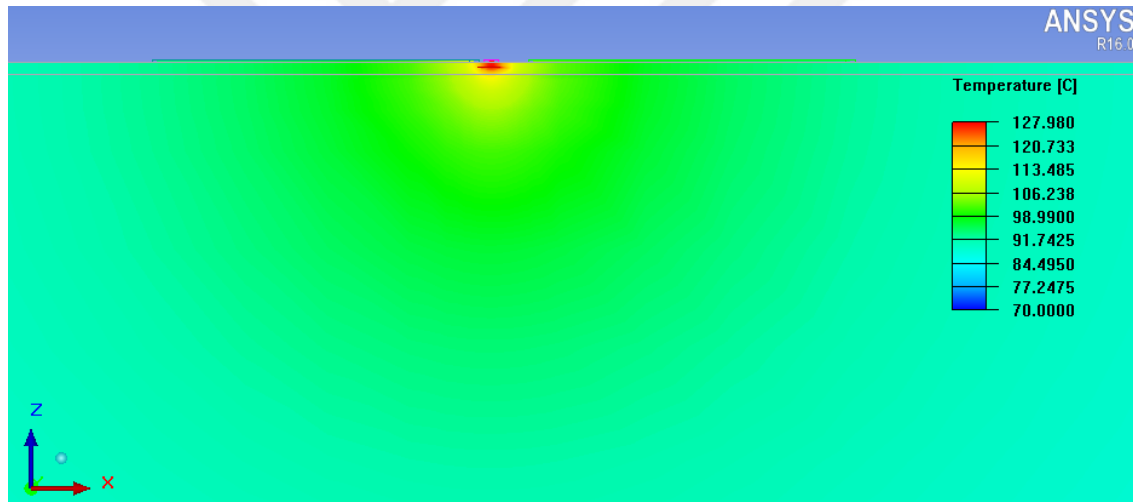
Şekil 5.32. 300 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



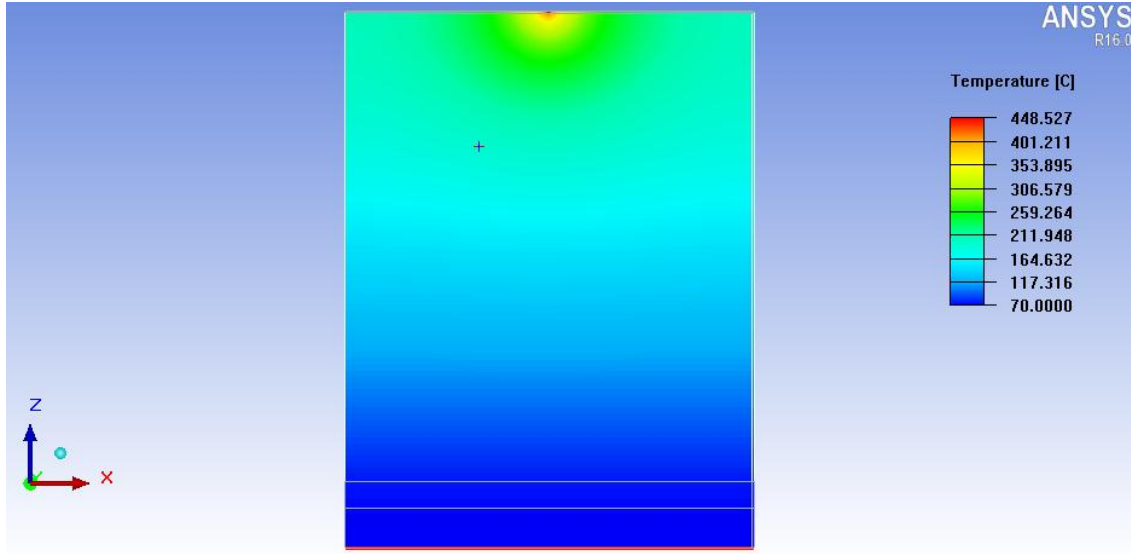
Şekil 5.33. 300 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



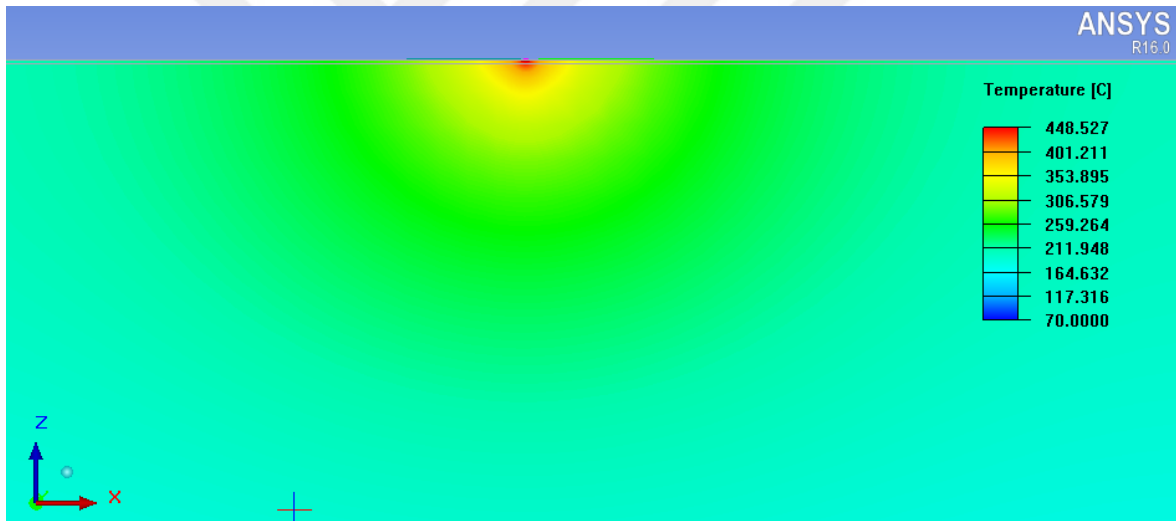
Şekil 5.34. 300 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



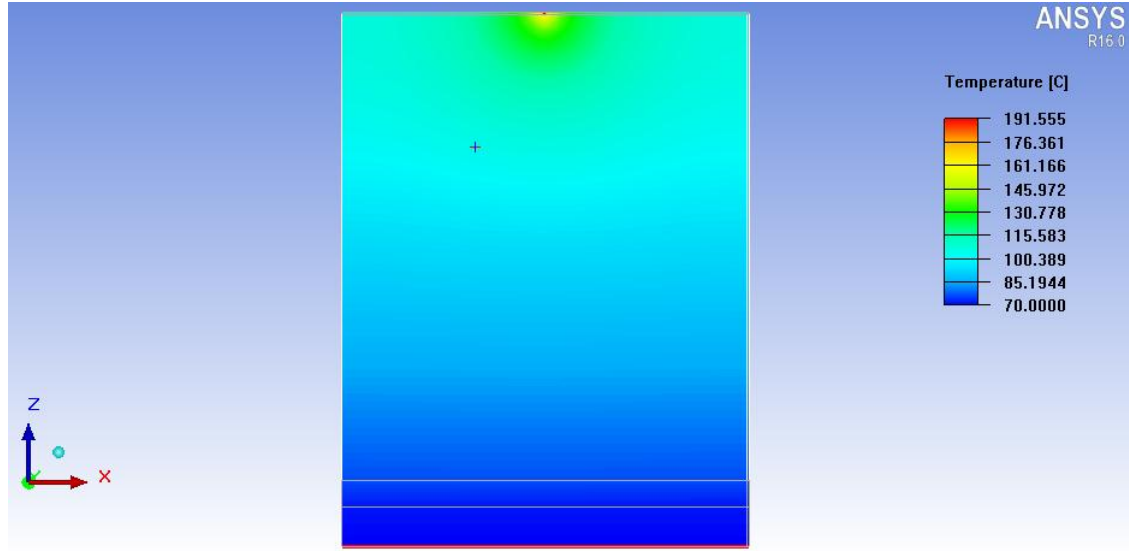
Şekil 5.35. 300 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



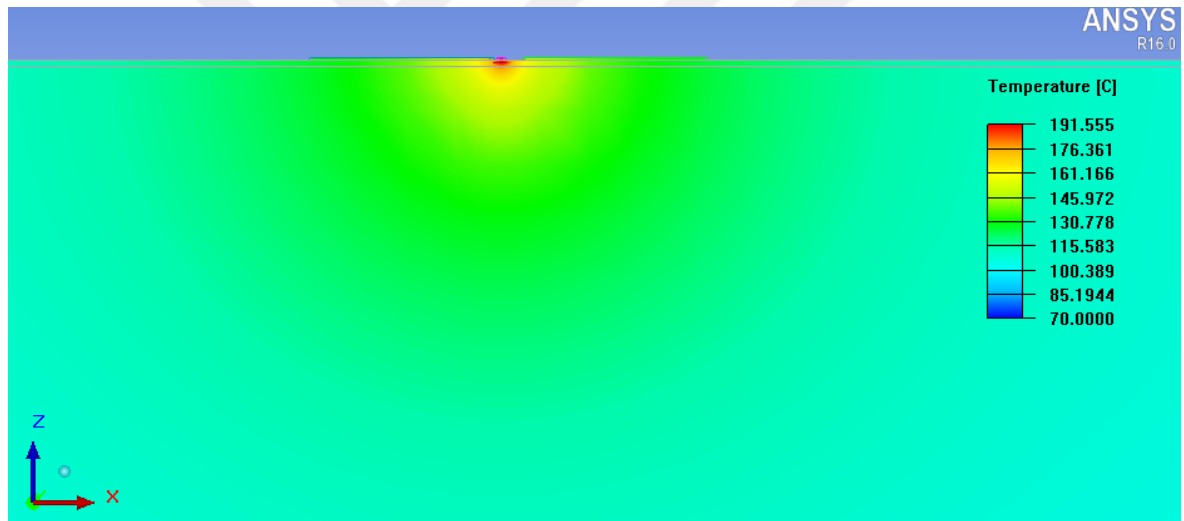
Şekil 5.36. 350 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



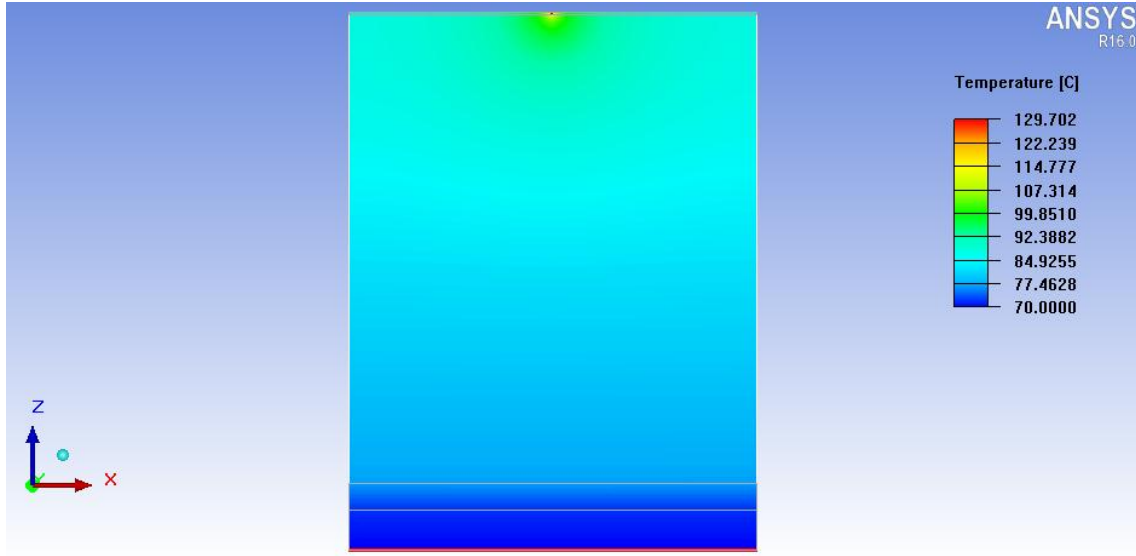
Şekil 5.37. 350 μm kalınlığında Safır alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



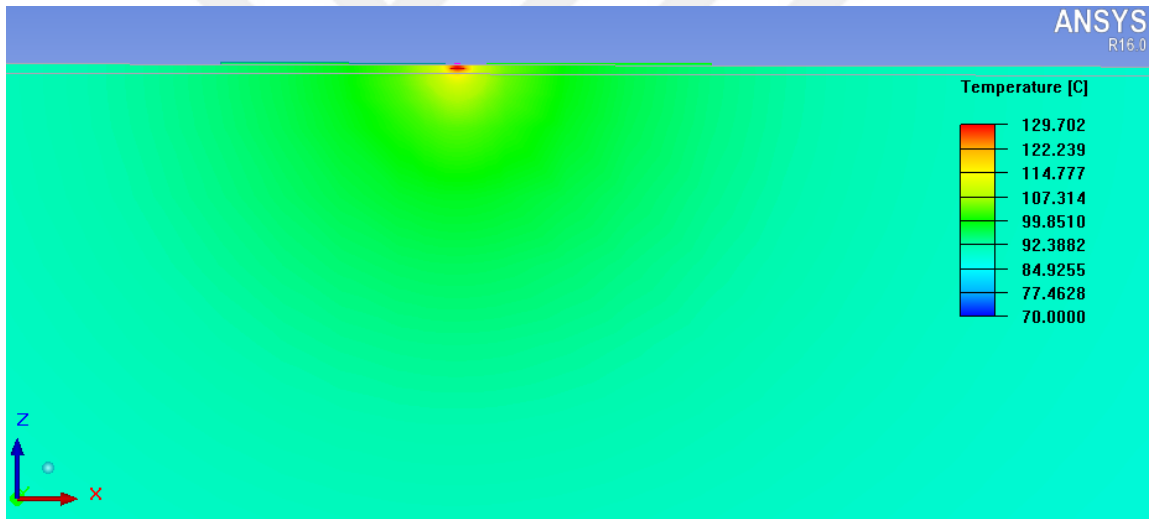
Şekil 5.38. 350 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



Şekil 5.39. 350 μm kalınlığında Si alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



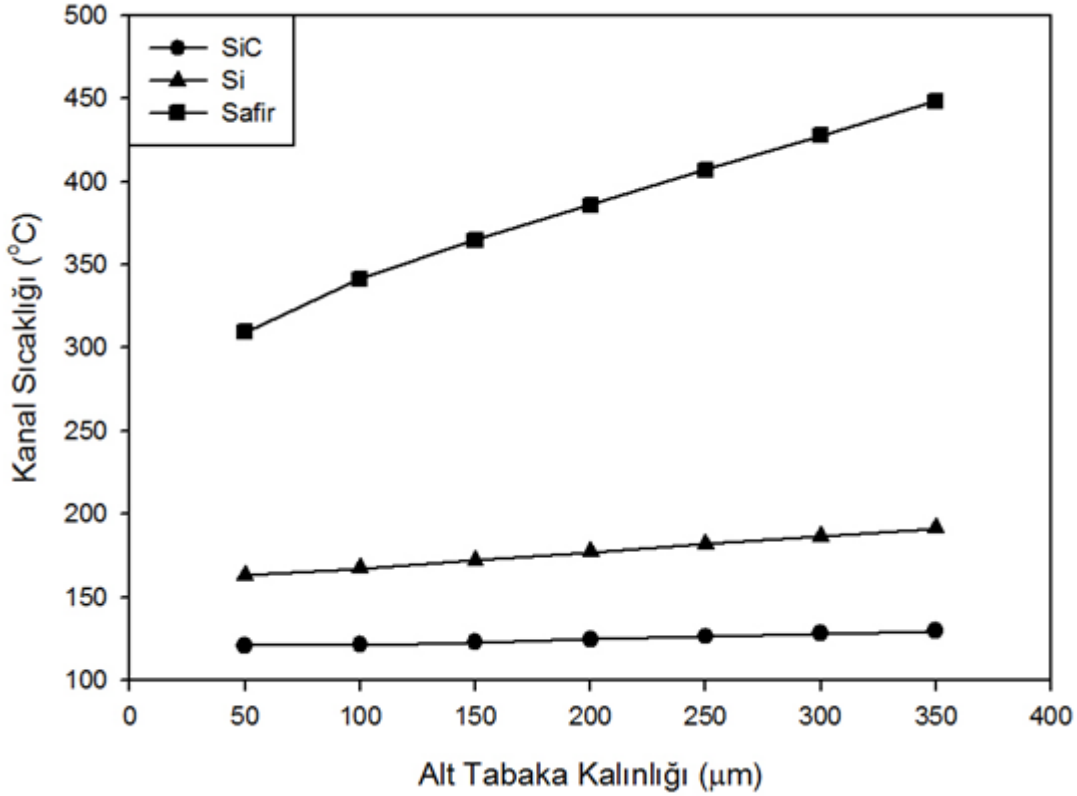
Şekil 5.40. 350 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



Şekil 5.41. 350 μm kalınlığında SiC alt tabaka üzerinde AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm

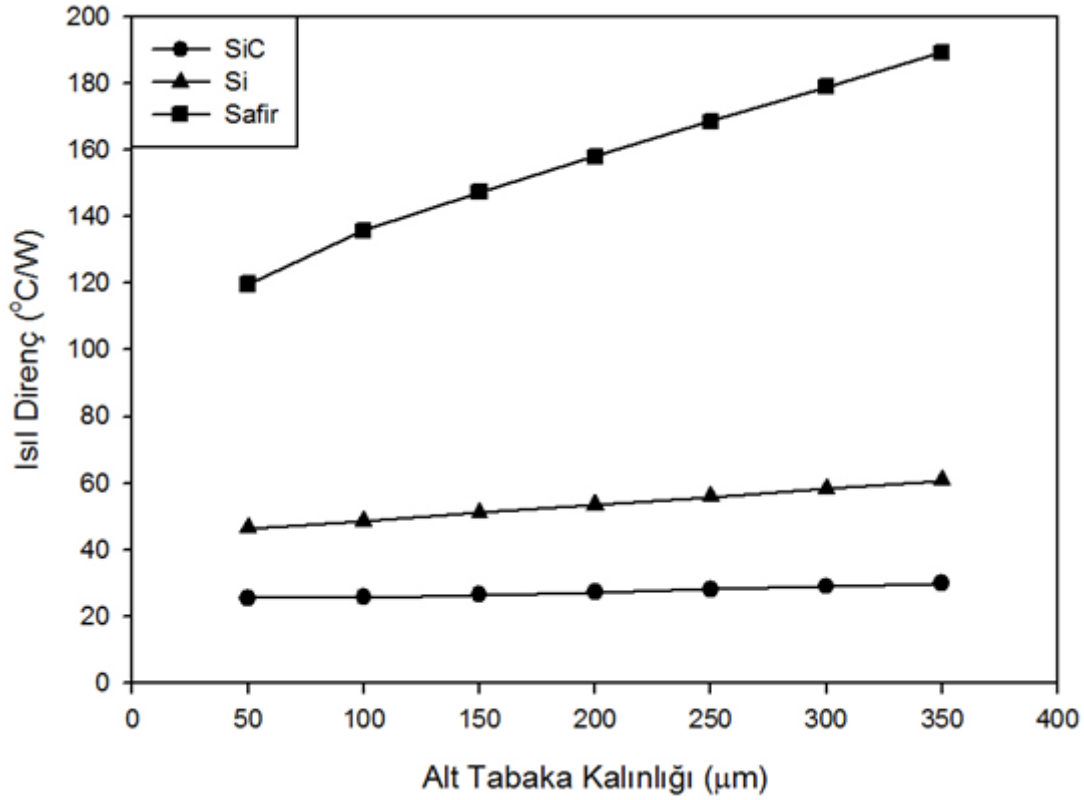
Şekil 5.42.'de görülen grafikte farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal sıcaklığının alt tabaka kalınlığına göre değişimi sunulmuştur. Grafikte görüldüğü gibi alt tabaka kalınlığı artışında kanal sıcaklıkları yükselmiştir, Şekil 5.43.'de farklı alt tabakalardaki transistörde, kalınlık değişimine bağlı olarak ısı direnç değişimi sunulan grafikte görüldüğü üzere, ısı direnç artışları kanal sıcaklığında yükselmeye sebep olmuştur. Alt tabaka kalınlığı 7 katına çıkarıldığında en fazla kanal sıcaklığı değişimi % 44,9'la Safir alt tabakada gerçekleşmiştir. Bunun nedeni Safir alt tabakanın en düşük ısı iletkenliğe sahip olmasıdır, sıcaklık dağılımlarında da Safir alt tabakada kalınlık artışında belli bir mesafeden sonra ısının yayılmadığı ve taban sıcaklığına yaklaştığı görülmektedir.

Şekil 5.42.'deki grafiğe bakıldığında en düşük kanal sıcaklığı ve en düşük kanal sıcaklığı değişimi ise % 7,3'le en yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan SiC alt tabakada görülmektedir, sıcaklık dağılımlarında da SiC alt tabakada ısının diğer malzemeye geçinceye kadar homojen olarak yayıldığı görülmektedir.



Şekil 5.42. AlGaIn/GaN transistörde farklı alt tabakalarda kanal sıcaklığının alt tabaka kalınlığına göre değişimi

Şekil 5.43.'de farklı alt tabakalarda AlGaIn/GaN transistörde ısıl direncin alt tabaka kalınlığına göre değişimi görülmektedir, grafik Şekil 5.42. ile oldukça benzerdir, burada kanal sıcaklığı artışı olduğu gibi artan alt tabaka kalınlığına bağlı olarak ısıl direncin tüm alt tabaka malzemelerinde arttığı görülmüştür. Eşitlik 3.18'de görüldüğü gibi ısıl direnç malzemenin kalınlığıyla doğru orantılıdır, dolayısıyla alt tabaka kalınlığının artışına bağlı olarak ısıl direnç artışı beklenen bir sonuçtur. En düşük ısıl direnç tüm malzemelerde 50 μm kalınlıkta gözlenirken çok ince tabakalar için kırılma arttığından üretim prosesinin zorlaştığı göz önünde bulundurulursa, olabilecek en düşük alt tabaka kalınlığının transistörde gerçekleşecek en verimli ısı transferini sağladığını söyleyebiliriz.



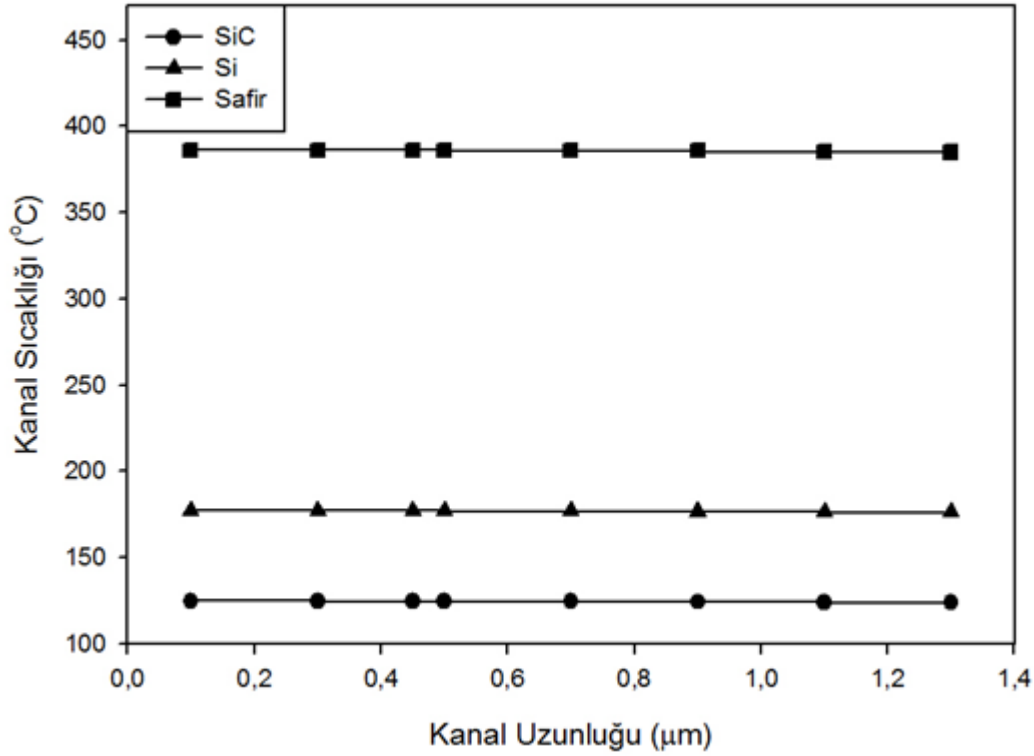
Şekil 5.43. AlGaIn/GaN transistörde farklı alt tabakalarda ısı direncin alt tabaka kalınlığına göre değişimi

5.2.2. Kanal uzunluğunun ısı transferine etkileri

Bu bölümde AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı transferine etki eden bir diğer parametre olan kanal uzunluğu etkileri incelenecektir. Kanal uzunlukları, 0,1, 0,3, 0,45, 0,5, 0,7, 0,9, 1,1 ve 1,3 μm olan 200 μm kalınlıktaki Safir, Si ve SiC alt tabakalı, 260 μm kanal genişliğinde ve 2 W'lık güç atımına sahip transistör modelinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Kanal uzunluğunun, kanal sıcaklığına ve toplam ısı dirence etkilerini gösteren grafikler farklı alt tabakalardaki transistörler için sunulmuştur. Kanal sıcaklığında çok küçük değişimler olduğundan sıcaklık dağılımı ayrıca gösterilmemiştir.

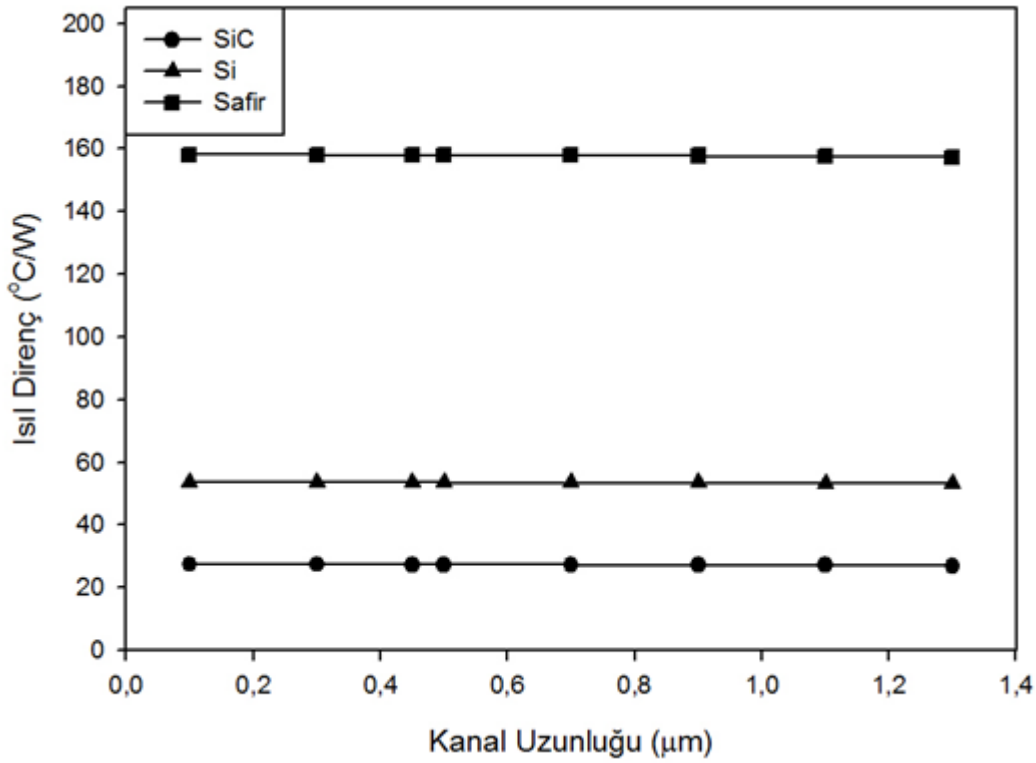
Şekil 5.44.'de farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal uzunluğu arttıkça kanal sıcaklığının az miktarda düştüğü gözlenmektedir. Kanal uzunluğu 13 kat arttığında SiC alt tabakalı transistörde kanal sıcaklığında % 0,75, Si alt tabakalı transistörde % 0,6, Safir alt tabakalı transistörde ise %0,34'lük bir düşüş gözlenmiştir, SiC alt tabakasının ısı iletkenliği yüksek olduğundan en büyük kanal sıcaklığı değişimi bu malzemede olmuştur. bunun nedeni ısı kaynağına tanımlanan ısı gücün kanal uzunluğu arttıkça daha geniş bir

bölgeye tanımlanmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalarda da artan kanal uzunluğunda kanal sıcaklığının azaldığı gözlenmiştir [48].



Şekil 5.44. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal sıcaklığının kanal uzunluğuna göre değişimi

Şekil 5.45.'de bir önceki şekle benzer olarak AlGaIn/GaN transistörde artan kanal uzunluğuyla ısı direncin azaldığı görülmektedir. Kanal uzunluğu 13 katına çıktığında SiC alt tabakalı transistörde ısı direnci % 1,71 azalırken, Si alt tabakalı transistörde % 1, Safir alt tabakalı transistörde ise % 0,4 oranında azalma görülmüştür. Transistörün en üst katmanından alt tabakanın tabanına kadar toplam ısı direnci hesaplanırken taban sıcaklığı değişmemiş ancak kanal sıcaklığı, ısı gücü daha büyük bir alana yayıldığı için azalmıştır, dolayısıyla Eşitlik 3.18'de pay azaldığı için eşitliğin diğer tarafındaki ısı direnci değeri de azalmıştır. Sonuç olarak optimum transistör modeli oluşturulurken kanal uzunluğunun büyük olması kanal sıcaklığını düşürecek ve transistörün ömrünü uzatacaktır ancak ısı performansının yanında elektriksel performans da göz önünde bulundurulmalıdır.



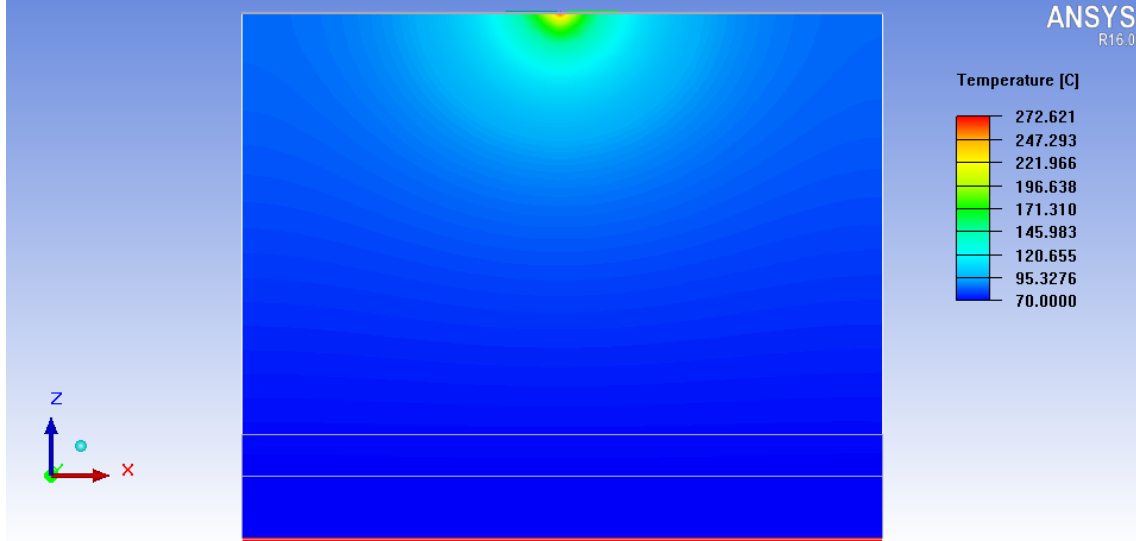
Şekil 5.45. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde ısı direncinin kanal uzunluğuna göre değişimi

5.2.3. Kanal genişliğinin ısı transferine etkileri

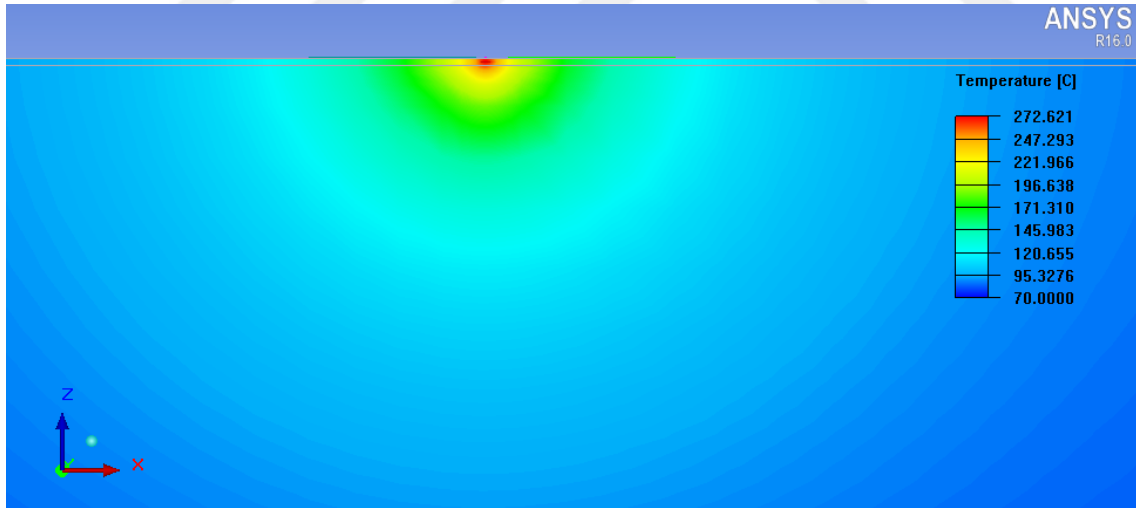
AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı transferine etki eden parametrelerden bir diğeri de kanal genişliğidir. Kanal genişlikleri 50, 100, 130, 160, 200, 230, 260 ve 300 µm olan, 0,45 µm kanal uzunluğuna sahip, 200 µm kalınlıktaki Safir, Si ve SiC alt tabakalı, 2 W'lık güç atımında yapılan sayısal analizler sonucu iki boyutlu sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Ayrıca kanal genişliğinin kanal sıcaklığına ve toplam ısı dirence etkilerini gösteren farklı alt tabakalardaki transistörler için grafikler sunulmuştur.

Kanal genişliğinin farklı alt tabakalarda sıcaklık dağılımına etkisini daha iyi görmek için tüm kanal genişlikleri yerine 50, 160 ve 300 µm kanal genişliğine sahip Safir, Si ve SiC alt tabakalardaki transistörlerin sıcaklık dağılımları Şekil 5.46-5.63'de sunulmuştur. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında tüm alt tabakalarda kanal genişliği arttıkça ısınmın daha iyi yayıldığı ancak ısı gücün artmasına bağlı olarak kanal sıcaklığının arttığı görülmektedir. Kanal genişliği kanal uzunluğuna oranla oldukça büyük olduğundan literatürde güç değeri tanımlanırken gücün birim kanal genişliğinde tanımlandığı çalışmalar görülmektedir. Bu bölümde 260 µm genişliğinde transistörden 2 W ısı gücü atıldığı kabul edilerek birim kanal

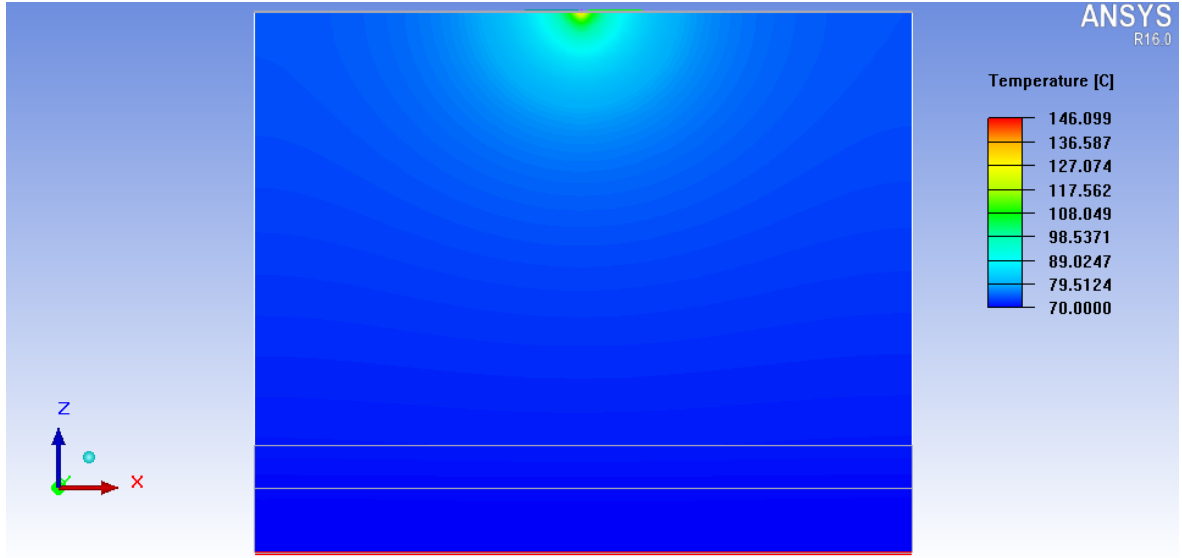
genişliğinde 7,692 W/mm'lik güç değeri sabit kabul edilmiştir. Bu durumda sayısal analizlerde ısı kaynağına tanımlanan güç değeri kanal genişliği ile birim kanal genişliğindeki güç değeri çarpılarak hesaplanmıştır.



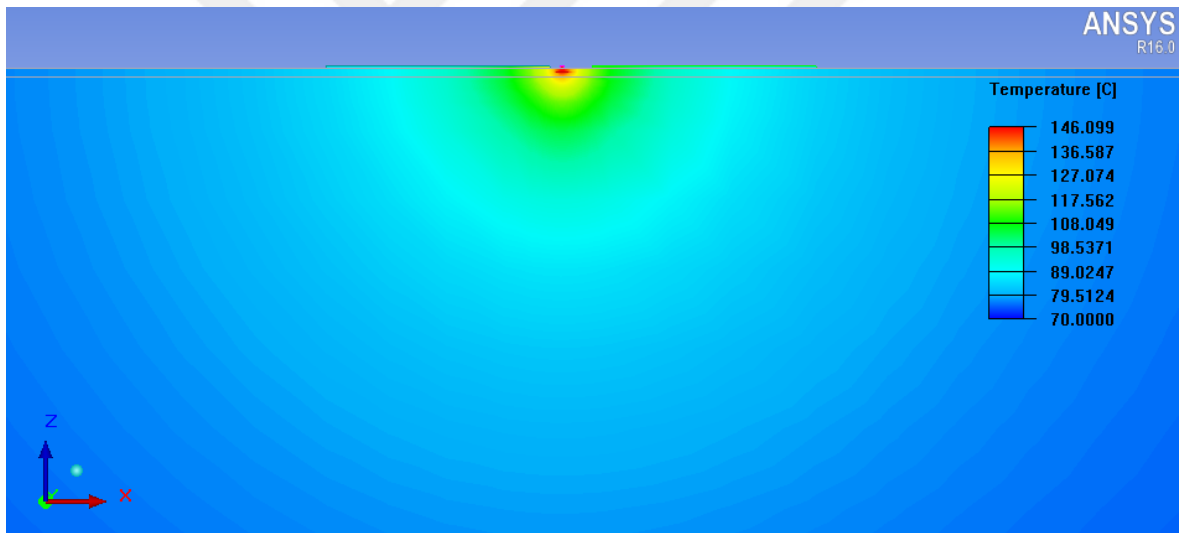
Şekil 5.46. 50 μm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



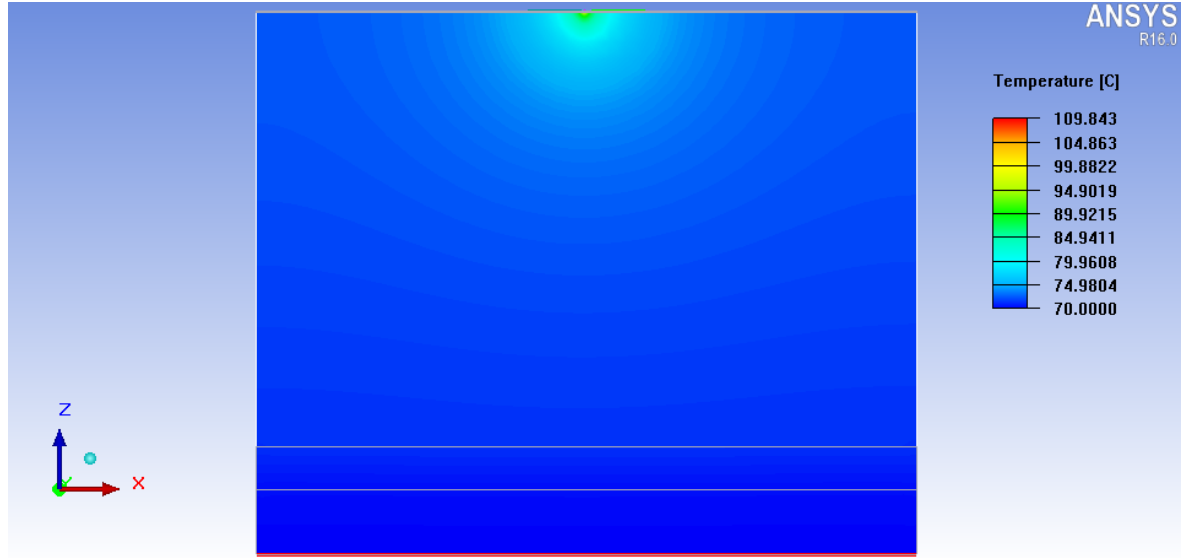
Şekil 5.47. 50 μm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



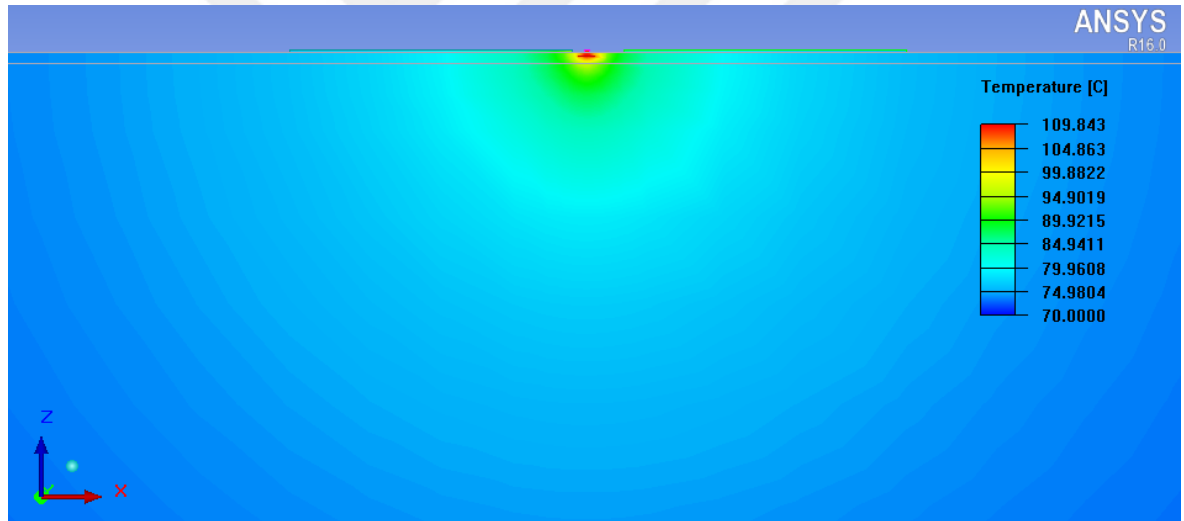
Şekil 5.48. 50 μm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



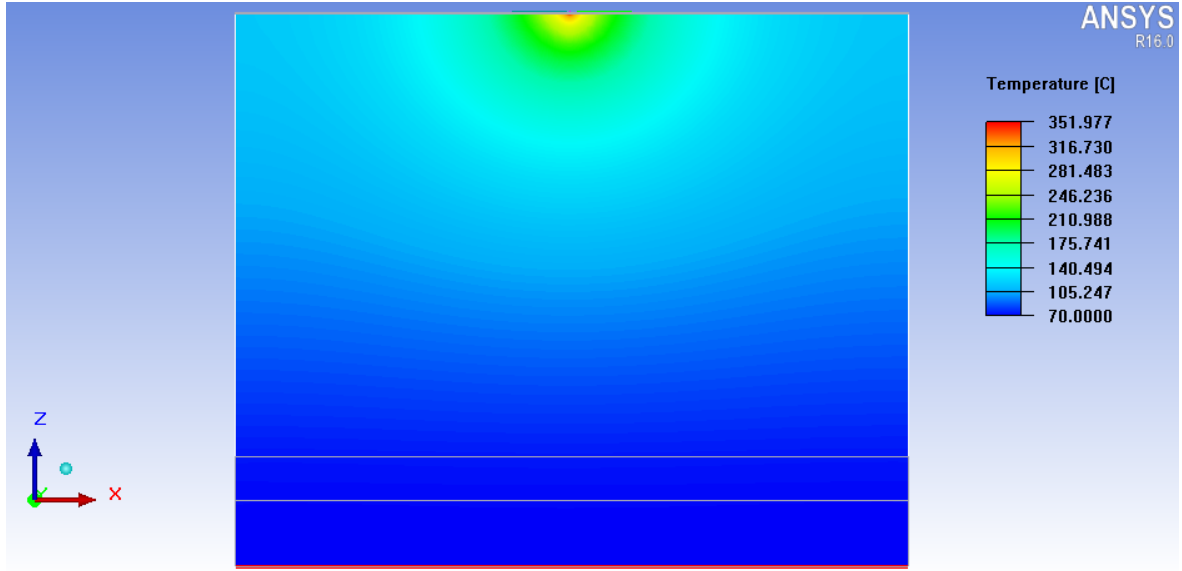
Şekil 5.49. 50 μm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



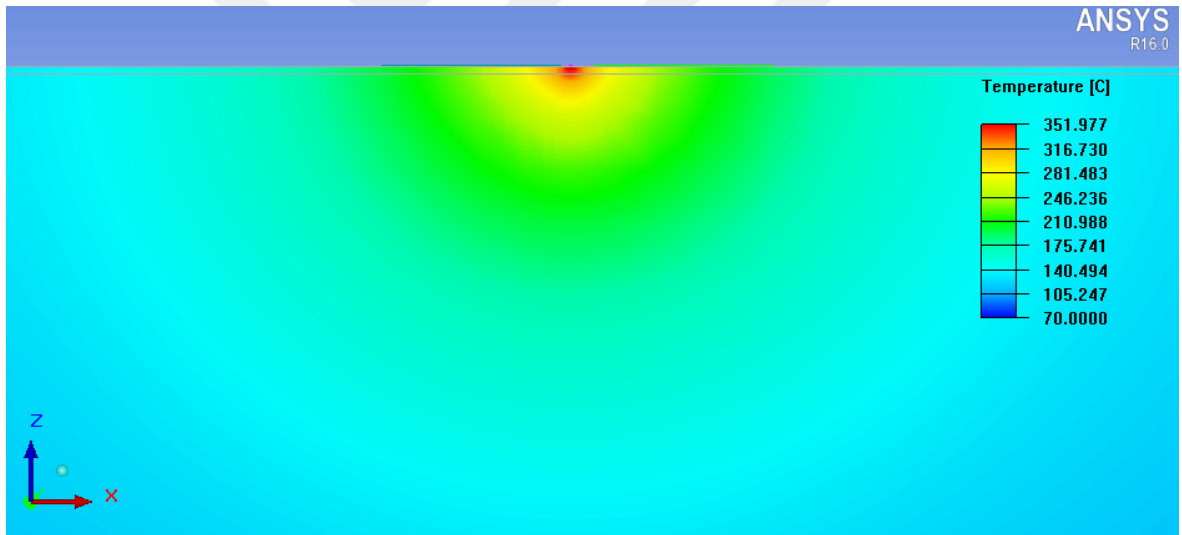
Şekil 5.50. 50 μm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



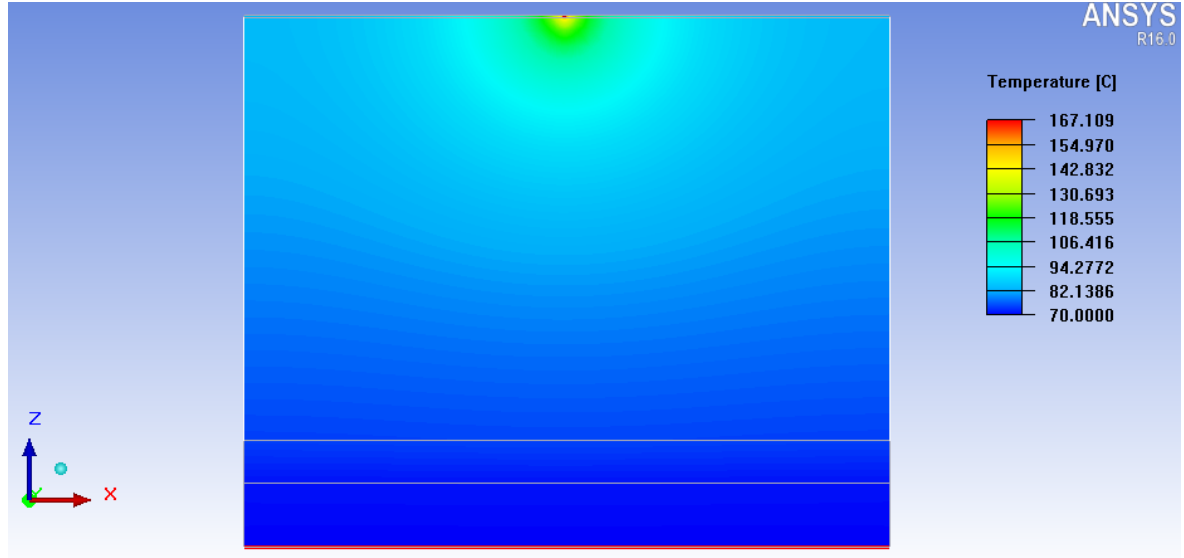
Şekil 5.51. 50 μm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



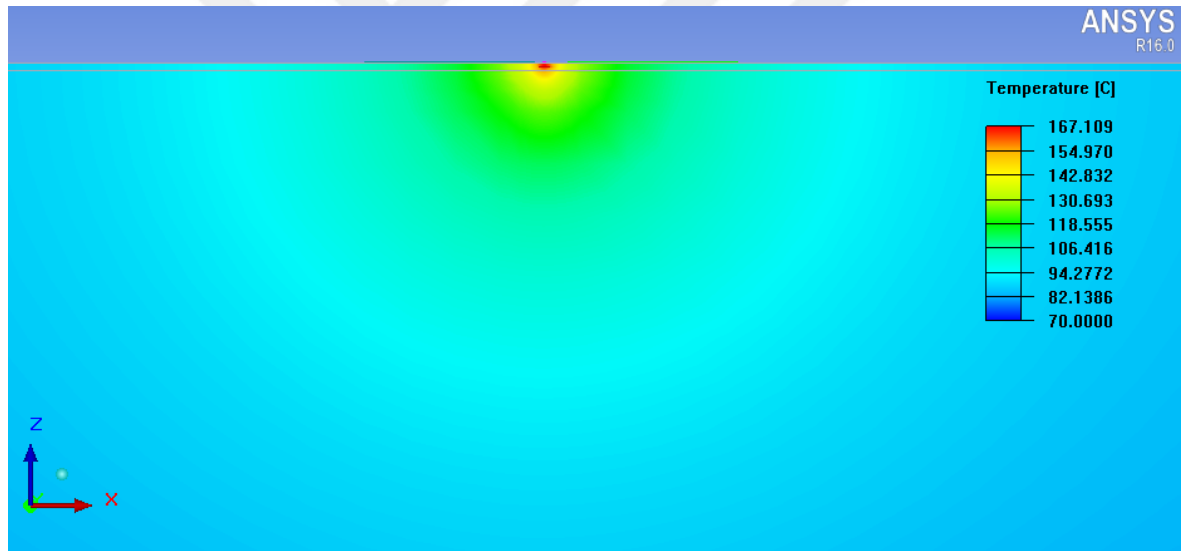
Şekil 5.52. 160 μm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



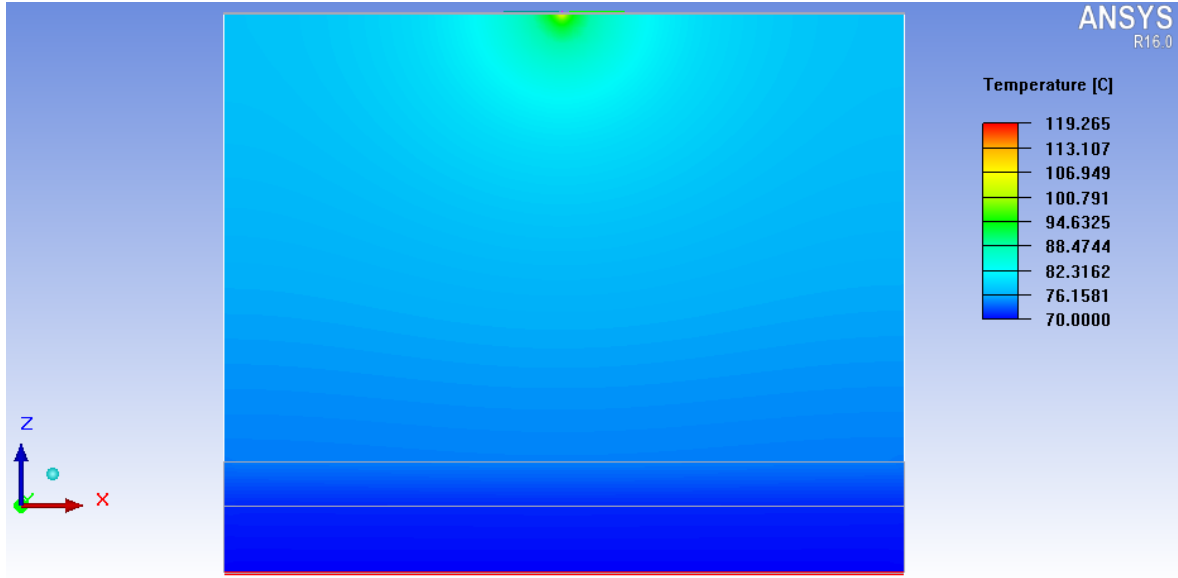
Şekil 5.53. 160 μm kanal genişliğine sahip Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



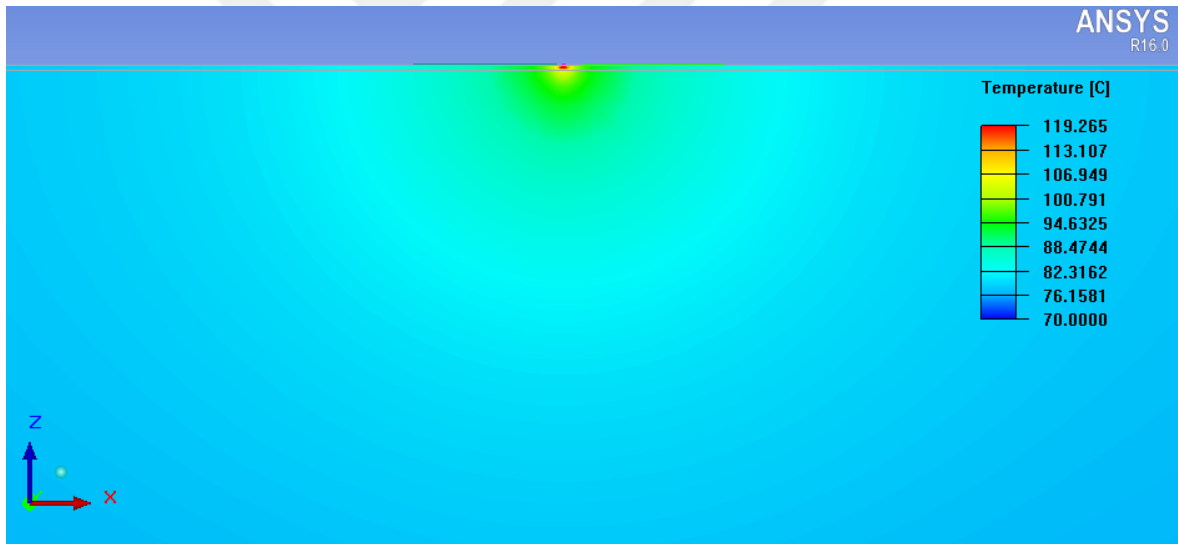
Şekil 5.54. 160 μm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



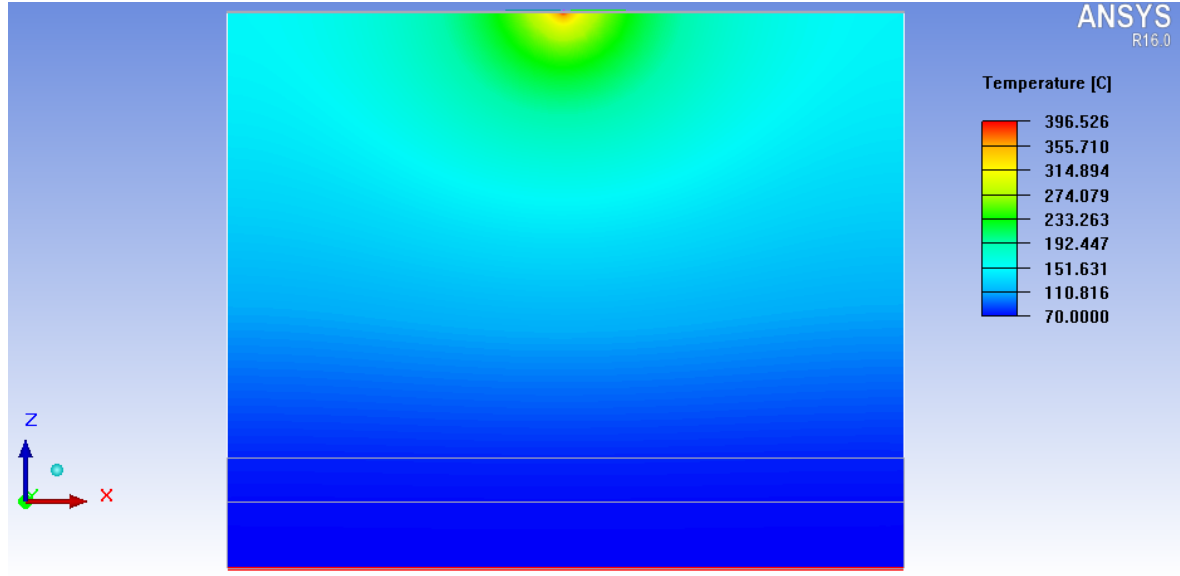
Şekil 5.55. 160 μm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



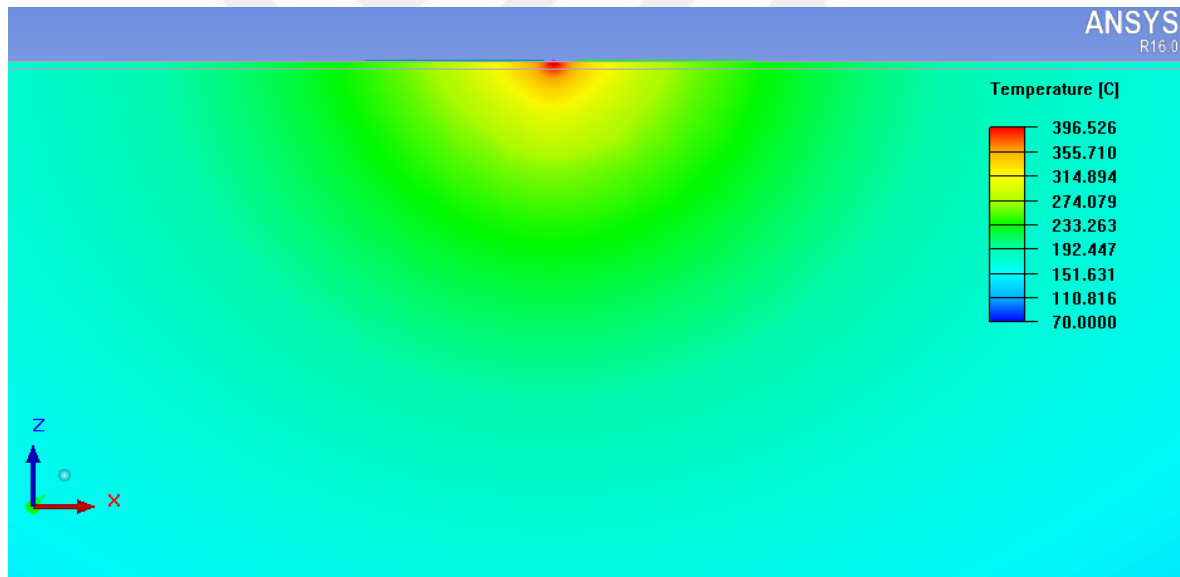
Şekil 5.56. 160 μm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



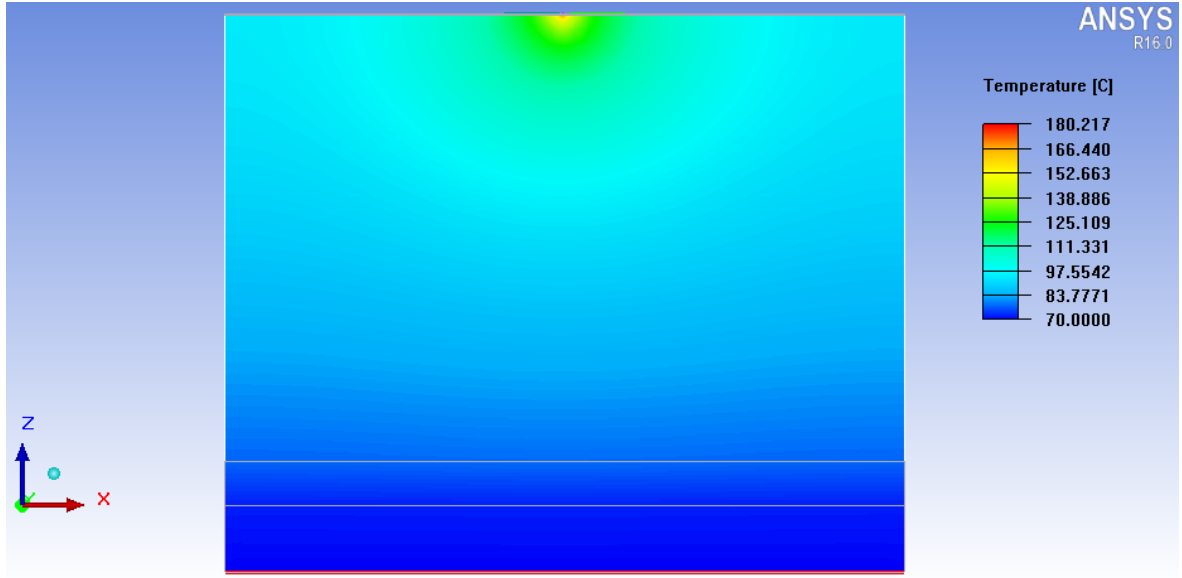
Şekil 5.57. 160 μm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



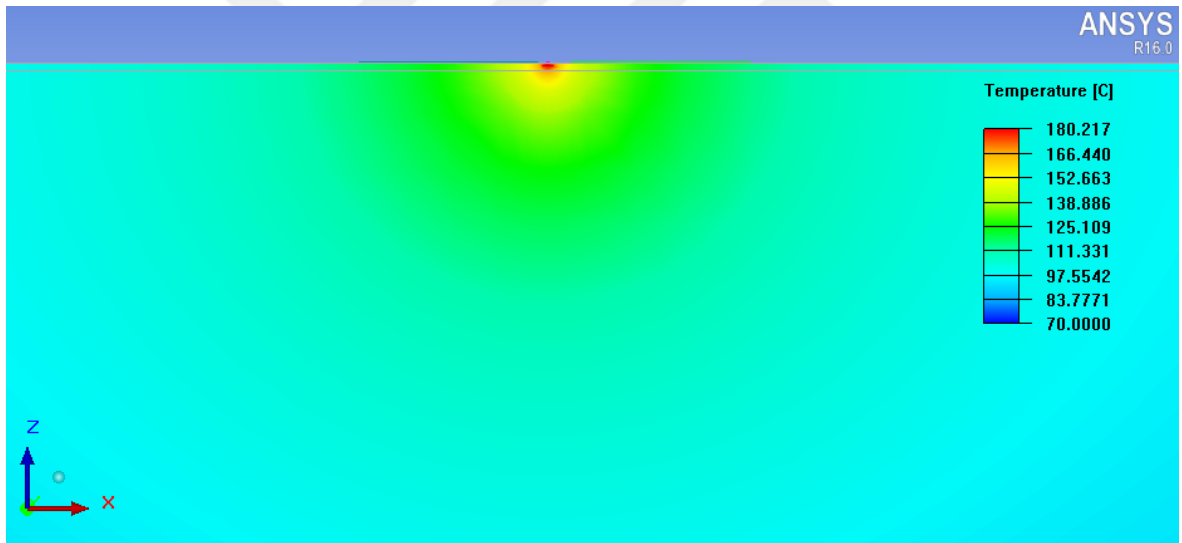
Şekil 5.58. 300 μm kanal genişliğine sahip Safır alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



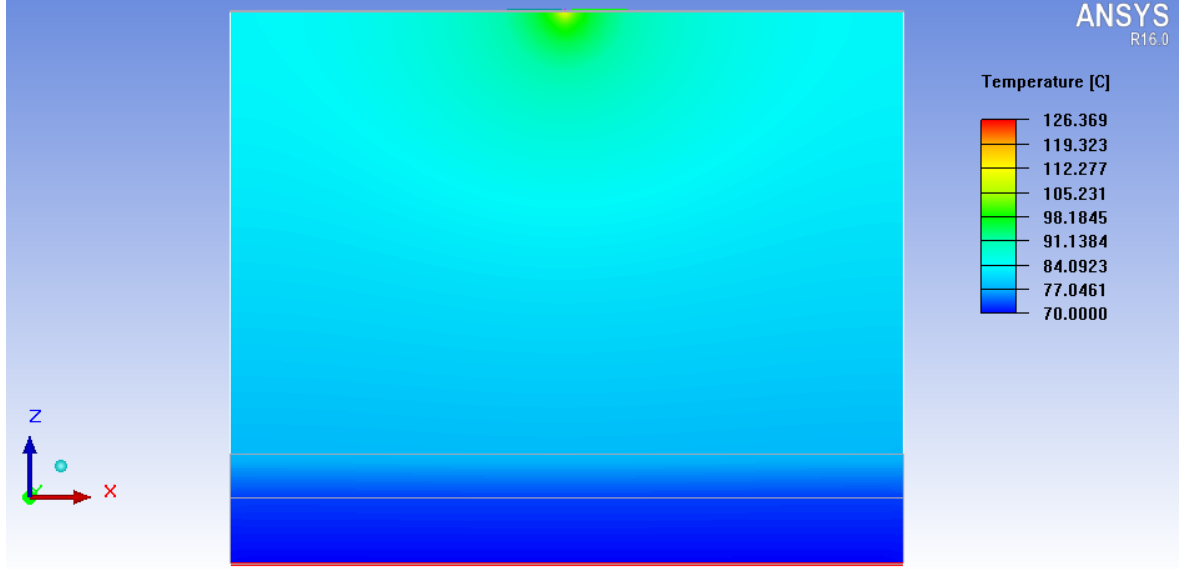
Şekil 5.59. 300 μm kanal genişliğine sahip Safır alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm



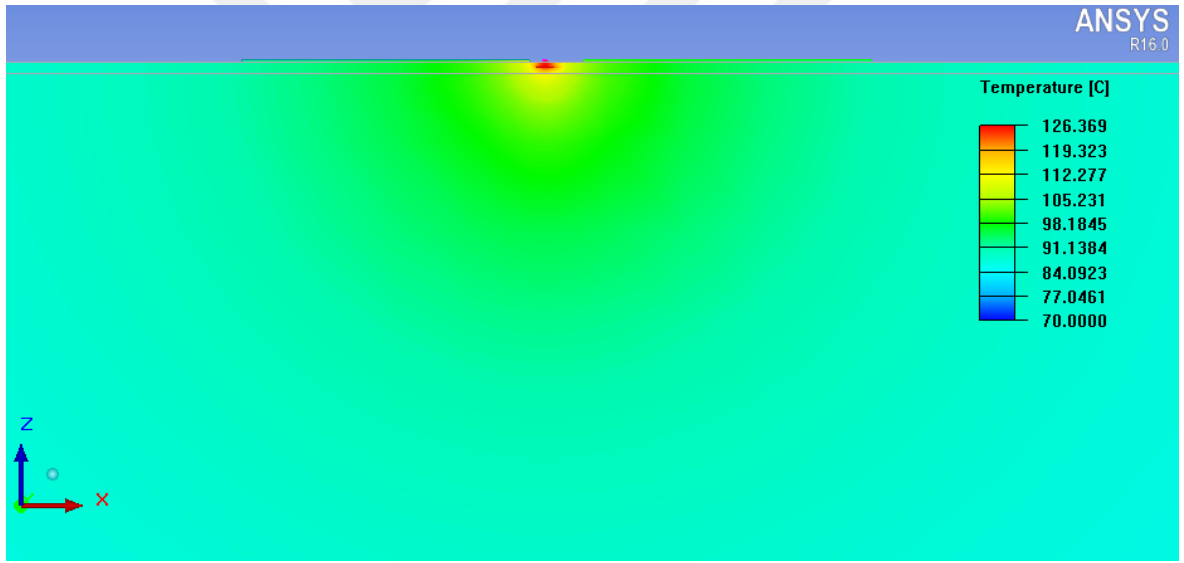
Şekil 5.60. 300 μm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



Şekil 5.61. 300 μm kanal genişliğine sahip Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm

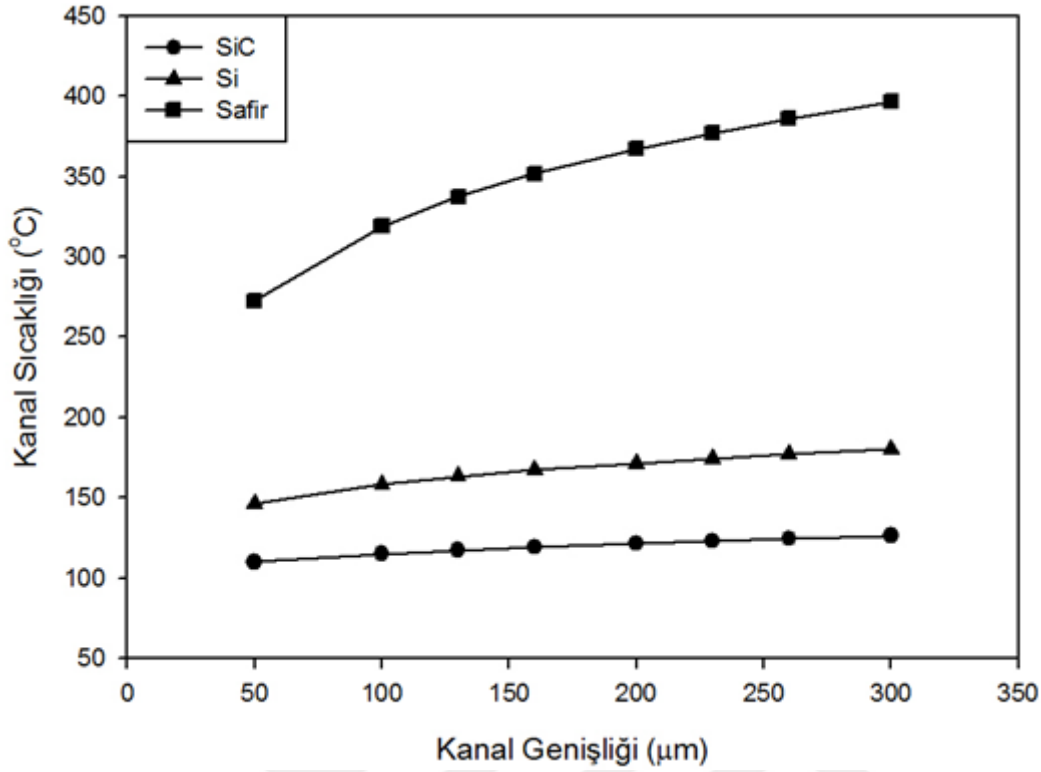


Şekil 5.62. 300 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



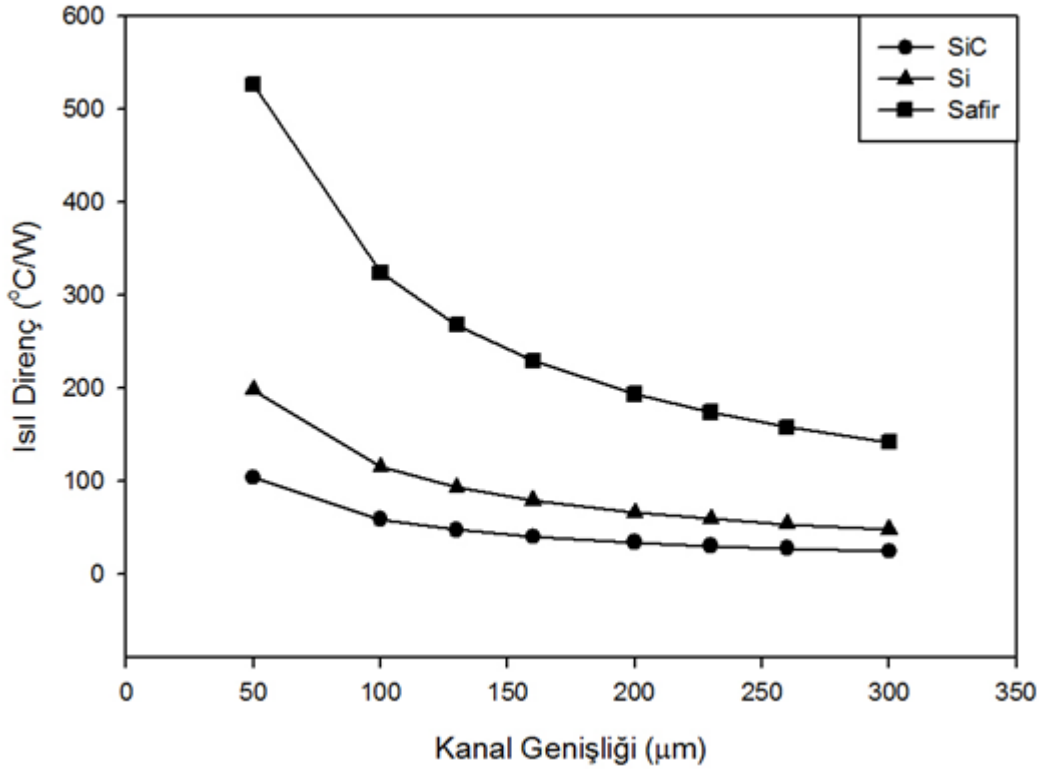
Şekil 5.63. 300 µm kanal genişliğine sahip SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı yakın görünüm

Şekil 5.64.'de farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN çöktürel yapıları transistörlerde kanal sıcaklığının kanal genişliğine göre değişimi görülmektedir. Transistörlerde güç atımı kanal genişliğine bağlı tanımlandığından, artan kanal genişliğiyle birlikte açığa çıkan ısı güç de artmakta dolayısıyla üç alt tabaka için de kanal sıcaklığı değerleri artmaktadır, Safir alt tabakalı transistörde % 45,4, Si alt tabakalı transistörde % 23,4 ve SiC alt tabakalı transistörde % 15 artış görülmüştür. En fazla artış ısı iletim katsayısı düşük olan Safir alt tabakada görülmektedir. En düşük artış ise en yüksek ısı iletkenliği olan SiC alt tabakaya sahip transistörde görülmektedir.



şekil 5.64. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal sıcaklığının kanal genişliğine göre değişimi

şekil 5.65.'de farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde ısı direncin kanal genişliğine göre değişimi görölmektedir. Artan kanal genişliğiyle birlikte kanal sıcaklıkları artmasına rağmen, ısı direnç azalmaktadır. Bunun nedeni düşük kanal genişliklerinde transistörün x-y düzleminde alanının azalmasıdır, alan azaldığı için x-y düzleminde ısı atımı da azalmaktadır. Düşük kanal genişliklerinde daha düşük ısı güç tanımlandığı için kanal sıcaklıkları düşmüş ancak alan azaldığı için bu durum ısı direncin artmasına sebep olmuştur. Bu da ısı nın x-y düzleminde de önemli oranda atıldığını göstermektedir. Artan kanal genişlikleriyle ısı direnç değerlerinde Safir alt tabakalı transistörde % 73, Si alt tabakalı transistörde %75,84, SiC alt tabakalı transistörde % 76,4 azalma görölmektedir. Yüksek ısı performansına sahip alt tabaka malzemelerinde hem düşük ısı direnç hem de düşük kanal sıcaklığı elde etmek için 150-200 μm'lik kanal genişliği baz alınabilir.



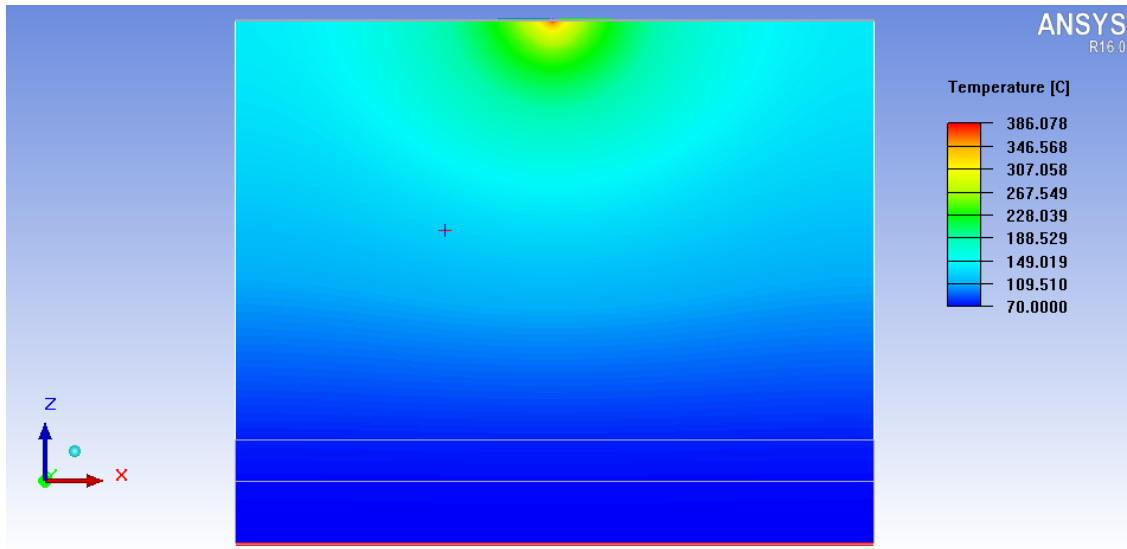
şekil 5.65. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde ısı direncin kanal genişliğine göre değişimi

5.2.4. Isıl gücün ısı transferine etkileri

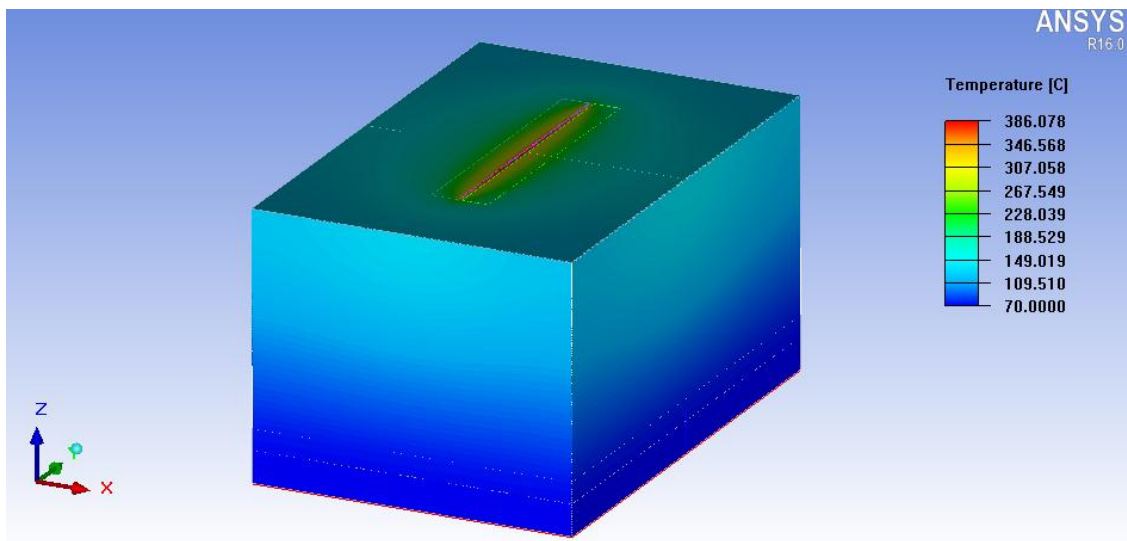
Literatürde yapılan birçok çalışmada ısı gücün AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde gerçekleşen ısı transferine etkileri gözlenmiş ve bu çalışmaların büyük çoğunluğunda özellikle sayısal modellerde artan ısı gücüne birlikte kanal sıcaklığı ve ısı direncin doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür [8]-[55]. Bu bölümde 200 μm kalınlığında Safir, Si ve SiC alt tabaka üzerinde, 0,45 μm kanal uzunluğunda, 260 μm kanal genişliğinde, AlGaIn/GaN transistörün 1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2, 2,2, 2,4, 2,6, 2,8 ve 3 W'lık ısı güçlerindeki ısı performansları incelenmiş, farklı güçler için aynı alt tabaka üzerindeki ısı dağılımları benzer olduğundan 2 W'taki sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Ayrıca farklı alt tabakalarda artan güçle kanal sıcaklığı ve ısı direnc değişimlerini gösteren grafikler sunulmuş ve yorumlanmaya çalışılmıştır.

şekil 5.66.-şekil 5.71.'de görüldüğü üzere aynı ısı gücünde farklı alt tabakalardaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, en düşük ısı iletim katsayısına sahip olan Safir alt tabakadaki AlGaIn/GaN transistör kanal sıcaklığı diğer alt tabakalardaki transistörlere oranla oldukça yüksek olmakla birlikte homojen bir sıcaklık dağılımı görülmemektedir. En iyi ısı

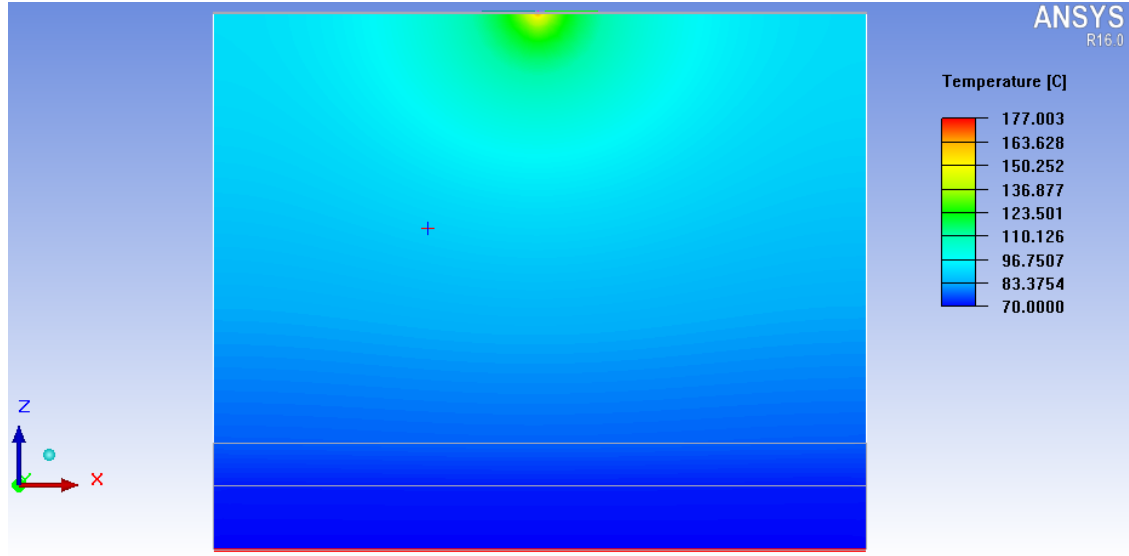
performans ve sıcaklık dağılımı ise Şekil 5.70.'deki SiC alt tabakasındaki AlGaIn/GaN transistörde görülmektedir. Giriş bölümünde de anlatıldığı üzere AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörler yüksek güç performansı gerektiren uygulamalarda kullanılmakta ve dolayısıyla çok ısınmaktadır ancak elektriksel performans açısından belli gerekleri sağlamak için uygulanan güç değeri düşürülemez. Bu problem sürekli güç uygulamak yerine çok hızlı bir şekilde ve kısa zaman dilimlerinde güç uygulayarak çözülmektedir. Böylece cihaz ömründen ve güvenilirlikten fedakarlık etmeden elektriksel performans sağlanmış olur.



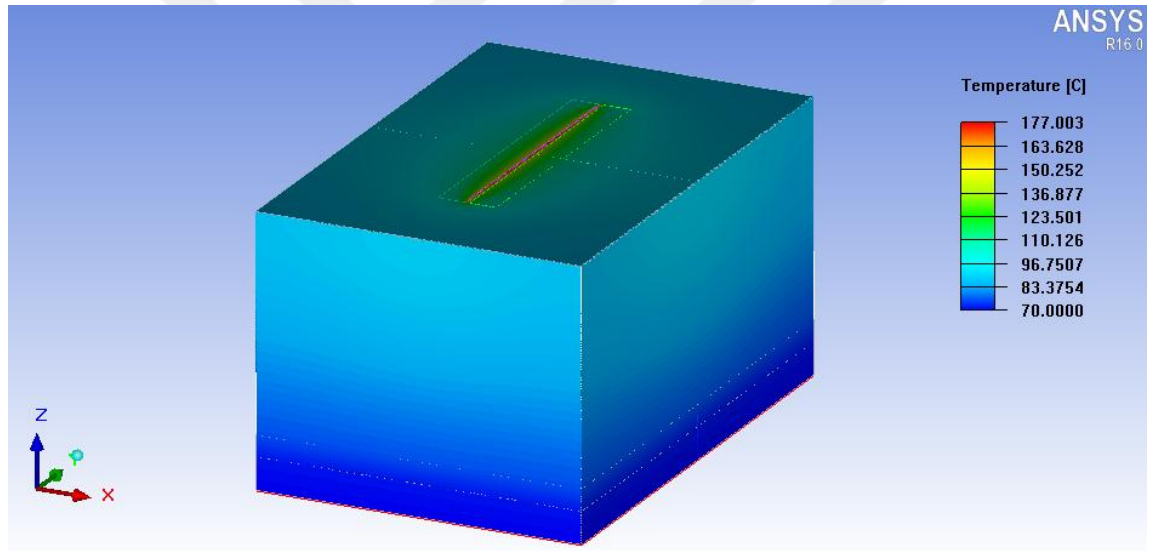
Şekil 5.66. 2 W'lık ısı güçte Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



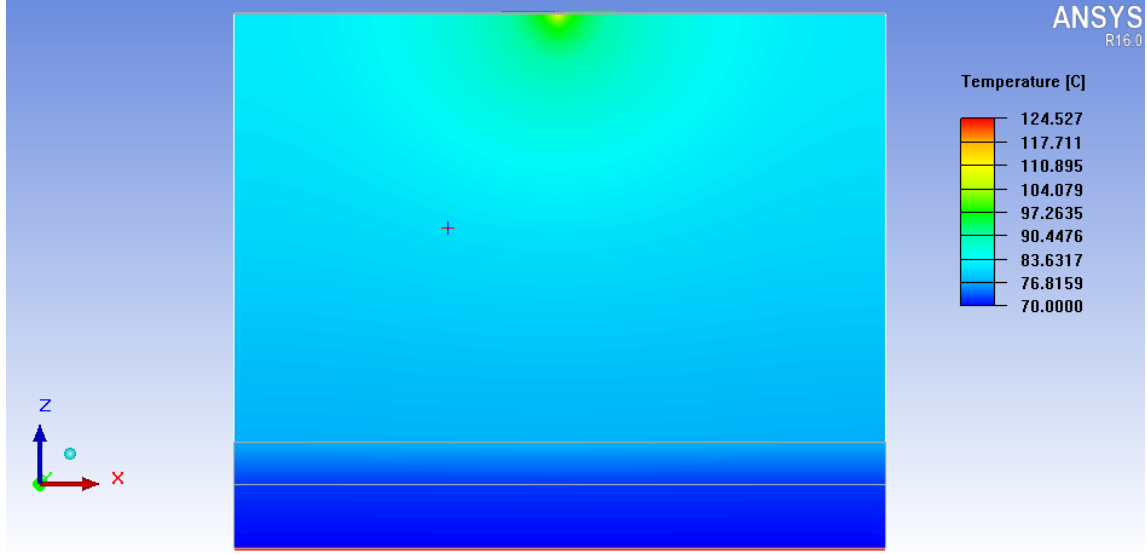
Şekil 5.67. 2 W'lık ısı güçte Safir alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde üç boyutlu sıcaklık dağılımı



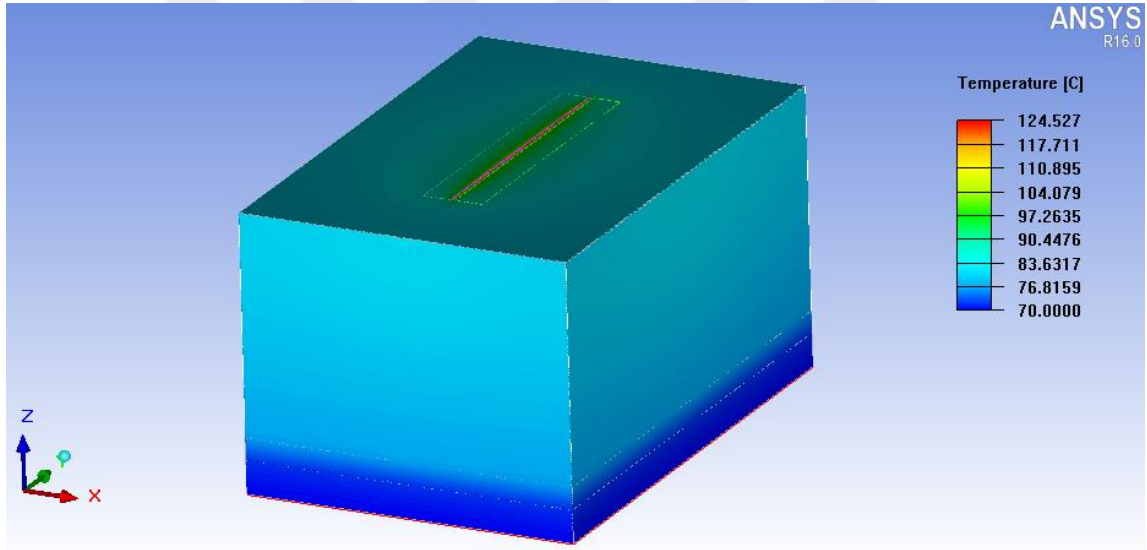
Şekil 5.68. 2 W'lık ısı güçte Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



Şekil 5.69. 2 W'lık ısı güçte Si alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde üç boyutlu sıcaklık dağılımı



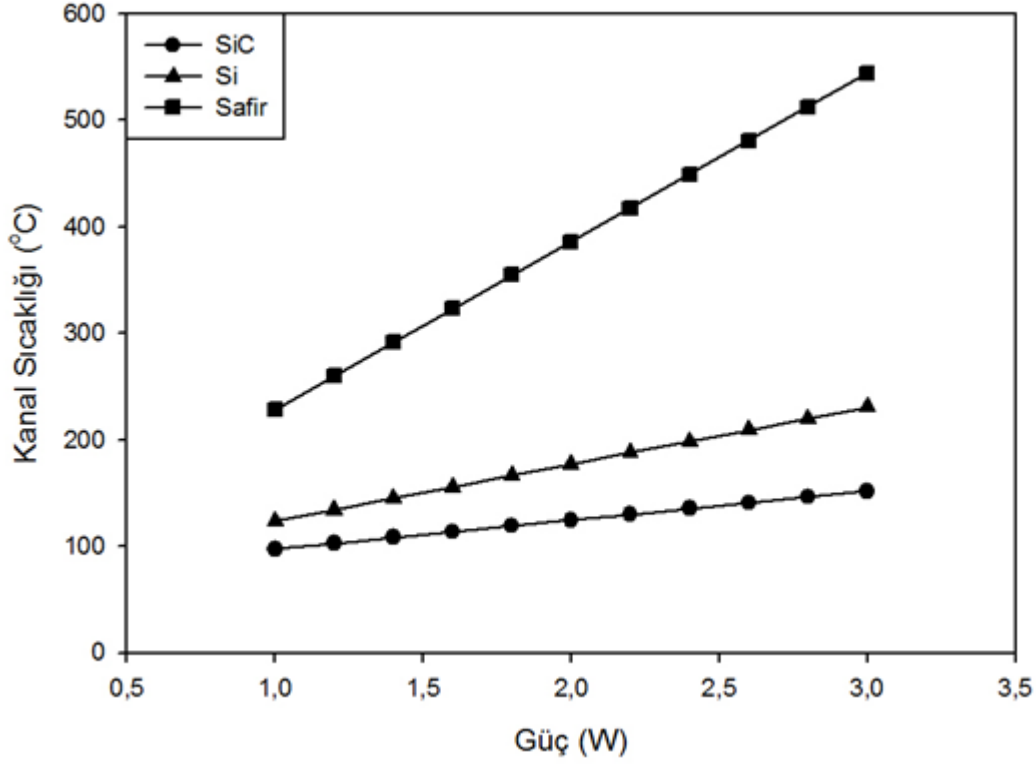
Şekil 5.70. 2 W'lık ısı güçte SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde sıcaklık dağılımı



Şekil 5.71. 2 W'lık ısı güçte SiC alt tabakalı AlGaIn/GaN transistörde üç boyutlu sıcaklık dağılımı

Şekil 5.72.'de görüldüğü üzere artan güç değerleriyle birlikte farklı alt tabakalardaki transistörlerde kanal sıcaklığı doğru orantılı olarak artmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü ısı güç, kanal sıcaklığını etkileyen en önemli parametredir, birim alanda daha fazla ısı güç oluşmakta ve bu da kanal sıcaklığında artışa sebep olmaktadır. Isıl güç üç kat artırıldığında en fazla artış % 138,61'lik artışla ısı iletkenliği en düşük olan Safir alt tabakada görülürken, bunu % 86,65 ile Si ve % 56,06 ile SiC alt tabakalar takip etmektedir. AlGaIn/GaN transistörler yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılmakta ve dolayısıyla kanal sıcaklığı yüksek değerlere ulaşmaktadır, bu durum da yarı iletken malzemelerin elektriksel performanslarını düşmektedir. Bu nedenle transistör tasarımı

yapılırken ısı iletkenliği düşük malzemenin seşilmesi Şekil 5.72.'de görüldüğü gibi kanal sıcaklığını önemli oranda etkilemektedir.



Şekil 5.72. Farklı alt tabakalardaki AlGaIn/GaN transistörde kanal sıcaklığının ısı ıgüce göre değişimi

Sayısal analiz sonucunda elde edilen maksimum kanal sıcaklığı değerleri ve taban sıcaklığı olan 70°C alınarak, transistörün merkezinden alt tabakanın tabanına olan sıcaklık farkı hesaplanmış, ısı ıgüce değerleri bilindiğinden Eşitlik 3.18 yardımıyla ısı direnç değerleri bulunmuştur, artan ısı ıgüce değerleriyle birlikte kanal sıcaklıkları da doğru orantılı olarak arttığından ısı dirençler sabittir ve Çizelge 5.2.'de Safir, Si ve SiC için hesaplanan ısı direnç değerleri görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar görülmüştür [52]. Bu sonuçlara göre en etkili ısı transferi sağlayan alt tabaka malzemesinin en düşük ısı dirence sahip olan SiC olduğı görülmektedir.

Çizgelge 5.2. Farklı alt tabakalarda transistörün toplam ısı direnç değerleri

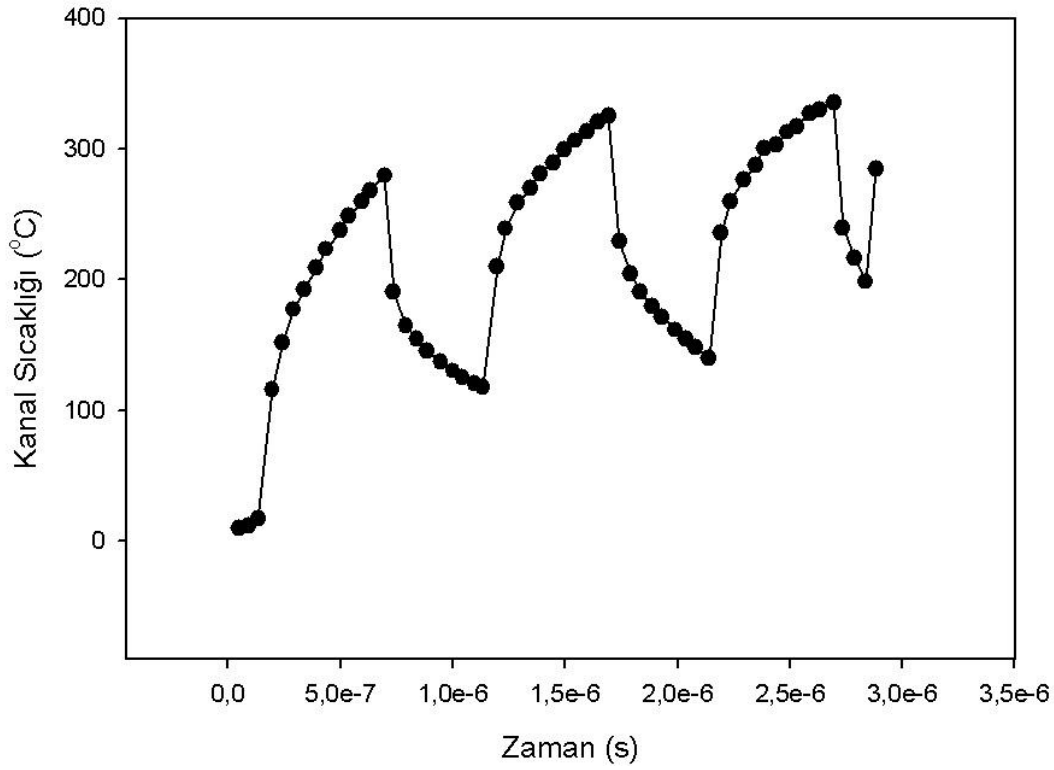
Alt tabaka malzemesi	Alt tabaka kalınlığı (μm)	Kanal Uzunluğu (μm)	Isıl Direnç ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
Safir	200	0,45	158,04
Si			53,50
SiC			26,26

5.2.5. Darbe genişliğinin ısı transferine etkileri

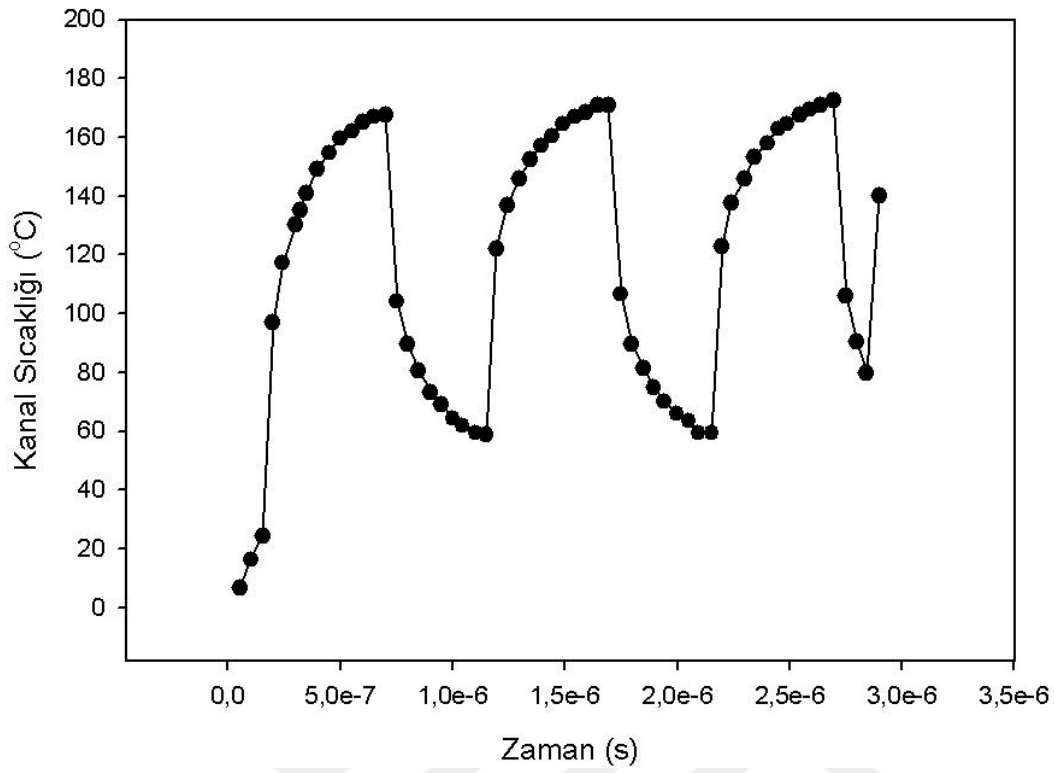
Bu bölümden önceki tüm sonuçlar kararlı rejim şartlarında gerçekleştirilmişti, bu bölümde ise kararsız rejim şartlarında AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde gerçekleşen ısı transferi incelenecektir. Bir önceki bölümde ısı gücün transistörde gerçekleşen ısı transferine etkileri incelenmiş ve elektriksel performansın sağlanması için güçten fedakarlık edilemeyeceği, bunun sonucu olarak da yükselen kanal sıcaklıklarının yarı iletken devre elemanlarının elektriksel performansını düşürdüğü ve cihaz ömrünü azalttığından bahsedilmişti. Bu problem sürekli güç uygulamak yerine çok hızlı bir şekilde kısa zaman dilimlerinde güç uygulayarak çözülmektedir. Böylece cihaz ömründen ve güvenilirlikten fedakarlık etmeden elektriksel performans sağlanmış olur. Bu bölümde 200 μm kalınlığında Safir, Si ve SiC alt tabakalarda, 260 μm kanal genişliğine, 0,45 μm 'lik kanal uzunluğuna sahip AlGaIn/GaN transistörde 2 W'lık ısı gücünde, 0,5, 5, 10, 50, 100, 200 ve 300 μs 'lik darbe genişliklerinde gerçekleşen ısı transferi incelenmiş, farklı alt tabakalar için kanal sıcaklığının zamana göre değişimleri sunulmuştur.

Şekil 5.73.-5.93. incelendiğinde aynı darbe genişliği uygulanan Safir, Si ve SiC alt tabaka malzemelerindeki AlGaIn/GaN transistörün zamanla kanal sıcaklığı değişimi görülmektedir. Kanal sıcaklığı değerine en hızlı ulaşan, ısı iletim katsayısı en yüksek olan SiC alt tabakasındaki transistördür. Bunun nedeni uygulanan ısı gücü sonucunda ısının alt tabakada homojen bir şekilde yayılması ve çabucak iletilmesidir. Si alt tabakadaki transistörde ısı daha yavaş yayılmasına rağmen ilerleyen darbelerde kararlılık göstermektedir, Safir alt tabakada ise ilerleyen darbelerde kanal sıcaklığı artmaya devam etmekte ve henüz kararlı rejim değerine ulaşmadığı görülmektedir. Darbe genişliği değeri arttıkça kanal sıcaklıkların kararlı rejim değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Şekil 5.73.-5.75. incelendiğinde aynı alt tabaka malzemesi için farklı darbe genişliklerindeki sıcaklık değerlerinin darbe bitiminde aynı değere ulaştığı görülmektedir. Tek fark transistörün açık konumda olduğu toplam süredir, darbe genişliği arttıkça transistörün belli bir zaman

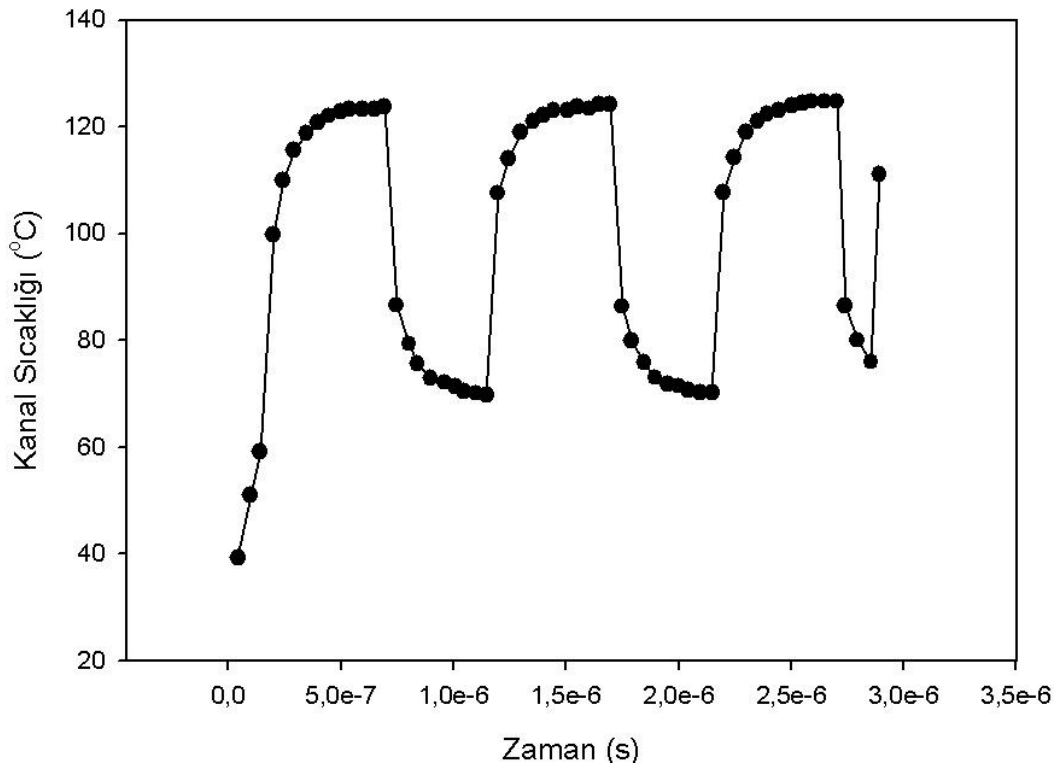
diliminde aktif olarak çalıştığı süre artmakta, bu yüzden yüksek kanal sıcaklığına daha uzun süre maruz kalmakta, bu da transistörün hem verimini düşürmekte hem de çalışma ömrünü azaltmaktadır. Bu nedenle transistör, güvenilir ve kaliteli, aynı zamanda uzun cihaz ömrü sağlamak için kullanım amacına göre istenilen elektriksel performansı sağlayabilen en kısa darbe genişliği değerinde çalıştırılmalıdır.



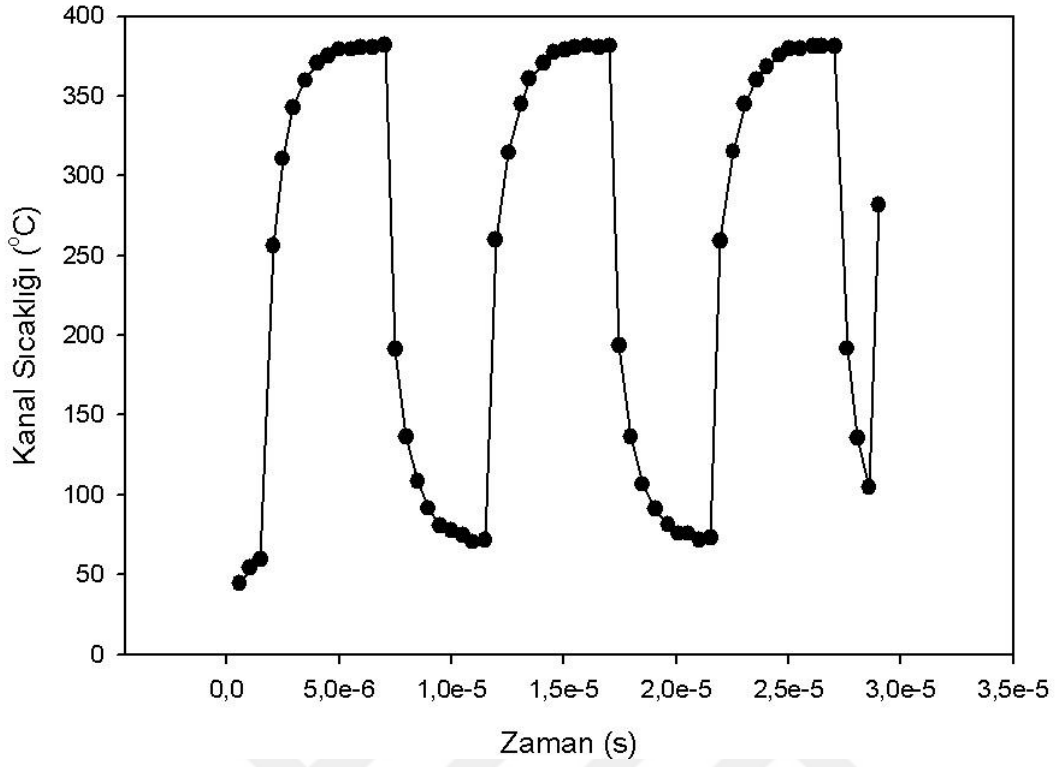
Şekil 5.73. 0,5 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



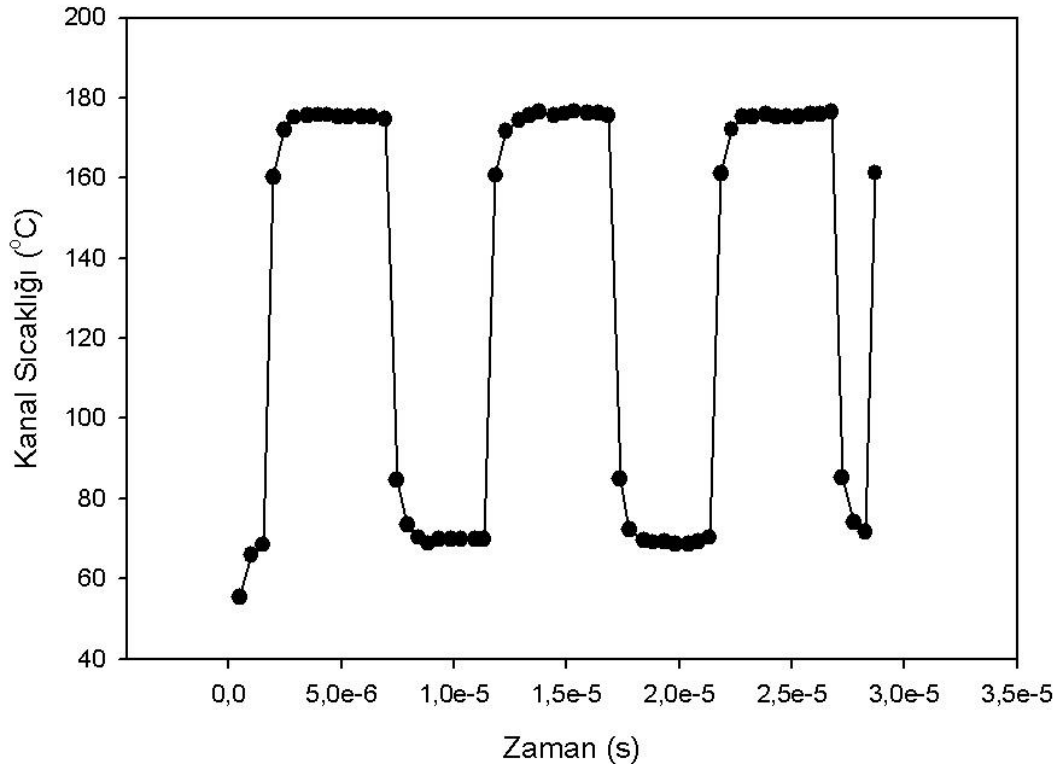
Şekil 5.74. 0,5 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



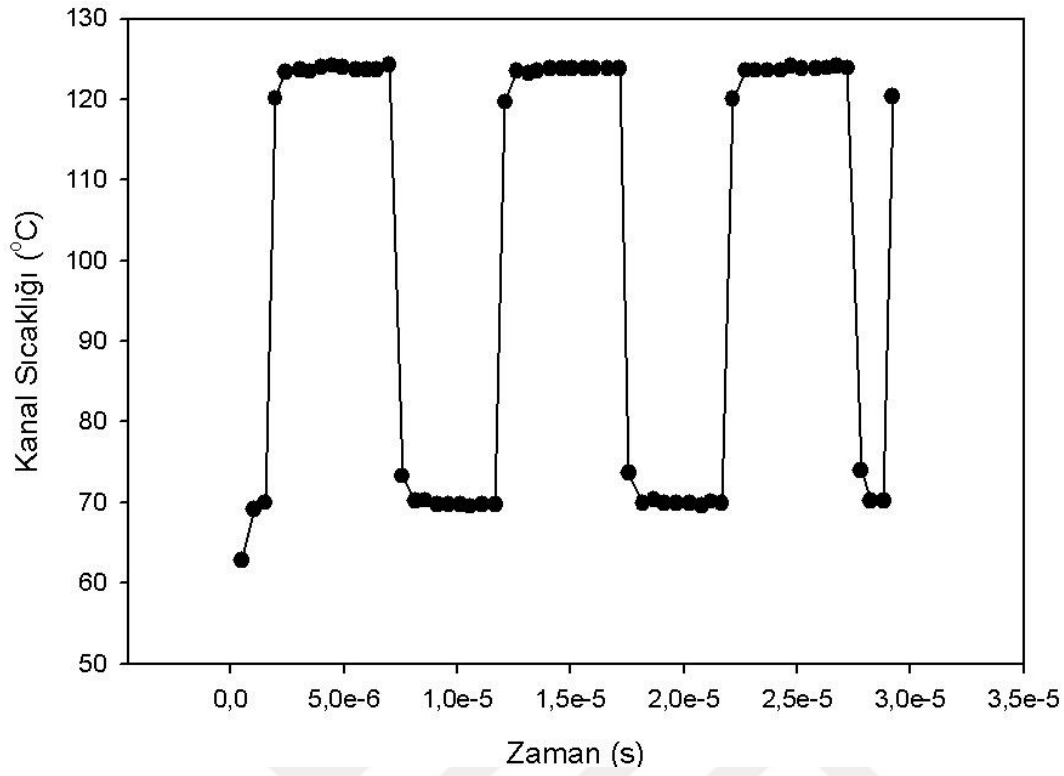
Şekil 5.75. 0,5 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



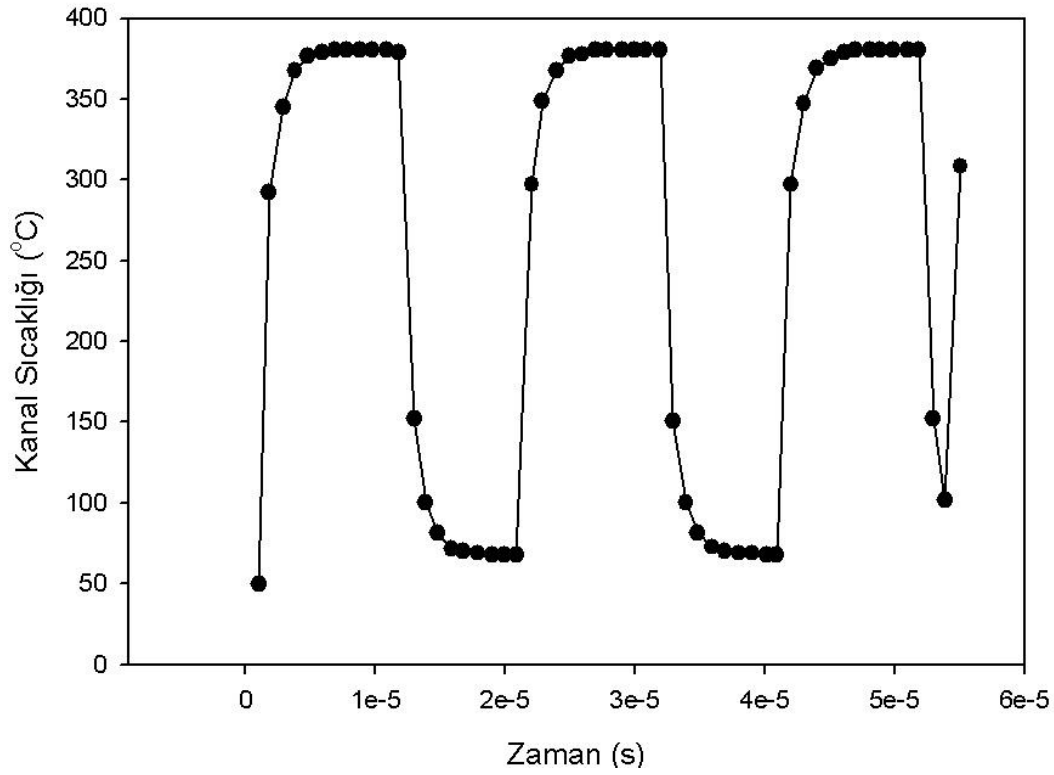
Şekil 5.76. 5 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



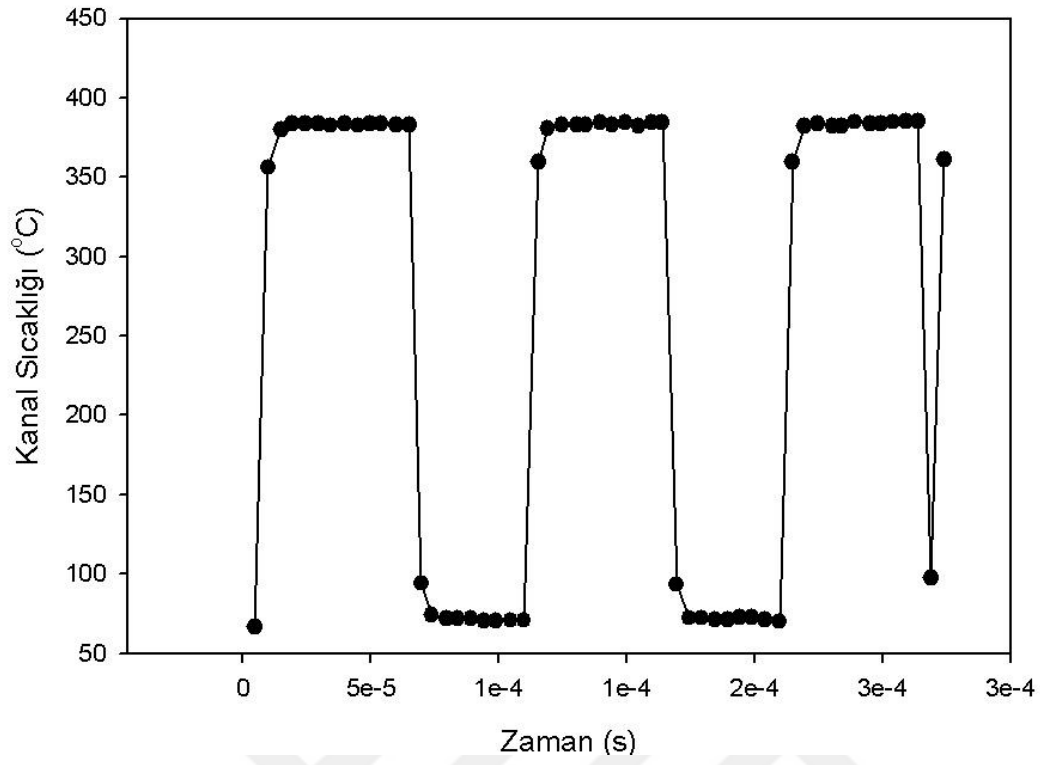
Şekil 5.77. 5 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



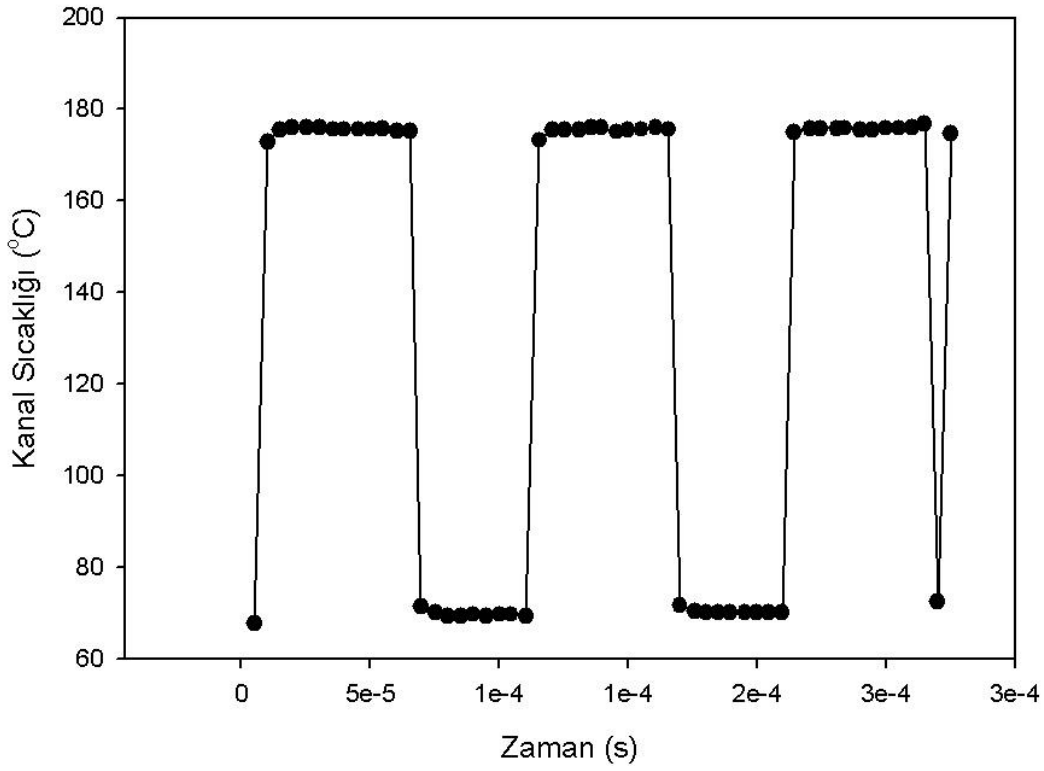
Şekil 5.78. 5 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



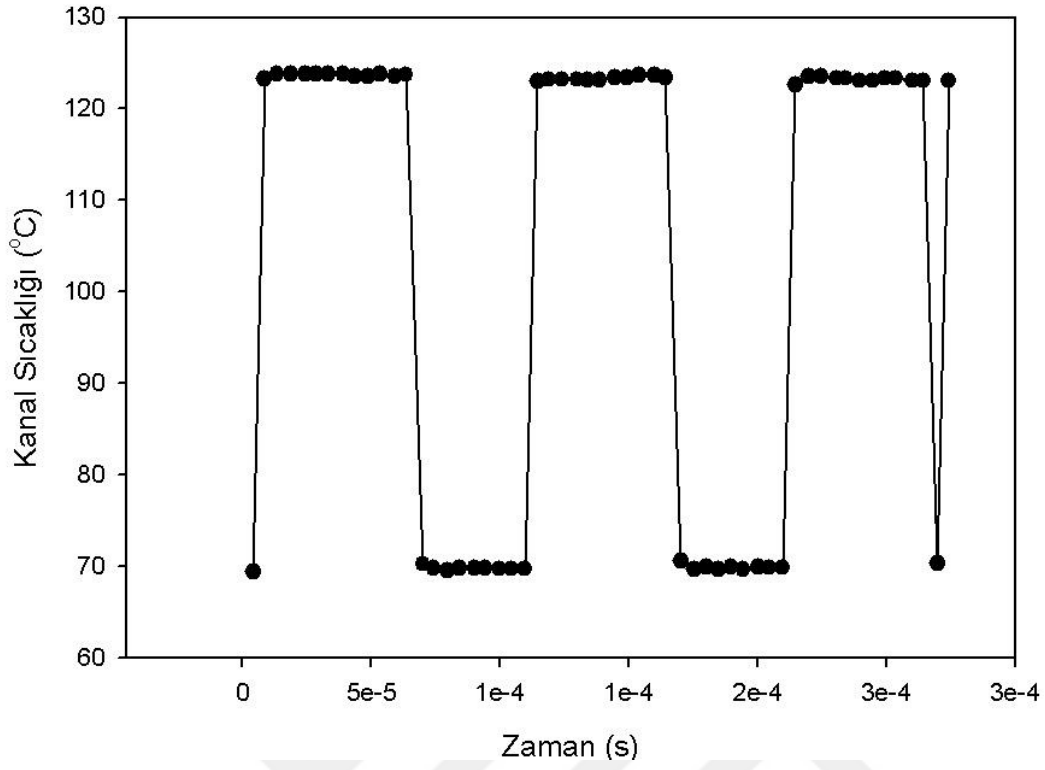
Şekil 5.79. 10 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



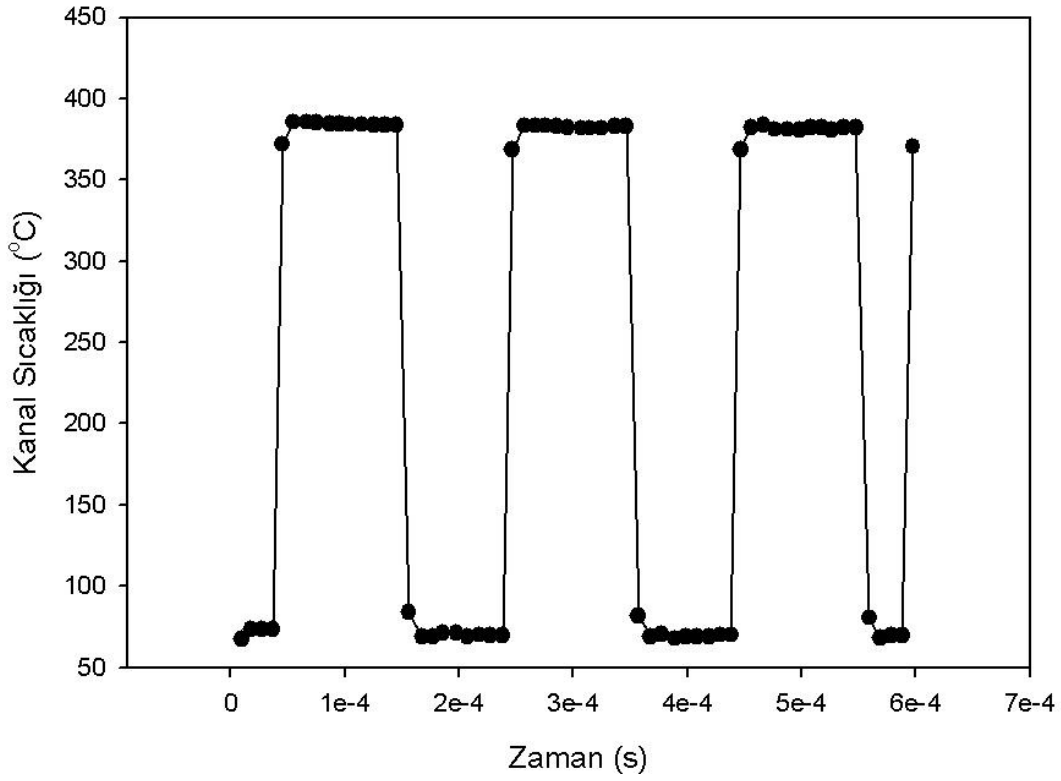
Şekil 5.82. 50 μ s'lik darbe genişliğinde Safır alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



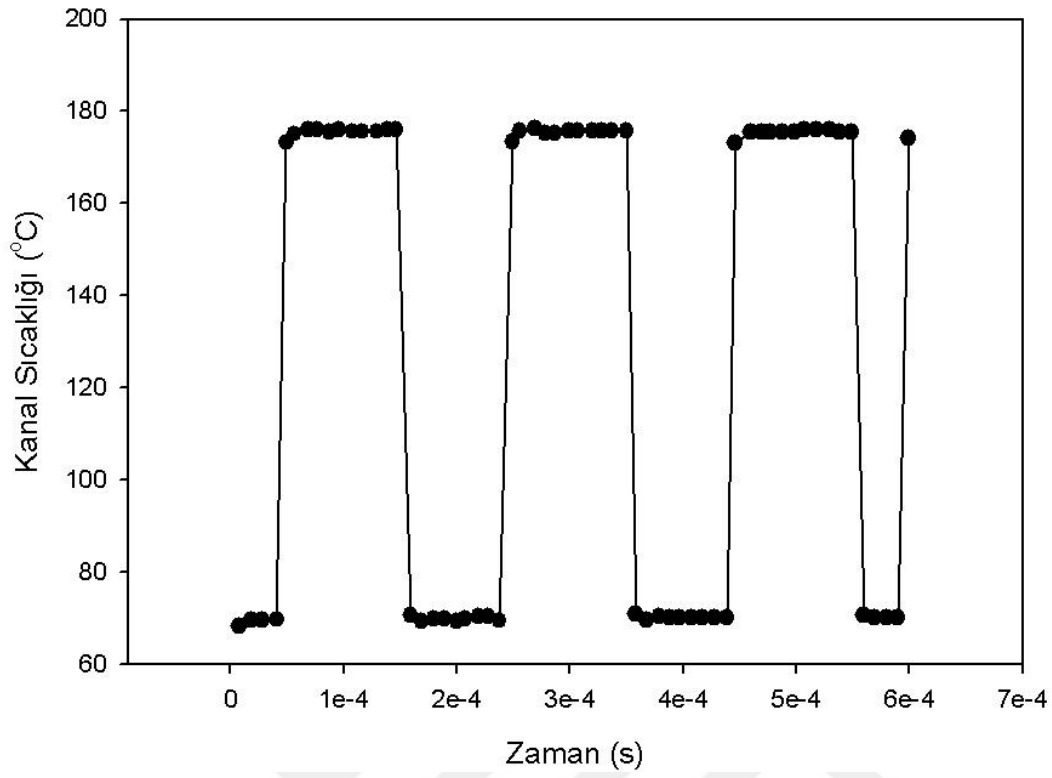
Şekil 5.83. 50 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



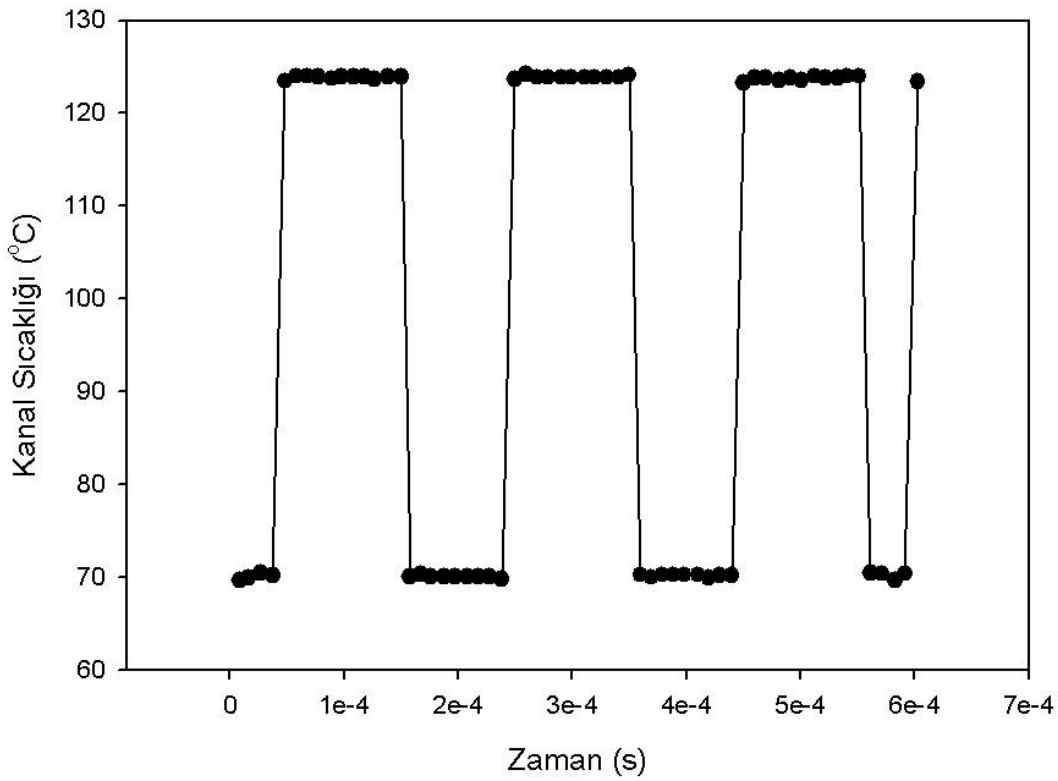
Şekil 5.84. 50 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



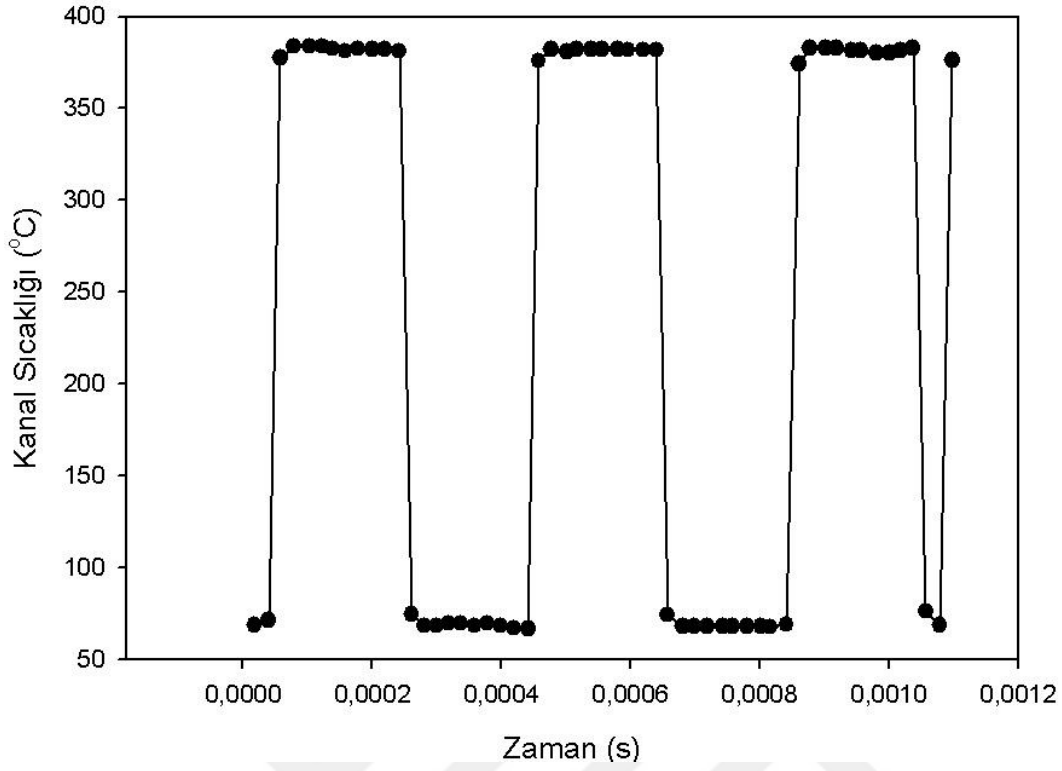
Şekil 5.85. 100 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



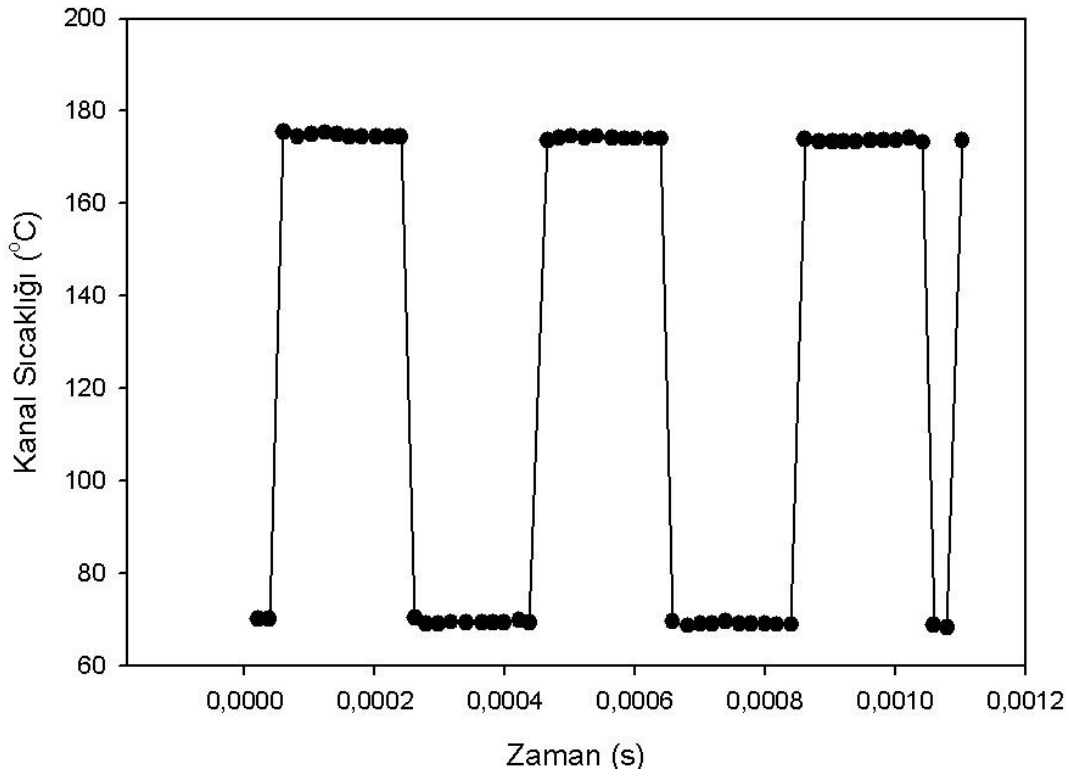
Şekil 5.86. 100 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



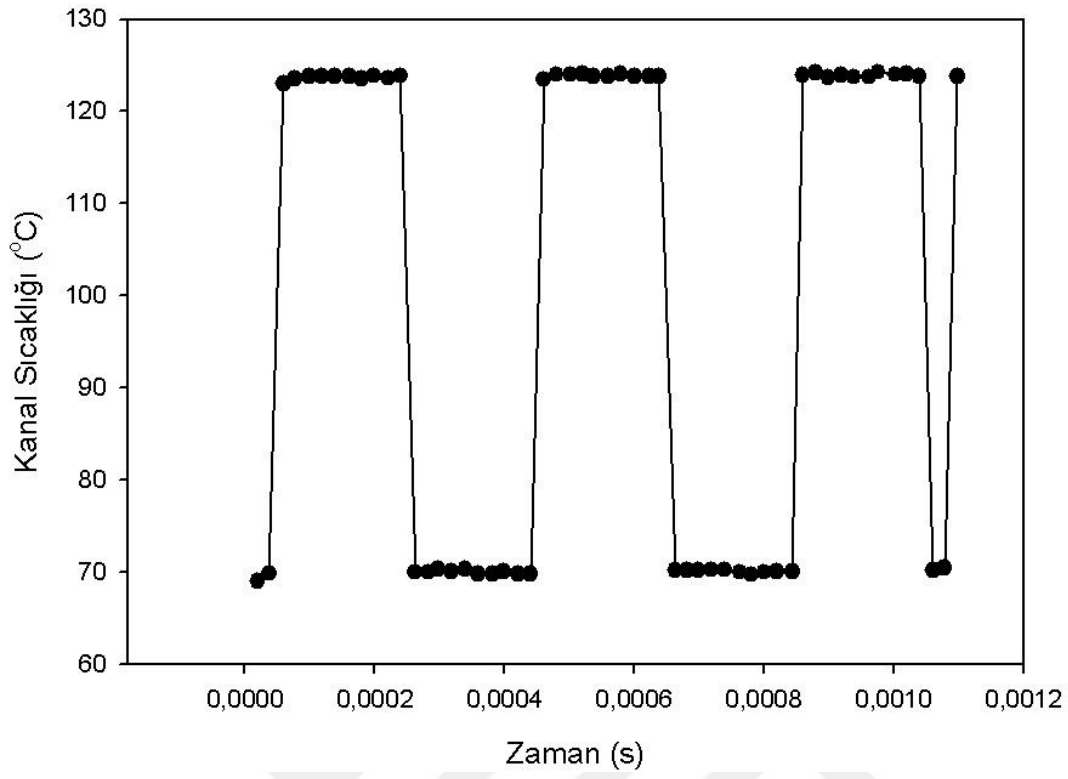
Şekil 5.87. 100 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



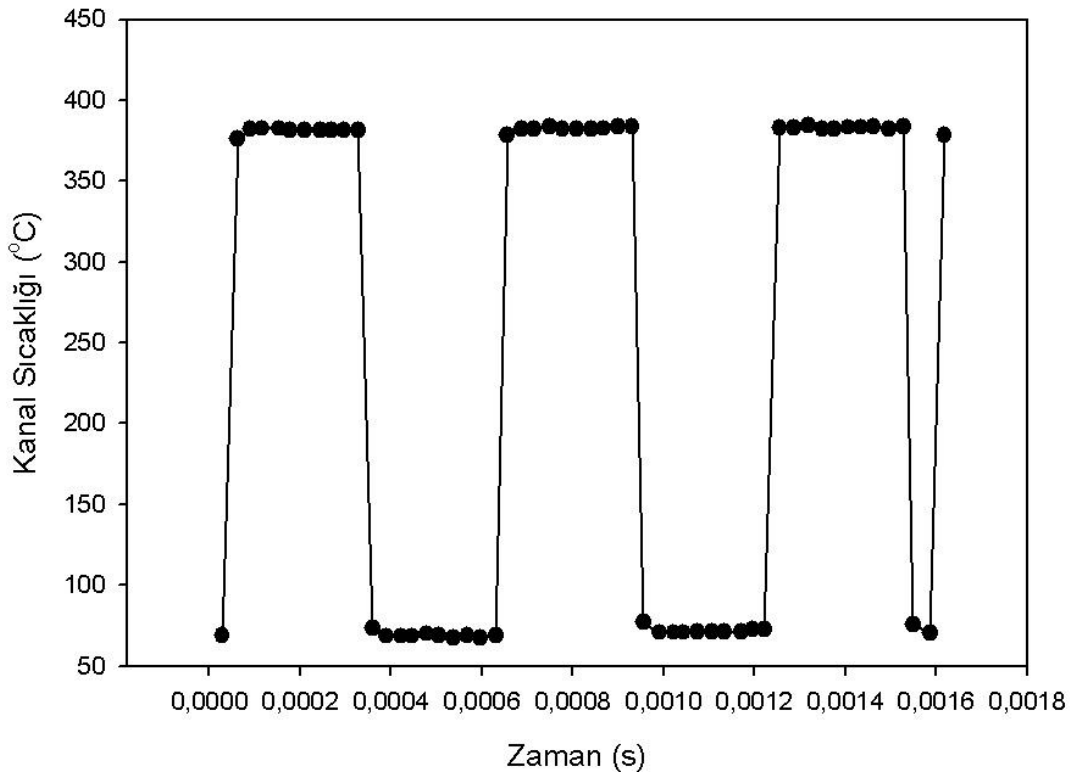
Şekil 5.88. 200 μ s'lik darbe genişliğinde Safır alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



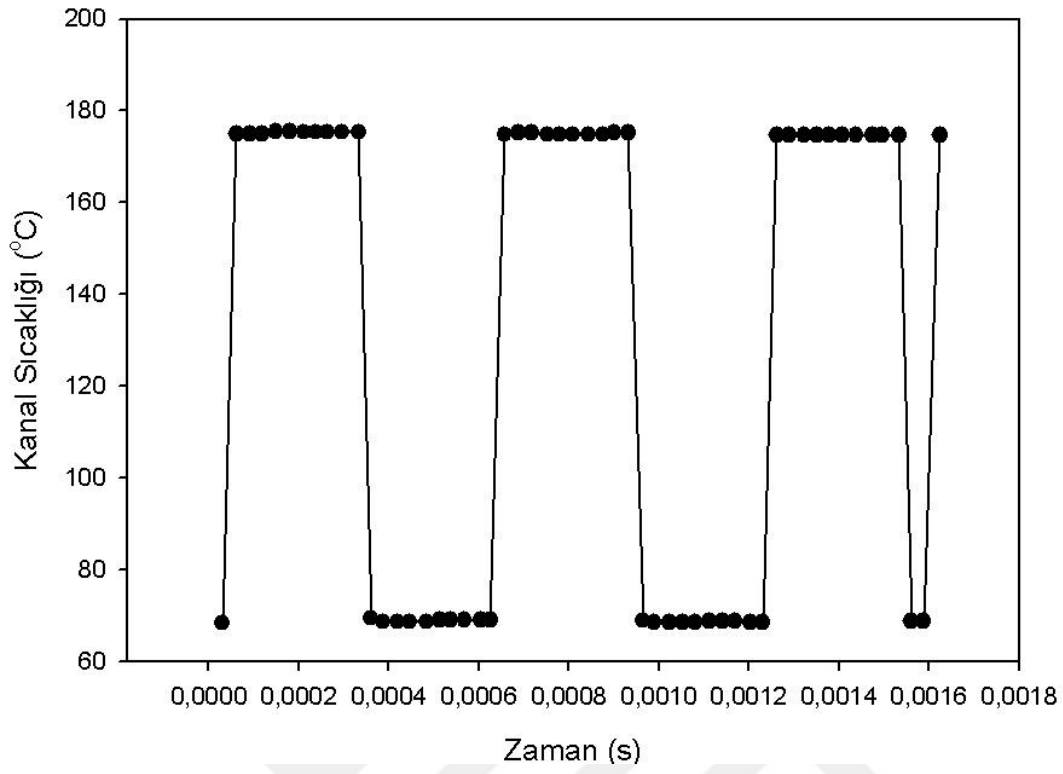
Şekil 5.89. 200 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



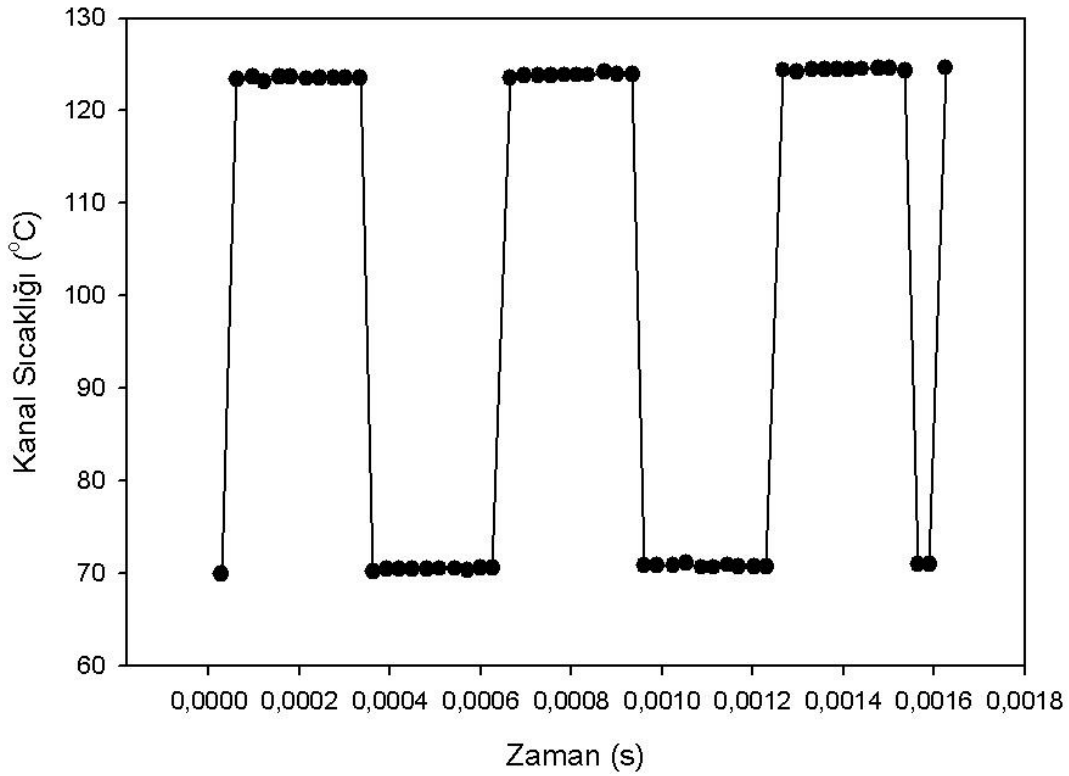
Şekil 5.90. 200 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



Şekil 5.91. 300 μ s'lik darbe genişliğinde Safir alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



Şekil 5.92. 300 μ s'lik darbe genişliğinde Si alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi



Şekil 5.93. 300 μ s'lik darbe genişliğinde SiC alt tabakada AlGaIn/GaN transistörün zamana göre sıcaklık değişimi

5.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı transferine etki eden başlıca parametreler; ısı gücü, darbe genişliği, kanal uzunluğu, kanal genişliği ve alt tabaka kalınlığıdır, bu parametreler, Safir, Si ve SiC alt tabakalardaki transistörlerde farklı aralıklarda tanımlanarak sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve ilgili sonuçlar sunulmuştur.

Alt tabaka kalınlığının ısı transferine etkilerini incelemek için Safir, Si ve SiC alt tabakaların 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 μm 'lik kalınlıkları göz önüne alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Artan kalınlıkla birlikte malzemenin ısı direnci de arttığından beklenildiği gibi alt tabaka kalınlığının artışıyla, kanal sıcaklığı ve toplam ısı direnci de artmaktadır. Bununla birlikte farklı alt tabaka malzemelerinin kanal sıcaklığına etkileri karşılaştırıldığında yüksek güçlerde farklı alt tabaka malzemelerinin kanal sıcaklıkları arasında $\sim 320^\circ\text{C}$ 'a varan sıcaklık farkı görülmektedir, bu da alt tabaka malzemesinin ısı performansının kanal sıcaklığını ve dolayısıyla transistörün çalışma performansını ciddi oranda etkilediğini göstermektedir. Alt tabaka kalınlığının artışı ise kanal sıcaklığını, malzemenin ısı iletkenliğine bağlı olarak 300 μm 'lik bir artışta ~ 10 - 140°C civarında arttırmaktadır.

Kanal uzunluğunun AlGaIn/GaN transistörlerde gerçekleşen ısı transferine etkilerini incelemek için 0,1, 0,3, 0,45, 0,5, 0,7, 0,9, 1,1 ve 1,3 μm 'lik kanal uzunluklarına sahip transistör, Safir, Si ve SiC alt tabakalarda analiz edilmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Üç alt tabaka malzemesi için de artan kanal uzunluğuyla birlikte kanal sıcaklığının % 0,34-0,75 arası ve toplam ısı direncinin ise % 0,4-1,71 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni daha önce de açıklandığı gibi transistörde ısı kaynağına tanımlanan güç değerinin kanal uzunluğu artınca daha geniş bir bölgeye tanımlanması ve dolayısıyla birim alandaki güç değerinin azalmasıdır. Bu nedenle elektriksel performans sağlandığı sürece en uygun kanal uzunluğu değeri mümkün olan en büyük değerdir.

Kanal genişliği AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı transferini etkileyen parametrelerden biridir, bu etkileri görebilmek için 50, 100, 130, 160, 200, 230, 260 ve 300 μm 'lik kanal genişliklerine sahip transistör Safir, Si ve SiC alt tabakalarda analiz edilmiş, sıcaklık dağılımları, kanal genişliğinin kanal sıcaklığına ve ısı dirence etkilerini gösteren grafikler sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde kanal genişliği arttıkça

tüm alt tabaka malzemelerinde kanal sıcaklığının arttığı görülmektedir. Bu artış Safir alt tabakalı transistörde % 45,4, Si alt tabakalı transistörde % 23,4, SiC alt tabakalı transistörde ise % 15'dir. Bu artışın sebebi gücün kanal genişliğine bağlı olması ve kanal genişliği arttıkça ısı kaynağına tanımlanan ısı güç değerinin de artmasıdır. Artan kanal genişliği ile birlikte kanal sıcaklıkları artarken ısı direnç değerleri ciddi oranda azalmaktadır, Safir alt tabakalı transistörde % 73, Si alt tabakalı transistörde % 75,84, SiC alt tabakalı transistörde % 76,4'lük azalma görülmektedir. Bu durum sıcaklık dağılımlarında da görülmektedir, kanal genişliği arttıkça tüm alt tabakalarda daha homojen bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bunun nedeni ısıнын x-y düzleminde de efektif bir biçimde iletilmesi, dolayısıyla kanal genişliği arttıkça bu etkinin z-yönünde ısı direncin düşmesine sebep olmasıdır, bu durum bilindiğinden literatürdeki çalışmalarda büyük çoğunlukla üç boyutlu analiz yapılmaktadır.

AlGaIn/GaN çoktörel yapılı transistörlerde kanal sıcaklığını ve dolayısıyla çalışma performansını etkileyen parametrelerden bir diğeri de ısı güçtür, bunun etkilerini görmek için Safir, Si ve SiC alt tabakalardaki transistörlere 1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2, 2,2, 2,4, 2,6, 2,8 ve 3 W değerinde güç değerleri uygulanmış ve artan güçle kanal sıcaklığı değişimleri incelenmiştir. Bunun yanı sıra Safir, Si ve SiC alt tabakalardaki transistörlerin toplam ısı direnç değerleri Eşitlik 3.18 yardımıyla hesaplanmıştır. Safir alt tabakalı transistörde toplam ısı direnç 158,04°C/W, Si alt tabakalı transistörde 53,5°C/W, SiC alt tabakalı transistörde ise 26,26°C/W bulunmuştur. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, alt tabaka malzemesinin ısı performansı iyileştikçe güç artışında kanal sıcaklığında ve toplam ısı dirençteki artışın azaldığı, sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ise daha homojen ve düzgün bir dağılım sağlandığı görülmektedir. Güç artışında kanal sıcaklığı Safir alt tabakalı transistörde % 138,61, Si alt tabakalı transistörde % 86,65, SiC alt tabakalı transistörde ise %56,06 artış göstermiştir. AlGaIn/GaN transistörlerin yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda, çalışma performansını iyileştirmek ve kanal sıcaklığını düşük tutmak için alt tabaka malzemesi seçimi büyük önem taşımaktadır. Alt tabaka malzemesi hem yüksek ısı iletkenliğe sahip olmalı hemde transistördeki diğeri malzemelerle uyumlu olmalıdır ki transistörde ısı gerilmeler oluşturup ana yapıya zarar vermesin. Sonuçlar değerlendirildiğinde ısı açıdan en iyi performansı SiC malzemesinin sağladığı, bunu Si ve Safir'in takip ettiği görülmektedir. Yüksek güçlerde SiC alt tabakalı transistördeki kanal sıcaklığı Safir alt tabakalı transistöre göre % 72,1 daha düşüktür.

AlGaN/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin güvenli çalışabilmesi için sürekli güç uygulamak yerine darbeli güç uygulanarak kanal sıcaklığında artışın önüne geçilmiştir. Bu nedenle güç uygulanan darbe genişliği önemli bir parametredir. Darbe genişliğinin ısı performansına etkilerini görmek için Safir, Si ve SiC alt tabakalardaki transistörlere 0,5, 5, 10, 50, 100, 200 ve 300 μ s'lik darbe genişliklerinde 2 W değerinde ısı güç uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde ısı performansı düşük olan alt tabaka malzemelerinde gerçekleşen ısı transferi sonucu kanal sıcaklığı değerinin, diğer alt tabakalara göre kararlı rejim şartlarındaki değere daha geç ulaştığı ancak kanal sıcaklığının yüksek olmasından dolayı bunun fayda sağlamadığı görülmüştür. Darbe genişliği değeri arttırıldığında ise tüm alt tabaka malzemeleri için darbe sonunda ulaşılan kanal sıcaklığı değeri aynıdır, burada önemli olan transistörün yüksek sıcaklığa maruz kaldığı süredir. Bu nedenle transistörün güvenli çalışabilmesi ve çalışma performansının iyileşmesi için ısı performansı yüksek bir alt tabaka malzemesinde, elektriksel performansı düşürmeyecek şekilde en kısa darbe genişliğinde güç uygulanmalıdır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörler son teknoloji yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır, bu yüzden çalışma sırasında transistör sıcaklığı çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu durum hem transistörlerde güvenilirlik sorunu oluşturmakta hem de cihaz ömrünü önemli oranda azaltmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için transistörün dayanabileceği maksimum değerin altında çalışması ve uzun süre yüksek sıcaklıkta kalmaması gerekir. Transistörün modeline göre katman yapısındaki yarı iletken malzemelerin özellikleri bilindiğinden, dayanabileceği maksimum sıcaklık bellidir. Önemli olan farklı güçlerde transistördeki maksimum kanal sıcaklığının hangi değerlere ulaştığını bilmektir ki o güç değerlerinin altında güvenli bir şekilde çalıştırılabilsin, aksi takdirde bir kaç taneden bir kaç milyara varan sayıda transistör barındıran yüksek güçlü cihazlar zarar görür ve çok büyük maddi hasarlar oluşabilir. Farklı güçlerde transistörün toplam ısı direncinin yüksek hassasiyetle belirlenmesi gerekir. Buna ısı yonga karakterizasyonu denmektedir. Böylece farklı kullanımlar için transistörü olan biri hangi güç değerlerini geçmemesi gerektiğini bilebilir. Ancak transistörler boyutsal olarak çok küçük olduğundan deneysel yöntemlerle yüksek hassasiyetle kanal sıcaklığını belirlemek oldukça güçtür. Yaygın olarak kullanılan ölçüm tekniklerinde en iyi çözünürlük değeri 1-2 μm 'dir, yeni geliştirilen bir kaç yöntemde 0,25 μm 'ye varan çözünürlük değerleri olduğu iddia edilse dahi, herkes tarafından kabul görmüş değildir, ayrıca buna deneysel hatalar da eklendiğinde genelde 0,25-0,5 μm arası kanal uzunluğuna sahip AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde kanal sıcaklığını doğru olarak belirlemek oldukça güçleşir. Sayısal analizlerde kanal sıcaklığını belirlerken de çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Bunlardan biri transistörün çok ince katmanlarının üretim prosesleri sırasında moleküler seviyede malzemenin yapısında değişikliğe yol açması ve toplam ısı direnci etkilemesidir, bu durum sayısal analize yansıtılamamaktadır. İkinci problem ısı kaynağının tanımlanmasıdır. Aslında kaynak-direnaj bölgesi arasında oluşan ısı, tek bir noktada ve düzenli değildir, ikinci dereceden bir fonksiyon gibi düzensiz olarak yayılmış vaziyettedir. Ancak genelde kabul edilen sayısal analiz yaklaşımı, ısıya en yoğun olduğu bölgede toplandığı varsayımıdır. Bir diğer problem transistörün tümüyle modellenememesidir, çok küçük boyutlarda elemanlar içerdiğinden ve çoğunlukla çok kanallı yapılar olduğundan bilgisayarın hesaplama yükünü önemli oranda arttırmakta ve sayısal hatalara sebep olmaktadır. Bu yüzden sadece küçük bir kısmı modellenmektedir ve

kanalların birbirini ne kadar etkilediği görülememektedir. Bunun yanı sıra elektriksel parametrelerin etkisi de sayısal modele yansıtılamamaktadır.

AlGaN/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde ısı transferini ve dolayısıyla ısı direnci etkileyen başlıca parametreler; güç değeri, alt tabaka malzemesi, alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, kanal genişliği ve darbe genişliğidir. Bu parametrelerin etkileri incelendikten sonra geliştirilen transistör modelinde güvenilirlik ve çalışma ömrü konusunda büyük gelişme sağlanacaktır

Bu çalışmada oluşturulan AlGaN/GaN yüksek elektron hareketli transistör modelinde, Safir, Si, SiC alt tabaka malzemeleri ile 50-350 μm arası alt tabaka kalınlıklarında, 0,1-1,3 μm kanal uzunluklarında, 50-300 μm kanal genişliklerinde, 1-3 W arası güç uygulanarak, 0,5-300 μs darbe genişliği değerlerinde sayısal analizler ANSYS-Icepak paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucu transistör kesitinde sıcaklık dağılımları sunulmuş, sayısal veriler yardımıyla bu parametrelerin kanal sıcaklığına ve ısı dirence etkilerini gösteren grafikler sunulmuş ve yorumlanmaya çalışılmıştır.

İlk olarak alt tabaka kalınlığının AlGaN/GaN yüksek elektron hareketli transistörde gerçekleşen ısı transferine etkileri incelenmiştir. Alt tabaka malzemesi olarak Safir, Si ve SiC kullanılmış, 0,45 μm kanal uzunluğuna, 260 μm kanal genişliğine sahip transistörde 2 W'lık ısı gücü değerinde 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 μm alt tabaka kalınlıklarında sayısal analizler gerçekleştirilmiş, transistör kesitinde oluşan sıcaklık dağılımları sunulmuş, alt tabaka kalınlığının kanal sıcaklığına ve ısı dirence etkileri yorumlanmaya çalışılmıştır. Sayısal analiz sonuçları incelendiğinde artan alt tabaka kalınlığıyla birlikte kanal sıcaklığı ve ısı direncin arttığı görülmüştür ayrıca en düşük kanal sıcaklığı değerleri 120,8-129,7°C ile yüksek ısı iletkenliğe sahip SiC alt tabakada görülürken, en yüksek kanal sıcaklıkları 309,5-448,5°C ile Safir alt tabakada görülmüştür. Alt tabaka kalınlığı azaldığında ısı transferinin gerçekleştiği mesafe kısalmış, Fourier'in ısı iletim yasasına göre mesafe paydada olduğu için, mesafe artışı ısı transferini arttırmakta dolayısıyla kanal sıcaklığı düşmektedir, diğer bir deyişle ısı direnç formülünde mesafe payda bulunduğundan, bu değer küçülmesi direnci de düşürmüş ve ısı daha rahat transfer edilmiştir.. Bu durumda analiz edilen değerler arasında en efektif alt tabaka kalınlığının 50 μm olduğu görülmüştür. Dolayısıyla transistörün üretim prosesleri ve elektriksel

performansı da dikkate alınarak, çalışma performansını arttırmak için transistör tasarımı mümkün olan en düşük alt tabaka kalınlığı seçilmelidir.

Kanal uzunluğunun AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde gerçekleşen ısı transferine etkilerini incelemek için, 200 μm 'lik Safir, Si ve SiC alt tabakalar üzerinde, 260 μm kanal genişliğine, 2 W'lık güç atımına sahip transistörde 0,1, 0,3, 0,45, 0,5, 0,7, 0,9, 1,1 ve 1,3 μm kanal uzunluğu değerlerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Kanal uzunluğunun ısı dirence ve kanal sıcaklığına etkilerini gösteren grafikler sunulmuş ve yorumlanmaya çalışılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına bakıldığında Safir, Si ve SiC alt tabakalarda, kanal uzunluğu arttıkça kanal sıcaklıklarının düzenli olarak azaldığı ancak bu azalmanın 1,5°C'yi geçmediği görülmektedir, aynı şekilde ısı direnç değerlerinde de 1°C/W'ı geçmeyen bir azalma görülmektedir. Önemli bir fark yaratmamakla birlikte en düşük kanal sıcaklığı en büyük kanal uzunluğunda yani 1,3 μm 'de görülmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü kanal uzunluğu arttığında toplam güç daha geniş bir alan yayılmakta, dolayısıyla kanal sıcaklığı daha düşük çıkmakta, bu durum da kanal sıcaklığında dolayısıyla ısı dirençte düşüşe yol açmaktadır.

Kanal genişliğinin AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde gerçekleşen ısı transferine etkilerini incelemek için, 200 μm 'lik Safir, Si ve SiC alt tabakalar üzerinde, 0,45 μm kanal uzunluğuna, 2 W'lık güç atımına sahip transistörde 50, 100, 130, 160, 200, 230, 260 ve 300 μm kanal genişliği değerlerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonucu sıcaklık dağılımları sunulmuş, kanal genişliğinin kanal sıcaklığına ve ısı dirence etkileri grafikler yardımıyla sunulmuş ve yorumlanmaya çalışılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde kanal genişliği arttıkça tüm alt tabakalarda daha düzgün ve homojen bir sıcaklık dağılımı olduğu, ısı dirençlerin azaldığı, kanal sıcaklıklarının ise arttığı görülmüştür. Kanal genişliği artışında Safir alt tabakalı transistörde % 45,4, Si alt tabakalı transistörde % 23,4, SiC alt tabakalı transistörde ise % 15'dir. Bu artış Safir alt tabaka ile SiC kıyaslandığında kanal genişliği değişiminde 160-270°C'yi bulan bir farkı göstermektedir. Bunun nedeni kanal genişliği arttıkça uygulanan gücün artması ve düşük ısı performansına sahip Safir alt tabakada artan ısı gücünün kanal sıcaklığında diğer alt tabakalara oranla daha çok artış meydana getirmesidir. Kanal sıcaklığı artarken tanımlanan ısı kaynağının x-y düzleminde alanının artması bu düzlemde daha çok ısı transferine sebep olmuş, sonuç olarak z-yönünde hesaplanan ısı dirençlerde düşme gözlenmiştir, bu düşüş Safir alt tabakalı transistörde % 73, Si alt tabakalı transistörde % 75,84, SiC alt tabakalı

transistörde ise % 76,4'tür. Bu değerler bir kez daha alt tabaka malzemesinin transistördeki ısı transferinde önemine işaret etmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde transistörün kullanım amacına göre, ısı direncin çok düşmemesi ve kanal sıcaklığının çok yükselmemesi için genelde tercih edilen 150-200 μm arası kanal genişliği tercih edilmelidir.

AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerde kanal sıcaklığına ve dolayısıyla ısı dirence etki eden bir diğer parametre ısı gücüdür. Isı gücün transistör üzerinde etkilerini görmek için kararlı rejimde 200 μm kalınlığında Safir, Si ve SiC alt tabakalar üzerindeki, 0,45 μm kanal uzunluğuna, 260 μm kanal genişliğine sahip transistöre 1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2, 2,2, 2,4, 2,6, 2,8 ve 3 W değerinde ısı gücü uygulanmış, farklı ısı gücü değerlerinde transistör kesitinde meydana gelen sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Bunun yanı sıra farklı alt tabakalarda artan ısı gücün kanal sıcaklığına etkilerini gösteren grafikler sunulmuş ve yorumlanmıştır. Güç artışında en büyük sıcaklık artışı 316°C ile Safir alt tabakadaki transistörde görülürken, bunu 107°C ile Si ve 54,5°C ile SiC takip etmektedir. Ayrıca Safir, Si ve SiC alt tabakaları için ısı direnç değerleri hesaplanmıştır, bu değerler Safir alt tabakalı transistör için 158,04°C/W, Si alt tabakalı transistör için 53,5°C/W ve SiC alt tabakalı transistör için 26,26°C/W'tır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, artan ısı gücüyle orantılı olarak kanal sıcaklığının arttığı görülmüştür. AlGaIn/GaN transistörler genelde yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanıldığından elde edilen parametrik çalışma verileriyle ısı transferini arttıran transistör modelleri geliştirilebilir.

Son olarak darbe genişliğinin AlGaIn yüksek elektron hareketli transistörlerde gerçekleşen ısı transferine etkileri incelenmiştir. AlGaIn/GaN transistörün yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanıldığından ve bunun sonucu olarak yükselen kanal sıcaklığının transistörde güvenilirlik problemleri doğurduğundan ve cihaz ömrünü önemli oranda düşürdüğünden bahsedilmişti. Çeşitli parametreler değiştirilerek kanal sıcaklığı her ne kadar düşürülmeye ve güvenli değerlere çekilmeye çalışılsa da yüksek sıcaklıkta uzun süre çalışan transistörlerde yarı iletken devre elemanlarının yapısının bozulduğu ve cihaz ömrünün kısaldığı bilinmektedir. Bu sorunu aşmak için transistöre uygulanan güç sürekli olarak değilde belli zaman aralıklarında darbe şeklinde verilmektedir. Artan darbe genişliklerinin ısı transferine etkisini görmek için 200 μm kalınlığında Safir, Si ve SiC alt tabakalarda, 0,45 μm kanal uzunluğuna, 260 μm kanal genişliğine sahip AlGaIn/GaN transistöre 2 W'lık ısı gücü 0,5, 5, 10, 50, 100, 200, 300 μs 'lik sürelerle uygulanarak

transistörde kanal sıcaklığının zamanla değişimi grafiklerle sunulmuştur. Farklı darbe genişliklerinin sonunda tüm sıcaklık değerleri eşit olmaktadır, tek fark transistörün açık kaldığı toplam süredir. Transistörün yüksek sıcaklıkta ne kadar az çalışırsa o kadar verimli olacaktır. Bu durumda en uygun darbe genişliği değeri 0,5 μ s'dir.

Öneriler

Bu çalışmada AlGaIn yüksek elektron hareketli transistörlerde gerçekleşen ısı transferinde çeşitli parametrelerin etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu parametreler alt tabaka malzemesi, alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, ısıl güç ve darbe genişliğidir. Sayısal analiz sonucunda elde edilen bilgilere dayanarak gelecek çalışmalara yönelik aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Bu çalışmada kullanılan sayısal analiz programı ANSYS-Icepak'te problem ısı kaynağı tanımlanarak ele alınmış, dolayısıyla kaynak-direnaj arasında oluşan elektriksel alanın kanal sıcaklığına etkileri görülememiştir. Ayrıca transistörün farklı ısıl iletkenliklere sahip katman yapıları arasında oluşan ısıl gerilmeler de hesaba katılmamıştır. Gerçeğe yakın bir analiz için çoklu fiziksel etkileri hesaplayan bir paket programdan faydalanabilir.
- Literatürde yapılan çalışmalarda çok kanallı transistörlerin sayısal olarak modellenmesi bilgisayarda çok fazla hesap yükü oluşturduğundan genelde transistör modelinin küçük bir parçası analiz edilmiştir. Bu nedenle ısınan kanalların birbirini nasıl etkilediği incelenememektedir. Sayısal analizlerde daha doğru sonuçlar elde etmek için deneysel çalışmalarda tek kanallı ve çok kanallı transistörlerde analiz yapılarak aynı güç değerinde kanalların birbirini nasıl etkilediği incelenebilir ve korelasyon katsayısı çıkarılarak, sayısal analizlerde güç tanımlanmasında kullanılabilir.
- Literatürde yapılan analitik çalışmalarda transistör modelini belirleyen parametrelerle ısıl direnç ifadeleri geliştirilmiştir. Bu ifadeler yardımıyla paket programlar için kod geliştirilebilir, bu sayede pahalı, zahmetli ve düşük çözünürlükte deneysel sonuçlar yerine, sayısal analizlerde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilebilir, sonuç olarak transistör teknolojisi daha hızlı geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

1. James, W.T. (2011). *Electro-thermal-mechanical modeling of GaN HFETs and MOSHFETs*, Master Thesis, G. W. Woodruff School of Mechanical Engineering, 1-3.
2. İnternet: URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2Fwiki%2FTransist%25C3%25B6r&date=2016-11-22>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2016.
3. İnternet: URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.digikey.com%2Fproduct-highlights%2Fus%2Fen%2Fnxpsemiconductorsmmic%2F1572&date=2016-11-22>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2016.
4. İnternet: URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Felektronikhobi.net%2Ftransistorler-nasil-kullanilir%2F&date=2016-11-22>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2016.
5. İnternet: URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.amcomusa.com%2Fproducts%2Fmmics.html&date=2016-11-22>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2016.
6. İnternet: URL:
http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FGallium_nitride&date=2016-11-22, Son Erişim Tarihi: 22.11.2016.
7. Kim, S.H. (2014). *Adressing Thermal and Environmental Reliability in GaN Based High Electron Mobility Transistors*, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, 1-2.
8. Choi, S., Heller, E.R., Dorsey, D., Vetury, R., Graham, S. (2013, June). Thermometry of AlGaIn/GaN HEMTs Using Multispectral Raman Features. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60(6), 1898-1904.
9. Kuball, M., Pomeroy, J.W., Bajo, M.M., Silvestri, M., Uren, M.J., Killat, N. (2013). Junction Temperature Measurements and Reliability of GaN FETs. *Proceedings of SPIE*, 8625 86250X-1.
10. Sommet, R., Mouginot, G., Quere, R., Ouarch, Z., Camiade, M. (2012). Thermal Modeling and Measurements of AlGaIn/GaN HEMTs Including Thermal Boundary Resistance. *Microelectronics Journal*, 43, 611-617.
11. Cho, J., Bozorg-Grayeli, E., Altman, D.H, Asheghi, M., Goodson, K.E. (2012, March). Low Thermal Resistances at GaN-SiC Interfaces for HEMT Technology. *IEEE Electron Device Letters*, 33(3), 378-380.
12. Russo, S., d'Alessandro, V., Costagliola, M., Sasso, G., Rinaldi, N. (2012). Analysis of the Thermal Behavior of AlGaIn/GaN HEMTs. *Elsevier, Materials Science and Engineering B*, 177, 1343-1351.

13. Darwish, A.M., Hung, H.A., Ibrahim, A.A. (2012, April). AlGa_N/Ga_N HEMT with Distributed Gate for Channel Temperature Reduction. *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*, 4(60), 1038-1043.
14. Yan, Z., Liu, G., Khan, J.M., Baladin, A.A. (2012, May). Graphene Quilts for Thermal Management of High-Power Ga_N Transistors. *Nature Communications*, 1-8.
15. Prejs, A., Wood, S., Pengelly, R., Pribble, W. (2009, June). Thermal Analysis and Its Application to High Power Ga_N HEMT Amplifiers. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*.
16. Hosch, M., Pomeroy, J.W., Sarua, A., Kuball, M., Jung, H., Schumacher, H. (2009, May). Field Dependent Self-Heating Effects in High Power AlGa_N/Ga_N HEMTs. *CS MANTECH Conference*.
17. Riedel, G.J., Pomeroy, J.W., Hilton, J.P., Maclean, J.O., Wallis, D.J., Uren, M.J., Martin, T., Forsberg, U., Lundskog, A., Kakanakova-Georgieva, A., Pozina, G., Janzén, E., Lossy, R., Pazirandeh, R., Brunner, F., Würfl, J., Kuball, M. (2009, February). Reducing Thermal Resistance of AlGa_N/Ga_N Electronic Devices Using Novel Nucleation Layers. *IEEE Electron Device Letters*, 2(30), 103-106.
18. Joh, J., del Alamo, J.A., Chowdhury, U., Chou, T.M., Tserng, H.Q., Jimenez, J.L. (2009, December). Measurement of Channel Temperature in Ga_N High-Electron Mobility Transistor. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 12(56), 2895-2901.
19. Chattopadhyay, M.K., Tokekar, S. (2008). Thermal Model for Dc Characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMTs Including Self-Heating Effect and Non-linear Polarization. *Microelectronics Journal*, 39, 1181-1188.
20. Menozzi, R., Umana-Mebreno, G.A., Nener, B.D., Parish, G., Sozzi, G., Faraone, L., Mishra, U.K. (2008, June). Temperature-Dependent Characterization of AlGa_N/Ga_N HEMTs: Thermal and Source/Drain Resistances. *IEEE Transactions On Device and Materials Reliability*, 2(8), 255-264.
21. Heller, E.R., Crespo, A. (2008). Electro-Thermal Modeling of Multifinger AlGa_N/Ga_N HEMT Device Operation Including Thermal Substrate Effects. *Elsevier, Microelectronics Reliability*, 48, 45-50.
22. Cappelluti, F., Furno, M., Angelini, A., Bonani, F., Pirola, M., Ghione, G. (2007, July). On the Substrate Thermal Optimization in SiC-Based Backside-Mounted High-Power Ga_N FETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 7(54), 1744-1752.
23. Sarua, A., Ji, H., Hilton, K.P., Wallis, D.J., Uren, M.J., Martin, T., Kuball, M. (2007, December). Thermal Boundary Resistance Between Ga_N and Substrate in AlGa_N/Ga_N Electronic Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 12(54), 3152-3158.
24. Kuzmik, J., Bychikhin, S., Lossy, R., Würfl, H.-J., di F. Poisson, M.-A., Teyssier, J.-P., Gaquière, C., Pogany, D. (2007). Transient Self-Heating Effects in

- Multifinger AlGaIn/GaN HEMTs with Metal Airbridges. *Elsevier, Solid-State Electronics*, 51, 969-974.
25. Vitusevich, S.A., Kurakin, A.M., Klein, N., Petrychuk, M.V., Naumov, A.V., Belyaev, A.E. (2008, September). AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor Structures: Self-Heating Effect and Performance Degradation. *IEEE Transactions on Device And Materials Reliability*, 3(8), 543-548.
 26. Jardel, O., De Groote, F., Reveyrand, T., Jacquet, J.-C., Charbonniaud, C., Teyssier, J.-P., Floriot, D., Quéré, R. (2007, December). An Electrothermal Model for AlGaIn/GaN Power HEMTs Including Trapping Effects to Improve Large-Signal Simulation Results on High VSWR, *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*, 12(55), 2660-2669.
 27. Oprins, H., Das, J., Ruythooren, W., Vandersmissen, R., Vandeveld, R., Germain, M. (2005). Thermal Modelling of Multi-Finger AlGaIn/GaN HEMTs. *Imec vzw, Kapeldreef 75, Belgium, B-3001*.
 28. Blackburn, D.L. (2004). Temperature Measurements of Semiconductor Devices. *20th SEMI-THERM Symposium*.
 29. Freeman, J.C. (2004). Channel Temperature Model for Microwave AlGaIn/GaN Power HEMTs on SiC and Sapphire. *IEEE MTT-S Digest*, 2031-2034.
 30. Park, J., Shin, M.W., Lee, C.C. (2003, July). Thermal Modeling and Measurement of GaN-Based HFET Devices. *IEEE Electron Device Letters*, 7(24), 424-426.
 31. Sun, J., Fatima, H., Koudymov, A., Chitnis, A., Hu, X., Wang, H.-M., Zhang, J., Simin, G., Yang, J., Khan, M.A. (2003, June). Thermal Management of AlGaIn-GaN HFETs on SApphire Using Flip-Chip Bonding with Epoxy Underfill. *IEEE Electron Device Letters*, 6(24), 375-377.
 32. Nuttinck, S., Wagner, B.K., Banerjee, B., Venkataraman, S., Gebara, E., Laskar, J., Harris, H.M. (2003, December). Thermal Analysis of AlGaIn-GaN Power HFETs. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 12(51), 2445-2452.
 33. Simms, R.J.T., Pomeroy, J.W., Uren, M.J., Martin, T., Kuball, M. (2008, February). Channel Temperature Determination in High Power AlGaIn/GaN HFETs Using Electrical Methods and Raman Spectroscopy. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2(55), 478-482.
 34. Ji, H., Kuball, M., Sarua, A., Das, J., Ruythooren, W., Germain, M., Borghs, G. (2006, October). Three-Dimensional Thermal Analysis of A Flip-Chip Mounted AlGaIn/GaN HFET Using Confocal Micro-Rman Specroscopy. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 10(53), 2658-2661.
 35. Kuball, M., Hayes, J.M., Uren, M.J., Martin, T., Birbeck, J.C.H., Balmer, R.S., Hughes, B.T. (2002, January). Measurement of Temperature in Active High-Power AlGaIn/GaN HFETs Using Raman Spectroscopy. *IEEE Electron Device Letters*, 1(23), 7-9.

36. Bhunia, A., Boutros, K., Chen, C.-L. (2004). High Heat Flux Cooling Solutions for Thermal Management of High Power Density Gallium Nitride HEMT. *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 75-81.
37. Kuball, M., Sarua, A., Ji, H., Uren, M.J., Balmer, R.S., Martin, T. (2006). Integrated Raman-IR Thermography on AlGa_N/Ga_N Transistors. *IEEE*, 1339-1342.
38. Kuball, M., Pomeroy, J.W., Simms, R., Riedel, G.J., Ji, H., Sarua, A., Uren, M.J., Martin, T. (2007). Thermal Properties and Reliability of Ga_N Microelectronics: Sub-Micron Spatial and Nanosecond Time Resolution Thermography. *IEEE*, 1-4.
39. Zhang, R., Zhao, W.S., Yin, W.Y. (2014). Investigation on Thermo-Mechanical Responses in High Power Multi-Finger AlGa_N/Ga_N HEMTs. *Microelectronics Reliability*, 54, 575-581.
40. Calame, J.P., Myers, R.E., Wood, F.E., Binari, F.C. (2005, December). Simulations of Direct-Die-Attached Microchannel Coolers for the Thermal Management of Ga_N-on-SiC Microwave Amplifiers. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 4(28), 797-809.
41. Darwish, A.M., Bayba, A.J., Hung, H.A. (2008, December). Utilizing Diode Characteristics for Ga_N HEMT Channel Temperature Prediction. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 12(56), 3188-3192.
42. Kuball, M., Riedel, G.J., Pomeroy, J.W., Sarua, A., Uren, M.J., Martin, T., Hilton, K.P., Maclean, J.O., Wallis, D.J. (2007, February). Time-Resolved Temperature Measurement of AlGa_N/Ga_N Electronic Devices Using Micro-Raman Spectroscopy. *IEEE Electron Device Letters*, 2(28), 86-89.
43. Florian, C., Santarelli, A., Cignani, R., Filicori, F. (2013, May). Characterization of the Nonlinear Thermal Resistance and Pulsed Thermal Dynamic Behavior of AlGa_N-Ga_N HEMTs on SiC. *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*, 5(61), 1879-1891.
44. Schwitter, B.K., Parker, A.E., Mahon, S.J., Fattorini, A.P., Heimlich, M.C. (2014, May). Impact of Bias and Device Structure on Gate Junction Temperature in AlGa_N/Ga_N-on-Si HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 5(61), 3358-3364.
45. Zhao, M., Liu, X., Zheng, Y., Peng, M., Ouyang, S., Li, Y., Wei, K. (2012). Thermal Analysis of AlGa_N/Ga_N High-Electron-Mobility Transistors by Infrared Microscopy. *Optics Communications*, 29, 104-109.
46. Riccio, M., Pantellini, A., Irace, A., Breglio, G., Nanni, A., Lanzieri, C. (2011). Electro-thermal Characterization of AlGa_N/Ga_N HEMT on Silicon Microstrip Technology. *Microelectronics Reliability*, 51, 1725-1729.
47. Darwish, A.M., Bayba, A.J., Hung, H.A. (2004, November). Thermal Resistance Calculation of AlGa_N-Ga_N Devices. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techiques*, 11(52), 2611-2620.

48. Jiji, L.M. (2009). *Heat Conduction* (Third Edition). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2-8.
49. İnternet: URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.figes.com.tr%2Ffansys%2Fdokuman%2Ffansys-icepak-brochure.pdf&date=2016-11-22>, Son Erişim Tarihi: 22.11.2016.
50. Çalışır, T. (2011). *Çarpan Akışkan Jetleri Kullanarak Kanatçıklı Yüzeyler Üzerindeki Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 38-42.
51. Kuball, M., Pomeroy, J.W., Simms, R., Riedel, G.J., Ji, H., Sarua, A., Uren, M.J., Martin, T. (2007). Thermal Properties and Reliability of GaN Microelectronics: Sub-Micron Spatial and Nanosecond Time Resolution Thermography. *IEEE*, 1-4.
52. Kuball, M., Hayes, J.M., Uren, M.J., Martin, T., Birbeck, J.C.H., Balmer, R.S., Hughes, B.T. (2002, January). Measurement of Temperature in High-Power AlGaIn/GaN HFETs using Raman Scattering. *IEEE, Electron Device Letters*, 1(23), 7-9.
53. Kuzmik, J., Javorka, P., Alam, A., Marso, M., Heuken, M., Kordos, P. (2002, August). Determination of Channel Temperature in AlGaIn/GaN HEMTs Grown on Sapphire and Silicon Substrates Using DC Characterization Method. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 8(49), 1496-1498.
54. McAlister, S.P., Bardwell, J.A., Haffouz, S., Tang, H. (2006, May/June). Self Heating and the Temperature Dependence of the DC Characteristics of GaN Heterostructure Field Effect Transistors. *Journal of Vacuum Science Technology A*, 3(24), 624-628.
55. Turin, V.O., Balandin A.A. (2004, January). Performance Degredation of GaN Field-effect Transistors due to Thermal Boundary Resistance at GaN/Substrate Interface. *IEEE, Electron Device Lette*, 1(40), 81-83.





EKLER

EK-1. Literatürde bulunan çalışmaların özeti

Makalenin Yazarları	Test Yöntemi	Nümerik Analiz Programı	Alt Tabaka Malzemesi	Alt Tabaka Kalınlığı (μm)	Kanal Uzunluğu (μm)	Darbe Genişliği	Güç
A.M. Darwish, A. J. Bayba, and H. A. Hung [48]	Raman Spektroskopisi	ANSYS	Safir, Si, SiC	100	0,25	Kararlı Rejim	0-10 W/mm
M. Riccio, A. Pantellini, A. Irace, G. Breglio, A. Nanni, C. Lanzieri [47]	IR Isıl DC Karakterizasyon	TCAD	Si, SiC	50		Kararlı Rejim	1-5
Miao Zhao, Xinyu Liu, Yingkui Zheng, Mingzeng Peng, Sihua Ouyang, Yankui Li, Ke Wei [46]	IR Mikroskop		SiC	90	0,5	Kararlı Rejim	0-9 W
B. K. Schwitter, E. Parker, S. J. Mahon, A. P. Fattorini, M. C. Heimlich [45]	Kanal Metal Direnç Ölçümleri	SYMMIC	Si	100	0,5	Kararlı Rejim	1-1,6 W
C. Florian, A. Santarelli, R. Cignani, F. Filicori [44]	IR Kamera		SiC	100	0,25	7 ns	
M. Kuball, G.J. Reidel, J. W. Pomeroy, A. Sarua, M.J. Uren, T.Martin, K.P. Hilton, J.O. Maclean, and D.J. Wallis [43]	Mikro Raman Spektroskopisi		Safir, SiC	300- 400		10-250 μs	5,5 W

EK-1. (Devam) Literatürde bulunan çalışmaların özeti

Makalenin Yazarları	Test Yöntemi	Nümerik Analiz Programı	Alt Tabaka Malzemesi	Alt Tabaka Kalınlığı (µm)	Kanal Uzunluğu (µm)	Darbe Genişliği	Güç
A. M. Darwish, A. J. Bayba, H. A. Hung [42]	IR Kamera ve Raman Spektroskopisi	Simülasyon	SiC		0,1-0,5	300-500 µs	0-1,5 W
R.Sommet, G. Mougnot, R. Quere, Z. Ouarch, M. Camiade [11]	PIV Ölçümleri, Sıvı Kristal Ölçümler	ANSYS	SiC	100	0,25	Kararlı Rejim	0-5 W
J. P. Calame, R. E. Myers, F. N. Wood, S. C. Binari [41]		ANSYS	SiC	50-100		Kararlı Rejim	50-100 W
M. Kuball, J. W. Pomeroy, R. Simms, G. J. Reidel, H. Ji, A.Sarua, M. J. Uren, T. Martin [52]	Raman Ölçümleri		SiC		0,25-1,2	200 ns	1,2-2,5 W
M. Kuball, A. Sarua, H. Ji, M. J. Uren, R. S. Balmer, T. Martin [38]	Bileşik Raman- IR Ölçümleri		4H-SiC	410			
Avijit Bhunia, Karim Boutros, Chung-Lung Chen [37]	Chromega-Constantan (E-Tip) Isıl Çiftler	FLUENT	SiC	75-400	0,5	Kararlı Rejim	4 W/mm

EK-1. (Devam) Literatürde bulunan çalışmaların özeti

Makalenin Yazarları	Test Yöntemi	Nümerik Analiz Programı	Alt Tabaka Malzemesi	Alt Tabaka Kalınlığı (μm)	Kanal Uzunluğu (μm)	Darbe Genişliği	Güç
S. Nuttinck, B. K. Wagner, B. Banerjee, S. Venkataraman, E. Gebara, J. Laskar, H. M. Harris [33]	Elektiriksel Metot	Sonlu Elemanlar Metodu	Safir, Si, SiC	300	0,35	Kararlı Rejim	5 W/mm
J. Sun, H. Fatima, A. Koudymov, A. Chitnis, X. Hu, H.-M. Wang, J. Zhang, G. Simin J. Yang, M. Asif Khan [32]	Elektiriksel Metot		SiC			200 ns	6 W/mm
J. Park, M. W. Shin, C. C. Lee [31]	Nematik Sıvı Kristal Ölçümleri	PAMICE Kodu ile Sayısal Simülasyon	Safir	330	0,8	Kararlı Rejim	0,42 W
J. C. Freeman [30]	Raman Spektroskopi, Nematik Sıvı Kristal Ölçümleri		Safir, SiC	200	0,15	Kararlı Rejim	2 W/mm
A.Prejs, S. Wood, R. Pengelly, W. Pribble [16]	IR Spektroskopi	ANSYS	SiC			400 ms	57,6 W

EK-1. (Devam) Literatürde bulunan çalışmaların özeti

Makalenin Yazarları	Test Yöntemi	Nümerik Analiz Programı	Alt Tabaka Malzemesi	Alt Tabaka Kalınlığı (µm)	Kanal Uzunluğu (µm)
R. J.T. Simms, J. W. Pomeroy, M. J. Uren, T. Martin, M. Kuball [34]	Elektriksel Metot ve Mikro-Raman Ölçümleri		4H-SiC	400	
V. O. Turin and A.A. Balandin [56]	Elektriksel Metot				1,6
H. Oprins , J. Das, W. Ruythooren, R. Vandersmissen, B. Vandavelde, M. Germain [28]		MSMARC	Safir, SiC	300	0,25
S. A. Vitusevich, A. M. Kurakin, N. Klein, M. V. Petrychuck, A. V. Naumov, and A. E. Belyaev [26]	Elektriksel Metot (I-V Ölçümleri)		Safir, SiC	300	

EK-1. (Devam) Literatürde bulunan çalışmaların özeti

Makalenin Yazarları	Test Yöntemi	Nümerik Analiz Programı	Alt Tabaka Malzemesi	Alt Tabaka Kalınlığı (µm)	Kanal Uzunluğu (µm)	Darbe Genişliği	Güç
J. Kuzmik, S. Bychikhin, R. Lossy, H.-J. Würfl, M.-A. di Forte Poisson, J.-P. Teyssier, C. Gaquiere, D. Pogany [25]	Elektriksel Metot ve IR Kamera	Matlab	Safir		0,3	10 µs	
A. Saura, H. Ji, K.P. Hilton, D.J. Wallis, M. J. Uren, T. Martin, and M. Kuball [24]	Mikro-Raman Spektroskopisi	Sonlu Elemanlar Simülasyonları	4H-SiC, Safir	300		Kararlı Rejim	0-7 W
E.R. Heller, A.Crespo [22]		ISE DESSIS	SiC	350	0,22	Kararlı Rejim	6,43 W/mm
R. Menozzi, G. A. Umana-Membreno, B. D. Nener, G. Parish, G. Sozzi, L. Faraone, U. K. Mishra [21]	DC Ölçüm Teknikleri	ISE DESSIS	Safir	325	0,9	Kararlı Rejim	0,1-0,8 W
M. K. Chattopadhyay, S. Tokekar [20]	Elektriksel Metot		Safir, Si, SiC			Kararlı Rejim	
M. Hosh, J.W. Pomeroy, A. Sarua, M. Kuball, H. Jung, H. Schumacher [17]	Mikro-Raman Ölçümleri	Silvaco ATLAS	4H-SiC		0,5	Kararlı Rejim	13,5 W/mm

EK-1. (Devam) Literatürde bulunan çalışmaların özeti

Makalenin Yazarları	Test Yöntemi	Nümerik Analiz Programı	Alt Tabaka Malzemesi	Alt Tabaka Kalınlığı (μm)	Kanal Uzunluğu (μm)	Darbe Genişliği	Güç
J. Joh, J. A. del Alamo, U. Chowdhury, T.-M. Chou, H.-Q. Tsem, J. L. Jimenez [19]	Elektriksel Metot	ANSYS TAS				0,2 μs	0-12 W/mm
G. J. Riedel, J. W. Pomeroy, K. P. Hilton, J. O. Maclean, D. J. Wallis, M. J. Uren, T. Martin, U. Forsberg, A. Lundskog, A. Kakanakova-Georgieva, G. Pozina, E. Janzen, R. Lossy, R. Pazirandeh, F. Brunner, J. Würfl, M. Kuball [18]	Mikro-Raman Ölçümleri		4H-SiC	400		10-30 ns	
Z. Yan, G. Liu, J. M. Khan, A. A. Baladin [15]	Mikro-Raman Spektroskopisi	COMSOL	SiC			Kararlı Rejim	13 W/mm
A. M. Darwish, H. A. Hung, A. A. Ibrahim [14]	Elektriksel Metot	ANSYS	SiC		0,25	Kararlı Rejim	5,6 W/mm

EK-1. (Devam) Literatürde bulunan çalışmaların özeti

Makalenin Yazarları	Test Yöntemi	Nümerik Analiz Programı	Alt Tabaka Malzemesi	Alt Tabaka Kalınlığı (µm)	Kanal Uzunluğu (µm)	Darbe Genişliği
S. Russo, V. d'Alessandro, M. Costagliola, G. Sasso, N. Rinaldi [13]	Elektriksel Metot (DC)	COMSOL	6H-SiC	70		Kararsız Rejim
J. Cho, E. Bozorg-Grayeli, D. H. Altman, M. Asheghi, K. E. Goodson [12]	Termoreflektans Ölçümü		4H-SiC			Kararsız Rejim
S.Choi, E. R. Heller, D. Dorsey, R. Vetury, S. Graham [9]	Mikro-Raman Spektroskopisi	COMSOL	Safir, Si, 6H-SiC		0,5	Kararlı Rejim

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : İLHAN, Didem Cansu
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 05.04.1991, Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 538 396 84 47
e-mail : didemcansu891@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2014
Lise	Eryaman Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-2016	Aselsan A.Ş.	Mühendis
2012-2013	Alter Yayıncılık	Kapak Tasarımcısı

Yabancı Dil

İngilizce



GAZİ GELECEKTİR..