

Termoelektrik yarıiletkenlerin P-N elektriksel iletkenlik tipinin belirlenmesine yönelik çok fonksiyonlu prob tasarımı

The design of multi-functional probe for determining the P-N electrical conductivity type of thermoelectric semiconductors

Serkan DİŞLİTAŞ^{1*}, Hilmi YANMAZ², Günay ÖMER³, Raşit AHISKA⁴

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye.

serkandislitas@hitit.edu.tr

²Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye.

hilmiyanmaz@hitit.edu.tr

³TES Ltd. Şti. Ankara, Türkiye.

gunayomer84@gmail.com

⁴Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

rasitahiska@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 02.02.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 16.08.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.33239

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, termoelektrik (TE) yarıiletkenlerin P-N elektriksel iletkenlik tiplerinin belirlenmesi amacıyla, temelini Seebeck etkisine dayanan Hot-Probe metodunun oluşturduğu çok fonksiyonlu bir prob tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tip belirleme işlemi, TE yarıiletkenin yüzeyleri arasında sıcaklık farkının (ΔT) oluşturulmasıyla üretilen Seebeck geriliminin (termoemk) pozitif veya negatif genlikli olma durumuna göre yapılmaktadır. Geliştirilen prob sayesinde, hem sıcaklık farkının oluşturulmasına yönelik gerekli ısıtma hem de termoemk gerilimi ve sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre; geliştirilen prob ile termoemk ölçümlerinin 0-30 mV aralığında ± 0.1 mV doğrulukta, sıcaklık ölçümlerinin ise 0-75 °C aralığında ± 1 °C doğrulukta yapılabildiği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen çok fonksiyonlu prob ile TE yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik tipleri P veya N olarak pratik, hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Termoelektrik, Yarıiletken, Hot-Probe metodu, Seebeck, Elektriksel iletkenlik tipi

Abstract

In this study, a multi-functional probe was designed and implemented to determine P-N electrical conductivity type of thermoelectric (TE) semiconductors according to Hot-Probe method based on the Seebeck effect. The type determination operation is performed according to the positive or negative amplitude of the Seebeck voltage (thermoemf) produced by forming the temperature difference (ΔT) between the surfaces of the TE semiconductors. Using the developed probe it is possible to provide both necessary heating and measurement of the thermoemf voltage and temperature. As a result of experimental studies; it has been shown that the thermoemf measurements can be made in ± 0.1 mV accuracy in 0-30 mV range and the temperature measurements can be ± 1 °C in 0-75 °C range. In conclusion, with the developed multifunctional probe, electrical conductivity type of TE semiconductors can be determined as P or N practically, quickly and reliably.

Keywords: Thermoelectric, Semiconductor, Hot-Probe method, Seebeck, Electrical conductivity type

1 Giriş

Çevre ve enerji sorunlarının arttığı günümüzde termoelektrik (TE) yarıiletkenler ve bunlara bağlı teknolojilerin önemi artmaktadır. TE yarıiletkenlerin elde edilmesi, özelliklerinin araştırılması, çeşitli cihaz ve sistemlere uyarlanması amacıyla yarıiletken teknolojileri alanında dünyada geniş çapta araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle TE modülü oluşturan yarıiletkenlerin elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel şekilde diziliminde P-N elektriksel iletkenlik tipleri büyük öneme sahiptir. TE yarıiletkenler çok küçük boyutlarda ve benzer görünüme sahip olduklarından, P-N tipinin gözle ve elle belirlenmesi mümkün olamamaktadır. Bu açıdan TE yarıiletken P-N tipinin hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenmesine yönelik yeni sistemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuş ve zaman içerisinde Hot-Probe metodu [1]-[6], Hall-Effect metodu [7],[8], 4-point probe metodu [9],[10] gibi çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bu yöntemler içerisinde Seebeck etkisi prensibine dayanan Hot-Probe metodu, diğer metotlara göre daha pratik, hızlı ve kullanışlıdır [3],[5],[6].

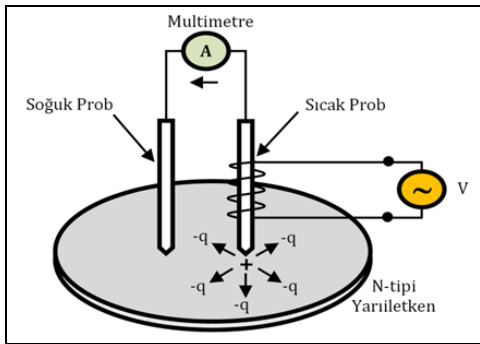
Hot-Probe metodu ile ilgili literatür incelendiğinde; Akter ve diğ. [1] harici ısıtıcı plaka, sıcaklık kontrolörü, termokupl ve voltmetre yardımıyla manuel olarak çalışan bir Hot-Probe ölçüm düzeneği oluşturarak, silisyum numunelerin elektrik özelliklerini araştırmışlardır. Benzer şekilde literatürde, yığın ve ince film yarıiletkenlerin elektriksel ve ısıl özelliklerinin araştırılması amacıyla, manuel olarak çalışan Hot-Probe ölçüm düzenekleri kurularak çeşitli çalışmalar yapılmıştır [2]-[6].

Literatürde TE yarıiletken iletkenlik tipinin belirlenmesi için gerekli ısıtma ve ölçme işlemlerinin kısmen veya tamamen manuel olarak yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, TE yarıiletken elektriksel iletkenlik tipinin otomatik olarak belirlenmesi amacıyla Hot-Probe metodunu kullanan çok fonksiyonlu özel bir prob tasarlanmış ve mikrodenetleyici tabanlı bir prototip geliştirilerek, çalışır ve kullanılabilir bir ürün haline getirilmiştir. Geliştirilen çok fonksiyonlu prob sayesinde, tip belirleme için gerekli olan ısıtma işleminin yanı sıra termoemk ve sıcaklık ölçümlerinin otomatik olarak yapılması sağlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1.1 Hot-Probe metodu

Temel mantığı Seebeck etkisine dayanan, biri sıcak diğeri soğuk iki prob ile bir multimetreden oluşan Hot Probe metodunun temel prensip şeması Şekil 1'de görülmektedir. Bu metotta sıcak ve soğuk prob lar sırasıyla multimetrenin (+) ve (-) terminallerine bağlanmaktadır. Sıcak ve soğuk prob lar TE yarıiletken numunenin farklı yüzeylerine dokundurulduğunda, sıcaklık farkına bağlı olarak bir termoemk gerilimi oluşmaktadır. Bu termoemk gerilimi TE yarıiletkenin sahip olduğu Seebeck katsayısına bağlı olarak negatif veya pozitif genlikli olabilmektedir. Seebeck katsayısı P-tipi TE yarıiletkenler için pozitif, N-tipi TE yarıiletkenler için ise negatif genlikli olduğundan dolayı, multimetrede görülen pozitif veya negatif gerilime göre TE yarıiletkenin P-tipi veya N-tipi olduğu belirlenmektedir [3],[5].



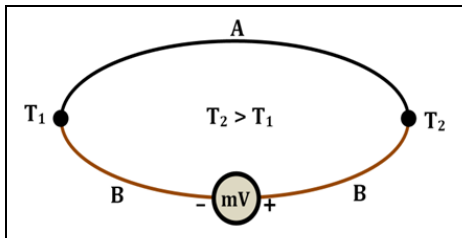
Şekil 1: Hot-Probe temel prensip şeması.

2.1.2 Seebeck etkisi

Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck 1821 yılında, A ve B gibi farklı iletkenler kullanılarak oluşturulan seri devrede (Şekil 2), iletkenlerin birleşim noktalarına birbirinden farklı T_1 ve T_2 sıcaklıkları uygulandığında iletken uçlarında termoemk veya Seebeck gerilimi olarak adlandırılan bir potansiyel farkı meydana geldiğini bulmuştur. ΔT sıcaklık farkıyla doğru orantılı olarak meydana gelen bu termoemk (E);

$$E = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada α , Seebeck katsayısı yani termoelektrik güç (thermopower) olup birimi V/K'dir [11]-[14].



Şekil 2: TE yarıiletkende Seebeck etkisi.

2.1.3 Termoelektrik yarıiletkenler

Seebeck katsayısı (α) 100 $\mu\text{V}/\text{K}$ 'den büyük yarıiletkenlere TE yarıiletken adı verilmektedir. TE özelliği yüksek yarıiletkenlere Bizmut (Bi), Antimon (Sb), Selenyum (Se) ve Telleryum (Te) örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 vb. bileşimler ile $\text{Bi}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Se}_3$, $\text{Sb}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Te}_3$ gibi alaşımların da TE özelliği oldukça yüksektir. Dünyada soğutucu ve jeneratörlerin üretiminde genellikle Seebeck katsayısı 200-240

$\mu\text{V}/\text{K}$ arasında değişen $\text{Bi}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ve $\text{Sb}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Te}_3$ gibi alaşımlar kullanılmaktadırlar [15]-[18].

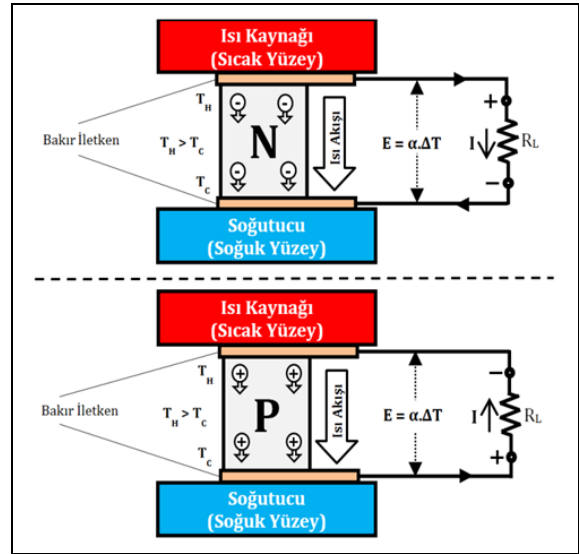
İyi bir TE yarıiletkende aranan özellikler şu şekilde sıralanabilir [19]:

- Gereken gerilimi sağlamak için yüksek Seebeck katsayısına (α) sahip olmalıdır,
- İstenmeyen Joule ısısını (Joule, I^2R) azaltmak için çok iyi elektriksel iletkenliğe (σ) sahip olmalıdır,
- Isı kayıplarının azaltılması için düşük ısıl iletkenliğe (κ) sahip olmalıdır.

Seebeck katsayısı (α) değeri TE yarıiletkenin madde cinsine göre, işareti ise TE yarıiletkenin elektriksel iletkenlik tipine göre değişmektedir. Elektron fazlalığı olan N-tipi TE yarıiletken negatif Seebeck katsayılı iken, elektron eksikliği olan P-tipi TE yarıiletken ise pozitif Seebeck katsayılıdır [16]-[18].

2.1.4 TE yarıiletken elektriksel iletkenlik tipinin belirlenmesi

TE yarıiletken elektriksel iletkenlik tipinin belirlenmesine yönelik Şekil 3'te görülen TE devrede, sırasıyla R_L yüküne bağlı P-tipi ve N-tipi TE yarıiletkenler için ısı transfer yönüne bağlı olarak meydana gelen termoemk gerilimi ve akım yönü görülmektedir.



Şekil 3: TE yarıiletken elektriksel iletkenlik tipinin belirlenmesine yönelik Seebeck etkisine dayanan TE devre.

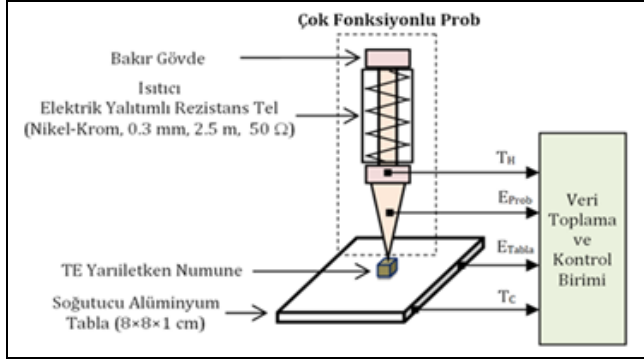
TE devrede P-tipi ve N-tipi TE yarıiletkenlerin üst yüzeyinden ısıtma, alt yüzeyinden soğutma yapılması durumunda yüzeyler arasında bir sıcaklık farkı (ΔT) meydana gelmekte ve üst yüzey bağlantı noktasından alt yüzey bağlantı noktasına doğru bir ısı transferi gerçekleşmektedir. Isı transferi yönüyle aynı yönde N-tipi yarıiletkende elektron akışı, P-tipi yarıiletkende ise deşik akışı meydana gelmektedir. Böylelikle TE devrede deşik akışıyla aynı yönde, elektron akışıyla ters yönde bir elektrik akımı (I) meydana gelmektedir. Bu durumda TE yarıiletkenin yüzeyleri arasında Denklem (1)'de görüldüğü gibi ΔT sıcaklık farkıyla doğru orantılı olarak bir termoemk gerilimi meydana gelmektedir. α değeri P-tipi TE yarıiletkenler için pozitif, N-tipi TE yarıiletkenler için negatif değerli olduğundan, TE yarıiletkenin tipine bağlı olarak elde edilen E termoemk gerilimi pozitif veya negatif genlikli olmaktadır. Sonuç olarak Seebeck etkisiyle elde edilen elektrik akımının yönüne bağlı

olarak ölçülen termoemk gerilimin pozitif veya negatif genlikli olmasına göre TE yarıiletkenin tipinin P veya N olduğu belirlenmektedir [20].

3 Tasarlanan sistem

3.1 Sistem yapısı

Şekil 4'te TE yarıiletken P-N tipinin belirlenmesi için geliştirilen sistemin prototipi ve genel tasarımı görülmektedir. Test sistemi genel olarak çok fonksiyonlu prob ile ana gövdede yer alan soğutucu tabla ve veri toplama ve kontrol birimlerinden oluşmaktadır.



(a): Genel tasarım şeması.



(b): Prototip.

Şekil 4: Sistemin genel. (a): Tasarım şeması ve (b): Prototip görünümü.

Tasarlanan sistemde, soğutucu tabla üzerindeki TE yarıiletkenin üst yüzeyine prob dokundurularak ısıtma yapılmaktadır. Bu sayede TE yarıiletkenin yüzeyleri arasında meydana getirilen ΔT sıcaklık farkına bağlı olarak üretilen E termoemk gerilimi yine prob ve tabla üzerinden ölçülmektedir. Sistemde çok fonksiyonlu prob hem ısıtma hem de negatif termoemk (E_{Prob}) ölçüm ucu olarak kullanılırken; alüminyum tabla ise hem soğutucu hem de pozitif termoemk (E_{Tabla}) ölçüm ucu olarak kullanılmaktadır. Hot-Probe metodundan farklı olarak, tasarlanan sistemde pozitif ve negatif termoemk bağlantıları farklı yapılmıştır. Bu sayede, α değerinin P-tipi için pozitif, N-tipi için ise negatif değerli olmasına bağlı olarak, termoemk ölçümleri ile elde edilen pozitif değerlerin P-tipi, negatif değerlerin ise N-tipi TE yarıiletkenleri ifade etmesi sağlanmıştır.

Yarıiletkenler üzerinde tip belirleme işlemi, soğutucu olarak kullanılan 8x8x1 cm ebadındaki alüminyum tabla üzerinde yapılmaktadır. TE yarıiletken alüminyum tabla üzerine konularak alt yüzeyin soğutulması sağlanmaktadır. Alüminyum tablanın hava ile teması sayesinde ortama bağlı soğutma yapılmaktadır.

Tip belirleme işleminin en önemli kısmını oluşturan fonksiyonel prob sayesinde, gerekli termoemk ve sıcaklık ölçümlerinin yanı sıra ısıtma işlemi yapılabilmektedir. Şekil 5'te tasarım şeması ve prototip fotoğrafları görülen prob, 3x15 cm boyutunda olup temel olarak bakır gövde üzerine sarılmış rezistans tel, sıcaklık sensörü, termoemk ölçüm bağlantısı, ısı ve elektriksel yalıtım malzemeleri ile plastik kılıftan oluşmaktadır. Ayrıca probun ucu, çapı 1.2 mm olan bir yarım küre şeklinde yapılmıştır. Buna göre milimetrik yarıiletken numuneler için bile probun etkili temas alanı sağlanmaktadır. Prob ucunun ısıtılması amacıyla, toplam 50 Ω değerine sahip, 2.5 m uzunluğunda ve 0.3 mm çaplı nikel-krom rezistans tel prob gövdesinin etrafına sarılmıştır. Rezistans telin elektriksel yalıtımı için hava kurumalı bobinaj verniği kullanılmıştır. Elektriksel yalıtım sayesinde rezistans telin termoemk gerilimi ölçümüne olan olumsuz etkileri ortadan kaldırılmış olmaktadır. Probun katmanları arasındaki elektriksel yalıtımın sağlanması ve dış kılıf olarak ısı daralan makaron kullanılmıştır. Probda meydana gelecek ısı kayıpların önlenmesi amacıyla da dış kılıfın altında izocam kullanılmıştır. Rezistans ısıtıcı tele 0-24 V DC uygulanarak, yaklaşık 0-12 W ısıtma gücü elde edilebilmektedir.

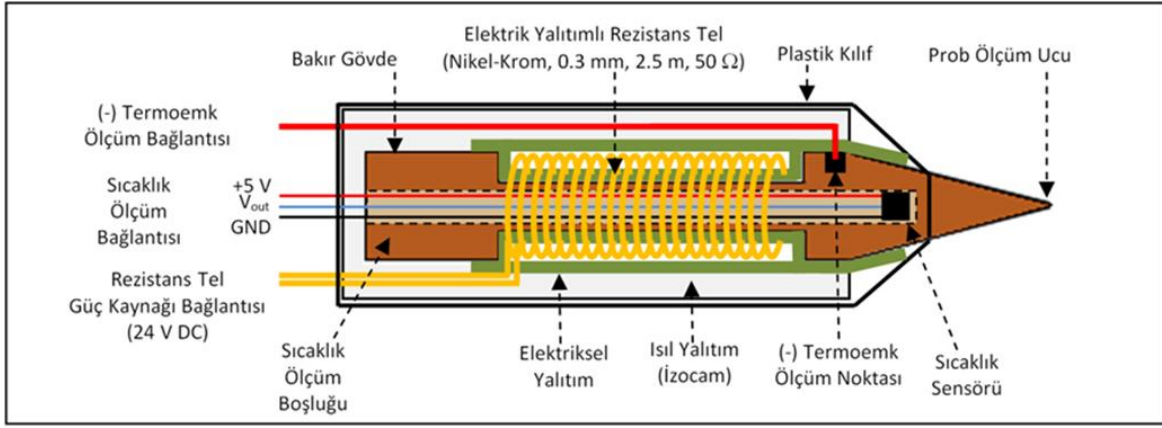
Çok fonksiyonlu prob üzerindeki sıcak yüzey sıcaklığı (T_H) ve soğutucu tabla üzerindeki soğuk yüzey sıcaklığı (T_C) ölçümlerinin yapılması amacıyla sistemde yarıiletken yapıya sahip LM35 sıcaklık sensörleri kullanılmıştır [21]. Sıcaklık ve termoemk ölçümleri probun uç noktasından, soğutucu tablanın ise orta kısmının arka iç tarafından yapılmaktadır. TE yarıiletken numuneye olan ölçüm mesafesi, probda 2 cm iken soğutucu tablada ise en fazla 4 cm'dir.

Sisteme yönelik veri toplama ve kontrol birimi, 16 MHz hızında 8-bitlik Atmega328P [22] mikrodenetleyici ile sıcaklık ve termoemk gerilim ölçümlerinin yapıldığı ölçüm biriminden oluşmaktadır. INA125P [23] enstrümantasyon amplifikatörü ile 124 kat yükseltilebilir termoemk gerilimi mikrodenetleyicinin 10 bit çözünürlüklü dahili analog girişine uygulanmaktadır. Sistemde E_{Prob} ve E_{Tabla} termoemk ölçüm değerleri ile T_H ve T_C sıcaklık ölçüm değerleri mikrodenetleyici tabanlı veri toplama ve kontrol biriminde toplanarak, TE yarıiletkenin tip belirleme işlemi gerçekleştirilmektedir.

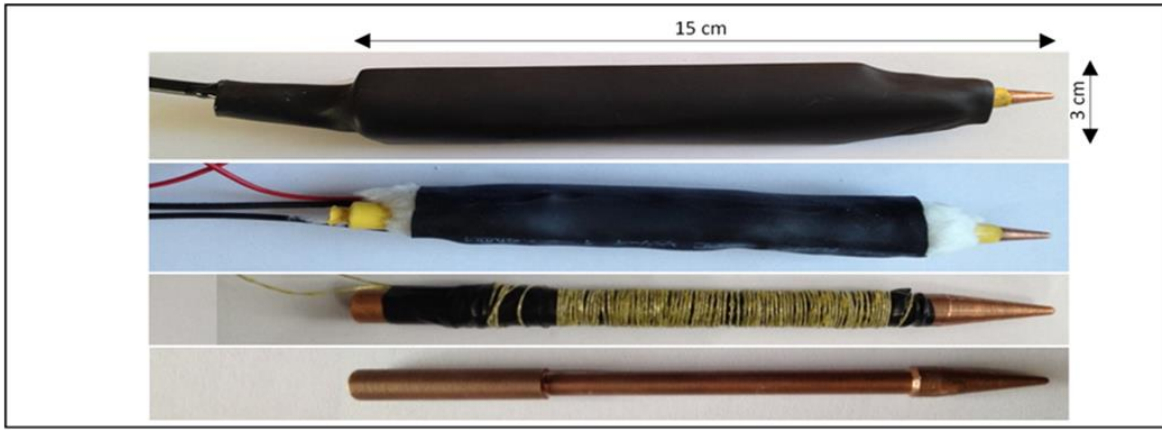
3.2 Sistemin çalışması

Kullanımı oldukça basit olan sistemin çalışmasına yönelik genel akış şeması Şekil 6'da görülmektedir. Sisteme enerji verilmesiyle birlikte prob ısınmaya başlar ve sistem ayarlarında belirlenen minimum prob sıcaklığı değerine bağlı olarak yaklaşık 30 s içerisinde test sisteminin kullanıma hazır olduğu sinyali verilir.

Sistemin çalışmasında, sürekli bir çevrim içerisinde T_H ve T_C sıcaklıkları ölçülüp, ΔT sıcaklık farkı yeterli oluncaya kadar ısıtıcı açılıp kapatılarak prob sıcaklığı kontrol edilmektedir. ΔT sıcaklık farkı yeterli olduğunda, TE yarıiletken tip belirleme işlemi yapılabilmektedir. Çok fonksiyonlu prob ucu soğutucu alüminyum tabla üzerindeki TE yarıiletken numuneye hafifçe dokundurduğunda, gerekli ölçümler otomatik olarak yapılarak 1 s gibi kısa bir süre içerisinde TE yarıiletken tipinin P veya N olduğu belirlenmektedir. Ölçülen termoemk (E) değeri pozitif genlikli olduğunda TE yarıiletkenin P-tipi, negatif genlikli olduğunda ise N-tipi olduğu belirlenmektedir. Geliştirilen sistemde prob ucu alüminyum tablaya doğrudan değdirilmemek kaydıyla prizmatik, silindirik ve film gibi farklı şekil ve boyutlardaki TE yarıiletken numunelerin tip belirleme işlemi yapılabilmektedir.

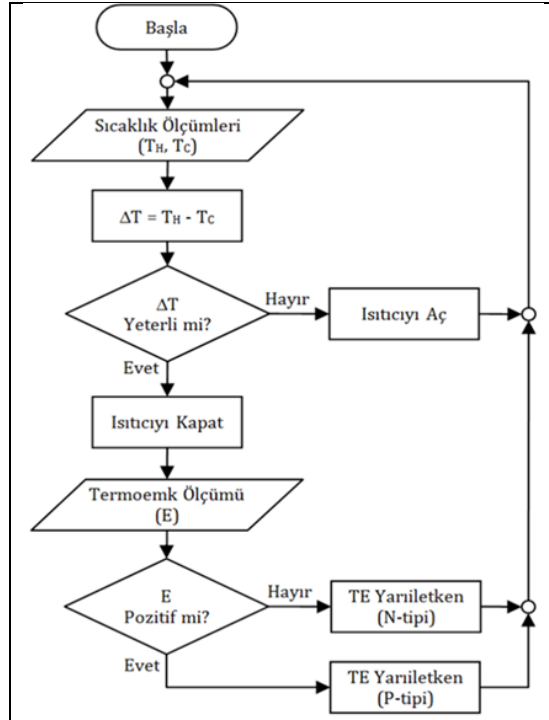


(a): Tasarım şeması.



(b): Prototip fotoğrafları.

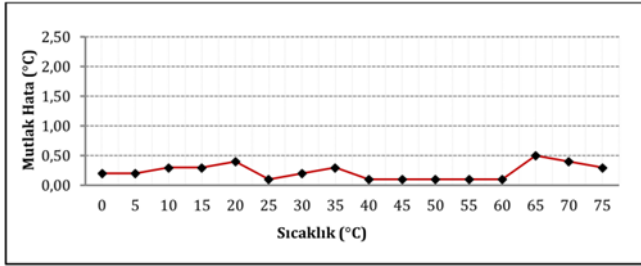
Şekil 5: Geliştirilen çok fonksiyonlu probun.



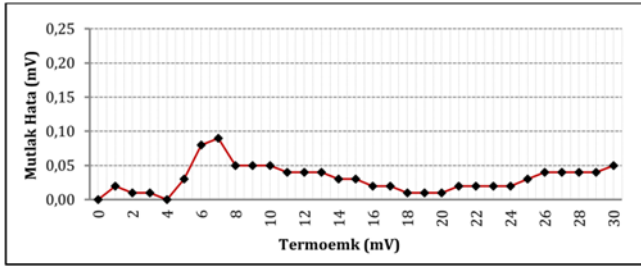
Şekil 6: Sistemin genel akış şeması.

4 Bulgular ve tartışma

Geliştirilen çok fonksiyonlu probda, TE yarıiletken elektriksel iletkenlik tipinin belirlenmesi için ölçüm yöntemiyle elde edilen sıcaklık ve gerilim verileri kullanılmaktadır. Geliştirilen probun termoemk ve sıcaklık ölçümlerine yönelik kalibrasyonu amacıyla, ölçülen değerler FLUKE 287 ölçüm cihazı [24] ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çok fonksiyonlu probun gerçekleştirilen performans testleri sonucuna göre; 12W gücünde ısıtma, 0-75 °C aralığında ± 1 °C doğrulukta sıcaklık ölçümü ve 0-30mV aralığında ± 0.1 mV doğrulukta termoemk ölçümü yapılabilmektedir. Çok fonksiyonlu probun sıcaklık ve gerilim ölçümüne bağlı mutlak hata değişimleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir.

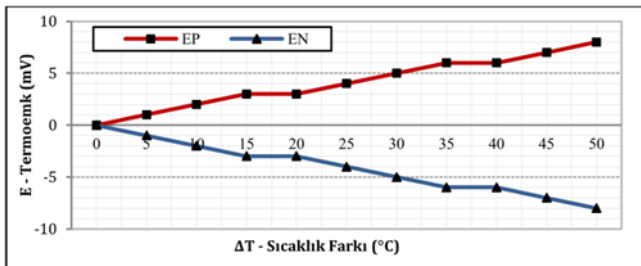


Şekil 7: Sistemde sıcaklık ölçümüne bağlı mutlak hata değişimi.



Şekil 8: Sistemde termoemk ölçümüne bağlı mutlak hata değişimi.

Çalışma kapsamında geliştirilen çok fonksiyonlu prob ile P-tipi ve N-tipi TE yarıiletkenlerin yüzeyleri arasındaki ΔT sıcaklık farkına bağlı olarak E termoemk gerilim değişimleri araştırılmıştır. Bu amaçla 1x1x1 mm ebatlı Bizmut-Tellür-Selenyum (BiTeSe) bileşiminden oluşan P-tipi TE yarıiletken ve Bizmut-Tellür-Antimon (BiTeSn) bileşiminden oluşan N-tipi TE yarıiletken kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Şekil 9'da P-tipi ve N-tipi TE yarıiletkenlerde ΔT 'ye bağlı E değişimleri görülmektedir. ΔT arttıkça E değerinin N-tipi TE yarıiletkeninde negatif yönde (E_N), P-tipi TE yarıiletkeninde ise pozitif yönde (E_P) arttığı görülmüştür.



Şekil 9: P-tipi (BiTeSe) and N-tipi (BiTeSn) TE yarıiletkeninde ΔT 'ye göre E değişimi.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, TE yarıiletken elektriksel iletkenlik tipinin otomatik olarak belirlenmesi için Hot Probe metodunu kullanan çok fonksiyonlu bir prob tasarımı yapılmış ve mikrodenetleyici tabanlı bir prototip geliştirilerek çalışır ve kullanılabilir bir ürün haline getirilmiştir. Geliştirilen prob ile P-N tip belirleme işlemlerinde, ölçülen termoemk değerinin büyüklüğünden çok negatif/pozitif genlikli olup olmadığı önemli olduğundan, ΔT sıcaklık farkına bağlı ölçüm hatalarının artması göz ardı edilebilmektedir. Bununla birlikte test işleminin 1 mV'tan büyük termoemk ve 5 °C'ten büyük sıcaklık farkı değerlerinde yapılması, düşük sıcaklıklarda olası tip belirleme hatalarının önüne geçecektir. Sistemde ölçüm hatalarının azaltılması ile daha düşük sıcaklık farklarında da test işlemi güvenilir bir şekilde yapılabilir.

Çok fonksiyonlu proba yönelik elde edilen deneysel sonuçlar, TE yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik tipinin P veya N olarak yarıiletkenin herhangi bir yere sabitlenmesine gerek kalmadan sadece prob ucunun dokundurulmasıyla pratik, hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenebileceğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarda, yaklaşık 30 s içerisinde kullanıma hazır hale gelen çok fonksiyonlu prob ile prizmatik, silindirik ve film gibi farklı şekil ve boyutlardaki TE yarıiletken numunelerin tiplerinin P veya N olarak 1 s gibi kısa bir süre içerisinde belirlendiği görülmüştür. Ancak numune kalınlığı arttıkça, tip belirleme işlemi için gerekli olan minimum sıcaklık farkının sağlanmasına bağlı olarak ölçüm süresi artmaktadır.

Sonuç olarak; geliştirilen çok fonksiyonlu prob sistemi, hem TE yarıiletkenler konusunda hem de TE modüllerin tasarımı, geliştirilmesi ve üretimi konusunda çalışmalar yapan araştırmacı ve üretici firmalara TE üretim kalitesinin artırılması, TE modül üretiminde montaj hatalarının önüne geçilmesi vb. konularda büyük katkı sağlayacaktır.

6 Semboller

E	: TE yarıiletken tarafından üretilen termoemk (V),
E_N	: N-tipi TE yarıiletkenin ürettiği termoemk (V),
E_P	: P-tipi TE yarıiletkenin ürettiği termoemk (V),
E_{Prob}	: Negatif termoemk ölçüm ucu,
E_{Tabla}	: Pozitif termoemk ölçüm ucu,
I	: TE yarıiletken akımı (A),
N	: N-tipi TE yarıiletken,
P	: P-tipi TE yarıiletken,
R_L	: Elektriksel yük direnci (Ω),
T_C	: TE yarıiletken soğuk yüzey sıcaklığı (°C),
T_H	: TE yarıiletken sıcak yüzey sıcaklığı (°C),
V	: TE yarıiletken gerilimi (V),
ΔT	: TE yarıiletken yüzeyler arası sıcaklık farkı (°C),
κ	: TE yarıiletkenin ısı iletkenliği ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$),
α	: TE yarıiletken Seebeck katsayısı ($V \cdot K^{-1}$),
σ	: TE yarıiletkenin elektriksel iletkenliği ($\Omega \cdot m$) ⁻¹ .

7 Kısaltmalar

DC	: Doğru Akım,
TE	: Termoelektrik.

8 Teşekkür

Bu çalışma Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: MYO01.13.001), TÜBİTAK TEYDEB (Proje No: 1511/1120014) ve NATO (Proje No: SFP 984536) tarafından desteklenmiştir.

9 Kaynaklar

- [1] Akter N, Afrin S, Hossion A, Kabir K, Akter S, Mahmood ZH. "Evaluation of majority charge carrier and impurity concentration using Hot Probe method for mono crystalline Silicon (100) wafer". *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE)*, 4(4), 13-21, 2015.
- [2] Akter N, Hossion MA, Hoq M, Rana SM, Anzan-Uz-Zaman M, Mia MNH, Kabir MA, Mahmood ZH. "Electrical characterization and doping uniformity measurement during crystalline silicon solar cell fabrication using hot probe method". *Engineering International*, 2(1), 38-42, 2014.
- [3] Axelevitch A, Golan G. "Hot-Probe method for evaluation of majority charged carriers concentration in semiconductor thin films". *Facta Universitatis Series: Electronics and Energetics*, 26(3), 187-195, 2013.
- [4] Kumar SR, Kasiviswanathan S. "A hot probe setup for the measurement of Seebeck coefficient of thin wires and thin films using integral method". *The Review of Scientific Instruments*, 79(2), 024302-1-4, 2008.
- [5] Golan G, Axelevitch A, Gorenstein G, Manevych V. "Hot-Probe method for evaluation of impurities concentration in semiconductors". *Microelectronics Journal*, 37(9), 910-915, 2006.
- [6] Zhou Y, Wang Y, Zhang J, Li Q. "Hot Probe Method for Measuring Thermal Conductivity of Copper Nanoparticles/Paraffin Composite Phase Change Materials". *Key Engineering Materials*, 561, 428-434, 2013.
- [7] Neamen DA. *Semiconductor Physics & Devices: Basic Principles*. 4th ed. New York, USA, Mcgraw-Hill, 2012.
- [8] Matsumura T, Sato Y. "A theoretical study on van der pauw measurement values of inhomogeneous compound semiconductor thin films". *Journal of Modern Physics*, 1(5), 340-347, 2010.
- [9] Kinder R, Mikolasek M, Donoval D, Kovac J, Tlaczala, M. "Measurement system with hall and a four point probes for characterization of semiconductors". *Journal of Electrical Engineering*, 64(2), 106-111, 2013.
- [10] Meydanyeri F, Saatçi B, Ari M. "Thermo-electrical characterization of Lead-Cadmium (Pb-Cd) alloys". *International Journal of Physical Sciences*, 7(48), 6210-6221, 2012.
- [11] Pollock DD. *Thermoelectric Phenomena*. Editor: Rowe DM. CRC Handbook of Thermoelectrics, 21-31, FL, USA, CRC Press, 1995.
- [12] Buist RJ. *Methodology for testing thermoelectric materials and devices*. Editor: Rowe DM. CRC Handbook of Thermoelectrics, 189-209, FL, USA, CRC Press, 1995.
- [13] Mamur H, Ahıska R. "Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators". *Energy Conversion and Management*, 97, 265-272, 2015.
- [14] Temizer İ, İlkılıç C. "İçten yanmalı dizel motorunun atık egzoz gazı enerjisi kullanılarak elektrik enerjisi üretimi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 330-336, 2017.
- [15] Fidan U. Mikrodenetleyici Kontrollü Taşınabilir Termoelektrik Tıp Kiti Cihazı Tasarımı ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2000.
- [16] Ahıska R, Güler NF, Savaş Y. "Termoelektrik soğutucusunun özelliklerinin araştırılması". *Politeknik Dergisi*, 2(3), 89-94, 1999.
- [17] Ökten E. Mikrodenetleyicili Sıcaklık ve Hız Kontrollü Termoelektrik Yarıiletken Üretim Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [18] Ahıska R, Güler E, Acar S, Kasap M. "Thermoelectric Characterization of N-type (Bi₂Te₃)Se₃ Semiconductors in a Temperature Range 11-373 K". *Gazi University Journal of Science*, 18(3), 481-487, 2005.
- [19] Möröydor E. Sb₂Te₃ ve Bi₂Te₃ İçerikli Bileşenlerin Termoelektrik, Yapısal ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [20] Tellurex Corporation. "Frequently Asked Questions about Our Power Generation Technology". <https://tr.scribd.com/document/151844647/seebeck-faq> (12.04.2019).
- [21] Texas Instruments. "LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, 2016". <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf> (11.01.2018).
- [22] Microchip Corporation. "8-bit AVR Microcontrollers". http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Summary.pdf (30.05.2018).
- [23] Texas Instruments. "Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference". <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf> (30.05.2018).
- [24] Fluke Corporation. "Fluke 287/287 True-rms Digital Multimeters User Manual, 2007". http://media.fluke.com/documents/287_289_umeng020_0.pdf (19.01.2018).