

KUANTIZE HALL DİRENCİNDEN ELEKTRİKSEL DİRENC BİRİMİ  
OHM'UN YENİDEN TANIMLANMASI

Tahsin Kılıçoğlu\*, Zafer Ziya Öztürk\*\*, Mehmet Ali Ebeoğlu\*

\* D.Ü.Fen-Edebiyat Fak.Fiz. Bölümü, Diyarbakır

\*\* TUBİTAK, MBEAM, Elektronik Araştırma Bölümü, Gebze

**ÖZET:** Bu çalışmada elektriksel direnc birimi Ohm'un kuantum Hall olayına dayanılarak tanımlanması ele alınmıştır. Sonuçlar, SI birim sisteminin yeniden gözden geçirilmesini gerektirmektedir.

REDEFINITION OF ELECTRICAL RESISTANCE UNIT OHM BY  
QUANTIZED HALL RESISTANCE

**SUMMARY:** In this article, the definition of the electrical resistance unit Ohm was discussed from view-point of the quantized Hall effect. The results necessitate that SI unit system should be reviewed in terms of the quantized Hall effect.

1. Giriş

Ölçüm yöntemlerini geliştirmek her deneysel fizikçinin vazgeçilmez görevleri arasındadır. Daha duyarlı veriler, teoriyle daha iyi karşılaştırılma olanağı verirken, birimlerin duyarlığı, her zaman ve her yerde aynı doğrulukta

elde edilebilen bir "standard"a dayandırılması daha da önem kazanmaktadır. Burada da çözüm, birimlerin değişmez kuantumsal büyüklüklerle tanımlanmasıdır. Bu gerçeği elektromagnetik teorisinin kurucusu J.C. Maxwell 1870 te şöyle vurgulamıştır: "uzunluk, zaman ve kütle birimlerini, harekette veya gezegenimizin kütesinde değil, dalga boyunda, frekansta ve hiç değişmeyen, biribirinin tıpa tıp aynı olan moleküllerin kütesinde aramalıdır" (1). Metre ve saniyenin, Maxwell'in ifade ettiği anlamda tanımları ancak son yıllarda gerçekleşmiştir. Metre için, iyonla kararlı hale getirilmiş He-Ne lazerinin yayınladığı ışığın dalga boyu esas alınmaktadır. Saniye için,  $^{133}\text{Cs}$  atomunun taban durumunun iki hiper ince düzeyleri arasındaki elektron geçişinde yayınlanan ışığın periyodu esas alınmaktadır (2). Kütle tanımı ise halen 1889 da seçilen ve Paris'te BIPM\*\*\* de muhafaza edilen ilk örneğe (prototype) dayanmaktadır. Elektriksel akım birimi ampere de (A), elektriksel güç ile mekanik güç eşitliğini sağlayacak şekilde tanımlanmıştır (3).

Ancak son yıllardaki bilimsel buluşlar ve gelişmeler, elektriksel direnç ve gerilim birimlerinin kuantumsal büyüklüklerle tanımlanabileceklerini göstermektedir. Bu

\*\*\* BIPM : Bureau International des Poids et Mesures, Sevres, France. (Uluslararası ağırlık ve ölçümler bürosu)

sonuçlar SI\*\*\*\* birim sistemini gözden geçirmeyi gerektirmektedir. Bu çalışmada elektriksel direnç birimi Ohm'un kuantum Hall olayına dayanılarak tanımlanması ele alınmıştır.

## 2. Elektriksel Direnç Birimi Ohm

Elektriksel direnç, Ohm yasasına göre bir iletken üzerine düşen gerilimin o iletkenden geçen akıma oranı ( $R=U/I$ ) olarak tanımlanır. Direnç birimi Ohm ( $\Omega$ ) ise, düzgün bir metal telin iki noktasına 1 Volt'luk (V) bir gerilim uygulandığında geçen akım 1 Ampere (A) ise metal telin bu iki noktası arasındaki direnci 1  $\Omega$  dur ( $1\Omega=1V/1A$ ). Bu tanıma göre  $\Omega$  birimi, V ve A birimlerinden daha duyarlı olamaz. Fakat pratik ölçüm tekniği bakımından  $\Omega$ 'un duyarlılığı tatmin edici olmadığında  $\Omega$  birimi, Thomson-Lampart çarpaz kondansatörü ile m ve s birimlerine dayanılarak  $10^{-7}$  den daha küçük bir bağıl belirsizlikle tanımlanmıştır (3). 1 pF'lık bir kondansatörün kapasitesi  $C=\epsilon_0 \ln 2.1/\pi$  ( $\epsilon_0$ : boşluğun permitivesi, l kondansatörün uzunluğu) eşitliği ile belirlenebilir. 1 nF'lık kondansatöre  $\omega = 10^4$  rad s<sup>-1</sup>'lik bir değişken akım uygulanırsa  $R = (\omega C)^{-1} = 100 \text{ k}\Omega$  değerinde bir direnç oluşur. Bu 100k $\Omega$ 'luk direnç ikinci değişken akım köprüsünde zaman sabiti geometrisinden hesaplanabilen 1k $\Omega$ 'luk bir dirence bağlanır.

\*\*\*\* SI : System International d'Unites (Uluslararası birim sistemi)

Böylece belirlenen 1 k $\Omega$ 'luk direnc , bir doğru akım karşılaştırıcı ( comparator ) ile adım adım 1 $\Omega$ 'a ayarlanır. Elde edilen 1  $\Omega$  ,  $10^{-7}$ 'den küçük bir bağıl belirsizliğe sahiptir. Ancak işlemleri oldukça zahmetlidir.

Ohm biriminin korunması , devlet metroloji enstitülerinde, yüksek duyarlıklı seçilen 1 $\Omega$  standart direnci ile sağlanmaktadır. Bu standart direnc , 500 °C'de tavllanmış CuMnNi alaşımı manganin telinden yapılmakta ve kapalı bir metal silindir içine monte edilmektedir. Bu telin bağıl sıcaklık katsayısı  $10^{-8}$  K $^{-1}$ 'den daha küçük olup yıllık değişim miktarı 0.1  $\mu\Omega$ 'dur. Basıncıta 100 mbar'lık bir değişim  $2.10^{-7}$ , güçte 2.5 mW'lık bir değişimde  $5.10^{-8}$  basamağında bir bağıl belirsizliğe neden olmaktadır. ~

Ohm'da uluslararası anlaşma, her üç yılda bir BIPM'de yapılan uluslararası karşılaştırma ölçümleri ile sağlanmakta ve her ülke kendi  $\Omega$  standardını diğer ülkelerin  $\Omega$  standartlarına göre belirlemektedir. Bu yöntemde tüm ülkelerin üzerinde anlaşıp standart kabul edebileceği bir direnc bulunamamış ve uluslararası birlik sağlanamamıştır. Bu güçlük kuantum hall direnci ile yenilmiştir.

### 3. Yeni Ohm'un Gerçekleştirilmesi

İşımanın " enerji kuantları " şeklinde yayınlandığını, enerji kuantlarının büyüklüğünün frekans ile orantılı, orantı sabitinin ise , bir temel sabit (Planck sabiti) olduğunu

keşfeden Max Planck, bu çalışmalarını ile 1918'de Nobel fizik ödülünü almıştı. Hall ölçümlerinde, Hall direncinin kuantize olduğunu keşfederek Planck'ın kuantlarını mikroelektronige taşıyan K.Von Klitzing 1985 Nobel fizik ödülünü almaya layık görülmüştü. K. von Klitzing'in bu çalışmaları Ohm'un yeni tanımlanmasında temel olmuştur.

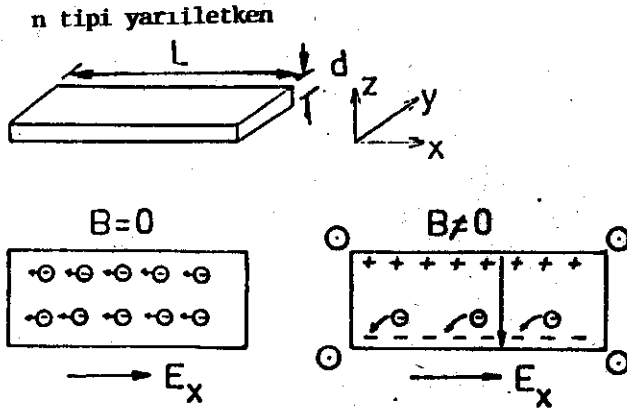
n tip bir yarıiletken için Hall olayını açıklayalım (Şekil-1): Kalınlığı d olan dikdörtgen levha şeklindeki n tip bir yarıiletkenin iki ucuna bir potansiyel farkı uygulandığında elektronlar alana ters yönde (-x yönünde) hareket edecekler ve bir akım geçmeye başlayacaktır. Bu örneğe ve akım yönüne dik bir magnetik alan (+z yönünde) uygulanırsa hareket halindeki elektronlara Lorentz kuvveti etki edecek ve bunun sonucunda elektronlar -y yönünde sapmaya uğrayacaklar ve -y tarafında birikeceklerdir. Bu birikme levhanın +y ve -y kenarları arasında bir potansiyel farkına neden olacaktır. Lorentz kuvvetine karşı kuvvet etki eden bu potansiyel farkı, Lorentz kuvvetini dengelediğinde akım yine eskisi gibi geçecek ve sapsmalar duracaktır. Taşıyıcı hareketi x-y düzleminde olacağından bu tür sistemlere iki boyutlu elektron gazı sistemleri denir. Lorentz kuvvetini dengeleyen bu potansiyel farkına Hall gerilimi adı verilir. Klasik Hall olayında Hall gerilimi  $U_H = (BI)/(n_e e)$  (I örnekten geçen akım), Hall direnci (katsayısı) ise  $R_H = U_H/I$

eşitliği ile verilir. Buradan Hall direnci ifadesi,

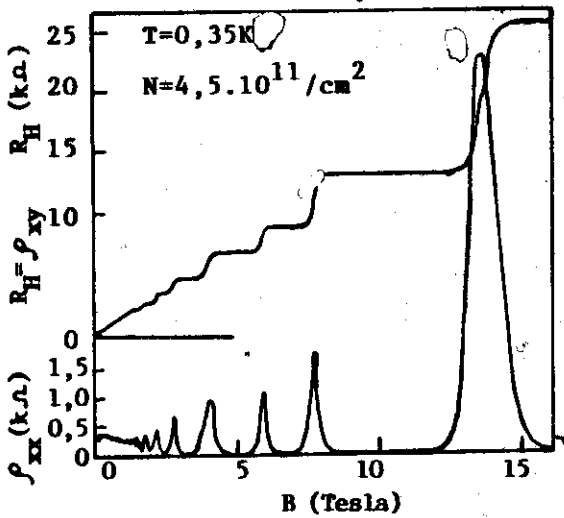
$$R_{H} = \frac{B}{n \cdot e} \quad (1)$$

olarak bulunur. Burada, B magnetik alanıdır. [1] bağıntısına göre Hall direnci magnetik alanla lineer olarak artmaktadır. Eğer Hall olayı, iki boyutlu elektron gazına sahip sistemlerde, 4 K'den küçük sıcaklıklarda ve kuvvetli magnetik alanlarda tekrarlanırsa Hall direncinin lineer olmadığı (Şekil-2), kuantize olduğu görülür (4.5). İki boyutlu elektron gazı azınlık taşıyıcıları noksan elektronlar olan (p tip) bir MESFET'te n kanalı olarak ve hetero yapılarda (örn. GaAs-GaAlAs arayüzeyinde) elde edilmektedir. Metal organik kimyasal buhar ile kaplama (MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (MBE) gibi ince film büyütme tekniklerinin gelişmesiyle istenilen özellikte hetero yapılar elde edilmektedir. İki boyutlu elektron gaz sistemi Şekil-3'de görüldüğü gibi Si veya GaAs yarıiletkenin üzerine SiO<sub>2</sub> veya Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As yalıtkan, yalıtkanın üzerinden metal kaplayarak, yarıiletkenin yalıtkanın bakan yüzeyinde oluşturulabilir (6). Aşağıda bir hetero yapıda kuantum Hall olayı ele alınacaktır.

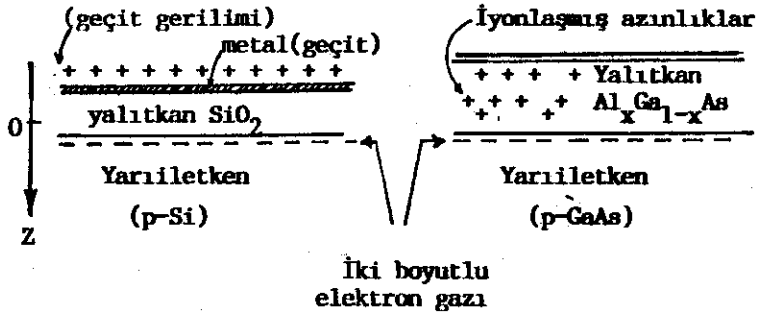
Kuantum Hall olayında kullanılan GaAs/GaAlAs hetero yapısı şematik olarak Şekil-4a'da gösterilmiştir. Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As katmanı tükenimde (çoğunluk yük taşıyıcılar azınlıkta) olduğundan Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As tabakası bir yalıtkan gibi davranacak



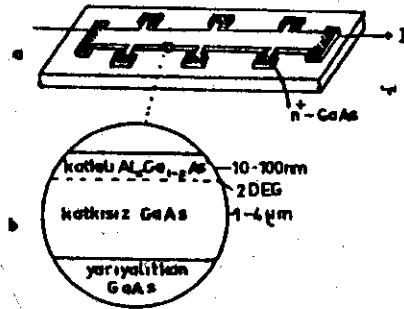
Şekil-1. n tip bir yarıiletkende Hall olayı



Şekil-2. Heterojen yapıda bir yarıiletkenin Hall direnci ( $R_H = \rho_{xy}$ ) ve boyuna direnc  $\rho_{xx}$  'in magnetik alana bağıllığı



**Şekil-3.** Bir dış elektrik alan etkisi altında iki boyutlu bir elektron gazı sisteminin oluşumu (a) Silisyum MOSFET (b) GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As



**Şekil-4.** GaAs/GaAlAs hetero yapısında kuantum Hall olayı



ve potansiyel farkı uygulandığında elektrik akımı Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs arayüzeyinden geçecektir (Sekil-4b).

Arayüzeye dik (+z yönünde) kuvvetli bir magnetik alan, elektriksel alanın etkilediği kuvvet nedeniyle hareket etmekte olan elektronlara Lorentz kuvveti etki edecek, bu kuvvet magnetik alanın büyük olmasından dolayı elektronları arayüzeye paralel siklotron (cyclotron) yörüngelerde harekete zorlayacaktır. Bunun sonucu olarak iki boyutlu elektron gazının enerji düzeyleri

$$E_n = E_0 + (n+1/2)h\omega_c + sg\mu_B B, \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (2)$$

ile belirlenir. Bu eşitlikte  $h\omega_c = h e B / m^*$  siklotron (cyclotron) enerjisi,  $s = \pm 1/2$  spin kuantum sayısı,  $g$  Land'e faktörü,  $\mu_B$  Bohr magnetronudur. Elektron yoğunluğu 2.enerji düzeyinin tam dolu olduğu durumda  $n_c = iN$  ile verilir. Bu durumda Hall direnci hesaplanırsa,

$$R_H = B / iNe = h / ie^2, \quad i=1,2,3,\dots \quad (3)$$

eşitliği elde edilir. Kuantize Hall direnci, birbirinden bağımsız laboratuvarlarda farklı yapılarda ( Si-MOSFET, GaAs - GaAlAs ve diğer ) ölçülmüş ve birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir (7). Bu sonuçlar kuantize Hall direncinin direnc birimi Ohm için "standart" alınabileceği fikrini doğurmuş, bunun üzerine yapılan çalışmalar

sonuçlanmış ve  $i=1$  için ölçülen Hall direnci, Klitzing sabiti olarak tanımlanmıştır.

$$R_K = 25812,807 (1 \pm 2 \cdot 10^{-7}) \Omega \quad [4]$$

Klitzing sabiti cinsinden  $1\Omega$  ise,

$$1\Omega = R_K / 25812,807 \quad [5]$$

olarak tanımlanmış ve 1.1.1990 tarihinden itibaren CIPM\*\*\*\* tarafından Ohm standardı olarak kullanılması tavsiye edilmiştir (8). Zamanla değişmeyen Ohm'un yeni tanımı ile, Ohm biriminde uluslararası birlik sağlanmıştır. Ancak bu amaçla, halen uluslararası kabul görmüş SI birim sisteminin gözden geçirilmesini gerektirmektedir. Çünkü Ohm türetilen birimdir. Fakat yeni tanıma göre değişmez bir temel birimle tanımlanmıştır. Benzer şekilde yine bir türetilen birim olan Volt'ta Josephson olayına dayanılarak temel birimle tanımlanmıştır. Bu durumda temel birimler neler olmalıdır? Acaba tamamen kuantumsal büyüklüklerle tanımlanan temel birimler seçilerek yeni bir birim sistemi oluşturulabilir mi?

Tablo 1'de SI temel birimleri ile önerilen temel birimler gösterilmiştir. Ancak bu şimdiden bazı sorunlar

\*\*\*\* CIPM : Comite International des Poids et Mesures

(Uluslararası Ağırlık ve Ölçümler Komitesi)

Tablo-1. SI temel birimleri ile önerilen temel birimler

m kg s A	SI sisteminin temel birimleri
m s V $\Omega$	kuantumsal olarak tanımlanabilen birimler (yeni temel birimler?)
m kg s V $\Omega$	(kütle temel birim olarak yerinde kalırsa)

getirmektedir. Örneğin yeni sistemde 1 Joule, 1 Watt-s'ye eşit değildir. Bu tür çelişkileri gidermek için yeni birim sistemi üzerindeki çalışmalar devam etmektedir.

Yakın gelecekte, belki yeni buluşların da katkısıyla, her zaman ve her yerde aynı doğrulukta gerçekleştirilebilen yeni bir birim sistemi kurulabilecektir.

#### Kaynaklar

- (1) Kose, V., ve Wöger, W., Phys. Bl. **43**, 227 (1987).
- (2) Öztürk, Z.Z., Çağdaş Fizik, **20**, 17 (1988).
- (3) German, S., ve Draht, P., Handbuch SI Einheiten, Fried-Vieweg & Sohn Verlagsgemeinschaft GmbH, Braunschweig (1979).
- (4) Klitzing, K.Von, Korda, G., ve Pepper, M., Phys. New. Lett. **45**, 494 (1980).
- (5) Klitzing, K.Von, Rev. of Modern Phys., **58**, 519 (1986).
- (6) Bozdemir, S., ve Kıymac, K., Sakarya Üniversitesi Fen - Edebiyat Fakültesi Dergisi, **9**, 179-189, (1989).
- (7) Rashba, E.T., ve Timofeev, V.B., Sov. Phys. Semicond. **20**, 617 (1986).
- (8) Braun, E., Verhandl. DPG (VI) 24, Vortragsnr.F2., (1989).