

# ELEKTRİKSEL DİRENÇ ÖLÇÜMLERİNDE İZLENEBİLİRLİK

Beylan Akyel, Handan Sakarya, Denizhan Ateşalp

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü(UME), P.K.21, 41470 Gebze / Kocaeli

## Özet

Direnç birimi, 1960 yılında kabul edilmiş olan fiziksel birim sistemi SI uyarınca,  $\Omega = s^{-3}m^2kgA^{-2}$  şeklinde, temel SI birimleri olan saniye, metre, kilogram ve amperden türetilmiş olarak ifade edilir. Bu birimin laboratuvarlarda gerçekleştirilmesi,  $10^{-7}$  mertebesinde belirsizlikle, 1960 yıllarında geliştirilmiş olan "hesaplanabilir kros-kapasite" yöntemiyle yapılabilmektedir.

1980 yılında Klaus von Klitzing tarafından geliştirilen Quantum-Hall etkisi yöntemi ise direnç biriminin  $10^{-8}$  mertebesinde belirsizlikle tekrarlanabilir, zaman ve mekandan bağımsız olarak üretilebilir olmasını sağlamıştır. Direnç biriminin laboratuvarlarda muhafazası ve çalışma standartlarına aktarılması ise kontrollü ortam şartlarında düzenli olarak ölçülerek izlenen standart direnç grupları vasıtasıyla yapılmaktadır. Direnç ölçümlerinde izlenebilirlik, çeşitli ölçüm yöntemleri kullanılarak, dirençlerin veya direnç ölçen cihazların, bu zincir üzerinden, 1.1.1990 tarihinden itibaren dünya çapında direnç referans standardı olarak baz alınması öngörülmesi olan Quantum-Hall direncine göre kalibre edilmesi ile sağlanmaktadır.

Bu çalışmada bu izlenebilirlik zinciri ve direnç ölçüm yöntemleri incelenmekte, ayrıca UME Direnç laboratuvarının imkanları hakkında bilgi verilmektedir.

## 1. Giriş

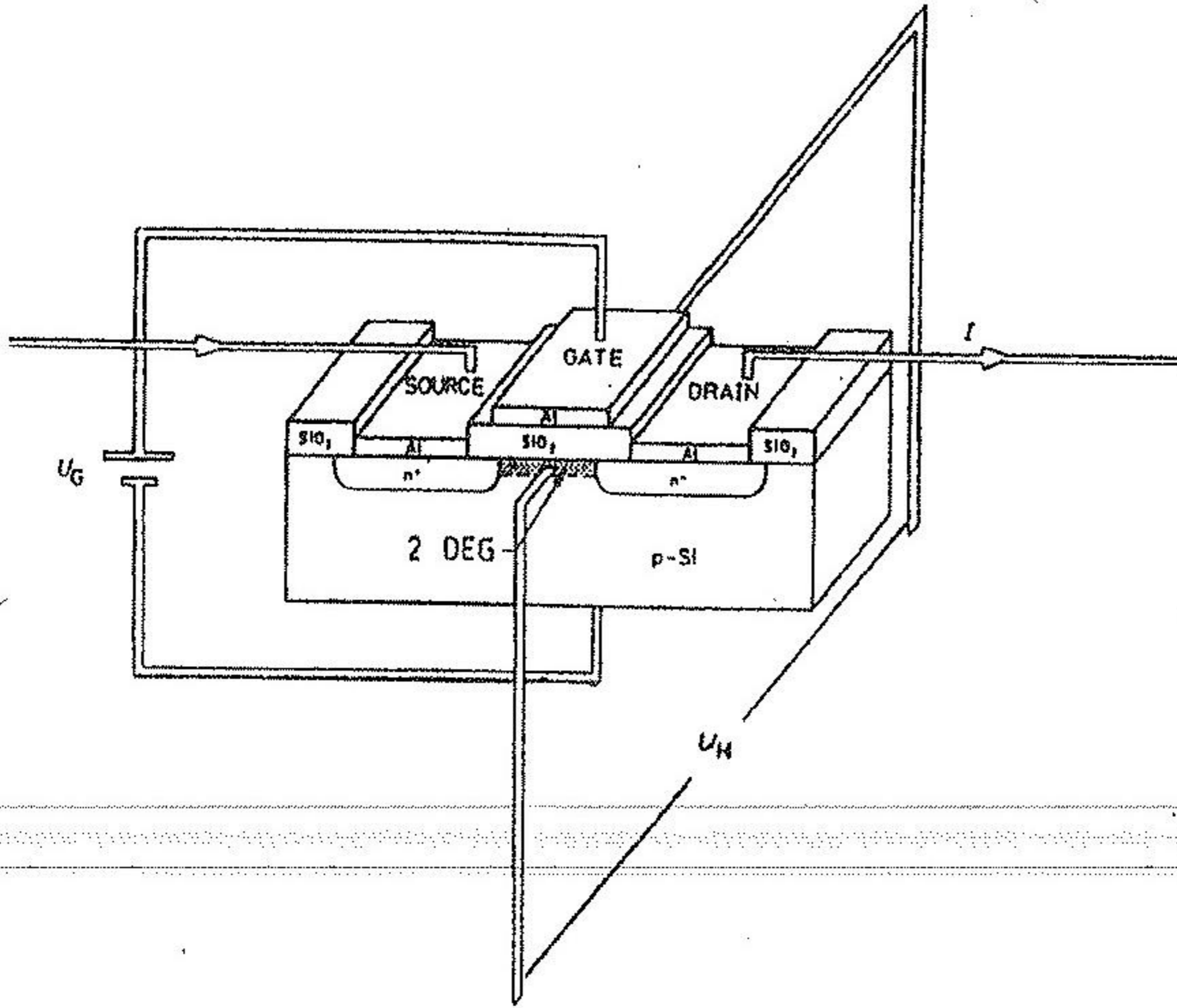
Ohm kanunu uyarınca, bir iletkenin iki ucu arasındaki potansiyel farkının, üzerinden geçen akıma oranına eşit olan direnç değeri, iletken malzemenin cinsine ve boyutlarına bağlıdır. Ancak, hassas ölçümler göstermiştir ki, sıcaklık ve hatta basınç farklılıkları bile direnç değeri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu faktörleri denkleme katmak yerine direncin sıcaklık ve basıncın fonksiyonu olduğu söylenir ve bir direncin değeri verilirken sıcaklık ve gerekiyorsa basınç değerleri de belirtilir.

Direncin sıcaklığa göre değişme özelliği sıcaklık ölçümlerinde, bir telin direncini önce bilinen sabit bir sıcaklıkta, sonra da bilinmeyen sıcaklıkta ölçüp karşılaştırmak şeklinde kullanılmaktadır. Direncin boyutlara göre değişmesi özelliğinden küçük uzaklıkların ölçümünde, basınca göre değişmesi özelliğinden ise sıvıların basınç ölçümlerinde yararlanılmaktadır. Ayrıca çok sayıda fiziksel ve kimyasal fenomen elektromotif kuvvet ölçümleri ile incelenmekte, elektromotif kuvvetlerin ölçümü ise direnç oranlarının ölçülmesi şeklinde yapılmaktadır. Elektrik akımı, bilinen bir direncin üzerinde okunan potansiyel farkı cinsinden ölçülmektedir. Gerçekte, elektriksel büyüklüklerin çoğunun ölçüm yöntemlerinde direnç ölçümleri yer almaktadır.

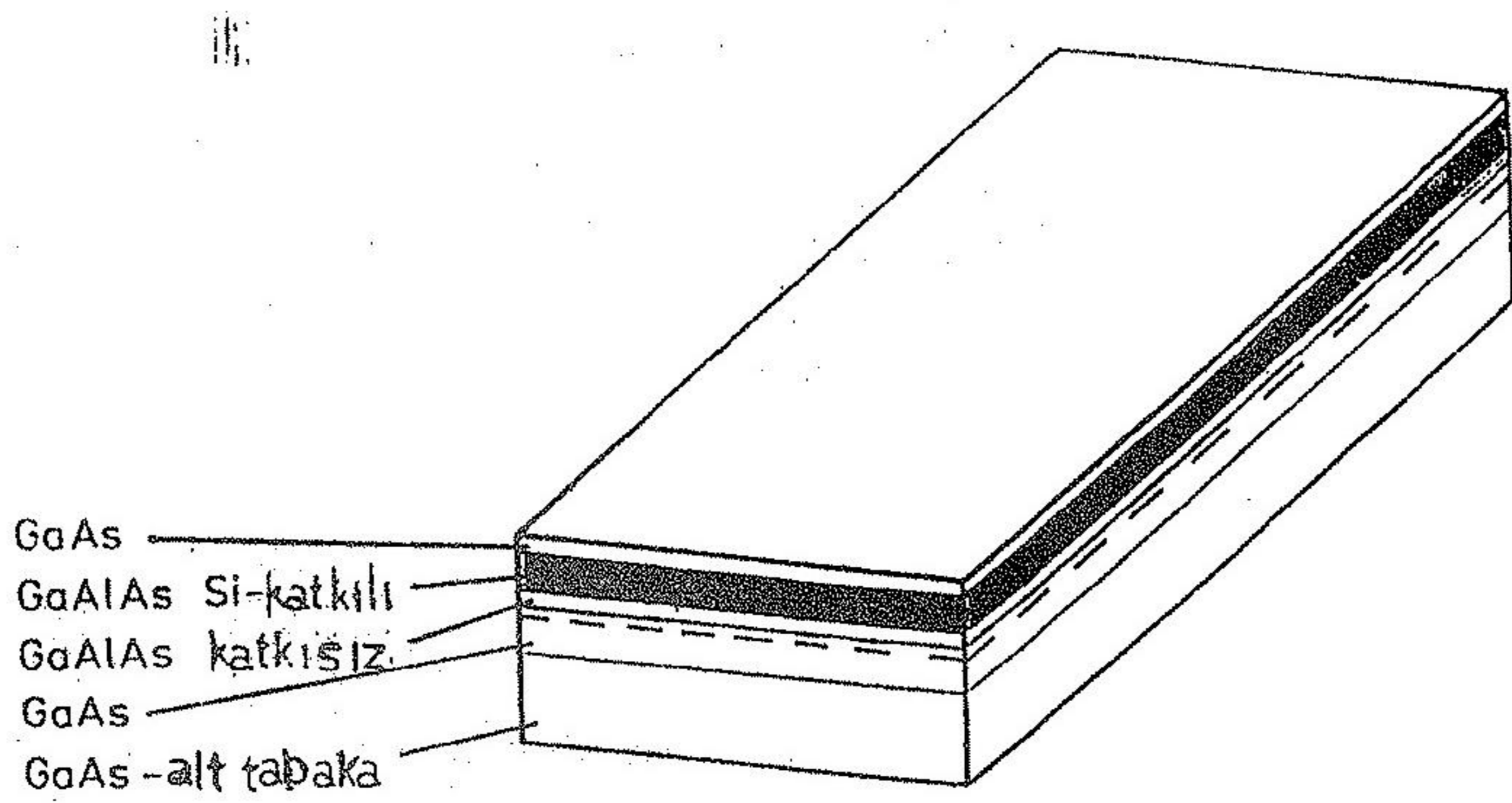
Direnç ölçümlerinde, ampermetre-voltmetre yöntemi, gerilim düşümü yöntemi, potansiyometrik yöntem, Wheatstone, Thomson gibi köprü yöntemleri ve ohmmetreler çeşitli direnç değerlerinde ve farklı doğruluklarla kullanılmaktadır. %0.01'den daha büyük doğruluk elde edebilmek için özel köprüler veya özel teknikler kullanılması gerekmektedir.

## 2. Quantum Hall Etkisi [1]

1.1.1990 tarihinden itibaren dünya çapında direnç referans standardı olarak baz alınması öngörülmuş olan Quantum Hall direncini meydana getiren Quantum Hall etkisi, iki boyutlu elektron gazı (2 DEG) adı verilen oluşumun bir özelliğidir. Bu özellik metaller ve yarıiletkenler gibi doğal maddelerde bulunmaz ve ancak modern mikroelektronik cihazlar ile suni olarak yaratılır. İki tür malzeme bu amaçla kullanılabilir: Şekil 2.1'de görülen Silikon MOSFET'ler (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ve Şekil 2.2'de görülen GaAs bazlı hetero-yapılar.



Şekil 2.1 Bir MOSFET'in şematik yapısı. SOURCE ve DRAIN uçları akım bağlantı uçlarıdır(I akımı). U<sub>G</sub> gerilimi GATE ile p-Si tabakası arasında uygulanmaktadır. Akıma dik olarak Hall voltajı(U<sub>H</sub>) elde edilmektedir. İki boyutlu elektron gazı (2 DEG), SiO<sub>2</sub> ile p-Si arasındaki yüzeyde oluşmaktadır.



Şekil 2.2 Bir GaAs-GaAlAs hetero-yapının şeması. Kesik çizgi, 2 boyutlu elektron gazının (2 DEG) olduğu düzlemi göstermektedir.

Bu tür bir prob sıvı helyum sıcaklığında yani  $-270^{\circ}\text{C}$  civarında soğutulduğunda ve aynı zamanda takriben 10 Tesla şiddetinde güçlü bir manyetik alan uygulandığında Quantum Hall etkisi gözlenebilmektedir. Yani uygulanan gerilim veya manyetik akı yoğunluğunun değişmesinden etkilenmeyen basamaklar halinde Hall voltajları oluşmaktadır. Bir basamağdaki Hall direnci  $R_H(i)$ , Hall voltajı  $V_H(i)$ 'nin,  $i$  basamağında probdan geçen akıma ( $I$ ) oranına eşittir ve von Klitzing'in gösterdiği üzere sadece doğal sabitlere bağlıdır:

$$R_H(i) = V_H(i) / I = h / ie^2 \quad (h:\text{Planck sabiti, } e:\text{elektron yükü, } i=1,2,..)$$

Hassas ölçümlerde genellikle  $i=2$  ( $12906,4 \Omega$ ) ve  $i=4$  ( $6453,2 \Omega$ ) basamakları kullanılmaktadır.  $h/e^2$  sabitine von Klitzing sabiti ( $R_K$ ) adı verilmekte ve bu değer  $i=1$  basamağındaki Hall direncine eşit olmaktadır. Uygun teçhizat ve koşullar sağlandığında  $R_K$  sabitinin  $10^{-8}$  mertebesinde belirsizlikle üretilebildiği belirtilmektedir.

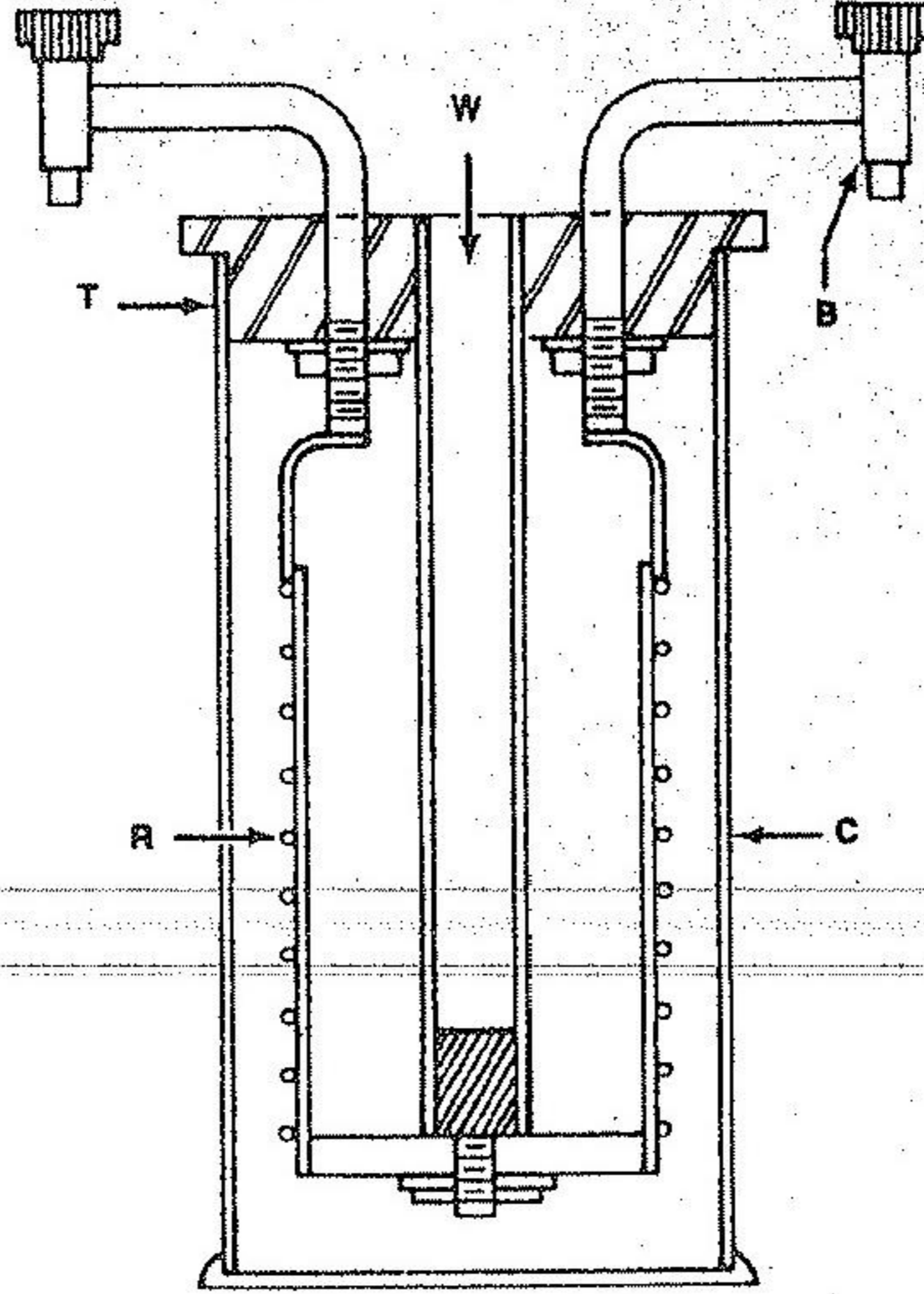
### 3. Standart Dirençler

Dirençler çeşitli amaçlarla kullanılmakta ve çeşitli tip ve doğruluklarda üretilmektedir. Bazı uygulamalarda direncin doğruluğunun %10-%20 olması yeterli olabilmekte, bazı durumlarda ise %0.01, hatta daha yüksek doğruluk gerekmektedir. Hassas cihazlarda kullanılan dirençlerin zamanla ve sıcaklıkla değişiminin çok düşük

olması önemlidir. Zaman ve sıcaklık kararlılığı, diğer dirençleri kalibre etmekte kullanılan standart dirençler için de çok önemli özelliklerdir.

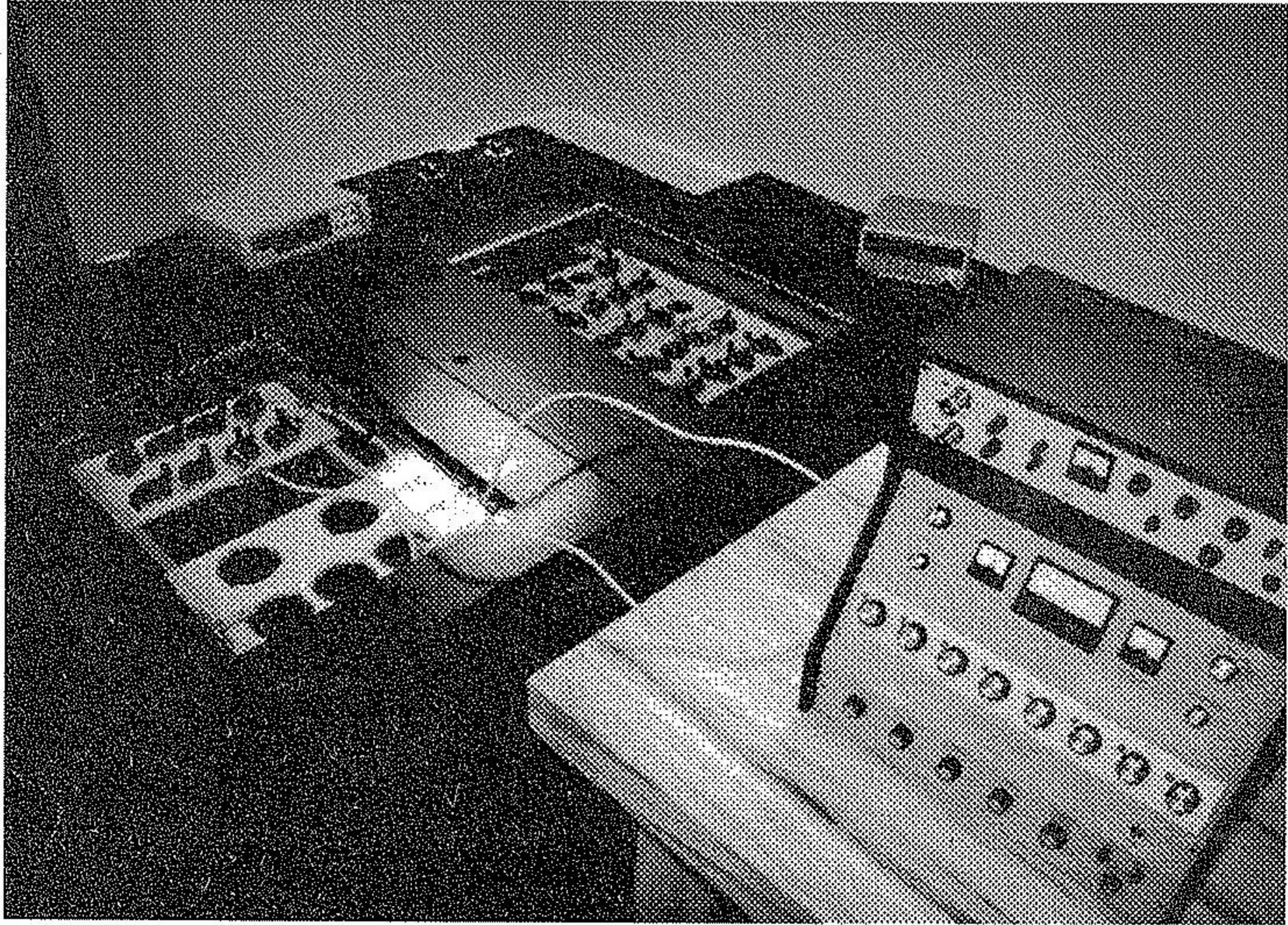
Standart dirençler, genelde  $0.0001 \Omega$  ile  $1 M\Omega$  arasındaki ondalık değerlerde çeşitli firmalardan satın alınabilmektedir. Bunlar iki veya dört terminalli olarak üretilmektedir. Kontaklarda oluşan direncin ihmal edilemeyeceği direnç değerlerinde dört terminalli dirençler kullanılmaktadır. Kontak direncinin ihmal edilip edilemeyeceği, istenen ölçüm doğruluğuna bağlı olmakla birlikte genelde  $1 k\Omega$  ve daha düşük değerli dirençlerin dört terminalli olması gerekmektedir.  $1 k\Omega$ 'dan daha yüksek değerli dirençlerin ölçülmesi ise 2 terminalli yapılabilmektedir. Bu tür  $\%0.01$  ve daha yüksek doğruluk istenen ölçümlerde özel standart dirençlerin kullanılması gerekmektedir. Bunlar genelde dirençleri atmosferdeki oksijen ve nemin etkilerinden korumak amacıyla sıkıca kapatılırlar.  $\%0.1$  ve daha düşük doğruluklar için bu etkiler ihmal edilebileceğinden buna gerek yoktur. Bir takım hassas dirençler nominal değerlerinde  $\%0.01$  doğrulukla üretilirlerse de bunların değerleri zamanla önemli ölçüde kayma göstermektedir. Bu nedenle bu dirençlerin, yukarıda sözünü ettiğimiz primer seviyedeki özel standart dirençlerle karşılaştırılarak, düzenli olarak kalibre edilmeleri ve dolayısıyla izlenebilirliklerinin sağlanması gerekmektedir.

Şekil 3.1'de bir standart direncin yapısı görülmektedir. Şekilde R ile gösterilen,



Şekil 3.1 Bir standart direncin yapısı

elektriksel direnci yüksek, sıcaklık katsayısı düşük olan manganinden yapılmış tel, ipek izolasyonlu pirinç levha üzerine monte edilmiştir. T ile gösterilen sert plastik kapak, C ile gösterilen ve kaliteli bir hafif madeni yağ ile dolu olan kaba vidalanmıştır. W ile gösterilen bölge ise içine termometre yerleştirilebilecek boşluktur. B ile gösterilen konnektörler ve terminaller bakırdan yapılmıştır. Bütün bağlantı noktaları, yağda çözülme-yen bir tür vernik kullanılıp kapatılarak direnç dış ortamdan izole edilmiştir. Direncin içinde yağ kullanılmasının amacı, akım geçmesi sonucu oluşan ısınmayı azaltmak, dolayısıyla direncin akım taşıma kapasitesini arttırmaktır. Bu nedenle ve direncin bulunduğu ortam sıcaklığını mümkün olduğunca sabit tutmak amacıyla primer seviyedeki ölçümlerde, bazı standart dirençler sürekli olarak ya da ölçüm süresince çok hassas sıcaklık kontrollü, Şekil 3.2’de bir örneği görülen yağ banyosunda bulundurulurlar.



Şekil 3.2 Yağ banyosu ve direnç köprüsü

Yağ kullanımının dezavantajı ise, yağın zamanla asidik hale gelebilmesi ve direnç telinin paslanmasına, izolasyon malzemelerinin de aşınmasına yol açabilmesidir. Direnç değerinin zaman içinde sabit kalmasının önemli olduğundan, standart dirençlerin yapımında genellikle manganin malzemesinden yapılmış teller kullanılmaktadır. Sıcaklık katsayısının düşük olması ve bakıra karşı düşük termal emf yaratması nedeniyle manganin çok uygun bir alaşımdır.

Primer seviyedeki laboratuvarlarda bir grup standart direnç sürekli olarak ölçülüp izlenerek ulusal direnç birimi muhafaza edilmekte ve çeşitli ölçüm yöntemleriyle çalışma standartlarına aktarılmakta ve daha düşük seviyeli laboratuvarların dirençlerinin kalibre edilmesinde kullanılmaktadır.

#### 4. UME'de Direnç Ölçümleri ve İzlenebilirlik

1980 yılında Klaus von Klitzing tarafından geliştirilen Quantum-Hall etkisi yöntemi, direnç biriminin  $10^{-8}$  mertebesinde belirsizlikle tekrarlanabilir, zaman ve mekandan bağımsız olarak üretilebilir olmasını sağlamıştır. Fiziksel birim sistemi SI uyarınca,  $\Omega = s^3m^2kgA^{-2}$  şeklinde, temel SI birimleri olan saniye, metre, kilogram ve amperden türetilmiş olarak ifade edilen direnç biriminin laboratuvarlarda gerçekleştirilmesi ise,  $10^{-7}$  mertebesinde belirsizlikle, 1960 yıllarında geliştirilmiş olan "hesaplanabilir kros-kapasite" yöntemiyle yapılabilmektedir. "Hesaplanabilir kros-kapasite"nin saptanan değeri, çeşitli köprülerle yapılan bir dizi ölçüm ile ac direnç değerine, buradan da özel ac/dc dirençler kullanılarak dc direnç değerine aktarılır.

UME'de "hesaplanabilir kros-kapasite" yönteminin uygulanması öngörülmemekte, ancak Quantum Hall sisteminin 1997 yılında gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Şu anda izlenebilirlik Almanya'nın primer metroloji enstitüsü PTB (Physikalisch-Technisches Bundesanstalt) üzerinden sağlanmaktadır. Her yıl  $1 \Omega$  ve  $10 k\Omega$  değerinde standart dirençler PTB'ye gönderilerek Quantum Hall standardı ile kalibre edilmekte, daha sonra bu dirençler UME'nin diğer standart direnç gruplarının kalibre edilmesinde kullanılmaktadır. Standart dirençler (Guildline 9330 serisi), iki yağ banyosunda  $(25 \pm 0.005)^\circ C$  sıcaklıkta muhafaza edilir ve düzenli olarak ölçülerek referanslarla karşılaştırılırlar. Bu ölçümlerde doğru akım karşılaştırmalı direnç köprüsü (Guildline 9975) kullanılır. Direnç laboratuvarındaki en hassas ölçüm yapabilen cihaz olan doğru akım karşılaştırmalı direnç köprüsü,  $10^{-8}$  çözünürlük ve  $2 \times 10^{-7}$  doğruluğa sahiptir. Bu cihazın avantajları kablo direncinden ve akımın kararlılığından etkilenmeden ölçüm yapabilmesidir. Ayrıca daha düşük değerli olan dirençte daha fazla güç harcandığından, yüksek akım şöntleri standart dirençlerle karşılaştırıldığında her ikisi de kendi güç seviyesinde ölçülebilmektedir.

UME direnç laboratuvarında,  $100 m\Omega$  ile  $1 M\Omega$  arasındaki ondalık değerli standart dirençlerden üçerli gruplar bulundurulmakta, düşük değerlerde ise ( $0.1 m\Omega - 10 m\Omega$ ) yine üçer adet Croydon RS3 standart dirençler kullanılmaktadır. Düşük değerli direnç ölçümlerinde Kelvin çift köprüsü (Tettex 2275 Thomson köprüsü), yüksek değerli direnç ölçümlerinde ise teraohmmetre (Guildline 6500A) kullanılmaktadır. Yüksek değerli direnç standardı olarak Guildline dekad direnç kutusu bulunmaktadır. Ölçüm belirsizlikleri direnç değerine göre değişir. Tablo 4.1'de ölçüm aralıkları ve belirsizlikleri verilmektedir.

Dirençten başka, UME'de, ohmmetre kalibrasyonu da, standart direnç değerlerinin kalibre edilecek cihazla doğrudan ölçülmesi şeklinde yapılmaktadır. Belirsizlik değerinin çok düşük olması gerekmediği durumlarda ise çalışma standartları (Guildline  $100\Omega$ ,  $1k\Omega$ ,  $100k\Omega$ ,  $1M\Omega$  dekad dirençler) kullanılır.

| Ölçüm Aralığı<br>( $\Omega$ ) | Ölçüm Belirsizliği      |
|-------------------------------|-------------------------|
| $10^{-7} - 10^{-6}$           | $3 \times 10^{-2}$      |
| $10^{-6} - 10^{-5}$           | $3 \times 10^{-3}$      |
| $10^{-5} - 10^{-4}$           | $5 \times 10^{-4}$      |
| $10^{-4} - 10^{-3}$           | $25 \times 10^{-6}$     |
| $10^{-3} - 10^7$              | $(5-15) \times 10^{-6}$ |
| $10^7 - 10^8$                 | $4 \times 10^{-3}$      |
| $10^8 - 10^{11}$              | $1.6 \times 10^{-2}$    |
| $10^{11} - 10^{13}$           | $5 \times 10^{-3}$      |
| $10^{13} - 10^{15}$           | $1.8 \times 10^{-2}$    |
| $10^{15} - 10^{16}$           | $3 \times 10^{-2}$      |

Tablo 4.1 Ölçüm Belirsizlikleri

**KAYNAKLAR :**

- [1] Volkmar Kose, Hans Bachmair; PTB-Bericht : Neue internationale Festlegungen für die Weitergabe elektrischer Einheiten (Vortraege des 84. PTB-Seminars); PTB-E-35 Braunschweig, Mai 1989