

Atf İçin: Dogan, H. (2024). Schottky Bariyer Diyotlarında Termal Tavlama İşleminin ANFIS ile Modellenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 696-705.

To Cite: Dogan, H. (2024). Modeling the Thermal Annealing Process of Schottky Barrier Diodes with ANFIS. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(2), 696-705.

Schottky Bariyer Diyotlarında Termal Tavlama İşleminin ANFIS ile Modellenmesi

Hülya DOĞAN

Öne Çıkanlar:

- Ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi
- Metal-yarıiletken Schottky diyotlar
- Tavlama sıcaklığının Anfis ile modellenmesi

ÖZET:

Bu çalışmada, Schottky bariyer diyotları (SBD'ler) için termal tavlama işleminin modellenmesi ve tahmin edilmesi için uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sisteminin (ANFIS) kullanılmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir. Laboratuvar ortamında Ni/n-GaAs/In Schottky bariyer diyotlar üretilmiş ve Schottky kontaklar üzerinden diyotun gerilim ve akım parametreleri 200⁰ C'den 600⁰ C'e kadar 100⁰ C sıcaklık adımları kullanılarak ölçüldü. SBD kontaktlarına ait gerilim, akım ve tavlama sıcaklığı parametreleri deneysel olarak elde edildi. Bu parametreler termal tavlama işleminin ana faktörleri olarak seçilmiştir. ANFIS sisteminin eğitimi için bu üç parametreyi içeren deneysel veriler kullanılmıştır. Deneysel verilerin eğitimi için genelleştirilmiş bell üyelik fonksiyonu içeren hibrit bir ANFIS modeli kullanıldı. Sonuçlara göre, Schottky bariyer diyotların tavlama sürecinin modellenmesinde önerdiğimiz ANFIS modeli verimli ve doğru sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler:

- Anfis
- Schottky
- Tavlama

Modeling the Thermal Annealing Process of Schottky Barrier Diodes with ANFIS

Highlights:

- Adaptive neuro fuzzy inference system
- Metal-semiconductor Schottky diodes
- Modeling the annealing temperature with Anfis

ABSTRACT:

In this work, a method for using adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) to model and predict the thermal annealing process for Schottky barrier diodes (SBDs) is proposed. Ni/n-GaAs/In Schottky barrier diodes were produced in the laboratory environment, and the voltage and current parameters of the diode were measured over Schottky contacts from to with steps of Voltage, current and annealing temperature parameters of SBD contacts were obtained experimentally. These parameters were chosen as the main factors of the thermal annealing process. Experimental data containing these three parameters were used to train the ANFIS system. A hybrid ANFIS model with a generalized bell membership function was used to train the experimental data. The result showed that the ANFIS model was an efficient and accurate model for the Schottky barrier diode.

Keywords:

- Anfis
- Schottky
- Annealing

Hülya DOĞAN ([Orcid ID: 0000-0002-5501-2194](https://orcid.org/0000-0002-5501-2194)), Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hülya DOĞAN, e-mail: hdogan@cumhuriyet.edu.tr

GİRİŞ

Schottky diyot, metal-yarıiletken doğrultucu kontak diyotudur (Sze and Mattis, 1970). Metal-yarıiletken Schottky diyotlar teknolojik açıdan önemli bir yere sahiptir. Çok hızlı anahtarlama kabiliyetine ve yüksek frekanslarda çalışma özelliğine sahip olan Schottky diyotlar, mikrodalga diyotlar, alan etkili transistörler (FET'ler), güneş pilleri, foto dedektörler dahil olmak üzere çok sayıda yarıiletken elektronik cihazın temelini oluşturur (Rhoderick, 1982; Tung, 2001). SBD'lerin engel yüksekliğinin termal tavlamaya karşı davranışı hem bilimsel hem de teknolojik açıdan ilgi görmektedir (Robinson, 1985; Van Meirhaeghe, 1994). Termal tavlama dolayısı ile metal yarıiletken arayüzeyinde kinetik işlemler meydana gelebilir. Tavlama sırasında metal yarıiletken arayüzeyinde; arayüzey difüzyonu, kimyasal reaksiyonlar, kirlilikler, yeni bileşikler ve yeni kusurlar ortaya çıkabilir (Yıldırım et. al, 2018; Dogan et. al, 2008; Cheung and Cheung, 1986). SBD'ların karakteristik parametrelerinin performansları büyük ölçüde Schottky metali ile yarı iletken yüzey arasındaki arayüzeyin kalitesi tarafından belirlenir (Dogan et. al, 2008). Metal yarı iletken diyotların kararlılığını ve performansını artırmak için en çok tercih edilen yöntem, yarı iletken alt tabakanın yüzeylerinde gerekli metal kontaktlar oluşturulduktan sonra metal-yarı iletken yapının termal tavlama işlemidir.

Termal tavlama, Schottky bariyer diyotlarının termal stabilitesini araştırmak için önemli bir işlemdir. Bu işlem SBD'ler için çeşitli tavlama sıcaklık değerleri için yapılabilir. Ancak termal tavlamanın birçok farklı sıcaklık değeri için gerçekleştirilmesi zordur. Çünkü ölçümler yüksek maliyetli teknoloji gerektirir ve çok zaman alır. Ayrıca bu tür deneylerde cihazların düzgün çalışmaması veya kişilerden kaynaklanan hatalardan dolayı deneysel veriler kaybolabilmektedir. Kaybolan verileri kurtarmak oldukça karmaşık bir süreçtir.

Uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), akım ve gerilim ölçüm değerleri kullanılarak SBD'lerin modellenmesinde literatürde sıkça kullanılmaktadır (Jang, 1993). Bu modeller yardımıyla SBD için farklı koşullarda ve geniş toleranslarda ölçüm yapıldıktan sonra, aynı malzemenin farklı ölçüm yapılmayan koşullarda elektriksel özelliklerinin (gerilim-akım parametreleri) belirlenmesi gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum maliyet ve işçilikten tasarruf sağlamaktadır. Böylece ANFIS modeli sayesinde Schottky bariyer diyotunun veri kaybı veya eksikliği durumunda gerilim-akım karakteristik değerleri elde edilebilmektedir.

Bahsedilen modelleme avantajını değerlendirmek için, nispeten düşük tavlama sıcaklıklarında bile GaAs üzerinde oldukça reaktif olan soy metallerine yakın metal grubunu temsil eden Nikel elementini bir SBD kontak metali oluşturmak için kullanıldı. [Brillson, 1982; Zu et. al, 2004; Sands, 1989;Lahav et al. 1986; Sands et al 1988]. N₂ atmosferinde 1 dakikalık adımlarla tavlama yapılan Ni/n-GaAs/In Schottky diyotların termal stabilitesi incelendi. Her tavlama sıcaklığı adımı için Schottky diyotunun akım ve gerilim parametreleri ölçüldü. Daha sonra ANFIS modeli oluşturmak için tavlama sıcaklığı, gerilim ve akım parametreleri kullanıldı. Özellikle bu modelde gerilim ve sıcaklık giriş iken akım çıkış olarak belirlendi.

Bu çalışmada, Schottky bariyer diyotları için termal tavlama işleminin modellenmesinde ANFIS kullanıldı. 200⁰ C'den 600⁰ C'e kadar 100⁰ C sıcaklık adımları kullanılarak SBD'lerin tavlama gerçekleştirildi ve Schottky kontaktlar üzerinden diyotun gerilim ve akım parametreleri ölçüldü. Akım, gerilim ve sıcaklık değerleri ANFIS modelinin giriş ve çıkışlarını besleyecek şekilde tasarım gerçekleştirildi. ANFIS modeli test ve eğitim aşamalarından geçirildi. En son kısımda ise katkılı ve tavlama işlemi gerçekleştirildi.

MATERYAL VE METOT

Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), doğrusal olmayan veya bulanık girdi ve çıktı verilerinin modellenmesi ve girdiye göre çıktının tahmin edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, belirli bir eğitim veri setini taklit etmek amacıyla bulanık çıkarım sistemi üyelik fonksiyonu parametrelerini eğitmek için hibrit iniş yöntemini kullandı. ANFIS sistemi, sinir ağlarını ve bulanık çıkarım sistemini içeren bir sistem olarak tasarlanmıştır.

ANFIS ilk olarak 1993 yılında Jang tarafından tanıtıldı (Jang, 1993). ANFIS, Takagi-Sugeno çıkarım modelini temel alan bir çıkarım modeli içerir (Takagi and Sugeno, 1983; Takagi and Sugeno, 1985). Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemlerinin sonuç parametrelerini tanımlamak için hibrit bir öğrenme algoritması kullanır.

Bu çalışmada, ele alınan bulanık çıkarım sisteminin iki girişi x ve y ve bir çıkışı z olduğunu varsayıyoruz. x ve y sıcaklık ve gerilim iken z ise akım olarak sisteme tanıtıldı. Birinci dereceden bir Sugeno bulanık modeli için, iki bulanık eğer-o halde kuralından oluşan ortak bir kural seti aşağıdaki gibidir:

Kural 1: Eğer (x , A_1 ise) ve (y , B_1 ise) o zaman $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Kural 2: Eğer (x , A_2 ise) ve (y , B_2 ise) o zaman $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

Burada p_1, p_2, q_1, q_2, r_1 ve r_2 doğrusal parametrelerdir ve A_1, A_2, B_1 ve B_2 doğrusal olmayan parametrelerdir.

ANFIS yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir ve burada aynı katmandaki düğümler benzer işlevlere sahiptir. Sistemin tamamı beş katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar bulanıklaştırma katmanı, ürün katmanı, normalleştirilmiş katman, durulaştırma katmanı ve çıktı katmanıdır. Bunlar aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

Katman 1 bulanıklaştırma katmanıdır. Bu katmanda x ve y sırasıyla A_1, B_1 ve A_2, B_2 düğümlerinin girdisidir. A_1, A_2, B_1 ve B_2 , bulanık teoride üyelik fonksiyonlarını bölmek için kullanılan dilsel etiketlerdir. Bu katmanın çıkış ve giriş fonksiyonları arasındaki üyelik ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), i = 1, 2 \quad (1)$$

$$O_{1,j} = \mu_{B_j}(y), i = 1, 2$$

Burada $O_{1,i}$ ve $O_{1,j}$ çıkış fonksiyonlarını, μ_{A_i} ve μ_{B_j} ise üyelik fonksiyonlarını göstermektedir.

Katman 2, Π etiketli iki düğümden oluşan ürün katmanıdır. W_1 ve W_2 çıktıları bir sonraki katmanın ağırlık fonksiyonlarıdır. Bu katmanın çıktısı girdinin çarpımıdır. Aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), i = 1, 2 \quad (2)$$

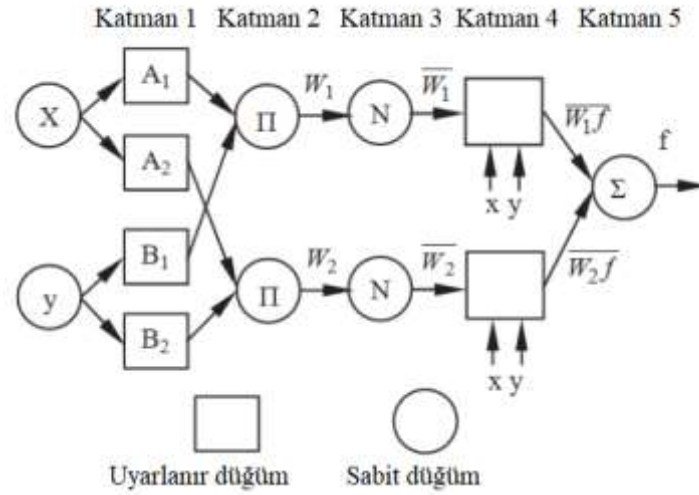
Burada $O_{2,i}$, katman 2'nin çıktısıdır.

Katman 3 düğümleri N olarak etiketlenen normalleştirilmiş katmandır. Bu katmanın işlevi aşağıdaki süreçte ağırlık fonksiyonunu normalleştirmektir.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (3)$$

Burada $O_{3,i}$, Katman 3'ün çıktısıdır.

4. katman durulaştırma katmanıdır. Bu katmandaki düğümler uyarlanabilir düğümlerdir. Bu katmanın girdileri ve çıktıları arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanabilir.



Şekil 1. ANFIS Modeli

$$O_{4,i} = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i), i = 1, 2 \quad (4)$$

Burada $O_{4,i}$, Katman 4'ün çıktısıdır. P_i , q_i ve r_i ise düğümün doğrusal parametreleridir.

Katman 5, düğümü Σ olarak etiketlenen çıktı katmanıdır. Bu katmanın çıktısı, temizleme oranlarının sonuçlarını temsil eden girdilerin tüm bileşenlerinden oluşur. Çıktı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}, i = 1, 2 \quad (5)$$

Burada $O_{5,i}$, Katman 5'in çıktısıdır.

Deneysel prosedür

ANFIS sistemini modellemek için Ni/n-GaAs/In Schottky bariyer diyotunun Akım-Gerilim (I-V) karakteristikleri kullanılmıştır. Schottky diyot yapımında kullanılan n- tipi GaAs yarıiletkeni (Si katkılı), (100) yönelimli ve oda sıcaklığında $7.3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. n- GaAs yarıiletkeninin yüzeyinin organik kirlere arındırılması için kimyasal temizleme işlemi uygulandı. Bu temizleme işlemi için numune 5 dakika boyunca sırasıyla trikloroetilen, aseton ve metanol içerisinde ultrasonik olarak yıkandı. Bu işlemin ardından istenmeyen yabancı maddeleri gidermek için 1 dakika boyunca $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ (5:1:1) ile dağlandı ve daha sonra deiyonize su ile yıkandıktan sonra azot gazında (N_2) kurutma işlemi gerçekleştirildi. Temizleme prosedüründen sonra n- GaAs yarıiletkeninin parlak olmayan mat tarafına omik kontak işlemi için In (indiyum) metali termal buharlaştırma yöntemi ile kaplandı. Küçük dirençli ve dayanıklı bir omik kontak oluşturmak için numune, 300°C 'de azot gazı (N_2) ortamında 3 dakika süreyle ısıtılma işlemi gerçekleştirildi. Tavlama işleminden sonra numunenin parlak olan kısmına 1.5 mm çaplı maske yardımıyla Schottky kontaklar oluşturuldu. Bu kontak için Nikel (Ni) metali kullanıldı. Tüm buharlaştırma işlemleri, 10^{-5} Torr basınçlı kaplama ünitesinde ve termal tavlama işlemleri de N_2 atmosferindeki bir kuvars tüplü fırında gerçekleştirildi. Ni/n-GaAs/In Schottky diyotlarının oluşturulmasından sonra numune azot gazında 100°C 'lik adımlarla 200°C 'den 600°C 'ye kadar 1'er dakika ısıtılarak tavlandı. Her tavlama işleminden sonra Schottky diyotun (I-V) karakteristikleri, karanlıkta ve oda sıcaklığında Keithley 487 Picoammeter/Voltage kaynağı kullanılarak ölçüldü.

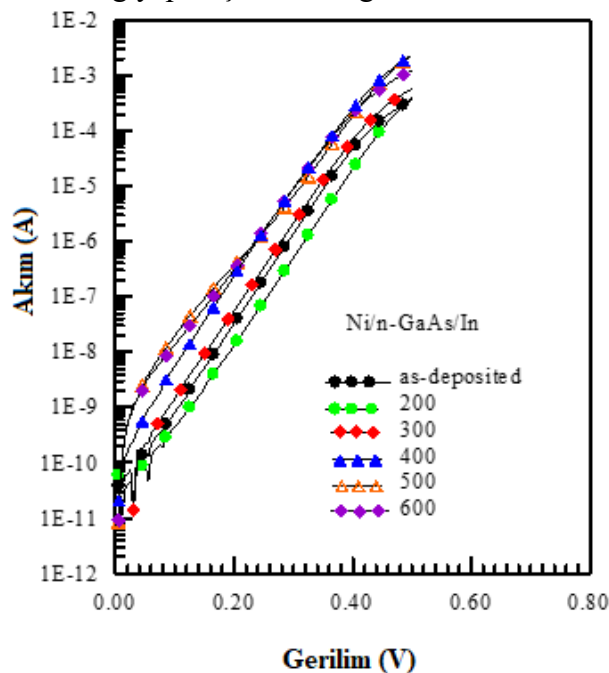
ANFIS model simülasyonu

Ni/n-GaAs/In Schottky diyotlar farklı sıcaklık dereceleri için tavlandı ve akım-gerilim değerleri Keithley 487 cihazı ile kaydedildi. Deneysel veriler giriş ve çıkışı olarak ANFIS sistemi ile modellendi. ANFIS için verilerin oluşturulmasında Matlab yazılımını kullandı. ANFIS eğitim algoritması, Matlab yazılımının bulanık mantık araç kutusuna gömüldü (Matlab, 2009). Ayrıca ANFIS düzenleyici arayüzü kullanışlı ve esnek olduğu için tercih edildi. ANFIS çalışma akışını şu şekilde ifade edebiliriz. ANFIS dört görevi içerir: Veri Yükleme, İlk FIS Yapısını Oluşturma veya Yükleme, FIS'i Eğitim ve Eğitilen FIS'i Doğrulama

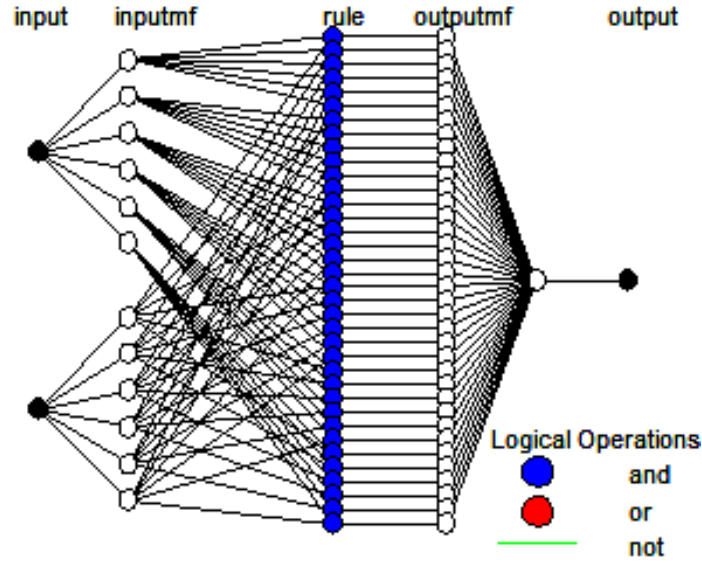
Bir FIS'i eğitmek için, modellenecek sistemin istenen giriş/çıkış verilerini içeren bir veri seti yükleyerek başlamalıyız. ANFIS sisteminin modellenmesine yönelik deneysel veriler üç parametre içermektedir. Bu parametreler sıcaklık, gerilim ve akımdır. Bu parametreler için 3 sütun ve 1500 satırdan oluşan bir veri bloğu oluşturduk. Giriş verileri sıcaklık ve voltajdır, çıkış verileri ise akımdır. Deneysel veriler üç bölüme ayrılmıştır. Birinci, ikinci ve üçüncü kısımlar sırasıyla eğitim, test ve veri kontrolüdür. Verileri yükledikten sonra grafikte görüntülenir. FIS eğitimine başlamadan önce başlangıç FIS model yapısını belirlememiz gerekiyor. Model yapısını belirlemek için aşağıdaki görevlerden birini gerçekleştirin: Daha önce kaydedilmiş bir Sugeno tipi FIS yapısını yükleyin veya İlk FIS modelini oluşturun. Verileri yükleyip ilk FIS yapısını oluşturduktan sonra FIS'i eğitebiliriz. Ancak öncelikle Optimizasyon Yöntemi, Adımlar ve Hata Toleransı belirlenmelidir. FIS eğitildikten sonra, test Etmeyi veya veriyi kontrol etmeyi kullanarak modeli doğrulayabiliriz. Bu çalışmada, model test ve eğitim aşmalarından geçirildikten sonra, SBD için çıktı tahmini gerçekleştirildi.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Araştırmamızda Schottky Bariyer Diyotlarının ANFIS modelinin gerçekleştirmek için MATLAB ANFIS editör araç kutusu kullanıldı. Hibrit ağı modellemek için Şekil 2'de gösterilen deneysel veriler kullanıldı. Şekil 2'de 200⁰ C'den 600⁰ C'e kadar 100⁰ C sıcaklık adımlarla tavlanan ve tavlınmayan Ni/n-GaAs/In Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri gösterilmektedir. Önceki bölümde deneysel veriler ANFIS modelinin oluşturulmasından ve özelliklerinden bahsedildi. ANFIS modeli oluşturulduktan sonra bu modele ait ağ yapısı Şekil 3'de gösterilmektedir.

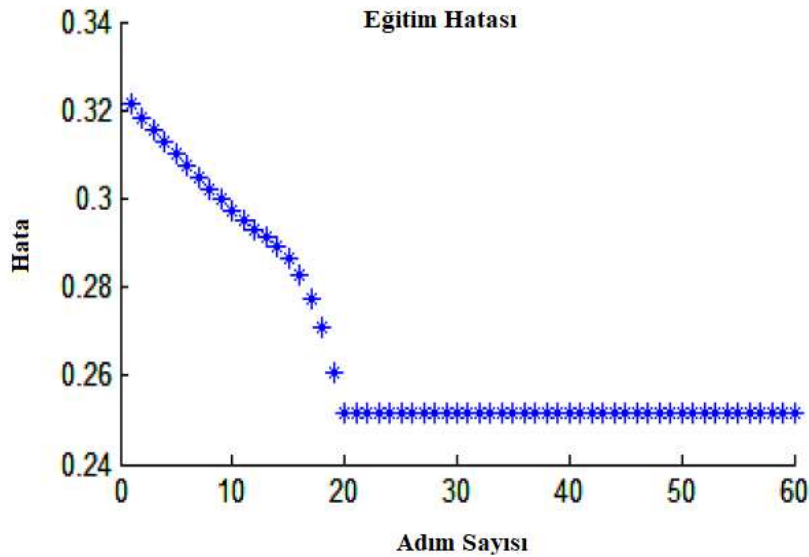


Şekil 2. Deneysel Akım-Gerilim Karakteristikleri



Şekil 3. Hibrit Ağ Yapısı

Hibrit eğitim yöntemi, en küçük kareler ve geriye yayılım yönteminin bir kombinasyonudur. Hata toleransı ve adım sayısı sırasıyla sıfır ve 60 olarak seçilmiştir. Yaklaşık 60 eğitim adımı sonunda, kök ortalama kare hatası Şekil 4'te gösterildiği gibi sabit hale gelmiştir. Bu hata bu model için minimumdur. Çünkü model her tür üyelik fonksiyonu (trimf, trapmf, gbellmf vb.) ve optimizasyon yöntemi ile eğitilmiştir. Denemelerden sonra eğitim hatası minimize edilmiştir.

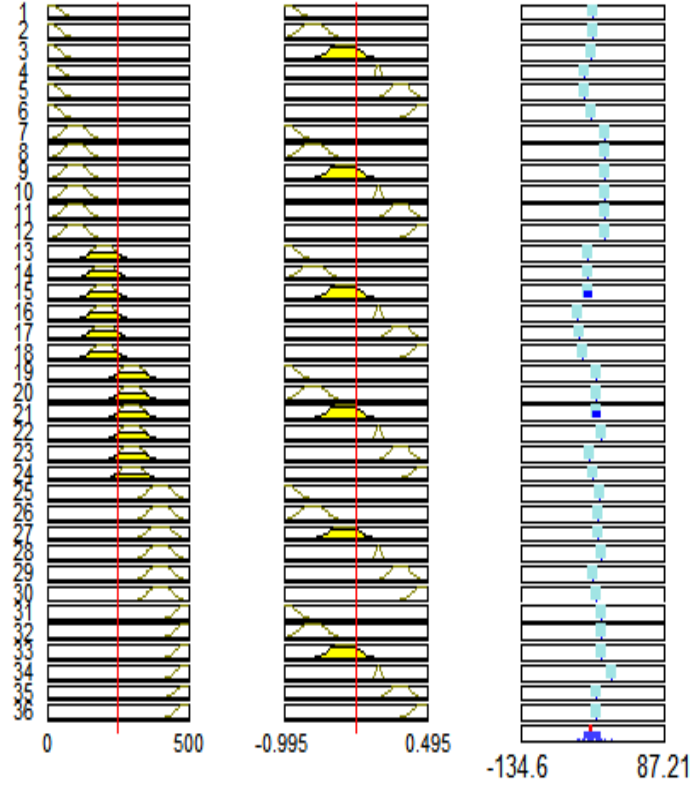


Şekil 4. Eğitim Hatası

Bu model için aşağıdaki kurallar belirlenmiştir:

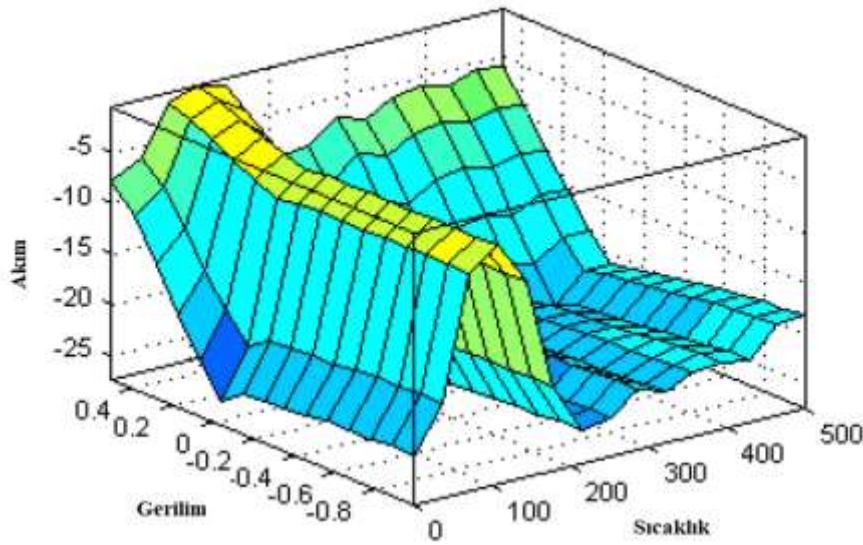
1. (sıcaklık küçük1) ve (gerilim küçük1) ise (akım= $p_1 * \text{sıcaklık} + q_1 * \text{gerilim} + r_1$)
2. Eğer (sıcaklık küçük1) ve (gerilim küçük2) ise (akım= $p_2 * \text{sıcaklık} + q_2 * \text{gerilim} + r_2$)
3. Eğer (sıcaklık küçük1) ve (gerilim orta1) ise (akım= $p_3 * \text{sıcaklık} + q_3 * \text{gerilim} + r_3$)
4. Eğer (sıcaklık küçük1) ve (gerilim orta2) ise (akım= $p_4 * \text{sıcaklık} + q_4 * \text{gerilim} + r_4$)
5. Eğer (sıcaklık küçük1) ve (gerilim büyük1) ise (akım= $p_5 * \text{sıcaklık} + q_5 * \text{gerilim} + r_5$)
6. Eğer (sıcaklık küçük1) ve (gerilim büyük2) ise (akım= $p_6 * \text{sıcaklık} + q_6 * \text{gerilim} + r_6$)
31. Eğer (sıcaklık büyük2) ve (voltage küçük1) ise (akım= $p_{31} * \text{sıcaklık} + q_{31} * \text{voltage} + r_{31}$)
32. Eğer (sıcaklık büyük2) ve (gerilim küçük2) ise (akım= $p_{32} * \text{sıcaklık} + q_{32} * \text{gerilim} + r_{32}$)

33. Eğer (sıcaklık büyük2) ve(gerilim orta1) ise (akım= $p_{33} * \text{sıcaklık} + q_{33} * \text{gerilim} + r_{33}$)
 34. Eğer (sıcaklık büyük2) ve(gerilim orta2) ise (akım= $p_{34} * \text{sıcaklık} + q_{34} * \text{gerilim} + r_{34}$)
 35. Eğer (sıcaklık büyük2) ve (gerilim büyük1) ise (akım= $p_{35} * \text{sıcaklık} + q_{35} * \text{gerilim} + r_{35}$)
 36. Eğer (sıcaklık büyük2) ve (gerilim büyük2) ise (akım= $p_{36} * \text{sıcaklık} + q_{36} * \text{gerilim} + r_{36}$)
 Bu modele ilişkin tüm kurallar Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Hibrit Ağın Kuralları

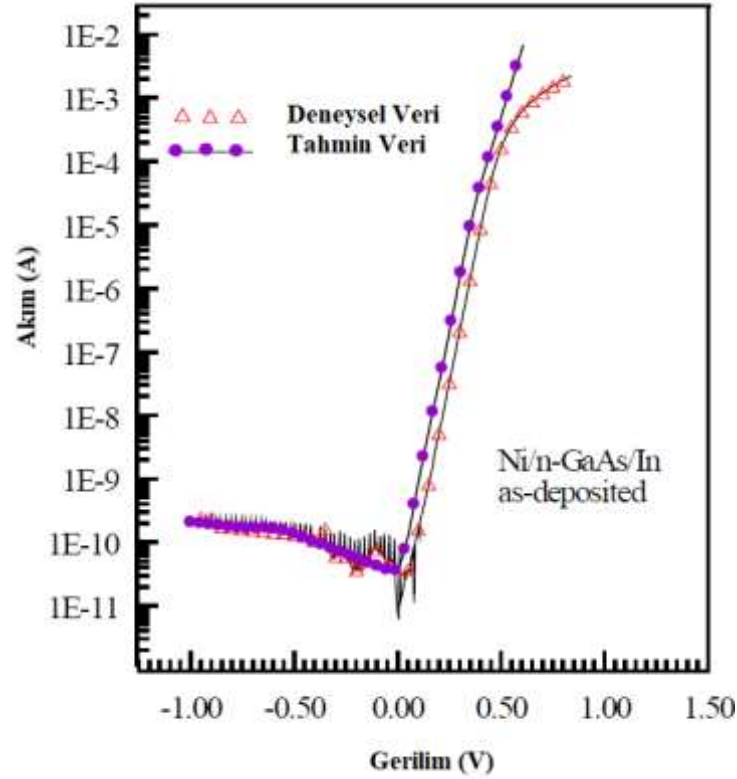
Giriş 1 (tavlama sıcaklığı), giriş2 (gerilim) ve çıkış (akım) parametrelerinin yüzeyi Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'ya göre oldukça karmaşık bir model oluşmuştur.



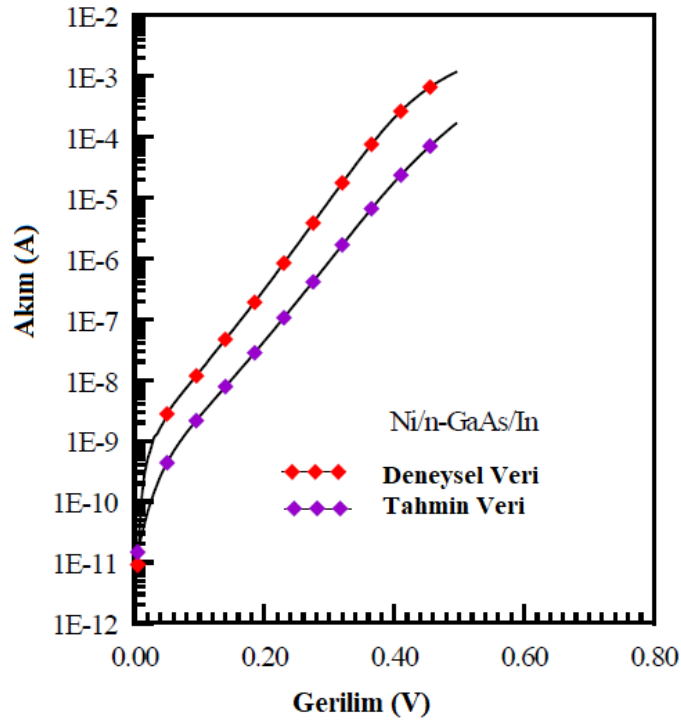
Şekil 6. Anfis Model Yüzeyi

Son olarak eğitim sürecinin ardından tahmin için eğitilen ANFIS modeli kullanıldı. ANFIS'te termal tavlamanın tahmini, Matlab yazılımının evalfis fonksiyonu kullanılarak sağlandı. Şekil 7, Ni/n-GaAs/In Schottky Bariyer Diyotunun ileri ve geri besleme I-V karakteristiklerinin hem deneysel hem

de tahmin değerlerini göstermektedir. Bu sonuçlara ek olarak 600°C 'de tavllanmış Ni/n-GaAs/In SBD'nin ileri besleme I-V karakteristiği verileri de tahmin edildi. 600°C tavlama sıcaklığı için tahmin edilen ve deneysel veriler Şekil 8'de gösterilmektedir.



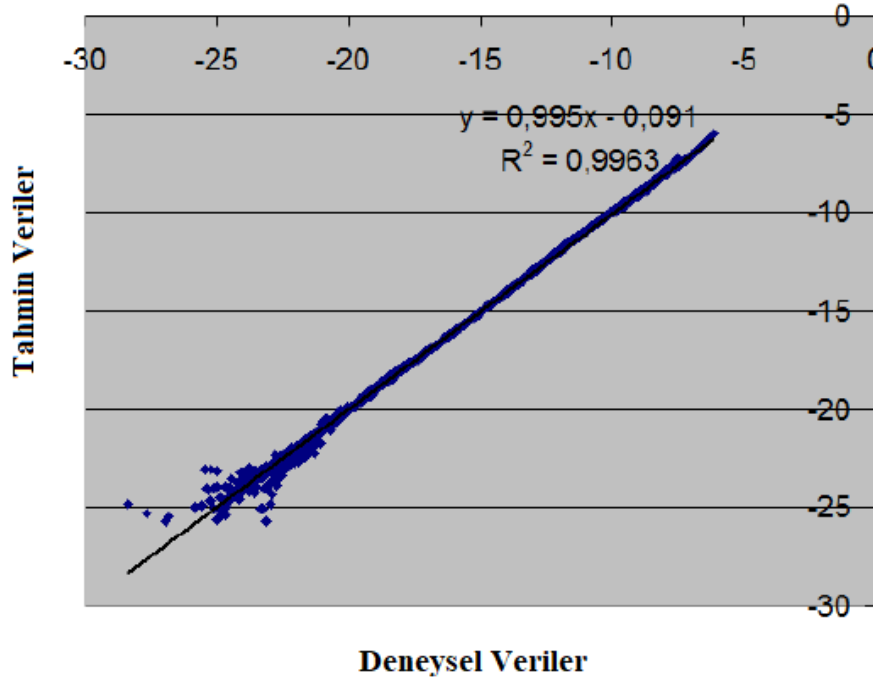
Şekil 7. Ni/n-GaAs/In Schottky Diyotun İleri ve Geri Besleme IV Karakteristiği



Şekil 8. 600°C Tavlama Sıcaklığı İçin Deneysel ve Tahmin Edilen I-V Karakteristiği

Şekil 9, ANFIS modelinin tahmin edilen değerlerinin ve deneysel değerlerinin dağılım diyagramlarını göstermektedir. Şekil 9'dan tüm veri noktalarının $y=x$ çizgisine yakın dağıldığı

görülebilir. Verilerin uyum eğrisi $y=0,995x-0,091$ olduğundan eğim ve kesişme oranı 1 ve 0'a çok yakındır. Yani tahmin edilen değerler akımın deneysel değerlerine çok yakındır.



Şekil 9. ANFIS Modeli İçin Tahmin Edilen ve Deneysel Verilerin Dağılım Diyagramı

Son olarak ANFIS'in tahmin doğruluğu oldukça yüksektir. ANFIS yöntemi ile deneysel veriler ile tahmin edilen veriler arasındaki ilişki, bu yöntemin Schottky Bariyer Diyotların termal tavlama sürecini tahmin etmek ve modellemek için güçlü bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Ni/n-GaAs/In SBD'ler farklı sıcaklık adımlarında tavlama süreci ve elde edilen I-V karakteristik değerleri kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak tavlama süreci ANFIS ile modellenmiştir. Ardından deneysel veriler ve tahmin edilen veriler karşılaştırılmıştır. Hem grafiksel eğriler hem R^2 değerinin bire yakın olması modelin başarısını göstermektedir. Sonuç olarak ANFIS modelinin performansı, fiziksel tavlama deneylerindeki belirsizlikleri en aza indirmek için iyi bir yaklaşımdır. Yukarıdaki açıklamalardan ve tartışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1.Schottky bariyer diyotlarının termal stabilitesi ve termal tavlama süreci, deneysel veriler olmadan deneysel denemelerden önce tahmin edilebilmektedir.

2.Bu model sayesinde Schottky bariyer diyotunun gerilim-akım eğrileri farklı tavlama sıcaklıklarında çizilebilmektedir.

3.Belirsizlikler ve kayıp veriler ANFIS modeli kullanılarak hesaplanabilmektedir.

4.Termal tavlama işlemi daha hızlı ve daha kolay yapılabilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesinde emeği geçen Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT'e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Brillson, L.J., (1982). *Metal-semiconductor interfaces, Surf. Sci.*, 299-300:909-927.
- Cheung, S.K., Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49 (2): 85–87.
- Doğan, H., Yıldırım, N., Turut, A. (2008). Thermally annealed Ni/n-GaAs (si)/In Schottky barrier diodes, *Microelectronic engineering*, 85(4): 655-658.
- Interfaces (Ed: C.W. Wilmsen), *Plenum Press, NewYork*, pp. 73–163, <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4835-1>.
- Jang, J. S. R., (1993) ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, 23: 665-685.
- Jang, J., (1993). *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 23(3):665.
- Lahav, A., Eizenberg, M., Komem, Y. (1986) *J. Appl. Phys.* 60:991.
- Rhoderick, E.H. (1982). Metal-semiconductor contacts, *IEE Proc. I Solid State Electron Devices*, 129 1-14. <https://doi.org/10.1049/ip-i-1.1982.0001>.
- Robinson, G. Y. (1985) *Physics and Chemistry of III–V Compound Semiconductor*
- S. Zhu, Van Meirhaeghe R.L, Forment S, Ru GP and Li BZ, *Solid-State Electron.* 48,29 (2004).
- Sands, T. (1989). *Mater. Sci. Eng.* B1, 289.
- Sands, T., Chan, W.K., Chang, C.C., Chase, E.W., Keramidas, V.G. (1988). *Appl. Phys. Lett.*, 52.
- Sze, S.M., Mattis, D.C. (1970). *Physics of semiconductor devices, Physics Today*, 23(6):75. <https://doi.org/10.1063/1.3022205>.
- Takagi, T., Sugeno, M., (1983) *Proceeding of IFAC Symposium Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis, Marseilles, France*, p. 55.
- Takagi, T., Sugeno, M., (1985) *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 15:116.
- Tung, R. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 35(1):1-138. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(01\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00037-7).
- Van Meirhaeghe, R. L., Laflère W. H. and Cardon, F. (1994) *J. Appl. Phys*, 76: 403-406. <https://doi.org/10.1063/1.357089>.
- Yıldırım N, Turut A And Dogan H. (2018) Current–Voltage Characteristics Of Thermally Annealed Ni/N-Gaas Schottky Contacts. *Surface Review and Letters*, 25: 1850082.
- Zhu, S., Van Meirhaeghe, R. Forment, S., Ru, G., Li, B. (2004). Effects of the annealing temperature on Ni silicide/n-Si(100) Schottky contacts. *Solid-State Electronics*. 48: 29-35.