



Numerical investigation of thermal behavior of AlGaIn/GaN HEMTs on SiC, Si and Sapphire substrates

Didem Cansu İlhan^{1*}, Şenol Başkaya²

¹TUBITAK SAGE, Ankara, 06261, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Gazi University, 06570 Ankara, Turkey

Highlights:

- AlGaIn/GaN HEMTs
- Thermal Resistance
- Reliability of HEMTs

Keywords:

- AGaN/GaN
- HEMTs
- Numerical Simulation
- Reliability
- Thermal Resistance

Article Info:

Research Article
Received: 16.03.2019
Accepted: 26.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.540941

Correspondence:

Author: Didem Cansu İlhan
e-mail:
didem.ilhan@tubitak.gov.tr
phone: +90 538 396 8447

Graphical Abstract

In this letter, thermal analysis results of AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC, Si and Sapphire substrates were presented. Simulation results are in good agreement with experimental data from the literature. Effect of different device parameters such as substrate thickness, gate length, gate width, dissipated power and pulse width were investigated to determine in which range of these parameters GaN-devices provide the best thermal performance. Resulting thermal resistance values have been extracted for different substrates. In addition, transient thermal performance was studied for sub micrometer pulse width, and substrate material performances are compared.

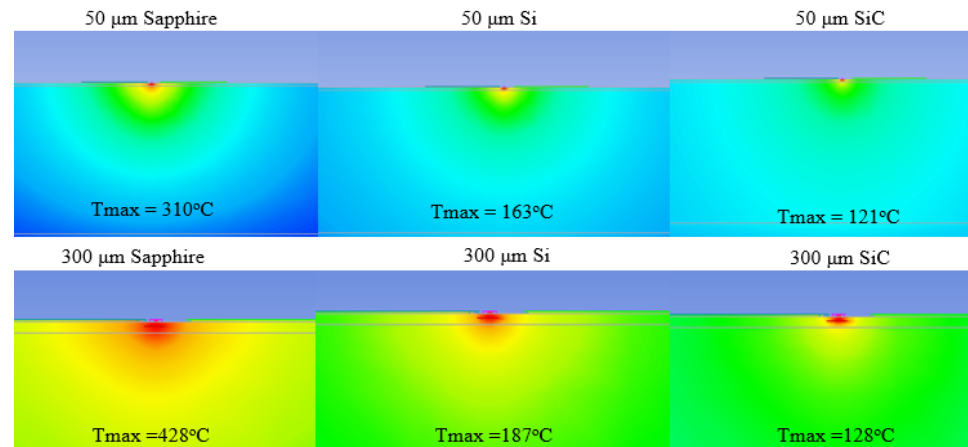


Figure A. Temperature distributions on cross section of AlGaIn/GaN devices grown on SiC, Si and Sapphire substrates for 50 µm and 300 µm substrate thicknesses

Purpose: This study facilitates the improvement of AlGaIn/GaN HEMTs design to reduce thermal resistance, and also improves the reliability and life-time of these devices.

Theory and Methods:

Fourier's law of conduction formula can be used to calculate thermal resistances and the 3-D finite element model is constructed to understand the thermal behavior of single-finger AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC, Si and Sapphire substrates, using the commercial software package ANSYS-Icepak.

Results:

According to numerical simulation results, device on Sapphire substrate has the highest thermal resistance, followed by device on Si, and then device on SiC substrate, due to the increasing thermal conductivity in this order.

Conclusion:

According to present simulation results, GaN device grown on SiC has the best thermal performance. Finally, these results facilitate optimization of device layout that results in an effective thermal management and reliability improvement in high power technologies.



AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörlerin SiC, Si ve Safir alt tabakalardaki ısıl davranışının sayısal olarak incelenmesi

Didem Cansu İlhan^{1*}, Şenol Başkaya²

¹TÜBİTAK SAGE, 06261 Mamak, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara, Türkiye.

Ö N E Ç İ K A N L A R

- AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörler
- Isıl direnç
- Yüksek elektron hareketli transistörlerde güvenilirlik

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 16.03.2019
Kabul: 26.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.540941

Anahtar Kelimeler:

AlGaIn/GaN,
yüksek elektron hareketli
transistörler,
sayısal analiz,
güvenilirlik, ısıl direnç

ÖZET

Bu çalışmada AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin (High Electron Mobility Transistor, HEMT) SiC, Si ve Safir alt tabakalardaki ısıl analizi sunulmuştur. Kanal sıcaklığı ve sıcaklık dağılımı kararlı ve kararsız rejim durumları için 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak belirlenmiştir. Alınan simülasyon sonuçları literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarıyla uyum içindedir. GaN tabanlı cihazın en iyi ısıl performansını sağlayacak parametre aralıklarını bulmak için alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, kanal genişliği, güç atımı ve darbe genişliği gibi parametrelerin performans üzerine etkileri incelenmiştir. Farklı alt tabakalar için ısıl direnç değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler tek kanallı Safir alt tabakaya sahip cihazda 158°C/W, Si alt tabakaya sahip cihazda 53,5°C/W ve SiC alt tabakaya sahip cihazda 26,3°C/W'tır. Alınan sonuçlara göre en iyi ısıl performansa sahip SiC alt tabakalı cihaz için kanal sıcaklığı; gücün, kanal uzunluğunun, kanal genişliğinin ve alt tabaka kalınlığının fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bunlara ek olarak, mikrometre altı darbe genişliği için kararsız rejimde ısıl performans incelenmiş ve alt tabaka için malzeme performansı karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarıyla ısıl direnç düşürülüp, güvenilirlik ve cihaz ömrünü artırılarak AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörlerin gelişimine katkı sağlanabilir.

Numerical investigation of thermal behavior of AlGaIn/GaN HEMTs on SiC, Si and Sapphire substrates

H I G H L I G H T S

- AlGaIn/GaN HEMTs
- Thermal Resistance
- Reliability of HEMTs

Article Info

Research Article
Received: 16.03.2019
Accepted: 26.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.540941

Keywords:

AlGaIn/GaN,
HEMTs,
numerical simulation,
reliability,
thermal resistance

ABSTRACT

In this letter, thermal analysis results of AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC, Si and Sapphire substrates were presented. Accurate channel temperature determination and temperature distribution were carried out using 3-D finite element model for both steady state and transient cases. Present simulation results are in good agreement with experimental data from the literature. Effect of different device parameters such as substrate thickness, gate length, gate width, dissipated power and pulse width were investigated to determine in which range of these parameters GaN-devices provide the best thermal performance. Resulting thermal resistance values have been extracted for different substrates. For single-finger devices grown on Sapphire, Si and SiC substrates, thermal resistances were calculated as follows; 158°C/W, 53.5°C/W and 26.3°C/W, respectively. According to our results, channel temperature is defined as a function of power, gate length, gate width and substrate thickness, for the device grown on SiC that has the best thermal performance. In addition, transient thermal performance was studied for sub micrometer pulse width, and substrate material performances are compared. It is expected that this study facilitates the improvement of AlGaIn/GaN HEMTs design to reduce thermal resistance, and also improves the reliability and life-time of these devices.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörler, kablosuz ve uydular haberleşme sistemleri, otomotiv sektörü gibi yüksek frekans gerektiren çeşitli uygulamaların gelişiminde oldukça önemlidir. GaN tabanlı bu cihazlar yüksek kırılma voltajı ve yüksek ısı iletkenliğe sahip olup yüksek güç yoğunluğunda çalışabilir [1]. Bu yapıların tasarım ve üretiminin yanı sıra taşıyıcı özelliklerinin anlaşılmasında çokça ilerleme kaydedilmiştir [2]. Birçok avantaj sağlayan AlGaIn/GaN tabanlı transistörlerin cihaz performansı günümüzde kabul edilebilir bir seviyede olmasına rağmen halen güvenilirlikle ilgili problemleri vardır çünkü yüksek ısı atımına bağlı olarak cihaz ısısında hızlı artış görülmektedir. Bu durum da kimi zaman çok sayıda transistor içeren cihazlar için yüksek risk oluşturmaktadır. Örneğin yüksek güvenilirlik isteyen uydularda bir cihazı değiştirmek oldukça maliyetli olacaktır, bu nedenle yüksek güvenilirlik garanti edilmediği sürece teknik ve güvenlik açısından cihaz tercih edilmeyecektir [3]. Benzer olarak emniyet ve güvenlik gibi kritik uygulamalarda ciddi güvenilirlik gereksinimi vardır [3]. Bu gibi nedenlerle bu cihazlarda ısı yönetimin iyileştirilmesini sağlamak, cihaz ve paket tasarımını geliştirmek için kanal sıcaklığının yüksek doğrulukta bilinmesi zorunludur. GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörlerde kanal sıcaklığının belirlenmesine yönelik çok sayıda çeşitli metod geliştirilmiştir. Bunlar, deneysel elektriksel, optik, fiziksel kontakt metodları olarak kategorize edilebilir [4]. Bunun dışında teorik ve sonlu elemanlar metoduna dayalı sayısal simülasyon metodları vardır. Teorik modelleme cihazların kanal sıcaklığını belirlemede yaygın olarak kullanılmıştır [5]. Ancak herhangi bir 3 boyutlu cihaz modeline uygulanabilir olmadığı gibi modellenen veriler uygulamalarda sıcaklık dağılımını da göstermemektedir. Bunlar yalnızca kararlı rejim koşullarında geçerli olup, tek bir değer olarak kanal sıcaklığını vermektedir [6].

Kızılötesi ısı görüntüleme, Raman spektroskopisi, fotoluminisans ve sıvı kristal uygulamaları gibi optik sıcaklık ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Ancak sıcaklık ve uzaysal çözünürlükleri yetersiz kalmaktadır, kanalın, kanal metali tarafından gizlenen maksimum sıcaklığa sahip bölgesini ölçmede zorlanmaktadır [7]. Buna ek olarak, optik teknikler GaN tabakasının dikey olarak ortalama sıcaklığını ölçmektedir [8]. Guo, Chen ve Shi [9] çalışmalarında GaN tabanlı transistörün zamana bağlı analizini yapıp, kanal sıcaklığı ile darbe genişliği ve güç yoğunluğu arasındaki ilişkiyi analiz etmiş, oluşturdıkları modeli kızılötesi ısı görüntüleme tekniği ile doğrulamıştır. Bocero vd. [10] çalışmalarında AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün kanal sıcaklığını ölçmek için mikro-Raman spektroskopisi, GaN yarı iletkeninde biriken CeO₂ mikropartikülleri ve metalin omik direnci ile kanal kontaktlarını içeren yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Dunder ve Donmezer [11] çalışmalarında alan plakası olan bir AlGaIn/GaN transistörde mikro-Raman ve termoreflektans ısı görüntüleme yöntemlerinin ölçüm performanslarını

karşılaştırmış ve ölçüm limitlerini değerlendirmiştir. Buna göre Raman spektroskopiden çok daha iyi sonuç vermesine rağmen termoreflektans ısı görüntüleme yöntemi simülasyonlarda balistik-difüzyon etkiler dikkate alındığında maksimum sıcaklık tahminlerinde halen ~%40'a varan hata vermektedir. Sonuç olarak, kanal sıcaklığını doğru ve tam olarak ölçmek zor bir hal almaktadır [12]. Kanal sıcaklığını belirlemek için pek çok elektriksel metod önerilmiştir. Bunlar genelde sıkça kullanılan mevcut ekipmanlarla yapılabilecek zarar vermeyen yöntemler olup azalan akımla meydana gelen ısınma arasında ilişki kurarak cihaz sıcaklığının hesaplandığı tipik yöntemlerdir. Cutivet vd. [13] çalışmalarında frekans çözünürlüklü kanal direnç termometre ile farklı kanal genişliklerine sahip GaN yüksek elektron hareketli transistörün ısı empedansını çıkartmışlardır. Wu vd. [14] çalışmalarında AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün ısı performansı üzerinde nanokanal geometrisinin etkisini incelemiş ve daha büyük nanokanal uzunluğunda veya daha küçük nanokanal genişliğinde, arasında daha küçük bir dağılıma olan doğru akım ve yüksek sıcaklıkta direnç akımının bozulma etkisini barındıran darbeleri ölçüm ile doğrulanan bastırılmış kendinden ısınma etkisi göstermiştir. Bu tip metodların doğruluğu kullanılan cihazların kalibrasyonuna ve yapılan kabullere bağlıdır. Elektriksel metodlarla ölçülen sıcaklık değeri cihazın tüm aktif bölgesinin ortalamasını aldığı için doğruluğu kısıtlıdır, ancak sonuç sıcaklığındaki bu belirsizliğin ölçülmesi için az sayıda veri bulunmaktadır [4].

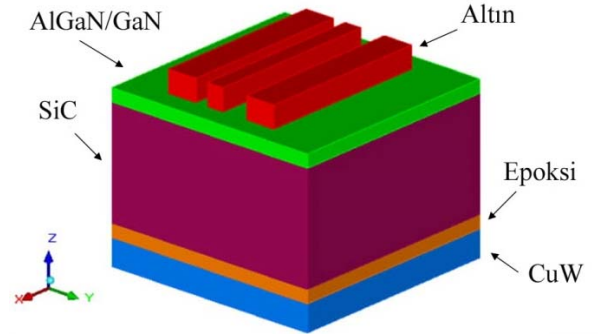
Isıl taramalı mikroskopla inceleme, ısı sonda, atomik güç mikroskopları [15] gibi fiziksel temas dayalı metodlar, nanometre mertebesine varan uzaysal çözünürlüğe sahiptir fakat bu cihazların ucu ve cihaz yüzeyi arasındaki ısı direnci belirsizliği cihaz sıcaklığının doğru ve tam olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır [4]. Sayısal metodlar kanal sıcaklığını doğru ve tam olarak belirlemek için oldukça kolaylık sağlar; düşük maliyetli, hızlı, ölçümlemeye ihtiyaç duymayan, sıcaklık dağılımının ve farklı parametrelerin kanal sıcaklığına etkisinin rahatlıkla görülebildiği metodlardır. Yüksek güçlü AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörlerin kanal sıcaklığının belirlenmesinde sonlu elemanlar metodu mantığına dayanan çeşitli sayısal çözüm yaklaşımları sunulmuştur. Singhal vd. [16] çalışmalarında büyük kanal genişliğine sahip cihazları farklı tabakalar üzerinde incelemiş, bunun için CFD-ACE+ yazılımını kullanmış, Oprins vd. [17] ısı performansı arttırmak için iki farklı hibrit bütünlemesini incelemiştir. Prejs, Wood, Pengelly ve Prible [18] hem darbeleri hem sürekli dalgada güç yoğunluğu, darbe genişliği ve çalışma faktörünün fonksiyonu olarak farklı transistörlerde ısı dirençleri karşılaştırmıştır. Hosch vd. [19] farklı güç ve voltaj seviyelerinde cihazın ısı davranışını sayısal elektro-termal cihaz simülasyonlarla incelemiştir. Park, Shin ve Lee [20] PAMICE kodu kullanarak çoktül bağlantılı transistörlerin sıcaklıklarını hesaplamıştır. Riccio vd. [21] HR-Si mikro şerit teknolojisi üzerinde transistörün elektro-termal davranışını incelemiştir. Choi, Heller, Vetury ve Graham [22] mikro-Raman spektroskopisi ve COMSOL yazılımı

yardımıyla transistörlerde sıcaklık ve gerilim ölçümü gerçekleştirilmiştir. Zhang, Zhao ve Yin [23] geliştirdikleri algoritma ile kararsız rejimde transistörde sıcaklık ve ısı gerilim tepkilerini inceleyip, sonuçları COMSOL yazılımıyla karşılaştırmıştır. Russo, d'Alessandro, Costagliola, Sasso ve Rinaldi [24] kararlı ve kararsız rejimde SiC alt tabakaya sahip transistörün ısı davranışını ticari bir yazılım yardımıyla gerçekleştirmiş ve dinamik ısı dağılımında Foster/Cauer ağ yapısının uygunluğu değerlendirilmiştir. Darwish, Hung ve Ibrahim [25] transistörde ısınmayı azaltmak için geliştirdikleri yapılanmayı deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarıyla göstermiştir. Nil, Öztürk, Akgül ve Sarı [26] çalışmalarında organik ışık yayan diyotlarda ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir, sayısal analizlerde ANSYS ICEPAK ticari yazılım paketini kullanmışlar ve çalışmada ısı transferini iyileştirmeye yönelik çözümler sunmuşlardır. Bu bahsedilen çalışmalar kanal sıcaklığına etki eden tüm parametreleri hesaba katmamıştır ya da sadece kararlı rejim şartları için analiz yapmıştır. Aslında pek çok cihaz darbeleri olarak yani kararsız rejimde çalıştırılmaktadır. Isıl özelliklerin gösterilmesi mikrosaniyeden daha düşük bir zaman çözünürlüğü gerektirmektedir. Ancak bu zaman skalası geleneksel ısı gösterim yöntemlerinde kolay elde edilememektedir [3]. Bu nedenle, darbe genişliğinin kanal sıcaklığına etkilerini görmek için zamana bağlı ısı analiz gereklidir. Yukarıda görüldüğü gibi kanal sıcaklığını belirlemede kullanılan deneysel metotlarda pek çok belirsizlik ve zorluk bulunmakla birlikte geliştirilecek her farklı transistör yapısı için deney yapmak oldukça maliyetli olacaktır, bu nedenle doğruluğu sağlanmış bir sayısal model bu açıdan avantaj sağlayacaktır. Bununla birlikte yukarıda değerlendirilen sayısal çalışmalarda da kanal sıcaklığına etki eden tüm parametrelerin bütünsel etkisinin hesaba katılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, SiC, Si ve Safir alt tabakaya sahip tekli AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı analizi sunulmuştur. 3 boyutlu sonlu elemanlar simülasyonları ticari yazılım paketi olan ANSYS-Icepak'te gerçekleştirilmiştir [27]. Alt tabaka malzemesi, alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, kanal genişliği, darbe genişliği gibi kanal sıcaklığına etki eden tüm parametrelerin ısı etkileri incelenmiştir. Buna ek olarak, farklı alt tabakaya sahip AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı direnç değerleri sunulmuştur. Sayısal model literatürdeki deneysel bir çalışmayla doğrulanmıştır, sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla Raman spektroskopisi yöntemiyle alınan sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir [3]. Sonuç olarak, yüksek güçlü GaN tabanlı transistörlerin ısı tasarımı için doğrulanan sayısal model ile optimum boyutlar, yüksek ısı performansı ve uzun cihaz ömrü için optimum çalışma koşulları belirlenmiştir.

2. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE ÇÖZÜM TEKNİĞİ (PROBLEM DEFINITION AND SOLUTION TECHNIQUE)

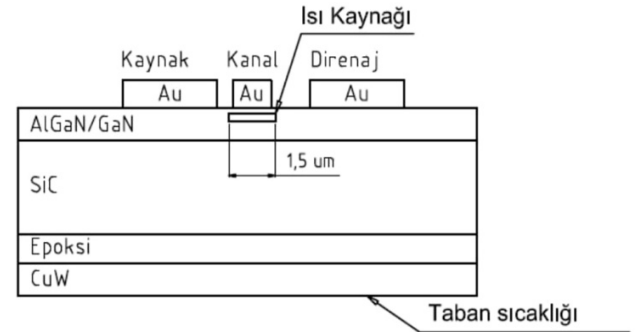
SiC, Si ve Safir alt tabakaya sahip tekli AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörlerin ısı davranışını incelemek için 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli, ANSYS-

Icepak ticari yazılım paketi yardımıyla oluşturulmuştur [27]. SiC, Si ve Safir alt tabakaların kanal sıcaklığına etkisini görmek için bir grup simülasyon gerçekleştirilmiştir. Alt tabaka kalınlığı 200 μm , kanal uzunluğu $L_G = 0,45 \mu\text{m}$ ve kanal genişliği $W_G = 260 \mu\text{m}$ olan, katmanları Şekil 1'deki gibi düzenlenmiş bir modeli ele alalım. Simülasyonlarda ısının üretildiği tüm iletim kanalı bölgesi ısı kaynağı olarak düşünülür [20]. Gömülü ısı kaynağı AlGaIn tabakasının 30 nm altında GaN tabakası içinde modellenmiştir. Cihazın kesiti ve 1,5 μm genişliğinde, 260 μm uzunluğundaki kanal bölgesi Şekil 2'de görülmektedir. Toplam güç değeri 2 W olarak tanımlanmıştır. Tablo 1'de her tabakanın ısı iletkenlik değeri sıcaklıktan bağımsız olarak alınmıştır, sıcaklık aralığı düşünüldüğünde makul bir kabul olduğu söylenebilir [20].



Şekil 1. 3 Boyutlu Transistör Modeli ve Tabaka Malzemeleri

(3-D Transistor Model and Materials of Layers)



Şekil 2. Kanal Bölgesinin Gösterildiği Model Kesiti

(Cross Section of Model with Channel Region)

Simülasyonlarda kullanılan sınır şartları için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Isı kaynağı kanalın 30 nm altından uniform ve sabit olarak tanımlanmıştır.
- Taşıyıcının (CuW) tabanı hariç tüm yüzeyler adyabatik kabul edilmiştir.
- Taşıyıcı tabanına sabit 70°C tanımlanmıştır.

Tablo 1. Malzemelerin ısı iletkenlik değerleri (Thermal Conductivities of the Materials)

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

- Kullanılan tüm tabakaların (GaN, SiC, Si, Safir, CuW, Epoksi) ısı iletkenlik değerleri sabit kabul edilmiştir.
- AlGaIn bariyer tabakasının çok ince olmasından dolayı ısı direnci ihmal edilebilir, toplam ısı direnç hesabına etki etmediği kabul edilmiştir. Buna ek olarak, alt tabaka ile GaN tabakası arasında herhangi bir çekirdek tabakanın kalınlığı ihmal edilebilir olduğundan ısı etkisi önemsiz olacaktır.

Sınır şartları, yapılan kabullere göre yalıtılmış yüzeyler için Eş. 1'deki gibi, sabit sıcaklık sınır şartı ise Eş. 2'deki gibi ifade edilebilir, burada n-, Kartezyen koordinat sisteminde üç yönü temsil kullanılmıştır.

$$q_n = \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial n} = 0 \quad (1)$$

$$T(x,y,0,t) = 70^\circ\text{C} \quad (2)$$

Zamana bağlı analizlerde kullanılan başlangıç şartı Eş. 3'te verilmiştir.

$$T(x,y,z,0) = 20^\circ\text{C} \quad (3)$$

Yukarıda verilen sınır şartları, sabit ısı iletkenliğe sahip durgun bir sistem için Eş. 4'teki üç boyutlu iletim denkleminde uygulanabilir. Ancak bu denklemin analitik çözümü mümkün olmadığından, ANSYS-Icepak ticari yazılım paketi yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür [27].

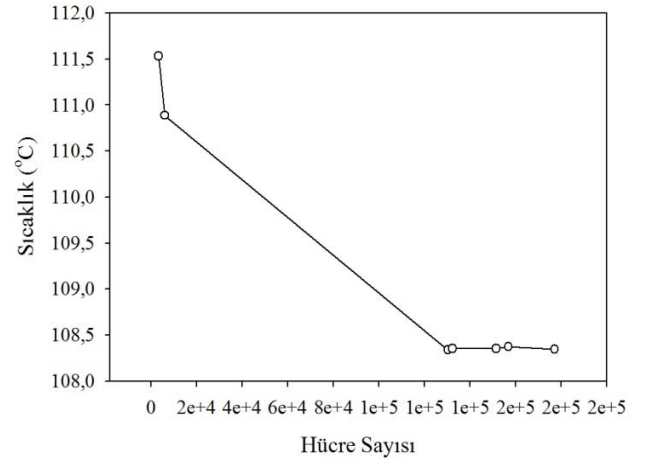
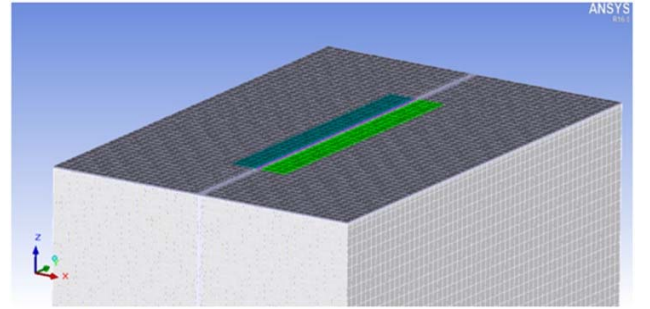
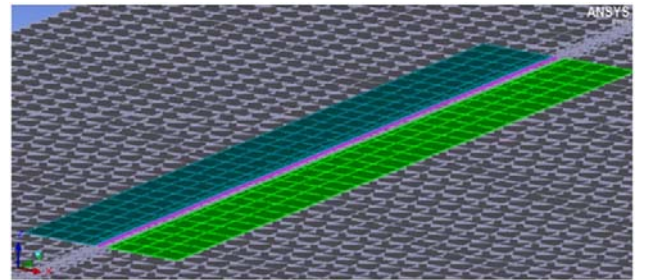
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

3 boyutlu sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasının ardından, yakınsama kriterleri değerlendirilmelidir. Çözümün yakınsaması için, mevcut değişkenlerin kalıntıları monoton veya değişken bir şekilde azalmalı, ayrıca tüm değişkenler için anlık değerler sabit hale gelmelidir [28]. Sonuçlara göre anlık sıcaklık değerleri çözüm süresince sabit hale gelmiş ve kalıntı değerleri çözüm sonunda 10^{-7} 'nin altına düşmüştür. Bu nedenle, çözümün yakınsadığı ve enerjinin korunumunun sağlandığı söylenebilir. ANSYS-Icepak kalıntı değerleri 10^{-7} 'nin altına düştüğünde otomatik olarak çözümü durdurduğu için çözüm iterasyon sayısından bağımsızdır. Bir diğer kriter çözümün hücre yapısından bağımsız olmasıdır. Hücre sayısı, çözüm hücre yapısından bağımsız hale gelene kadar artırılmıştır. Şekil 3'te çözümün hücre yapısından bağımsız hale geldiği görülmektedir. Üç boyutlu cihaz modelinin hücre yapısı ve kanal bölgesinin yakın görünümü sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.

Sayısal çözüm sonuçları cihazdaki sıcaklık dağılımını ve farklı alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN cihazlarının kanal sıcaklıklarını vermiştir. Analizde, konveksiyon ve radyasyon

ihmal edilmiş, ısının yalnızca iletimle kanaldan taşıyıcı tabanına doğru olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle, ısı dirençleri hesaplarırken Fourier'in iletim yasası kullanılmıştır. Bir boyutlu ısı transfer denklemi Eş. 5'teki gibi gösterilebilir.

$$q_z = -kA \frac{dT}{dz} \quad (5)$$


Şekil 3. Artan Hücre Sayısına Bağlı Sıcaklık Değerleri (Temperature Values at Increasing Number of Cells)

Şekil 4. 3 Boyutlu AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörün hücre yapısı (Mesh structure of 3-D AlGaIn/GaN HEMT device)

Şekil 5. AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörün kanal bölgesinin hücre yapısı (Mesh structure of channel region in AlGaIn/GaN HEMT device)

Burada q_z , z-yönündeki ısı transferi (W), k, ısı iletkenlik (W/mK) ve A, alandır (m²). Eş. 5 kullanılarak, ısı direnç Eş. 6'daki gibi ifade edilebilir.

$$\theta = \frac{L}{kA} = \frac{\Delta T}{q_z} \quad (6)$$

Burada θ , ısı direnç (°C/W), L ise tabaka kalınlığıdır. Eş. 5, Eş. 6 yardımıyla Eş. 7'deki gibi yazılabilir.

$$q_z = \frac{\Delta T}{\theta} \quad (7)$$

Toplam direnç Eş. 7 yardımıyla, Eş. 8'deki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta T = P_D \theta_{top} \quad (8)$$

Burada P_D cihazın gücü (W), ΔT kanal sıcaklığı ile taban sıcaklığı arasındaki fark (°C) ve θ_{top} ise taban sıcaklığı ile taban sıcaklığı arasındaki tüm katmanların ısı dirençlerini içeren toplam direnç değeridir (°C/W). Son olarak, toplam direnç Eş. 9'daki gibi yazılabilir.

$$\theta_{top} = \frac{T_{kanal} - T_{taban}}{P_D} \quad (9)$$

3. MODELİN DOĞRULANMASI (VERIFICATION OF MODEL)

Parametrik çalışmadan önce nümerik modelin geçerliliği doğrulanmalıdır. Daha önce bahsedildiği gibi, kanal sıcaklığını optik sıcaklık ölçüm teknikleriyle belirlemek limitli uzaysal ve sıcaklık çözünürlüğünden dolayı oldukça zordur. Bununla beraber, Kuball ve diğerleri kanal sıcaklıklarını Raman termografi yöntemiyle ölçmüşlerdir [3]. Bu teknikte sıcaklık ölçümü cihazdaki malzemelerin kafes titreşimindeki enerjiler gibi fonon enerjilerinin analizine dayanmaktadır [3]. Fonon enerjileri sıcaklığa bağlıdır ve cihazın elektriksel güç atımı fonon enerjisinin değişimine sebep olmakta, böylece cihazın aktif bölgesindeki sıcaklık artışı belirlenmektedir [3]. Çalışmada aşağıdaki AlGaIn/GaN cihaz parametreleri kullanılmıştır:

- 20 μm genişliğinde kanalsız AlGaIn/GaN cihaz;
- Alt tabaka malzemesi SiC;
- Alt tabaka kalınlığı 200 μm ;
- GaN tabakasının kalınlığı 1,2 μm ;
- Taban sıcaklığı 25°C;
- Toplam güç 4 W.

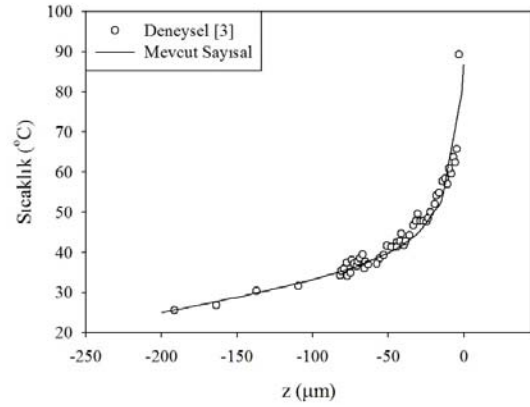
Deneysel çalışma ve sayısal çalışmanın karşılaştırıldığı sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde, çeşitli parametrelerin tekli AlGaIn/GaN tabanlı cihazlarda ısı etkilerini gözlemlemek için ANSYS-Icepak ticari yazılımıyla [27] gerçekleştirilen 3 boyutlu ısı

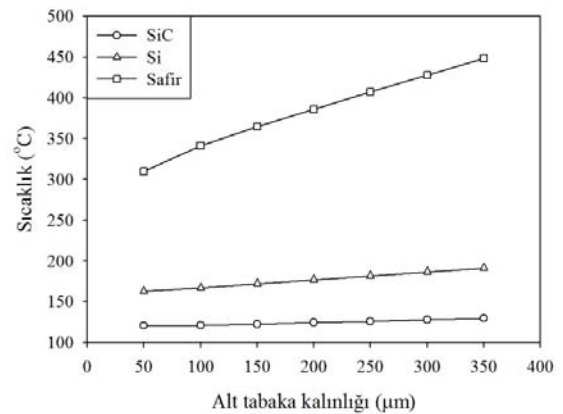
parametrik çalışma sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlara göre en iyi performansı sağlayacak çalışma koşulları, kritik cihaz boyutları ve alt tabaka malzemesi belirlenmiştir.

Farklı kalınlıklardaki SiC, Si ve Safir alt tabakaya sahip AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin analiz sonuçları Şekil 7'de sunulmuştur. Alt tabaka kalınlık aralığı literatürdeki çalışmalar ve çeşitli uygulamalar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, alt tabaka kalınlığı kanal sıcaklığını ciddi şekilde etkilemektedir. Alt tabaka malzemesinin ısı iletkenliği düştükçe, alt tabaka kalınlığının etkisi artmaktadır. Isıl direnç malzeme kalınlığı ve iletkenlik değerine bağlıdır. Bu nedenle, en düşük ısı iletkenliğe sahip Safir alt tabaka üzerindeki cihaz %44,9'la en yüksek sıcaklık artışına sahipken, beklenildiği gibi en düşük sıcaklık artışı %7,3'le SiC alt tabakaya sahip cihazda görülmektedir.



Şekil 6. 3 boyutlu simülasyon sonuçları ve Kuball vd. tarafından yapılan Raman termografi sonuçlarının karşılaştırılması [3]

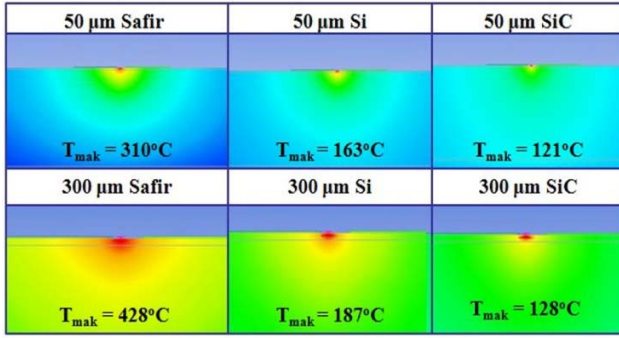
(Comparison of temperature values of present 3-D simulation and Raman thermography by Kuball et al. [3])



Şekil 7. SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörde alt tabaka kalınlığının sıcaklığa etkisi

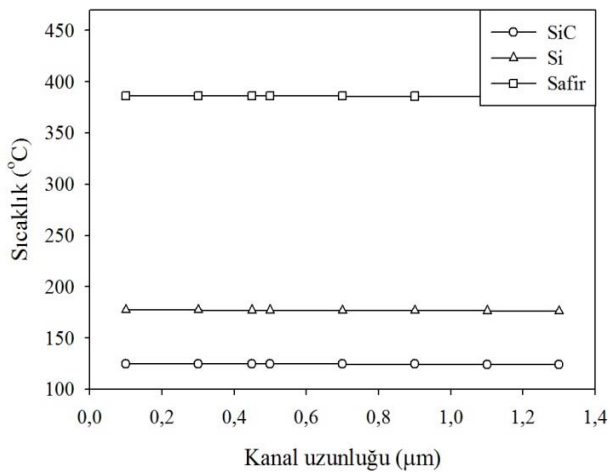
(Effects of substrate thickness on temperature for AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC, Si and Sapphire substrates)

Şekil 8'de 50 ve 300 μm kalınlıklara sahip Safir, Si ve SiC alt tabakalardaki sıcaklık dağılımı görülmektedir. SiC alt tabakada ısı yayılımı daha homojendir. Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla kanal uzunluğu ve kanal genişliğinin AlGaIn/GaN cihazlardaki ısı etkileri görülmektedir. Kanal uzunluğu artışıyla ısı daha geniş bir alandan yayılmaktadır. Bu nedenle kanal sıcaklığının düşmesi beklenir. SiC, Si ve Safir alt tabakalar için toplam sıcaklık düşüşü %1'den daha azdır. Şekil 10'da kanal genişliği artışıyla kanal sıcaklığının arttığı görülmektedir. Kanal genişliği arttıkça, cihazdan atılan ısı miktarı da artacaktır. Modellenen cihaz 260 μm genişliğinde olup 2 W ısı atmaktadır, bu demektir ki cihaz $\sim 7,7$ W/mm güç yoğunluğuna sahiptir. Kanal genişliğinin 50 μm 'den 300 μm 'ye artırılması, Safir alt tabaka için kanal sıcaklığında %45,4, Si alt tabaka için %23,4, SiC alt tabaka için %15'lik bir artışa sebep olmaktadır. Şekil 11'de 50 ve 300 μm kanal genişliği için Safir, Si ve SiC alt tabakaya sahip cihazlarda sıcaklık dağılımı görülmektedir.



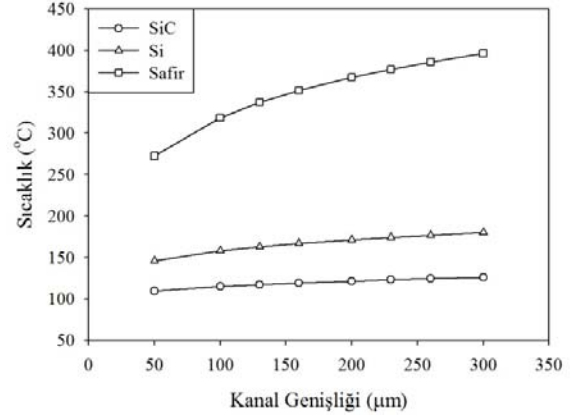
Şekil 8. 50 ve 300 μm kalınlıklarda SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN cihazda kesit görünüşte sıcaklık dağılımları

(Temperature distributions on cross section of AlGaIn/GaN devices grown on SiC, Si and Sapphire substrates for 50 μm and 300 μm substrate thicknesses)



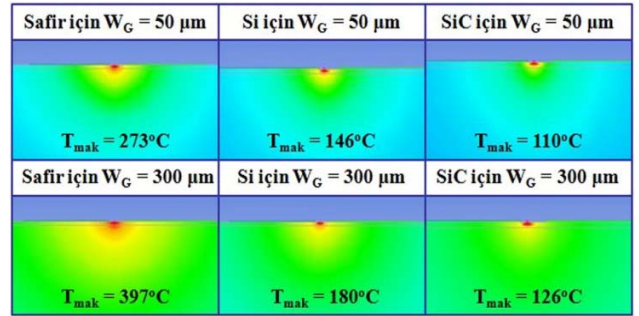
Şekil 9. SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörde kanal uzunluğunun sıcaklığa etkisi

(Effects of gate length on temperature for AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC, Si and Sapphire substrates)



Şekil 10. SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörde kanal genişliğinin sıcaklığa etkisi

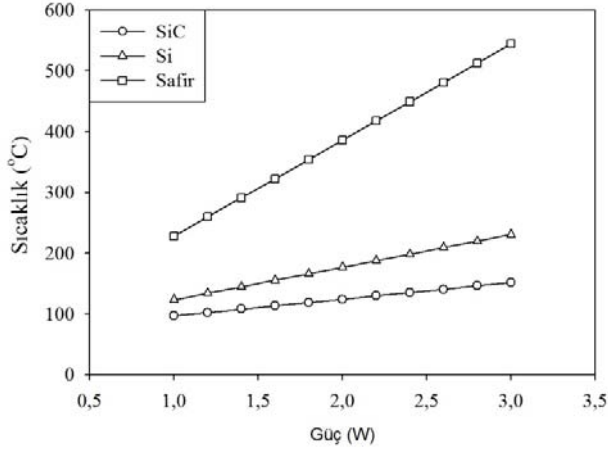
(Effects of gate width on temperature for AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC, Si and Sapphire substrates)



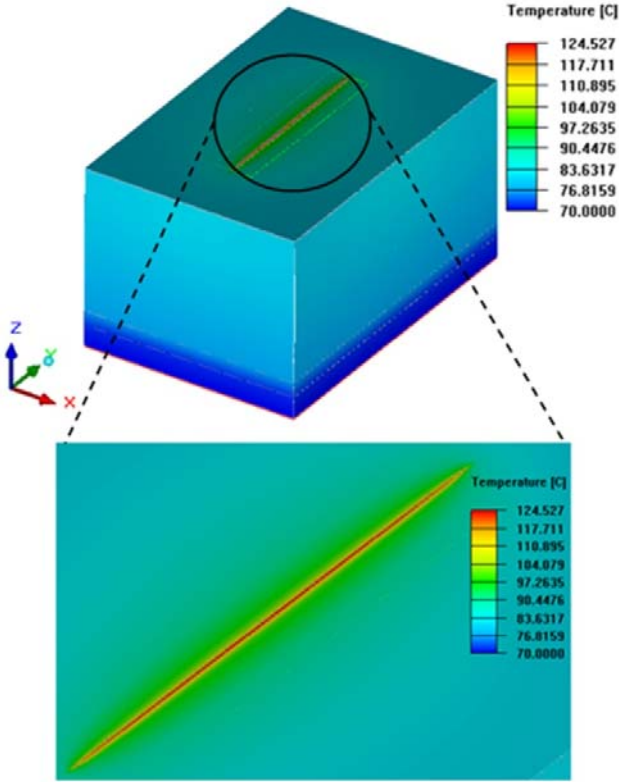
Şekil 11. 50 ve 300 μm kanal genişlikleri için SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN cihazda kesit görünüşte sıcaklık dağılımları

(Temperature distributions on cross section of AlGaIn/GaN devices grown on SiC, Si and Sapphire substrates for 50 μm and 300 μm gate widths)

Eş. 5'te görüldüğü gibi kanal sıcaklığı cihaz gücüyle orantılıdır, sonuçlar Şekil 12'de görülmektedir. AlGaIn/GaN tabanlı yüksek elektron hareketli transistörler yüksek güç uygulamalarında kullanıldığı için güç tüketim değeri arttıkça alt tabaka malzeme performansının önemi de artmaktadır. Şekil 13'te SiC alt tabakaya sahip cihazda 3 boyutlu sıcaklık dağılımı verilmiştir, kanal bölgesinde gelişen hızlı sıcaklık değişimi görülmektedir. Safir, Si ve SiC alt tabakalara sahip tekli cihazlar için ısı direnç yani güç başına düşen sıcaklık artış değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Düşük ısı iletkenlikten dolayı Safir alt tabakaya sahip cihaz en yüksek ısı dirence sahipken bunu Si ve SiC alt tabakalara sahip cihazlar takip etmektedir. Flip-çip teknolojisiyle Safir alt tabakaya sahip cihazlarda da ısı direnç düşürülebilmektedir [3]. Güç yükselteç kullanan pek çok sistem kararlı rejim koşullarından ziyade darbeli koşulda çalıştırıldığı için cihazın zamana bağlı cevabını öğrenmek de aynı şekilde önem arz etmektedir [29]. Şekil 14'te SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip tekli AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörün 2 W güçte ve 0,5 μs darbe genişliğinde zamana bağlı ısı cevabı görülmektedir.



Şekil 12. SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörde güce bağlı değişen sıcaklık değerleri
(Device temperature in AlGaIn/GaN HEMT grown on SiC substrate as a function of power)



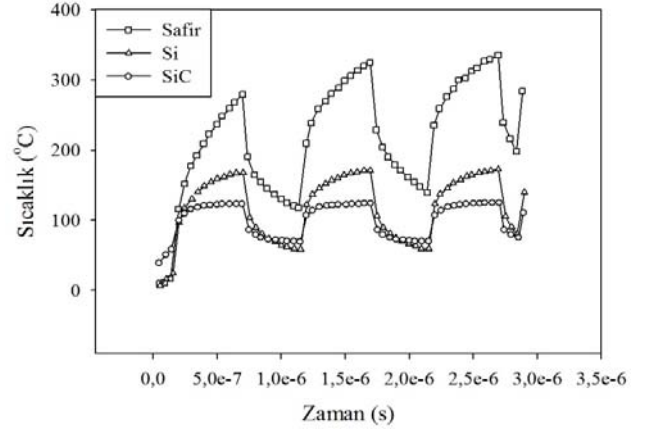
Şekil 13. SiC alt tabakaya sahip AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörde 2 W güte 3 boyutlu sıcaklık dağılımı
(3-D Temperature distribution of AlGaIn/GaN HEMT grown on SiC substrate at 2 W power)

Şekil 14'te görüldüğü üzere, ilk birkaç nanosaniyede cihaz sıcaklığının zamana bağlı değişimi adyabatik ısınmayla domine edilirken sonrasında ısı yayılımının etkisi görülmektedir [30]. Cihaz açıldığında, başlangıçta adyabatik

ısınma ve ısı yayılımının etkisiyle cihaz sıcaklığı artmakta, kapatıldığında hızlı bir şekilde başlangıç sıcaklığına dönmektedir. Yüksek ısı iletkenlikten dolayı en düşük sıcaklık SiC alt tabakaya sahip cihazda görülmekte ve kararlı rejim sıcaklığına hızlı bir şekilde ulaşmaktadır, bunu sırasıyla Si ve Safir alt tabakaya sahip cihazlar takip etmektedir. Alt tabakanın ısı iletkenliği arttıkça cihazın kanal sıcaklığı darbeleri koşulunda daha kararlı olmaktadır.

Tablo 2. Farklı alt tabakalarda transistörün toplam ısı direnç değerleri
(Thermal Resistances of AlGaIn/GaN HEMTs on Different Substrates)

Alt tabaka malzemesi	Alt tabaka kalınlığı (µm)	Kanal Uzunluğu (µm)	Isıl Direnç (°C/W)
Safir			158,04
Si	200	0,45	53,50
SiC			26,26



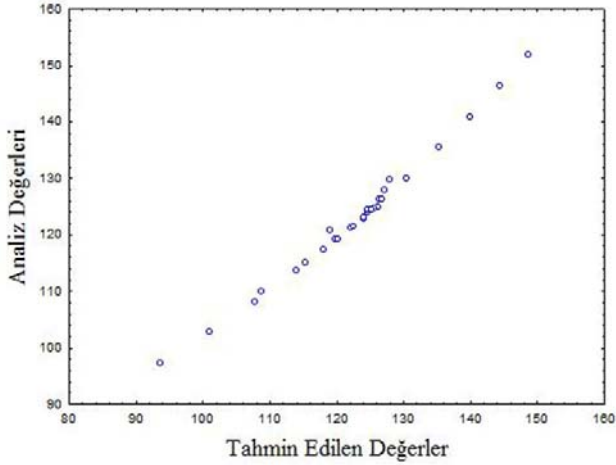
Şekil 14. SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörde 0,5 µs darbe genişliğinde zamana bağlı sıcaklık değerleri
(Device temperature of AlGaIn/GaN HEMTs grown on Sapphire, Si and SiC substrate as a function of time for 0,5 µs pulse width)

Analiz sonuçlarına göre, gücün, kanal uzunluğunun, kanal genişliğinin, alt tabaka kalınlığının (SiC için fonksiyonu olarak sıcaklık ifadesi Eş. 10'daki gibi tanımlanmıştır. Bu denklemdeki katsayılar ve katsayıların standart sapması Tablo 3'te verilmiştir. Analiz değerleri ve tahmin edilen değerlerin ilişkisi Şekil 15'te görülmektedir.

$$T = aP^b L^c W^d t^k \quad (10)$$

Tablo 3. Sıcaklık ifadesindeki katsayıların tahmin edilen değerleri ve standart sapmaları
(Estimated Values and Standard Errors of Coefficients in Temperature Expression)

Tahmin Edilen Değer	Standart Sapma Değerleri
a	47,63618
b	0,42120
c	-0,00456
d	0,08592
k	0,03657



Şekil 14. Analiz değerlerinin ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması
(Comparison of observed and predicted temperature values)

5. SİMGELER (SYMBOLS)

A	: Alan (m^2)
C_p	: sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
L	: tabaka kalınlığı (m)
k	: ısıl iletkenlik (W/mK)
T	: sıcaklık (K)
P	: güç (W)
Q	: ısı akısı (W/m^2)

5.1. Yunan Harfleri (Greek Letters)

α	: ısıl difüzyon hızı (m^2/s)
θ	: ısıl direnç ($^{\circ}C/W$)
ρ	: yoğunluk (kg/m^3)

5.2. Alt İndis (Subscript)

D	: yayılan
kanal	: kanal sıcaklığı
n	: x-, y- ve z- yönleri
taban	: taban sıcaklığı
top	: toplam
z	: z-yönü

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip AlGaIn/GaN yüksek elektron hareketli transistörlerin ısıl davranışı nümerik olarak incelenmiştir. 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ticari bir yazılım paketi yardımıyla hazırlanmış, farklı cihaz modelleri için kararlı ve kararsız rejimde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları Raman spektroskopisi yöntemiyle alınan sonuçlarla uyum içindedir. Modelin doğrulanmasının ardından, tüm alt tabakalar için alt tabaka kalınlığı, kanal uzunluğu, kanal genişliği ve güç gibi parametrelerin kanal sıcaklığına etkisi incelenmiştir. Geniş güç bandında çalışan transistörler yüksek güç yoğunluğunda çalıştığı için, diğer yarı iletken

teknolojileriyle kıyaslandığında, verilen transistör ve sistem şartları için belirtilen ısıl direncin doğruluğu çok daha önem kazanmaktadır [29]. Bu nedenle, SiC, Si ve Safir alt tabakalara sahip cihazlardaki ısıl direnç değerleri geliştirilen model için belirlenmiştir. Bu değerler Safir alt tabakaya sahip cihazda $158^{\circ}C/W$, Si alt tabakaya sahip cihazda $53,5^{\circ}C/W$ ve SiC alt tabakaya sahip cihazda $26,3^{\circ}C/W$ 'dir. Buna ek olarak, mikrometre altı darbe genişliğinde cihazın zamana bağlı performansı da incelenmiş ve farklı alt tabakalar için sunulmuştur. Sunulan simülasyon sonuçlarına göre, SiC alt tabakaya sahip GaN cihazının en iyi ısıl performansa sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu cihaz için kanal sıcaklığı; gücün, kanal uzunluğunun, kanal genişliğinin ve alt tabaka kalınlığının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Çalışma sonuçlarının yüksek güç teknolojisinde etkili ısıl yönetim ve güvenilirliği sağlayacak cihaz optimizasyonu için faydalı olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bhunia A., Boutros K., Chen C.-L., High Heat Flux Cooling Solutions for Thermal Management of High Power Density Gallium Nitride HEMT, Inter Society Conference on Thermal Phenomena, Las Vegas-Amerika, 75-81, 2004.
2. Vitusevich S. A., Kurakin A. M., Klein N., Petrychuk M. V., Naumov A. V., Belyaev A.E., AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor Structures: Self-Heating Effect and Performance Degradation, IEEE Trans. on Device And Materials Reliability, 8 (3), 543-548, 2008.
3. Kuball M., Pomeroy J. W., Simms R., Riedel G. J., Ji H., Sarua A., Uren M. J., Martin T., Thermal Properties and Reliability of GaN Microelectronics: Sub-Micron Spatial and Nanosecond Time Resolution Thermography, 2007 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, Oregon-Amerika, 1-4, 2007.
4. Simms R. J. T., Pomeroy J. W., Uren M. J., Martin T., Kuball M., Channel Temperature Determination in High Power AlGaIn/GaN HFETs Using Electrical Methods and Raman Spectroscopy, IEEE Trans. on Electron Devices, 55 (2), 478-482, 2008.
5. Darwish A. M., Bayba A. J., Hung H. A., Thermal Resistance Calculation of AlGaIn-GaN Devices, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 52 (11), 2611-2620, 2004.
6. Freeman J. C., Channel Temperature Model for Microwave AlGaIn/GaN Power HEMTs on SiC and Sapphire, 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Texas-Amerika, 2031-2034, 2004.
7. Heller E. R., Crespo A., Electro-Thermal Modeling of Multifinger AlGaIn/GaN HEMT Device Operation Including Thermal Substrate Effects, Elsevier, Microelectron. Reliab., 48 (1), 45-50, 2008.
8. Ahamd I., Kasisomayajula V., Holtz M., Berg J. M., Kurtz S. R., Tigges C.P., Allerman A. A., Baca A. G., Self-heating study of an AlGaIn/GaN-based heterostructure field-effect transistor using ultraviolet micro-Raman scattering, Appl. Phys. Lett., 86 (17), 173503-173503-3, 2005.

9. Guo, H., Chen, T., & Shi, S., Transient Simulation for the Thermal Design Optimization of Pulse Operated AlGa_N / GaN HEMTs of effects, *Micromachines*, 76 (11), 2020.
10. Brocero, G., Guhel, Y., Eudeline, P., Sipma, J. P., Gaquière, C., & Boudart, B., Measurement of Self-Heating Temperature in AlGa_N / GaN HEMTs by Using Cerium Oxide Micro-Raman Thermometers, *IEEE Trans. On Electron Devices*, 66 (10), 4156–4163, 2019.
11. Dundar, C., & Donmezer, N. (2019). Thermal Characterization of Field Plated AlGa_N / GaN HEMTs, 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Nevada-Amerika, 755–760, 2019.
12. Joh J., del Alamo J. A., Chowdhury U., Chou T. M., Tserng H. Q., Jimenez J. L., Measurement of Channel Temperature in GaN High-Electron Mobility Transistors, *IEEE Trans. On Electron Devices*, 56 (12), 2895-2901, 2009.
13. Cutivet, A., Pavlidis, G., Hassan, B., Bouchilaou, M., Rodriguez, C., Soltani, A., Graham S., Boone F., Maher, H., Scalable Modeling of Transient Self-Heating of GaN High-Electron-Mobility Transistors Based on Experimental Measurements, *IEEE Trans. On Electron Devices*, 66 (5), 2139–2145, 2019.
14. Wu M., Ma X.-H., Yang L., Zhang M., Zhu Q., Zhang X.-C., Hou B., Zheng X.-F., Hao Y., Investigation of the nanochannel geometry modulation on self-heating in AlGa_N / GaN Fin-HEMTs on Si, *Appl. Phys. Lett.*, 115 (8), 083505, 2019.
15. Aubry R., Jacquet J.-C., Weaver J., Durand O., Dobson P., Mills G., Di Forte-Poisson M.-A., Cassette S., Delage S.-L., SThM temperature mapping and nonlinear thermal resistance evolution with bias on AlGa_N/GaN HEMT devices, *IEEE Trans. Electron Devices*, 54 (3), 385-390, 2007.
16. Singhal S., Brown J.D., Borges R., Piner E., Nagy W., Vescan A., Gallium Nitride on Silicon HEMTs for Wireless Infrastructure Applications, *Thermal Design and Performance, Gallium Arsenide Applications Symposium, GAAS 2002, Milano-İtalya*, 23-22 Eylül, 2002.
17. Oprins H., Das J., Ruythooren W., Vandersmissen R., Vandeveldel B., Germain M., Thermal Modeling of Multi-finger AlGa_N/GaN HEMT's, *Thermal Investigations of ICS and Systems Workshop, Belgirate-İtalya*, 71–75, 28-30 Eylül, 2005.
18. Prejs A., Wood S., Pengelly R., Pribble W., Thermal analysis and its application to high power GaN HEMT amplifiers, *IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium, Baston-Amerika*, 917–920, 7-12 Haziran, 2009.
19. Hosch M., Pomeroy J. W., Sarua A., Kuball M., Jung H., Schumacher H., Field Dependent Self-Heating Effects in High Power AlGa_N/GaN HEMTs, *CS MANTECH Conference, Florida-Amerika*, 18-21 Mayıs, 2009.
20. Park J., Shin M. W., Lee C.C., Thermal Modeling and Measurement of GaN-Based HFET Devices, *IEEE Electron Device Lett.*, 24 (7), 424-426, 2003.
21. Riccio M., Pantellini A., Irace A., Breglio G., Nanni A., Lanzieri C., Electro-thermal Characterization of AlGa_N/GaN HEMT on Silicon Microstrip Technology, *Microelectron. Reliab.*, 51 (9-11), 1725-1729, 2011.
22. Choi S., Heller E. R., Dorsey D., Vetury R., Graham S., Thermometry of AlGa_N/GaN HEMTs Using Multispectral Raman Features, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60 (6), 1898-1904, 2013.
23. Zhang R., Zhao W. S., Yin W. Y., Investigation on Thermo-Mechanical Responses in High Power Multi-Finger AlGa_N/GaN HEMTs, *Microelectron. Reliab.*, 54 (3), 575-581, 2014.
24. Russo S., d'Alessandro V., Costagliola M., Sasso G., Rinaldi N., Analysis of the Thermal Behavior of AlGa_N/GaN HEMTs, *Elsevier, Mater. Sci. Eng., B*, 177 (15), 1343-1351, 2012.
25. Darwish A. M., Hung H. A., Ibrahim A. A., AlGa_N/GaN HEMT with Distributed Gate for Channel Temperature Reduction, *IEEE Trans. on Microwave Theory And Tech.*, 60 (4), 1038-1043, 2012.
26. Nil M., Öztürk Y., Akgül M.B., Sarı G., Experimental and numerical studies on improvement of heat transfer of OLED TVs, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2017–2031, 2019.
27. ANSYS-Icepak. <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-icepak>. Erişim tarihi Şubat 25, 2019.
28. Lak A., Çalışır T., Başkaya Ş., Numerical investigation of flow and heat transfer on smooth surface using inclined impinging jet, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 165-176, 2019.
29. Prejs A., Wood S., Pengelly R., Pribble W., Thermal Analysis and Its Application to High Power GaN HEMT Amplifiers, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Baston-Amerika, Haziran*, 2009.
30. Kuball M., Riedel G. J., Pomeroy J. W., Sarua A., Uren M. J., Martin T., Hilton K. P., Maclean J. O., Wallis D. J., Time-Resolved Temperature Measurement of AlGa_N/GaN Electronic Devices Using Micro-Raman Spectroscopy, *IEEE Electron Device Lett.*, 28 (2), 86-89, 2007.