

58069

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**HALL OLAYI VE REZİSTİVİTE ÖLÇÜMLERİ İÇİN
ENSTRUMENTASYON**

Cevdet COŞKUN

Yönetici: Doç. Dr. Hasan Efeoğlu

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Yarıiletkenlerin elektriksel karakterizasyonunda kullanılan Hall ve rezistivite ölçüm sisteminin, bilgisayar kontrolüne alınması için gerekli instrumentasyon bu çalışmanın ana temasını oluşturmaktadır.

Araştırma laboratuvarlarında, el ile kontrol edilen deneysel düzeneklerle yapılan ölçülerin bilgisayar kontrolüne verilmesi, sistemle bilgisayar arasındaki iletişimi sağlayacak bir dizi donanımın varlığını gerektirmektedir. Bu amaçla, programlanabilir sabit akım kaynağı, kryostat sürücü motoru kontrol ünitesi, magnet yön kontrol ünitesi ve sıcaklık kontrol ünitesi geliştirilerek sisteme adaptasyonu sağlanmıştır.

Geliştirilen arabirim üniteleri, bilgisayar tarafından National Instruments şirketince üretilen çok fonksiyonlu LAB PC kartı ile kontrol edilmiştir.

Çalışmanın sonunda, kurmuş olduğumuz otomasyon sistemini test etmek amacıyla, kare geometride hazırlanmış n-Si numune için, van der Pauw tekniğini kullanarak sabit magnetik alanda, 150-320K arasında sıcaklığa bağlı Hall ve rezistivite ölçümleri yapılmıştır. Ölçümden elde edilen veriler değerlendirilerek, elektronların hareketliliği ve serbest taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiş ve gerçekleştirilen sistemin güvenilir sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

SUMMARY

Autocontrol instrumentation of Hall effect and resistivity measurement system is the main object of this work.

A series of hardware required for the communication between computer and the system units. Therefore, we designed a constant current source, a cryostat position control unit, a magnetic field direction control unit, a buffer for temperature controller unit and a pair of scanner and these were adopted to the Hall kit.

All the developed units, except scanners, controlled by an IBM AT compatible multifunction National Instruments LAB PC card and the scanners used for current and voltage connection controlled via IEEE-488 interface.

A Czochralski grown n-Si sample used to test the constructed system. Hall and resistivity measurements carried out at 150-320K temperature range using 5K steps. Evaluating the data obtained from temperature dependent Hall and resistivity measurements, carrier concentration and mobility has been examined as a function of temperature and we have found that the results we obtained were in agreement what we expected.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışmanın gerçekleőmesinde çok değerli görüş ve çalıőmalarıyla bana yardımcı olan tez hocam Sayın Doç.Dr.Hasan Efeoğlu'na őükranlarımı sunarım.

Bu alıőma süresince yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Elektronik Mühendisi Tevhit Karacalı'ya, test numunesini hazırlayan Yrd. Doç. Dr. Mustafa Sađlam'a ve Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü elemanlarına çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
1. GENEL GİRİŞ	1
2. TEORİ	3
2.1.Giriş	3
2.2.Özdirenç	3
2.3.Hall Olayı ve Magnetorezistans	4
2.4.Van Der Pauw Tekniği	8
3. ENSTRUMENTASYON	12
3.1.Giriş	12
3.2.Literatür Özeti	16
3.3.Kryostat Sürücü Motoru Kontrol Ünitesi	24
3.4.Magnet Yön Kontrol Ünitesi	27
3.5.Programlanabilir Sabit Akım Kaynağı	29
3.6.Sıcaklık Kontrol Ünitesi	33
4. TEST VE ÖLÇÜM SONUÇLARI	35
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	38
EK AÇIKLAMALAR	40
KAYNAKLAR	45

1. GENEL GİRİŞ

Elektrik ve magnetik alan içinde bulunan bir iletken içindeki serbest taşıyıcıların hareketi, 19. yüzyılın son çeyreğinde E.H.Hall'in çalışmaları ile bilinmektedir. İletkenlerdeki akım iletimini sağlayan yüklerin, magnetik alan ile etkileşiminin keşfinden sonra Hall olayı, iletkenlerin ve bu yüzyılın ortalarından itibaren yarıiletkenlerin elektriksel ve magnetik karakterizasyonunda temel araştırma tekniklerinden biri olmuştur.

Yarıiletkenlerin kütsesel ve elektronik özelliklerinin araştırılmasında kullanılagelen bu metod, sağladığı temel bilgilerden dolayı yarıiletken araştırma laboratuvarlarının vazgeçilmez tekniğidir.

Hall ölçümü, aynı numune üzerinde yapılan öz direnç ölçümleriyle birlikte değerlendirildiğinde, çoğunluk taşıyıcılarının tipi, yoğunluğu ve hareketliliğine ait doğrudan bilgi sağlamaktadır. Elektron ve boşluk mobilitelerinin bilinmesi, doğrudan doğruya yarıiletken malzemenin kalitesini göstermesinin yanısıra, geniş bir sıcaklık aralığında, (4-300 K), sıcaklığa bağlı olarak yapılan Hall ve rezistivite ölçümlerinden elde edilen veriler bize, elektriksel aktiviteleri olan derin tuzak seviyelerinin enerjileri ve taşıyıcıların mobilitelerini etkileyen saçılma mekanizmaları gibi daha spesifik konularda bilgi verir.

İkinci bölümde, bütünlüğü sağlamak açısından Hall olayının kullanımına ait genel bir taslak çizilmiş ve aynı zamanda ilgili terim ve kavramları tanıtan genel bir giriş dahil edilmiştir. Daha sonra, geleneksel olarak dikdörtgen prizması şeklinde hazırlanan numunelere kıyasla büyük kolaylıklar sağlayan ve kare geometrisiyle en basit seviyede uygulama alanı bulan van der Pauw tekniği hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise, Hall ve rezistivite ölçüm sisteminin otomasyonu için organize edilen sistemin blok diyagramı verilerek ara birimler hakkında bilgi verilmiştir. Ele alınan ünitelerin tamamı fizik bölümünde gerçekleştirilip, donanımlara ait yazılımların blok diyagramları ve genel çalışma mantığı bu bölümde sunulmuştur.

Son olarak, gerçekleştirilen Hall olayı ve rezistivite lme sistemi kullanılarak, kare geometride hazırlanmış bir Si kristalinin rezistivitesi ve Hall katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi sistemin test ölümü olarak verilmiştir. Bu verilerden numuneye ait taşıyıcıların hareketliliği ve yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi hesaplanarak verilmiştir.



2.TEORİ

2.1 Giriş

Elektronik teknolojisinin temelini oluşturan yarıiletkenlerin büyütülmesi safhasından başlayıp, hazırlanan devre elemanlarının karakterizasyonunda, optik karakterizasyonun yanında elektrik ve magnetik karakterizasyon da, devre elemanının uygulama safhalarına göre önem arz etmektedir. Özellikle yeni büyütülmüş bir kütle kristalin, x-ışını destekli yapı ve matris analizini müteakip, optik özelliklerin araştırılması yanında serbest taşıyıcı yoğunluğu, bu taşıyıcıların hareketliliği, derin seviyelerin enerjisi ve netice olarak kristalin istenen özellikte olup olmadığının belirlenmesinde, sıcaklığa bağlı Hall ve öz direnç ölçümleri, birinci derecede önem arz etmektedir. Sıcaklığa bağlı elde edilen veriler, kapasite-gerilim ölçümleri ile birlikte değerlendirildiğinde telafi etme oranı (N_d/N_a) gibi doğrudan doğruya donör ve akseptör yoğunluklarını elde etme kolaylığı sağlar (Blood ve Orton, 1992). Hall olayı ölçüm sisteminin bir monokromatör ile birleştirilmesi ile oluşturulabilecek Foto-Hall olayı ölçümleriyle, derin seviyelerin aktivasyon enerjileri ve yoğunlukları hakkında bilgi elde edilebilir.

2.2 Öz direnç

Elektrik alanında bulunan bir yarıiletken içindeki elektron ve boşlukların sürüklenme hızına bağlı olarak akım yoğunlukları,

$$\begin{aligned} J_n &= nev_n \\ J_p &= pev_p \end{aligned} \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada e , elektronun yükü, v_n , n ve v_p , p sırası ile elektron ve boşlukların sürüklenme hızı ve konsantrasyonudur. Yarıiletkenden geçen toplam akım yoğunluğu ise bu iki terimin toplamı,

$$J = e(nv_n + pv_p) \quad (2.2)$$

olacaktır.

Birim elektrik alan başına geçen akım yoğunluğu olarak tanımlanan iletkenliği bulmak için, denklem 2.2'nin her iki tarafı elektrik alan şiddeti E'ye bölünürse,

$$\sigma = \frac{J}{E} = e \left(n \frac{v_n}{E} + p \frac{v_p}{E} \right) \quad (2.3)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 2.3'deki v_n / E ve v_p / E terimleri, birim alan başına sürüklenme hızını gösterir ve sırasıyla elektron ve boşluk mobiliteleri (μ_n ve μ_p)'ye karşılık gelir. Böylece mobilitelere bağlı olarak denklem 2.3 aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (2.4)$$

İletkenliğin tersi olarak tarif edilen öz direnç ifadesi ise,

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = [e(n\mu_n + p\mu_p)]^{-1} \quad (2.5)$$

ile verilir.

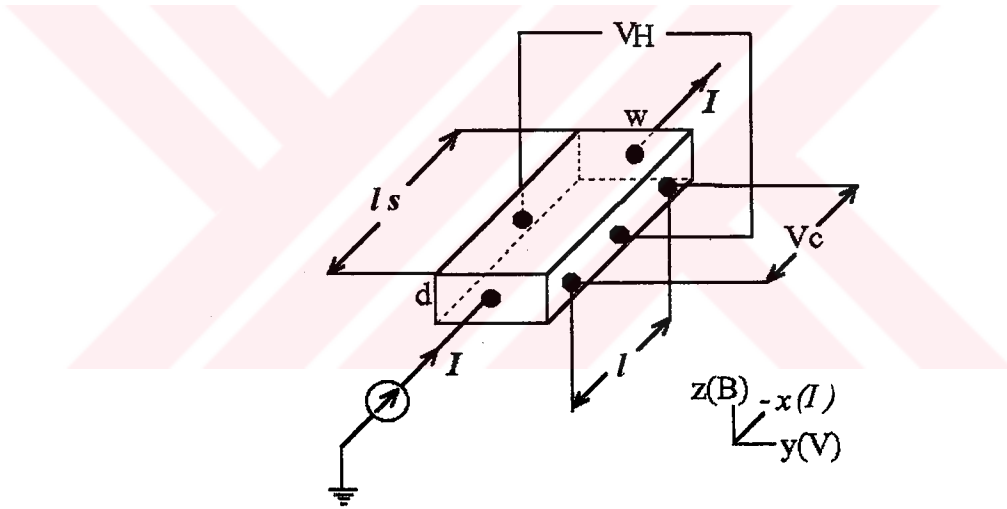
2.3 Hall Olayı ve Magnetorezistans

Hall olayı, bir yarıiletkenin tipi, öz direnci, serbest taşıyıcı yoğunluğu ve bu taşıyıcıların mobilitelerinin yanısıra, sıcaklığa bağlı Hall ölçümleri ve Foto-Hall olayı vasıtasıyla yarıiletkenlerdeki derin tuzak seviyeleri hakkında da önemli bilgiler verir.

Yarıiletkenlerdeki çeşitli galvanomagnetik etkilerin araştırılmasında, karakterizasyon amaçlı olarak en çok kullanılan Hall olayıdır. Ancak yarıyalıtkan malzemelerde Hall potansiyelinin ölçümü, omik kontak problemleri nedeniyle pratik açıdan zorluklar oluşturmaktadır. Bu gibi durumlarda magnetorezistans ölçümleri, taşıyıcı mobilitelerini

ölçmede büyük avantaj sağlar (Blood ve Orton, 1992). Diğer taraftan, magnetik alanın etkisiyle numune direncinde oluşan değişim olarak tanımlanan magnetorezistans, yarıiletkenin sabit enerji düzeyleri hakkında bilgi vermesi yanında, bilinmeyen magnetik alan şiddetini tayin etmede de kullanılabilir. Ayrıca Hall ölçümü magnetik alanın yönüne bağlı iken, magnetorezistansın magnetik alanın yönünden bağımsız olması aynı numune üzerinde her iki etkiyi aynı anda tayin etme imkanı verir. Bu iki olayı aynı numunede enine gerilim ölçümleri yardımıyla incelemek mümkündür.

İçinden akım geçen bir iletkene akım yönüne dik bir magnetik alan uygulanırsa, akım ve magnetik alan doğrultularına dik olacak şekilde bir potansiyel farkı oluşur. Bu potansiyele Hall potansiyeli denir.



Şekil 2.1 Hall olayı ve rezistivite ölçümleri için Hall çubuğu düzeneği

Hall olayı ölçümlerinde kullanılan geleneksel numune geometrisi şekil 2.1'de verilen dikdörtgenler prizması şeklindedir. Bu yapının başlıca avantajı büyük külçe numunelerden hazırlanışının kolay olması ve numune boyunca elektrik alan çizgilerinin paralel olmasından dolayı veri analizinin kolaylığıdır. Bu geometride ölçülerin manalı olması için, Hall potansiyelinin ölçüldüğü kontakların akım kontaklarından yeterince uzakta olması gerekmektedir. Bu hem akım çizgilerinin paralel olmasını hemde azınlık

taşıyıcılarının ölçülecek gerilim üzerindeki etkisinin minimum olmasını sağlayacaktır. Ayrıca numunenin genişliğine göre boyunun yeterince uzun olması, gövde içindeki akımın paralel olmasını ve geometriden gidilerek yapılan analizlerin daha doğru olmasını sağlayacaktır. Bu yapı ilk zamanlar popüler olmasına karşın, van der Pauw(1958) tarafından geliştirilen ve dörtlü simetri ile sadeleştirilen kare geometri, dairesel geometri ve yonca yaprağı gibi daha pratik yapılar kullanılmaya gelmiştir.

Şekil 2.1'de yük taşıyıcıların elektronlar olduğunu ve bunların (-x) yönünde v hızıyla hareket ettiğini farzedelim. Oda sıcaklığında yaklaşık 10^7 cm/s lik rastgele termal hızlara sahip olan elektronlar, yapıya 1V/cm lik bir elektrik alan uygulanırsa, 10^4 cm/s mertebesinde bir hızla hareket etmeye başlarlar. Numune (+z) yönünde bir magnetik alana maruz bırakıldığında, (-x) yönünde hareket etmekte olan elektronlar, $e(v_x \times B_z)$ kuvvetine maruz kalır. Bu kuvvet,

$$-e(v_x \times B_z)_y = ev_x B_z \quad (2.6)$$

şeklinde bir (+y) bileşenine sahiptir. Bundan dolayı elektronlar numunenin (+y) tarafında birikmeye başlayacaktır. Bu durum, $ev_x B_z$ kuvvetinin, eE_y kuvveti ile dengelenmesine kadar devam edecektir. Heriki kuvvet dengelendiğinde elektronların y doğrultusundaki net hız bileşeni sıfır olacak, $B=0$ 'dakine eşit (-x) doğrultusundaki akım oluşacaktır. Bu akım,

$$J_x = -nev_x \quad (2.7)$$

ile verilmekteydi. Bu durumda,

$$eE_y = ev_x B_z = -\frac{J_x B_z}{n} \quad (2.8)$$

denklemini geçerli olacaktır. Denklem 2.8'den elde edilen,

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = -\frac{1}{ne} \quad (2.9)$$

katsayısına Hall katsayısı denir ve işareti yarıiletkenin tipini verir. Biz akımın elektronlar tarafından taşındığını varsaydığımız zaman Hall katsayısı negatif işarete sahip olur. Bu eşitlik çok basit olmasına rağmen, çoğu yarıiletkenler için tam olarak geçerli değildir. Çünkü elektronların aynı v_x hızı ile hareket ettiği varsayılmıştır. Gerçekte ise elektronların hızı bir dağılım göstermektedir. Bu durumda gerçek Hall katsayısı,

$$R_H = -\frac{r}{ne} \quad (2.10)$$

şeklinde dir. Burada r 'ye Hall faktörü adı verilir ve 1-2 arasında değişir. Bu değişimi tayin eden faktörlerin başında sıcaklık değişimi ve numune safsızlıkları gelir.

Omik yapı durumunda, elektrik alanın düşük değerlerinde elektronların x doğrultusundaki v_x hızı, E_x elektrik alanı ile değişim gösterir. Bu iki terim arasındaki $v_x = \mu E_x$ ifadesine göre, μ hareketlilik parametresi sabit olmayacaktır. Hall olayında bulunacak μ , Hall mobilitesi olarak adlandırılır. Bütün elektronların hızlarının eşit olması halinde $\mu_H = \mu$ olacaktır. Hall katsayısını veren denklem 2.10 yeniden şu şekilde yazılabilir.

$$R_H = -\frac{r}{n_H e} \quad (2.11)$$

Burada n_H , Hall konsantrasyonu olup yine tüm elektronların aynı hıza sahip olmaları durumunda $n_H = n$ olacaktır. Bu durumda mobilite için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\mu = \frac{v_x}{E_x} = -\frac{J_x}{neE_x} = \frac{J_x E_y}{E_x J_x B} = \frac{E_y}{BE_x} = \frac{V_c w}{BV_H l} \quad (2.12)$$

$V_c = E_x l$ 'ye, yani akım yönüne paralel olan kontaklar arasındaki potansiyele, iletkenlik potansiyeli denir. Numunenin öz direnci, V_c potansiyelinin ve numune boyutlarının bir fonksiyonu olarak bulunur.

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{V_c A}{I l} \quad (2.13)$$

$V_H = E_y w$ ise Hall potansiyeli olup, akım yönüne dik kontaklar arasındaki potansiyeldir.

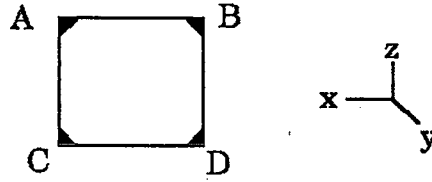
2.4 Van Der Pauw Tekniği

Geleneksel numune geometrilerinin yeterince büyük ve işlenebilir şekilde kütsel malzemeler gerektirmesi bir dezavantaj olarak görülmektedir. Homojen kalınlıkta ve sonsuz büyüklükte bir yüzeyde, iki noktadan verilen akıma karşılık iki noktadan ölçülen gerilimden, konform analizi ile, incelenen numunenin rezistivitesi matematiksel olarak ilk defa van der Pauw tarafından verilmiştir (van der Pauw, 1958). Teorinin uygulanmasında, belli geometriler için kullanımı çok kolay olan rezistivite ölçümüne ait basit ifadeler, ilerleyen kısımda verilecektir.

Bu teoriye ait matematiksel ifadeleri vermeden önce, teorinin uygulanabilmesi için gerekli olan sınır şartları şunlardır:

- a) Numune kontakları, aynı yüzde ve aynı çember yayı üzerinde bulunmalıdır.
- b) Kontaklar çok küçük olmalıdır.
- c) Numunenin kalınlığı homojen olmalıdır.
- d) Numune yüzeyi düzgün ve tek parça olmalıdır. (Numune üzerinde herhangi bir delik v.s olmayacak)

Kare geometriye sahip numunelerde kontaklar köşelerde oluşturularak dörtlü simetri sağlanabilir. Böylece ilk şart sağlanmış olur. Son iki şartın sağlanması ise kolaydır. İkinci şarta gelince, van der Pauw, teorisini sonsuz küçük kontakların varlığına dayandırdığı için bu pratikte mümkün olmamaktadır. Sonlu büyüklükte yapılan kontakın geometrik şekli ve büyüklüğü, öz direnç ve Hall ölçümlerinde sapmalara sebep olur. Bundan dolayı birçok araştırmacı özel geometriler düşünmüş, kontak büyüklüğü ve geometrisinin ölçüm sonuçlarını ne şekilde etkileyebileceğini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir.



Şekil 2.2 Van der Pauw tekniği için kare geometri

Yukarıdaki numuneye A ve B kontaklarından akım uygulanıp, C ve D kontaklarından gerilim okunduğunu düşünelim. Bu durumda,

$$R_{ABCD} = \frac{V_{CD}}{I_{AB}} \quad (2.14)$$

olacaktır. Van der Pauw, *Conform Mapping* dönüşüm yöntemiyle denklem 2.14'ün aşağıdaki şekilde de gösterilebileceğini ifade eder.

$$\exp\left\{-\left(\frac{\pi \cdot R_{ABCD} \cdot d}{\rho}\right)\right\} = \frac{1}{2} \quad (2.15)$$

Eşitliğin heriki tarafının logaritmasını alırsak,

$$\frac{\pi \cdot R_{ABCD} \cdot d}{\rho} = \ln 2 \quad (2.16)$$

olur. Buradan ρ değeri çekilirse,

$$\rho = \frac{\pi \cdot d}{\ln 2} R_{ABCD} \quad (2.17)$$

bulunur. Benzer eşitlikler, B ve D kontaklarından akım uygulanıp A ve C kontakları arasından gerilim okunarak da yazılabilir. Yapılan iki ölçüm sonucunda elde edilen veriler yardımıyla, ρ için aşağıdaki genel ifade van der Pauw tarafından verilmiştir.

$$\rho = \frac{\pi \cdot d}{\ln 2} \left(\frac{R_{ABCD} + R_{BDCA}}{2} \right) f \left(\frac{R_{ABCD}}{R_{BDCA}} \right) \quad (2.18)$$

Eğer A ve D kontaktları üzerinden akım uygulandığında, B ve C kontaktları arasından *sıfır* gerilim okunuyorsa kontaktlar simetriktir ve $R_{ABCD} = R_{BDCA}$ olacağından denklem 2.18 tekrar 2.17 denklemine dönüşür. $f(1)=1$ olduğu van der Pauw'un bu çalışmasında verilmiştir (van der Pauw, 1958).

Bu noktada, alan başına direnç, *sheet rezistans* ifadesi ise,

$$R_s = \frac{\rho}{d} = \frac{\pi}{\ln 2} R_{ABCD} \quad (2.19)$$

şeklinde verilir.

Hall katsayısını ve Hall potansiyelini bulmak için, şekil 2.2'de ele aldığımız numune üzerinden, x doğrultusunda bir I akımının geçtiğini düşünelim. Numuneye z doğrultusunda da bir B magnetik alanı uygulandığında y yönünde bir elektrik alan oluşacaktır. Bu durumda elde edilen Hall katsayısı, dikdörtgenler prizması şeklindeki numune için denklem 2.11'de verildiği gibi,

$$R_H = \frac{E_y}{B_z J_x} = \frac{dV_y}{B_z I_x} \quad (2.22)$$

şeklinde dir. Burada d, numunenin kalınlığıdır. Şekil 2.2'ye göre Hall potansiyeli, B ve C kontaktları arasından alınan V_{BC} potansiyeli olup, termal potansiyelin etkisini aşağıdaki ifade ile etkisiz kılınabilir.

$$V_{BC} = V_H = \frac{1}{2} [V_{BC}(B_z) + V_{BC}(-B_z)] \quad (2.23)$$

Magnetorezistans ölçümünde termal potansiyel ve diğer etkileri azaltmak için, magnetik alanın ve akımın pozitif ve negatif durumlarına ait ayrı ayrı ölçüm almak gerekmektedir. Her iki durum için elde edilen verilerin ortalaması, numune parametrelerinin daha hassas hesaplanmasını sağlar(Look, 1989).



3. INSTRUMENTASYON

3.1 Giriş

Bilgisayarların yaygınlaştığı günümüzde, yarıiletkenlerin elektriksel karakterizasyonunda kullanılan Hall olayı ve rezistivite ölçümlerinin halen el ile kontrol edilen sistemlerle yapılması araştırmacıların büyük zamanını almaktadır. Bilgisayar maliyetlerinin ucuzlaması ve veri transfer kartlarının geliştirilmesiyle birlikte oluşan yazılım dilleri, otomatik ölçüm sistemlerinin oluşmasına zemin hazırladı. Eskiden rastlanılan ciddi donanım ve yazılım hatalarının da tamamen giderilmesiyle bilgisayara dayalı kontrol sistemleri daha çok istenir oldu. Bu gün Hall olayı deneylerinin yapılması için gerekli olan bütün bir otomasyon sistemi (magnet, akım kaynağı, kryostat, yazılım v.s.) ticari olarak satın alınabilmektedir. Bunun yanısıra kendi otomasyon sistemlerini kurmak isteyenler için, ihtiyaç duyacakları pekçok cihaz da ticari olarak mevcut bulunmaktadır. 1988 yılı ortaları itibariyle, gerek komple bir otomasyon sistemi, gerekse de otomasyon sisteminin kurulması için gerekli olan cihazları yapan ve satan, beş şirket bulunmaktaydı(Look,1989). Bu şirketlerin adı, adresi ve ürettiği cihazların özellikleri Ek D'de verilmiştir. Bugün Keithley Instrument şirketi, Hall olayı otomasyon sistemleri satan şirketler arasında en çok arananı olmuştur. Bununla birlikte, bu tür komple sistemlerin tek maksatlı kullanılması, çalışmamızı genel maksatlı bir Hall olayı otomasyon sistemi dizayn etmeye iten sebep olmuştur.

Bilgisayarlar ile sistemler arasında veri ve komut iletişimini sağlamak üzere Hewlett Packard tarafından ilk kez üretilen HP-IB (Hewlett Packard-Interface Bus), dünya standardı olarak kabul edilmiş ve sonraları GPIB (General Purpose Interface Bus) adıyla yaygınlaşmıştır. IEEE-488 interface adıyla özel ad alan bu haberleşme kartları, aynı hat üzerinde 9 MB saniye hızla 32 cihaz ile haberleşebilir. Bu çalışmada bulunan Keithley 199 DMM dahili tarama üniteleri, bilgisayarla IEEE-488 arabirim kartı aracılığıyla iletişim kurmuştur.

Sistem kontrolünde, IEEE-488 kartına ek olarak National Instruments LAB PC çok fonksiyonlu kartı da kullanılmıştır. Bu kart giriş ve çıkış olarak programlanabilir 3x8 adet sayısal giriş-çıkış, 12 bitlik sekiz adet 75KHz örnekleme hızına sahip analog giriş ve iki

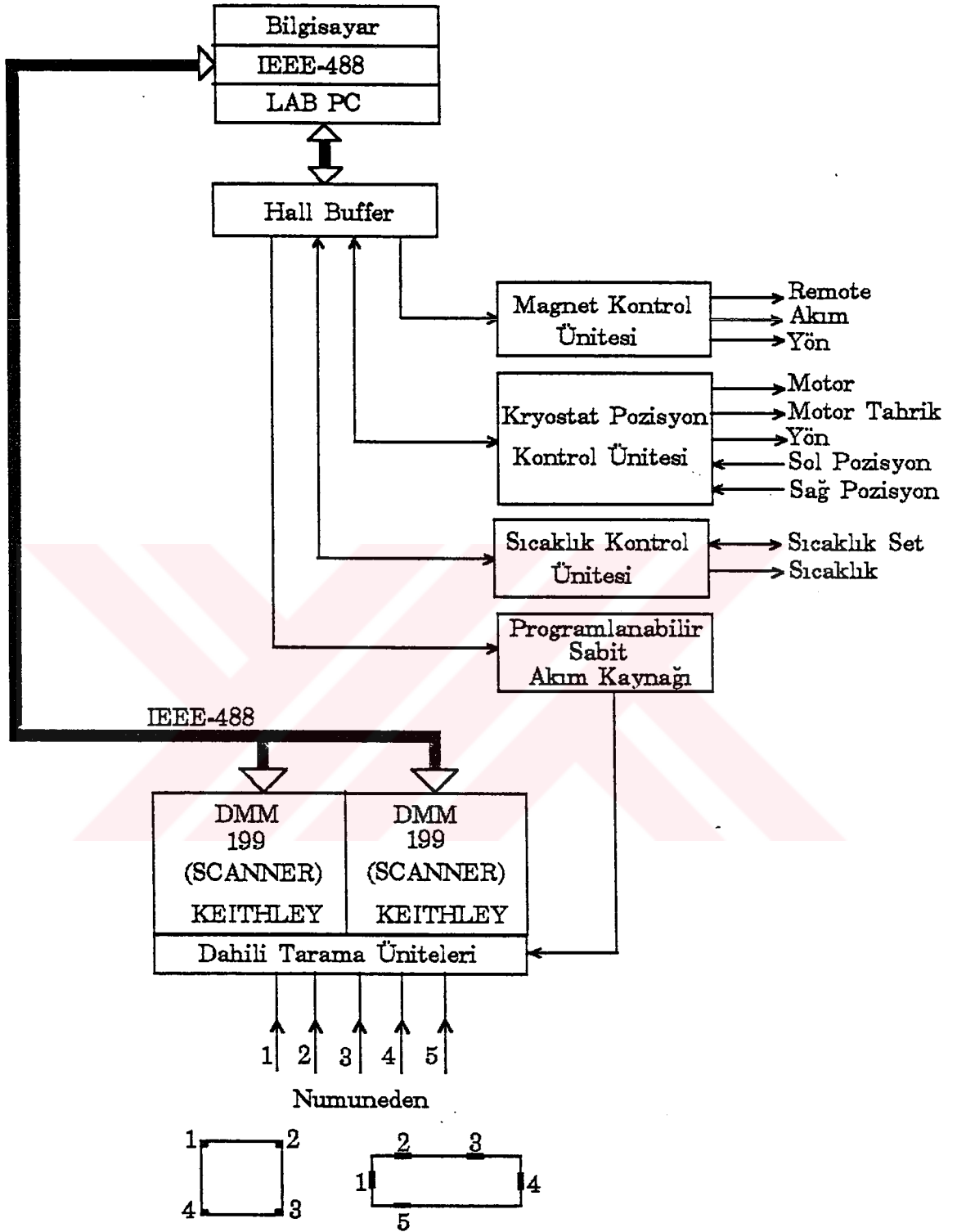
adet analog çıkış birimine sahiptir. Bu bölüm içerisinde açıklanacak olan arabirimler LAB PC kartı ile kontrol edilmektedir.

Genel maksatlı kullanımı mümkün olan LAB PC kartı ile otomatik Hall sistemi dışında aynı laboratuvarında bulunan fotolümünesans gibi başka sistemler de kontrol edilmektedir. Bundan dolayı, gerek kartı korumak gerekse de tek bir kart ile daha fazla sistem kontrol etmek için bir Hall Buffer ünitesi tasarlanmıştır. Böylece LAB PC kartı tarafından başka bir sistemin kontrol edilmesi durumunda, bu buffer ünitesi ile Hall sistemine ait sayısal giriş ve çıkışlar bloke edilerek diğer sistemin kontrol edilmesi için kullanılabilir. Bundan dolayı, Hall ölçümü yapılırken bu ünitenin aktif hale getirilmesi gerekmektedir.

Hall ve rezistivite ölçümlerinin bilgisayar kontrolünde yapılması için, bir dizi donanım ve yazılımın geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Sahip olduğumuz laboratuvar şartları içerisinde bu otomasyonun sağlanması için aşağıdaki ünitelerin yazılımları ile birlikte hazırlanması gerekmektedir.

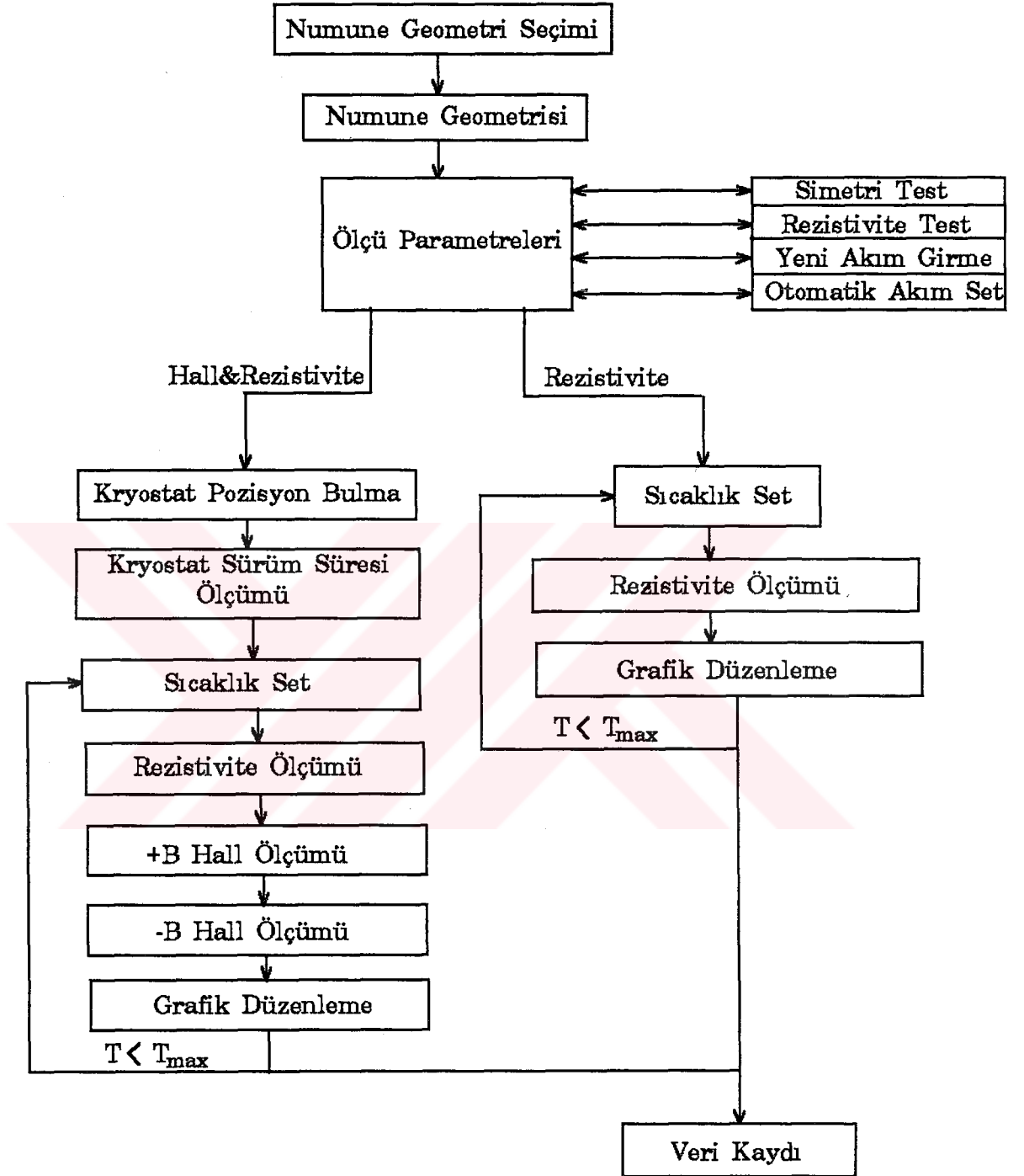
- a) Kryostat Sürücü Motoru Kontrol Ünitesi,
- b) Magnet Yön Kontrol Ünitesi,
- c) Programlanabilir Sabit Akım Kaynağı,
- d) Sıcaklık Kontrol Ünitesinin Bilgisayar Kontrolüne Alınması

Sistem donanımına ait blok diyagram şekil 3.1'de, yazılıma ait blok diyagram ise şekil 3.2'de sunulmuştur.



Standart Numune Geometrileri ve Bağlantı Numaraları

Şekil 3.1 Otomatik Hall ve rezistivite ölçüm sisteminin blok diyagramı



Şekil 3.2 Sistem kontrol yazılımına ait blok diyagram

3.2 Literatür Özeti

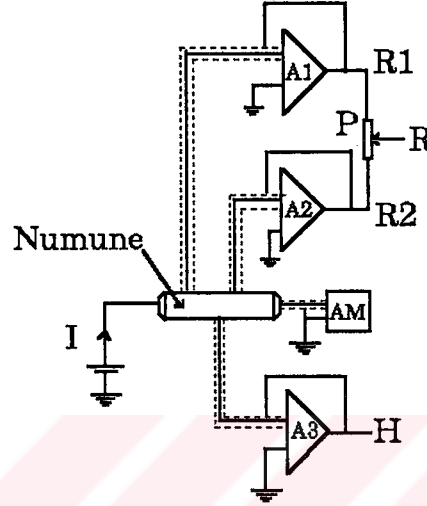
Geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler incelenirken yüksek dirençli değerlere sıkça rastlanmaktadır. II-VI grubu yarıiletken bileşiklerin yanında, infrared dedektörlerin yapımında kullanılan silisyum kristali ve Metal-Semiconductor Field Effect transistor(MESFET) teknolojisinde altlık olarak kullanılan yarıyalıtkan (SI) GaAs gibi, yarıiletken teknolojisinin vazgeçilmez bileşikleridir. Bu kristallerin, elektriksel, magnetik ve optik karakteristiklerinin açığa çıkarılması, elektronik teknolojisinde son derece büyük önem arz etmektedir.

Sızıntı için gerekli tedbirlerin alınması durumunda, dirençleri $10^7\Omega$ 'a kadar olan kristaller, geleneksel cihaz ve tekniklerle ölçülebilmektedirler. Dirençleri $10^7\Omega$ 'dan daha yüksek olan numunelerin parametrelerini elde etmek için, devre dizaynında daha fazla dikkat gerekmektedir. Birçok araştırmacı, numune geometrisi ve kontak problemleri açısından büyük kolaylıklar getiren van der Pauw tekniğinden hareketle, dirençleri $10^{12}\Omega$ 'dan daha yüksek gövde direncine sahip yarıiletkenlerin özelliklerini açığa çıkarmak için, deneysel sistemler geliştirmeye çalışmışlardır(Hemenger, 1973). Başlangıçta el ile kontrol edilen Hall ve rezistivite ölçme sistemleri, zamanla bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte yarı-otomatik sonraları da otomatik kontrol sistemlerine dönüşmüştür.

Yarıiletkenlerin dirençlerini ölçmede, AC ve DC metodu olmak üzere iki önemli teknik vardır. DC metodu yüksek rezistiviteli yarıiletkenlerin dirençlerini ölçmede sağladığı kolaylıklardan dolayı daha çok kullanılmaktadır.

Bu metod, numune üzerindeki kontaklara uygulanan herbir prob arasında, yüksek giriş dirençli birim kazançlı yükselticilerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu birim kazançlı yükselticiler, sızıntı akımını azaltır ve numune ile yükseltici arasındaki yollarda oluşacak parazik kapasiteyi bertaraf ederek sistemin zaman sabitinin azalmasına sebep olur. Şekil 3.3'de yüksek rezistiviteli numunelerin ölçümüne izin veren ve üç birim kazançlı yükseltici kullanan, bir Hall sistemi verilmiştir. Akımı sızıntıdan korumak için, giriş etkili bir şekilde toprağa sürülmüş ve akım geri besleme modunda işlem gören bir elektrometre ampermetresi ile ölçülmüştür. Özdirenci ölçmek için okunacak gerilim, R1 ve R2 dirençleri arasından ölçülür. Hall potansiyeli ise, magnetik alan uygulanmamışken P

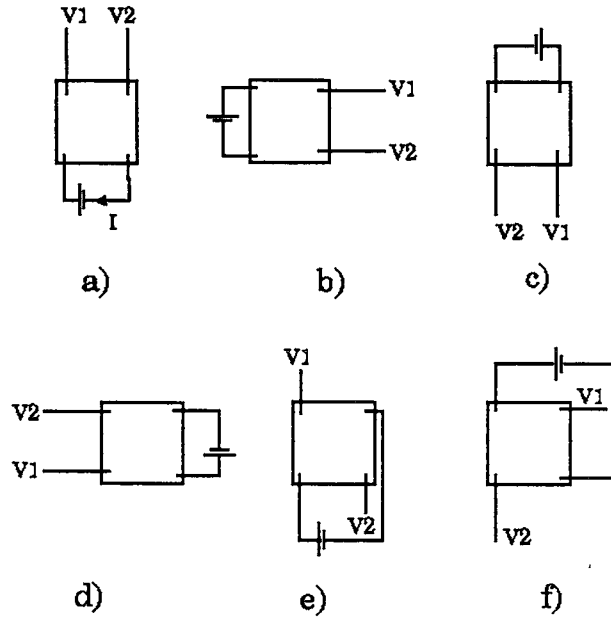
potansiyometresinin sıfır okuma vermesi sağlandıktan sonra, magnetik alanın uygulanmasıyla R ile H arasından ölçülür. (Hemenger, 1973)



Şekil 3.3 Üç birim kazançlı yükseltici kullanan bir Hall sistemi

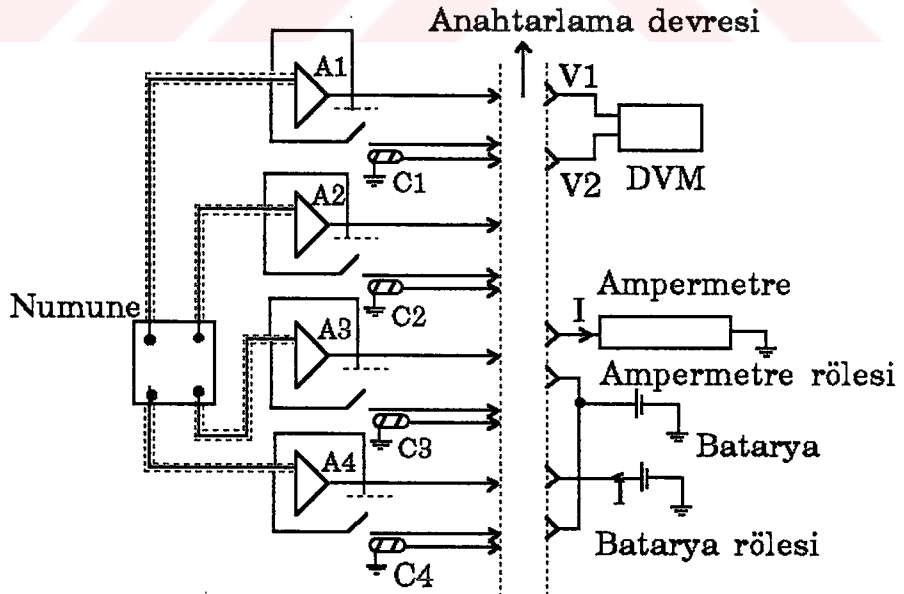
Bazı durumlarda direnç ölçümleri için çubuk şeklinde numune hazırlamak elverişli değildir. Özellikle küçük boyutlu ve ince tabakalı numunelerde veya iyon ekilmiş tabakalar için, van der Pauw tekniği kullanışlı bir alternatif sunar. Bu teknik, veri analizinin karışıklığına karşın, numune geometrisi ve kontak problemlerinde kolaylıklar sağlar. Van der Pauw tarafından teklif edilen kare geometride, Hall ve rezistivite değerlerinin elde edilmesi için, pratikte numune üzerinden altı ölçüm alınır. Bu duruma ait kombinasyonlar şekil 3.4'de gösterilmiştir.

Şekil 3.4'de gösterilen altı şeklin herbirinde, batarya kontaktarı boyunca akım uygulanmakta, V1 ve V2 arasından da gerilim ölçülmektedir. Altı şeklin ilk dördünden elde edilen veriler rezistivite ölçümlerinde kullanılmaktadır. Magnetik alan uygulandığı durumda, (e) ve (f) konfigürasyonları ise Hall ölçümlerini verir. Akım ve gerilimin farklı konfigürasyonları, bir anahtarlama devresi kullanılarak başarılabılır.



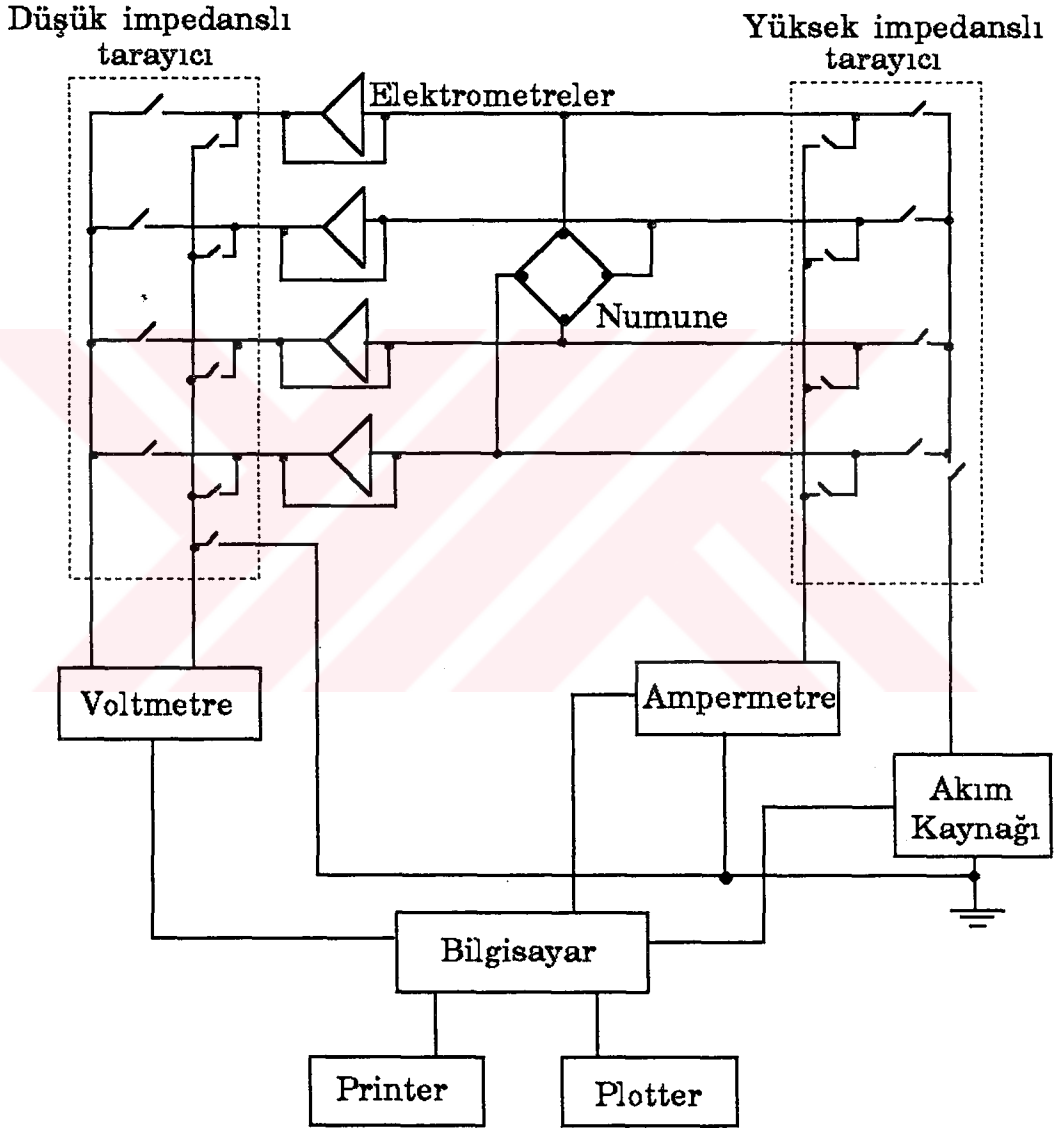
Şekil 3.4 Van der Pauw tekniğinde kullanılan konfigürasyonlar

Şekil 3.5'de numuneye tutturulmuş olan kabloların herbiri 1m olmasına karşın, devar ve birim kazançlı yükseltici girişleri arasında kullanılan triaksiyel kabloların topraklanmasıyla iç ve dış koruma sağlanmış olur.



Şekil 3.5 Van der Pauw tekniği ile Hall ve rezistivite ölçme sistemi(Hemenger, 1973)

Keithley 610C ve benzeri elektrometreler, giriş direnci $10^{14} \Omega$ 'dan daha büyük olan birim kazançlı yükselticilere ve $\pm 100V$ 'luk işlem aralığına olan ihtiyacı gidermektedirler. Bu sistemde veriler alınmadan önce, zaman sabitinin altı katı kadar beklemek gerekmektedir. Bu ise direnci $10^{12} \Omega$ ve daha büyük olan numunelerden alınacak Hall ölçümlerini etkili bir şekilde sınırlamaktadır.

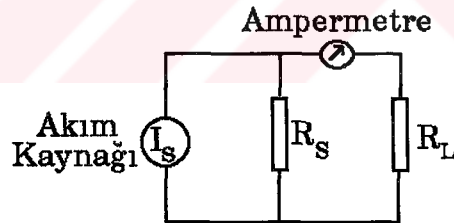


Şekil 3.6 Hall otomasyon sisteminin şematik diyagramı(Look, 1989)

Look(1989), şekil 3.6'da yüksek rezistiviteli numuneler için, birim kazançlı amlifikatörlerin kullanıldığı bir Hall otomasyon sisteminin temel fikirlerini içeren bir dizayn teklif etmiştir.

Hall otomasyon sistemi büyük ölçüde sistemin dengeye gelme süresini kısaltma etrafında yoğunlaşmıştır. Yüksek dirençli tarayıcının giriş ve çıkışlarıyla ampermetreye ve elektrometreye olan girişler üçlü dizayna sahiptir. Böylece dış etkiler ortak bir noktada topraklanmakta bu da gürültü ve kablo yüklemeye etkisini büyük ölçüde azaltmaktadır. Elektrometreler, ampermetrenin çok düşük akımları ölçmesini sağlamak ve yüksek dirençli numunelerde en önemli hata kaynağı olan sistemin dengeye gelme süresini kısaltmak için konulmuştur. Böylece ölçüm süresi de azaltılmış olacaktır.

Yüksek rezistiviteli numuneleri incelemek için dizayn edilen sistemlerde, ölçülebilecek direnç sınırı sabit akım kaynağının minimum çıkışıyla sınırlandırıldığından, akım kaynağı $10^{12}\Omega$ 'dan büyük bir çıkış direncine sahip olmalı ve akımı 10^{-10} A civarında düzenleyebilmelidir. Yüksek rezistiviteli numunelerde, sabit akım kaynağı genelde gerilim modunda işlem göreceğinden kaynaktan numuneye yönelen akım azalacaktır. Bu durum Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Akım kaynağının yüksek dirençli numunelerde çalışması

Numuneye uygulanacak akımın, numunenin direncini temsil eden R_L üzerinden, tamamının geçmesini sağlamak için, akım kaynağının çıkış direnci (R_S)'nin ideal olarak sonsuz direnç göstermesi gerekmektedir. Bu, pratik olarak mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı yüksek rezistiviteli numuneleri incelerken, çıkış akımı R_S ve R_L dirençleri arasında paylaşılacağından numune üzerinden istenilen akımın tümü geçemeyecektir. Ampermetrenin R_L direncine seri bağlanmasıyla bu sorunun üstesinden gelinebilir. Böylece numune üzerinden çıkış akımının tamamı geçmese bile, uygulanan akımın ne

kadarlık bir kısmının geçtiği ölçülerek, değerlendirmeler bu okunan akım değeri üzerinden yapılarak hesaplamaların daha doğru olması sağlanır.

Lyakhu ve arkadaşları(1979), RU5-O2 sıcaklık kontrol birimi, R306 düşük dirençli DC potansiyometresi, V2-25 yüksek dirençli DC mikrovoltmetresi ve P-136 sabit akım kaynağı ile bir otomasyon sistemi kurmuşlardır. Geliştirmiş oldukları magnet kontrol ünitesi, programlanmış bir komutatörün yanısıra el ile de kontrol edilebilmekte ve 0.2-25A arasında akım üretebilmektedir. Magnetin bobinleri arasındaki akım pratik olarak sıfıra düştükten sonra magnetik alan yön değişmektedir. Ölçüm esnasında RU5-O2 servo sistem programıyla kontrol edilen numune sıcaklığı, hızlı ve yüksek hassasiyetli bir sıcaklık regülatörü ile düzenlenmektedir. Düşük sıcaklıklara inmek için bir düşük hızlı buharlaştırıcı (low-lag evaporative) kullanılmışsa da yine de 85 K'den daha düşük sıcaklıklara inilememiştir. Sistem, azalan sıcaklıklarla ölçüm alabilmekte ve bir sıcaklıktan diğerine geçmek için ortalama 50s zaman almaktadır.

İletkenlik ve Hall potansiyelini ölçmek için kullanılan R306 düşük dirençli DC potansiyometresi asimetric gerilimlerini kısmen bertaraf edebilmekte, V2-25 mikrovoltmetresi ise kontak direncinin etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır. P-136 akım kaynağı ise $\pm 1\mu A$ ile $\pm 0.1A$ arasında isenilen akıma 0.05 % hassasiyetle set edilebilmektedir.

Bu dizayndan elde edilen ölçüm sonuçları, otomatik olarak "KSP-4 program tape" ünitesine kaydedilmektedir. Bir ölçüm sonunda KSP-4 program tape otomatik olarak durur ve zaman rölesi açılır. Böylece ölçüm, program bir sonraki ölçüm sıcaklığını set edene kadar geciktirilmiş olur. Tayin edilen bir sıcaklıkta Hall ve direnç ölçümü yapmak için, akımın herbir yönü için 6 ölçümden toplam 12 ölçüm almak gerekmektedir ki bu 12s almaktadır. 300-85K arasında sıcaklığa bağlı numune parametrelerinin toplam ölçüm süresi 60 dakikadır. Alınan ölçümlerden tesbit edilen mobilite hatasının, %5-6 mertebesinde olacağı rapor edilmiştir.

Forbes ve arkadaşları da(1981), Van der Pauw tekniğini esas alarak Hall ve rezistivite ölçme sistemi geliştirmişlerdir. Kurmuş oldukları sistem, Hall ölçümünün yanısıra karanlık iletkenlik, fotoiletkenlik ve Foto-Hall olayı deneylerine de imkan sağlamaktadır.

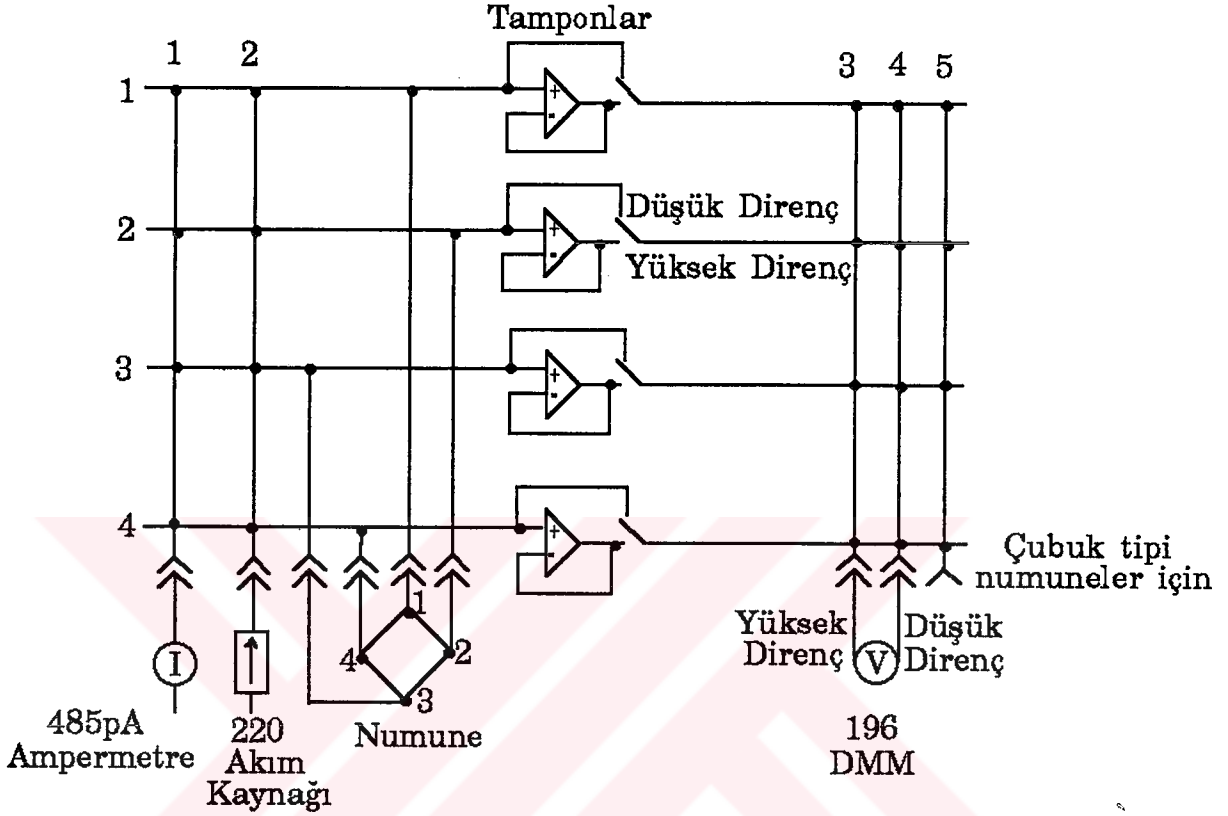
Ticari olarak satın almış oldukları HP 2240A sayısal giriş-çıkış kartını kullanarak, hem numune üzerinde istenen anahtarlama hemde gerekli korumayı sağlamışlardır. Yüksek dirençli numuneleri ölçerken Keithley 604 elektrometresini kullanmışlardır. Giriş direnci $10^{14}\Omega$ olan bu elektrometre, $10^{11}\Omega$ gibi yüksek dirençli numunelerde, 10s'de dengeye ulaşarak gerekli ölçümler yapılabilmektedir. 3000 Gauss'luk sabit magnetik alan üzerinden ölçüm yapılan sistemde, öz direnç numune derinliğinin bir fonksiyonu olarak ölçülebilmektedir. Si GaAs üzerinden alınan ölçüm sonuçlarından elde edilen mobiliteye ait deneysel değerler, yaklaşık $300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ civarında hata içermektedirler. Bir monokromatör yardımıyla yapılan Foto-Hall olayı ölçümleriyle de, derin seviyelerin enerjileri, yoğunlukları ve taşıyıcı ömür süreleri hakkında bilgi elde edilebilmektedir.

Bugün, yüksek rezistiviteli numunelerin karakterizasyonunda, hızlı anahtarlama kabiliyetine sahip olan ve istenilen anahtarlama isteğe bağlı olarak yazılım yoluyla set edilebilen dahili tarama üniteleri geliştirilmiştir(Keithley, Test & Measurement, 1993-1994). Ayrıca, gürültü oranı çok düşük (100ppm) ve yüksek çıkış direncine ($10^{12}\Omega$) sahip olan programlanabilir akım kaynakları, sağlamış oldukları geniş akım aralıkları ($\pm 5\text{nA} - \pm 101\text{mA}$) ile, ticari olarak satın alınabilmektedir.

Kendi laboratuvar imkanları içerisinde bir Hall otomasyon sistemi kurmak isteyen araştırmacılar, satın alabilecekleri elektrometreler, programlanabilir sabit akım kaynakları, dahili tarama üniteleri gibi ayrı ayrı cihazların yanısıra, Hall otomasyon sistemini bir bütün olarak satın alabilme imkanına da sahiptirler. Ek D'de bu şirketlerin isim ve adresleri verilmiştir.

Keithley Instruments tarafından üretilen "Model 80A Hall Effect System", anahtarlama yapan elektronik kartlar, arabirimler, aksesuar ve yazılımlardan müteşekkil bütün bir Hall olayı sistemidir. Bu sistem, sağlamış olduğu geniş akım uygulama ve gerilim ölçme aralığı ile, geniş bir direnç ($10^{-2}\Omega - 10^{12}\Omega$) ve sıcaklık aralığı (4-300K) üzerinden ölçüm yapabilmektedir. Magnet ve kryostatın konumu yazılım ile otomatik olarak kontrol edilmektedir. MS QuickBasic programlama dilinde yazılan yazılım, dört kontaklı Van Der Pauw ve altı kontaklı çubuk numunelerinden birini otomatik olarak seçebilmekte ve alınan ölçümlerden hareketle Hall katsayısını, taşıyıcı yoğunluğunu ve taşıyıcı mobilitelerini hesaplayabilmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçları depolayabilme,

bastrabilme ve çizdirebilme özelliklerinin yanında sistem donanım hatalarını da teşhis edebilmektedir.



Şekil 3.8 Keithley Instr. tarafından geliştirilen "Model 7065 Hall Effect Card"

Anahtarlama ve koruma, sistemin en önemli kısmını oluşturan "Model 7065 Hall Effect Card" (Şekil 3.8) tarafından yapılmaktadır. Kartı numuneye bağlamaya yarayan 8 ayrı DC yükselticiye ve istenilen tüm anahtarlama ve koruma işlemlerini sağlayacak bir tasarıma sahip olan bu kart vasıtasıyla kullanıcı, sekiz düşük ve yüksek dirençli ayarlardan istediğini yazılım yoluyla seçebilmektedir. Hassasiyeti ve kabiliyetleri diğer sistemlerle kıyaslanamayacak kadar fazla olan bu kart, $10^{12}\Omega$ ve daha yüksek dirençli numunelerde $50nV$ 'a kadar Hall potansiyeli ölçülebilmektedir. Numune tutucuya, tarama ünitelerine, bilgisayara ve diğer cihazlara bağlanmak için gerekli tüm aksesuara sahiptir. Bilgisayar ile diğer cihazlar IEEE-488 arabirim kartı vasıtasıyla haberleşmektedir.

Düşük ve yüksek direnç modunda isteğe bağlı olarak işlem gören kart, yüksek direnç modunda $100T\Omega$ 'dan daha büyük giriş direncine ve 60Ω 'dan daha küçük çıkış direncine sahiptir. Her iki işlem modunda da gerilim aralığı $+8V$ 'dan $-8V$ 'a kadar olup, giriş besleme akımı $150fA$ 'den daha küçüktür.

3.3 Kryostat Sürücü Motoru Kontrol Ünitesi

Hall ve magnetorezistans ölçümleri, numunenin içinde bulunduğu kryostatın, $B=0$ ve $B \neq 0$ 'da seri bir grub ölçüm yapılmasını gerektirmektedir. Numunenin monte edildiği kryostatın pozisyonunu kontrol etmek için, kryostat pozisyon kontrol devresi tasarımı yapılarak LAB PC kartı vasıtasıyla bilgisayar kontrolüne alınmıştır. Bu devrenin şeması Şekil 3.9'da verilmiştir. Bu sistem LAB PC kartı ile beş sayısal sinyalle haberleşmektedir. Bu sayısal giriş ve çıkışların adları ve fonksiyonları bu bölüm içinde verilecektir.

Her ne kadar kryostat pozisyon kontrol ünitesi, Hall ve rezistivite ölçümlerini otomatik olarak yapabilmek için geliştirilmiş olsa da, bu üniteyi fotolüminesans gibi aynı deneysel düzenek üzerinde yapılan ve kryostat içindeki numunenin ışığa göre pozisyonunun son derece hassas olduğu bir optik karakterizasyon yönteminde de kullanılacağını düşünürsek, bu motor kontrol devresinin bilgisayar kontrolüne ek olarak el ile de kontrol edilebilecek özellikte olması gerekmektedir. Bu düşünce ile geliştirilmiş olan küçük bir el kontrol ünitesi ile kryostata, ray üzerinde milimetre mertebesinde hareket imkanı da sağlandı. Bu görev, ileride açıklanacak olan D1 dijiti kontrol eden anahtara paralel olarak bağlanmış bir ince ayar buton ile sağlanmıştır. El kontrol ünitesinde D1 dijite ek olarak, D2 ve D5 gibi dijitlerini kontrol eden anahtarlar da yerleştirilerek ve üniteyi sisteme bağlayan kablolar da uzun tutularak, kullanıcıya sistemden uzak olduğu durumda da kontrol imkanı sağlanmıştır. Böylece optik ayarlanmanın yapıldığı kısımda daha rahat ve daha hassas çalışma imkanı hedeflenmiştir.

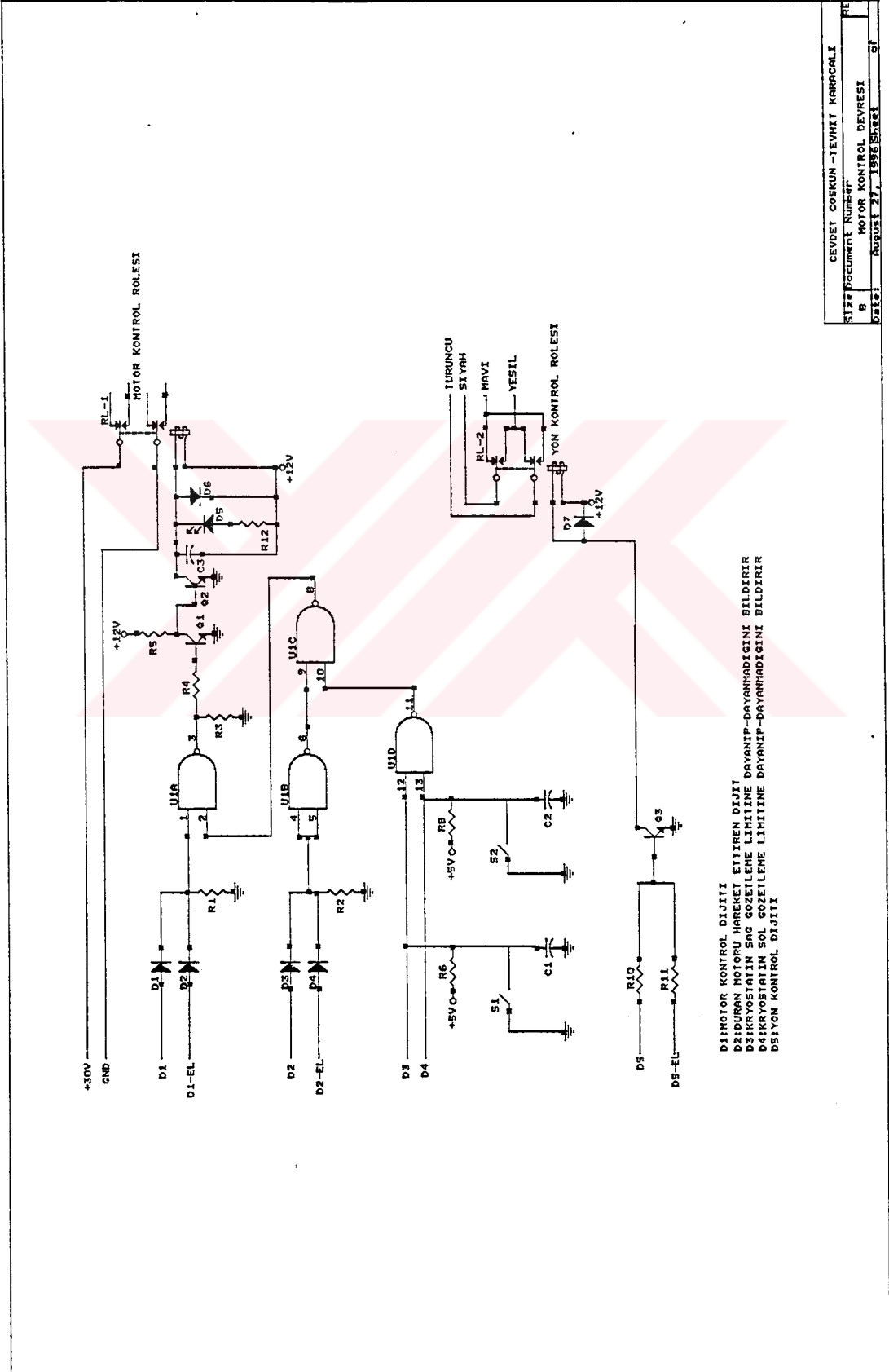
Sistem, bilgisayar kontrolüne ek olarak, el kontrol modunda da işlem göreceği şekilde tasarlanmış olduğundan, bilgisayar kontrol dijitleri ile bunlara paralel olarak bağlanan el kontrol dijitleri, 1N4148 diyotları kullanılarak birbirlerinden yalıtılmıştır.

Devrede oluşması muhtemel gürültü, C1 ve C2 kondansatörleri ile toprağa çekilmiştir. Motor kontrol rölesi önüne konan LED, kryostatın hareket halinde olup olmadığı hususunda kullanıcıya bilgi verir.

D1- Motor Kontrol Dijiti : Bu dijiti, motor tarafından bir ray üzerinde sürülen kryostatın, hareketinin herhangi bir anında durdurulmasını veya duran sistemin tekrar hareket ettirilmesini sağlar. Kullanıcı, kryostatı sabit bir noktada tutmak için D1 sinyaline '0' (0V) ve hareket için '1' (+5V) değerini verir.

D2- Gözetleme Limitleri Tarafından Durdurulan Motoru Tahrik Eden Dijit: Hall ve magnetorezistans ölçümlerinde kryostatı, magnetik alanın içinde ve dışında olmak üzere iki pozisyonda tutmak gerekmektedir. Bu amaçla, ray üzerinde bu noktalara karşılık gelen pozisyonların sınırını gözetlemek üzere, kendi dizaynımız olan silindirik geometride butonlar yapılmıştır. Sistemin bu butonlardan birini zorlaması durumunda, dizayn edilen kontrol ünitesi motor kontrol dijiti 0 yaparak sistemi durdurur. Bu noktada tekrar hareket için D5 dijiti ile motorun yönünün değiştirilmesi ve motorun tahrik edilmesi için D2 dijite, limit göstergesi dijitinin 0 seviyesine ulaşmaya kadar 1 verilmesi gerekmektedir. Motor, sınır dijiti 0 olduğunda, D2'nin seviyesinden bağımsız olarak D1 dijitinin seviyesine göre hareket eder.

D3 ve D4- Kryostatın Sağ ve Sol Sınır Gözetleme Dijitleri: Hall ve rezistivite ölçümlerinde, kryostatın pozisyonunun bilinmesi, elde edilen verilerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için gereklidir. Otomatik kontrol sisteminde bilgisayarın, numunenin magnetik alanın içinde mi yoksa dışında mı bulunduğunu bilmesi ve ölçüm sonuçlarını buna göre değerlendirmesi için bu pozisyon gözetleme dijitlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dijitler kryostatın ray üzerindeki pozisyonuna göre değer alacağından bilgisayar tüm durumlarda numunenin pozisyonunu belirleyebilecektir. Şekil 3.9'dan da anlaşılacağı gibi, kryostatın sağ gözetleme limitine dayandığı durumda, R8 direnci üzerinden besleme gerilimine çekilmiş olduğundan dolayı '1' değerine sahip olan D3 dijiti (S1), şaseye çekileceğinden '0' değerine sahip olacak ve bilgisayara *dijital input* olarak giden bu bilgi ile, kryostatın pozisyonu hakkında bilgi verilecektir. Aynı zamanda mantıksal tasarım, motor kontrol rölesini tetikleyerek 30 V besleme hattını kesecek ve kryostatın



Şekil 3.9 Kryostat sürücü motoru kontrol ünitesi açık devre şeması

limiti zorlamasına engel olacaktır. Aynı durum, sol gözetleme limitini kontrol eden D4 dijiti (S2) içinde geçerli olacaktır. Dolayısıyla, D3 ve D4 dijitleri '1' değerine sahip olduğu müddetçe, kryostatın herhangi bir limitte olmadığından, D1 ve D2 dijitlerinin durumuna göre ya seyir halinde yada limitler arasında durdurulmuş olduğu anlaşılacaktır.

D5- Motor Yön Kontrol Dijiti: Kryostatın sistem içinde bir boyutlu hareketinde yönü kontrol etmek üzere, sürücü olarak kullanılan motor statoruna yönelen akımın yönü, bir çift kontaktörlü röle ile kontrol edilmektedir. D5 dijitime verilecek 1 sinyali Şekil 3.9'da Q3 tranzistörünü sature ederek RL-2 rölesini çektirir ve motor statoruna giden akımın yönünü değiştirir. D5' in 0 seviyesi için Q3 tranzistörü kesimde olacağı için akımın yönü değişmemiş olacaktır.

3.4 Magnet Yön Kontrol Ünitesi

Hall ve magnetorezistans ölçümlerinde, yarıiletkenlerin elektriksel ve magnetik parametrelerini elde edebilmek için, magnetik alanın *normal* ve *ters* durumlarına ait ölçümlerin yapılması gerekmektedir. Bölümümüzde mevcut olan ve el ile kontrol edilen "Varian V2901 Regulated Magnet Power Supply" elektromagnetinin akım akış yönünü kontrol etmek için bir ara devre geliştirildi. Bu ara devre ile magnetin akım yön kontrolü tamamen bilgisayara devredilmiştir. D1 dijitime bilgisayardan verilen 1 sinyali, kontrolün bilgisayar tarafından ele alınmasını sağlar ve bunu şekil 3.10'da gösterilen D1 diyotu ile kullanıcıya bildirir. Akım yön değişimi esnasında, magnet sarımlarını besleyen akım hattında bulunan rölede ve besleme devresinde oluşacak geçici akımları ve etkilerini bertaraf etmek için akım kontrol rölesi ile önce güç kaynağının akımı bu röleyi kontrol eden D3 dijiti ile kesilir. Bu işlemi müteakip akım yönünü kontrol etmede kullanılan 100 A'lık çift kontaktörlü röleyi tahrik etmek üzere 220 AC gerilim, RL-2 rölesi üzerinden uygulanır. Bu röle şekil 3.10'da gösterilen Q4 tranzistörü tarafından sürülmektedir. Optik izalatör devresi ile bilgisayardan gelen D2 yön kontrol dijiti, elektriksel olarak yalıtılmıştır.

Devrede kullanılan optik-kuplaj ile düşük ve yüksek gerilimli kısımlar arasında izalasyon sağlanmış olur ve böylece devrede oluşabilecek herhangi bir yüksek gerilimin bilgisayara zarar vermesi önlenir. Optik- kuplajın çalışma mantığı gereği, giriş ve çıkış devreleri

birbirinden tamamen ayrı olması gerektiğinden, birbirinden yalıtılmış güç kaynakları ile beslenmiştir. Bu devre ile magnet sarımlarına giden akımın yönünü kontrol etmek için işlem sırası şöyle olacaktır. D3 dijiti ile güç kaynağının magnete vermiş olduğu akım kesilecek ve istenilen magnetik alanın yönü D2 dijiti ile seçilip tekrar D3 dijiti ile devreye akım verilecektir. Magnet tarafından oluşturulan akımın büyüklüğü şimdilik bilgisayar kontrolüne verilmediğinden, magnetik alanın büyüklüğü, magnet kontrol ünitesi üzerindeki akım kontrol potansiyometrisi ile başlangıçta istenilen seviyeye ayarlanması gerekmektedir.

3.5 Programlanabilir Sabit Akım Kaynağı

Hall ve rezistivite ölçümlerinde, numunenin elektronik parametrelerini elde etmek için numune üzerinde bir dizi akım-gerilim ölçümü yapılması gerekmektedir. Ölçümlerde, yarıiletken numune boyunca heriki yönde de akım uygulanmakta ve numunenin geometrisine bağlı olarak yapılan farklı kontaklardan da gerilim okunmaktadır. Düşük öz dirençli numunelerin aksine yüksek rezistiviteli numunelerden, büyük gövde dirençleri dolayısıyla yüksek akım geçememektedir. Bu sebeple, karakterize edeceğimiz numunenin yapısına bağlı olarak programlanabilen bir sabit akım kaynağı gerekmektedir.

Geliştirmiş olduğumuz programlanabilir sabit akım kaynağı, $\pm 5.10^{-3}A$ ile $\pm 5.10^{-8}A$ arasında istenilen akıma %2 hassasiyetle set edilebilmektedir. Açık devre şeması Şekil 3.11'de verilen sabit akım kaynağının elektronik özellikleri ve çalışma prensibi aşağıda verilmiştir.

Sabit akım kaynağının artı ve eksi çıkışlarının sistemden $10^{12}\Omega$ 'dan daha büyük bir izalasyon direncine sahip olması gerekmektedir. Sabit akım kaynağı bir bilgisayar tarafından kontrol edileceğinden, akım kaynağına gelen TTL sinyallerinin, devreden yalıtılması gerekmektedir. Bunu başarmanın en kolay ve sağlıklı yolu, bir optik-izalatör devresi kullanmaktır. Bir LED ve bir de fototranzistörden ibaret olan optik-izalatör, giriş LED'inin bir TTL sinyal ile beslenmesi ile bitişiğindeki fototranzistör tetiklenerek giriş sinyalini çıkışa taşır.

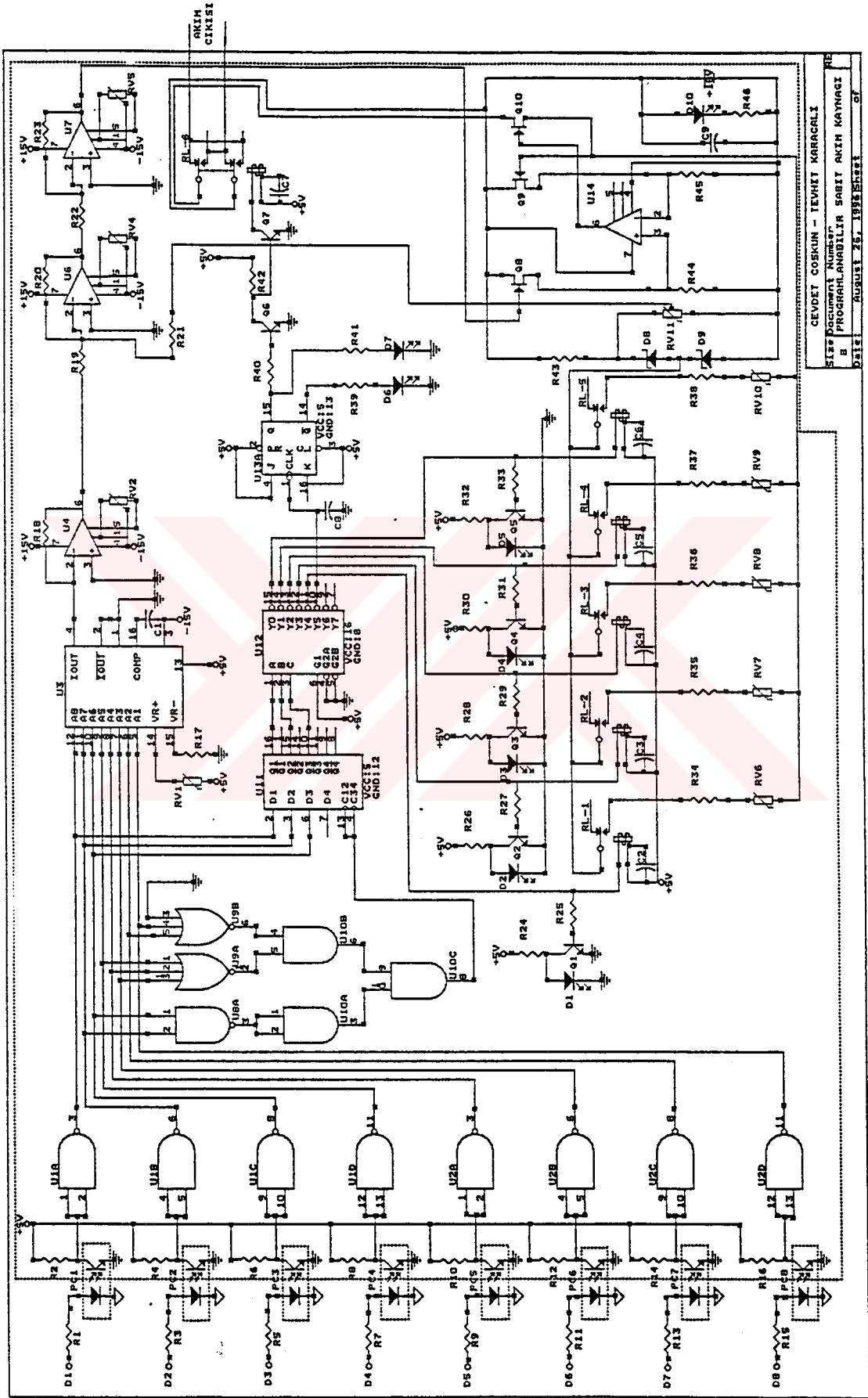
Akım kaynağının tüm fonksiyonları 8-bitlik bir hat üzerinden kontrol edilmektedir. Akım, 8-bitlik sayısal-analog dönüştürücü (Digital-Analog Converter-DAC) ile kontrol edilmektedir. Şekil 3.11'de, çıkış gerilimi RV1 değişken direnci ile ayarlanan dönüştürücü, 0V ile 9V arasında gerilim üretebilmektedir. Oluşturulacak olan akımın değerini de büyük ölçüde bu analog çıkış gerilimi, dolayısıyla da DAC 'a gelen sayısal bilgi tayin edecektir.

8-bitlik DAC 'ın sol tarafına $2^8 = 256$ farklı bilgi gelebilmektedir. Bu 256 farklı bilgidен ilk 6 adedi skala ve akımın yönünü, geriye kalan 249 adedi ise akımın ince ayarını belirlemede kullanılmaktadır.

Sistem, sırayla herbiri diğerinden 10 kat büyük dirençle seri bağlanmış skala belirleyici beş röle ile akımın basamağını belirlemektedir. Dolayısıyla üretilecek akım beş ayrı skala da kontrol edilir. Kaynağın dizaynı gereği akımın ince ayarını set etmeden önce skalanın set edilmesi gerekmektedir.

Set edilmek istenen akımın dahil olduğu skala, 8-bitlik sayısal bilginin ilk üç biti ile sisteme bildirilmektedir. Skalanın set edilmesi sırasında bu üç bitin dışında tüm bitlerin 0 olması gerekmektedir. Diğer bitlerden herhangi birinin 1 olması durumunda skala set işlemi yapılamayacaktır. Skala tutucu bitlerin bir 7475 flip-flop entegresi ile tutulup *izin* girişini kontrol eden bilginin de, ilk üç bit dışındaki tüm bitlerin 0 olması durumunda 1 üreten bir mantıksal tasarım ile kontrol edilmesiyle, skala set edecek bilgi kod çözücüyeye gönderilmektedir. Şekil 3.11'de U8, U9 ve U10 entegreleri ile gösterilen kısım, 8-bitlik sayısal bilginin son beş bitinin 0 olması durumunda 1 üretecek, diğer durumlarda da 0 üretecektir. TTL 7475 entegresinin çalışma prensibi gereği *izin* girişine 1 gelmesi durumunda girişteki bilgiyi devam ettirecek, 0 gelmesi durumunda ise giriş bilgisi ne olursa olsun çıkışlar aynı seviyede kalacaktır.

TTL 7475 entegresinden alınan bilgiler, kod çözücü TTL 74138 entegresiyle çözülmektedir. Bu entegre düşen kenarda tetikleme yaptığı için, alınan çıkışlardan sadece bir tanesi 0, diğer tüm çıkışlar 1 olmaktadır. Bundan dolayı bu entegrenin çıkışlarına bağlanan skala belirleyici rölelerden sadece bir tanesi çekili olacaktır. Böylece istenen skala set edilmiş olacaktır.



Şekil 3.1.1 Programlanabilir sabit akım kaynağı açık devre şeması

Hall ve rezistivite ölçümlerinde, daha hassas bir ölçüm yapmak ve istenmeyen etkileri bertaraf etmek için, magnetik alanın normal ve ters durumları gibi akımın da pozitif ve negatif durumları için ölçü almak gerekmektedir. Bu sebeple geliştirdiğimiz akım kaynağı, çıkış akımının yönünü de kontrol edebilmektedir.

Akımın yönünü kontrol etmek için yine sayısal bilginin ilk üç bitinden faydalanılmıştır. Üç bitten elde edilen $2^3 = 8$ adet farklı bilgiden ilk beşi skala belirlemek üzere kullanılmıştı. Geriye kalan üç adet bilgiden biri de akımın yönünü kontrol etmektedir. Bu, bir TTL 7476 (J-K flip-flop) entegresi kullanılarak başarılmıştır. 74138 entegresinden alınan çıkışlardan biri hafıza birimi olarak görev yapan 7476 entegresinin girişine uygulanmıştır. Bu entegre içerisinde bulunan hafıza biriminin çalışma mantığı, 7475 entegresi gibidir. Yani girişine uygulanan sinyalin değeri 1 olduğunda çıkış 1 olacak, 0 gönderildiğinde ise eski durumunu muhafaza edecektir. Bu entegrenin çıkışından alınan sinyal, ortak emiterli iki tranzistör üzerinden Şekil 3.11'deki RL-6 rölesini çektirecektir. Akımın yönü, 7476 entegresinin biri diğerinin tersi olan iki çıkışından alınan sinyallerle sürülen farklı renkteki iki LED ile kullanıcıya bildirilmiştir. Ayrıca skala belirleyici rölelere paralel bağlanmış olan tranzistörlerle sürülen LED'lerle de hangi skalanın aktif olduğu konusunda kullanıcı bilgilendirilmiştir.

Akımın yönü set edildikten sonra istenilen akım değeri set edilebilmekte ve akımın yönü değiştirilmek istenmedikçe de eski durumunu korumaktadır. Gerek skala tutucu kısım gerekse de akım yönünü tutucu kısım, ancak son beş bitin 0 olması durumunda ve ilk üç bitin değiştirilmesi ile mümkün olacaktır. Dolayısıyla sistem belli bir akım üretme halindeyken akımın yönü ve skalası değiştirilememektedir. Yön ve skala değişimi için önce akımın sıfırlanması, daha sonra istenilen set işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Sistem yazılımla kontrol edileceği için bu işlem sırası ile otomatik olarak yapılır.

Geliştirmiş olduğumuz programlanabilir akım kaynağı, Leach (1977) tarafından dizayn edilen sabit akım kaynağı esas alınarak yapılmıştır. Leach tarafından geliştirilen akım kaynağında skalalar bir komutatör ile, akımın yönü ise bir ters çevirici anahtar kullanarak el ile kontrol edilmiştir. Akımın ince ayarı ise Şekil 3.11'deki D8 ve D9 diyotlarına paralel olarak bağlanmış bir potansiyometre ile yapılmaktadır. Devrede akımın ne şekilde oluştuğu ise aşağıda açıklanmıştır.

Akım kaynağının vereceği akımı tayin eden üç analog gerilim vardır. Bunlardan birisi DAC tarafından elde edilen analog gerilim, ikincisi 5.6 V'luk D8 ve D9 diyotlarına paralel bağlanmış potansiyel bölücü RV11 değişken direnci tarafından elde edilen gerilim, üçüncüsü ise 5.6 V'luk D8 ve D9 diyotları arasından alınan gerilimin, aktif röleye seri bağlanmış olan direnç üzerinde oluşturduğu potansiyel farkıdır.

DAC'ın çıkışından alınan analog gerilim ile RV11 değişken direnci üzerinden alınan gerilim U7 entegresi tarafından toplanarak elde edilen gerilim, çıkış akımını kontrol eden Q8 Fet tranzistörünün kapı terminaline uygulanmaktadır. Bu gerilim arttıkça Q8 Fet tranzistörünün I_D akımı aşağıdaki denklem gereği azalacaktır.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (3.1)$$

Burada, V_{GS} tranzistörün kapı ve kaynak teminalleri arasındaki gerilim, V_P ve I_{DSS} ise tranzistöre ait bir sabitlerdir. Bundan dolayı U14 entegresinin ters çevirmeyen girişindeki gerilim de azalır. Bir kıyaslayıcı olarak çalışan U14 entegresinin çıkışı -Vcc'ye doğru kaçır. Bu entegrenin çıkışı Q10 Fet tranzistörünün kapı terminaline bağlı olduğundan Q10 tranzistörünün kapı terminalindeki gerilim de azalır. Dolayısıyla Q10 Fet tranzistörünün I_D akımının artmasına sebep olur. Böylece DAC'ın çıkışından alınan analog gerilim arttıkça üretilen akım da artacaktır. Aynı şekilde DAC'ın çıkışından alınan analog gerilim azaldıkça üretilen akım da azalacaktır. Q9 tranzistörü geribesleme tranzistörü olarak çalışır ve çıkış akımının artma ve azalmasını kontrol etmek için konmuştur. Çıkış akımı arttığında Q9 tranzistörünün kapı gerilimi artar ki bu da Q8 tranzistörünün I_D akımının azalmasına sebep olur. Böylece R45 direnci üzerindeki gerilim azalacak ve U14 entegresinin çıkışının +Vcc'ye doğru kaçmasına sebep olacaktır.

Sistemin sabit akım üretmeye hazır hale gelmesi için birtakım ayarların yapılması gerekmektedir ki bunlar Ek E'de verilmiştir.

3.6 Sıcaklık Kontrol Ünitesi

Sıcaklık kontrolü için Leybold Variotemp HR1 model sıcaklık kontrol ünitesi kullanıldı.

Bu cihazla, sıcaklık sensörünün ölçülen dirence karşılık vermiş olduğu çıkış gerilimi LAB PC kartı üzerinden okunarak ve sensöre ait *sıcaklık-direnç* tablosunu kullanarak Lagrangian interpolasyon yöntemiyle numune sıcaklığı hesap edildi. Buna karşılık, set edilmek istenen sıcaklığa ait direnç değeri de yine aynı bilgilerden interpolasyonla hesap edilerek, LAB PC kartının bir DAC'ından sıcaklık kontrol ünitesinin referans girişine uygulandı. Sıcaklık kontrol ünitesine, referans gerilim giriş ve sıcaklık karşılığı çıkış gerilimleri işlemsel kuvvetlendiricilerle oluşturulan birim kazançlı amlifikatörlerle izolasyon emniyeti sağlanmıştır. Sıcaklık kontrol sisteminin verimli çalışması için hassasiyet, ısıtıcı direnç değeri ve direnç ölçme skalalarının, başlangıçta kullanıcı tarafından uygun değerlere set edilmesi gerekir.

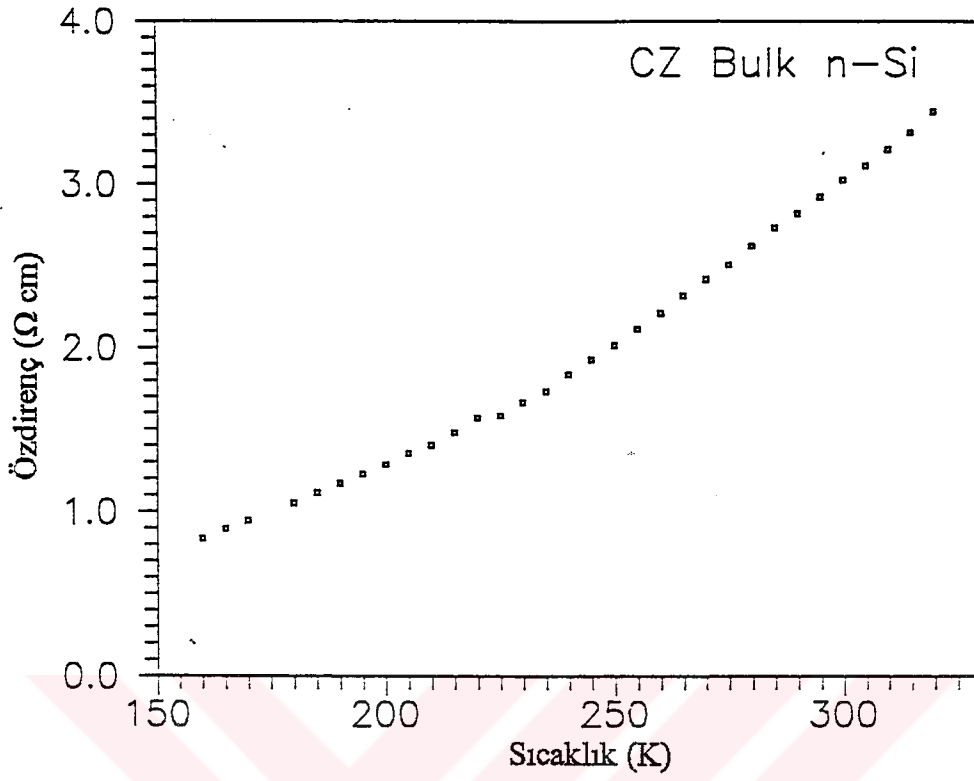


4. TEST VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

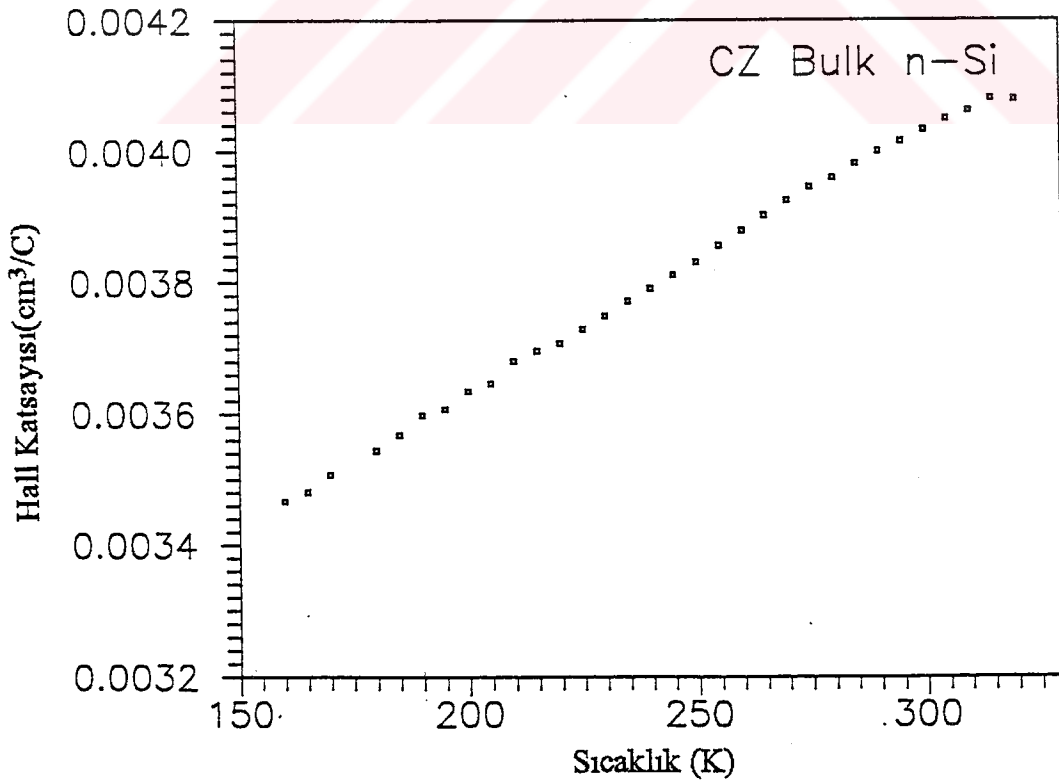
Gerçekleştirilmiş bulunan otomasyon sisteminin güvenilirliğini test etmek amacıyla CZ(Czochrolski) tekniği ile büyütülmüş Si kristalinden bir test numunesi hazırlanmıştır. Van der Pauw tekniği gereği kare geometride hazırlanmış olan numunenin elektriksel parametrelerinin sabit akım ve sabit magnetik alan altında, değişen sıcaklıkla ne şekilde değiştiği gözlenmiş ve alınan sonuçlar şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Ölçüm 4.6mA sabit akım ve 3020 Gauss sabit magnetik alan altında yapılmıştır. Sıcaklık değişim basamağı ise 5K'dir.

İncelenen numune, 10^{15} mertebesinde fosfor katkılanmış n-Si kristalidir. Yüksek evsafa olan test Si kristalinde fosfor atomları yüzeysel donör seviyeleri oluşturmuştur. Normalde 10K'nin altındaki donör seviyelerinin tamamı iyonize olacağından 10K üzerinde serbest taşıyıcı yoğunluğu sıcaklıkla değişmeyecektir. 150-320K aralığındaki test ölçümünde gerçekten de taşıyıcı yoğunluğunda belirgin bir değişimin olmadığı gözlenmiştir(Şekil 4.4).

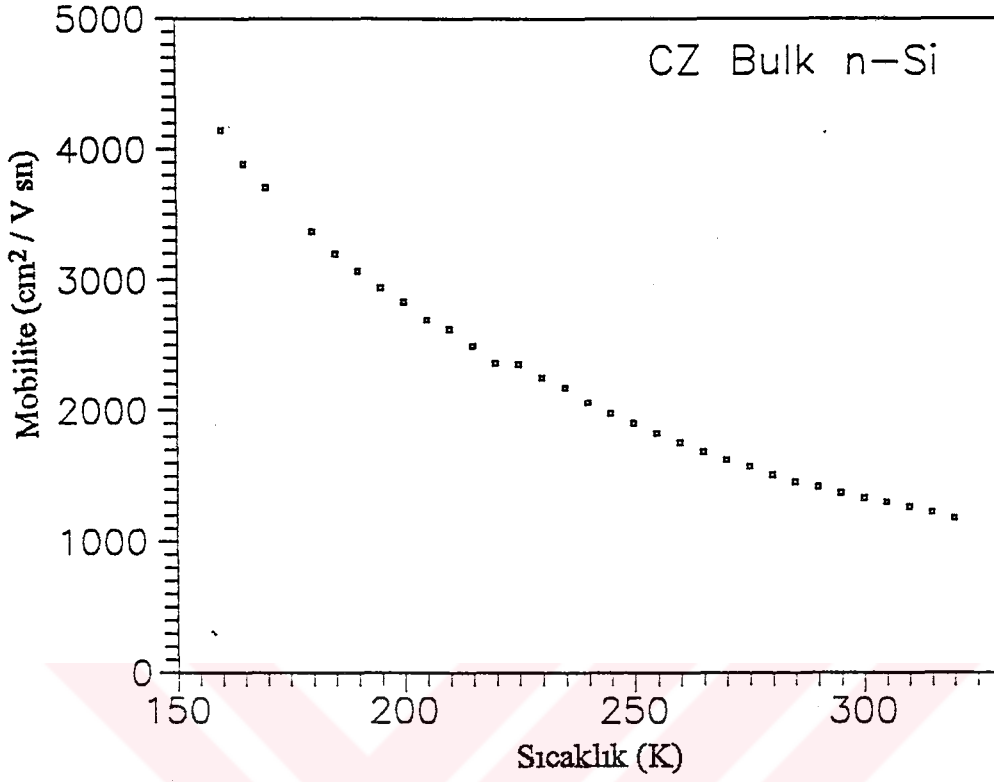
Sıcaklığa bağlı olarak şekil 4.1'de gözlenen öz direncin değişimi, ölçülen Hall katsayısı ile birlikte analiz edildiğinde dirençte sıcaklıkla orantılı olan artış, serbest taşıyıcıların hareketliliklerinin azalması ile açıklanmaktadır. Bu ise, serbest taşıyıcıların örgü içindeki saçılmalarının sıcaklıkla artacağı sonucunu teyit etmektedir.



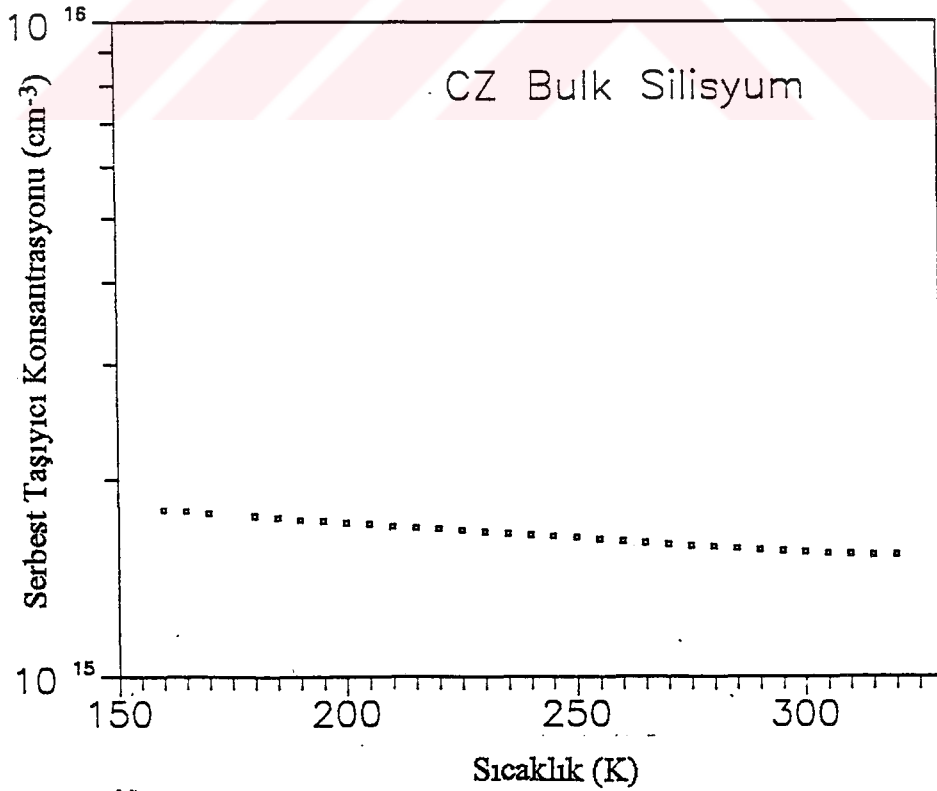
Şekil 4.1 CZ tekniği ile büyütülmüş n-Si kristalinde özdirencin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.2 CZ tekniği ile büyütülmüş n-Si kristalinde Hall katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.3 CZ tekniği ile büyütülmüş n-Si kristalinde mobilitenin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.4 CZ tekniği ile büyütülmüş n-Si kristalinde serbest taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklığa bağlı değişimi

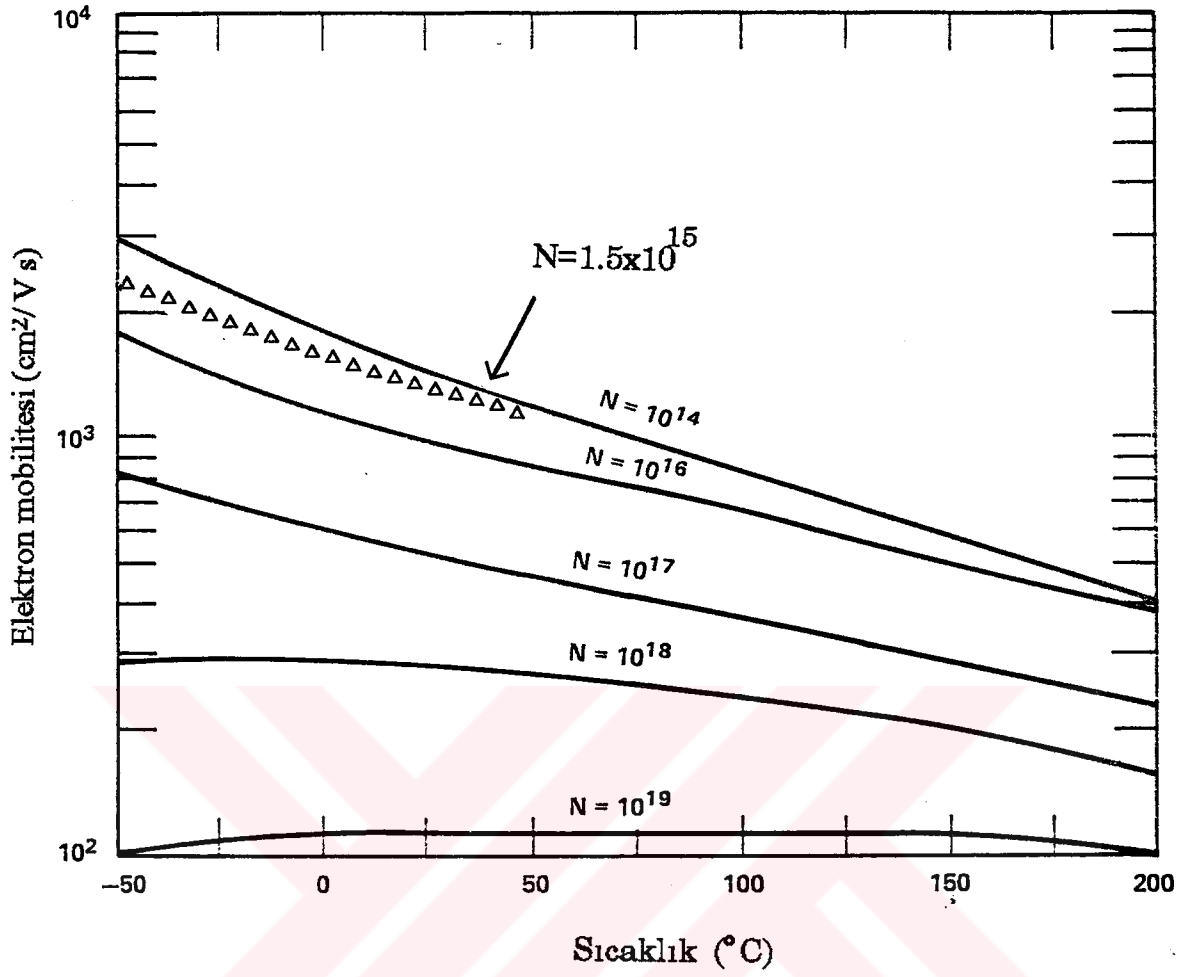
5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Elektronik teknolojisinin temelini oluşturan yarıiletkenlerin, optik özelliklerinin yanısıra elektriksel ve magnetik özelliklerinin de açığa çıkarılabilmesi onlardan daha fazla istifade etmenin yollarını açacaktır. Elektriksel karakterizasyon için en çok başvurulmuş ve itibar edilen tekniklerden biri olan Hall ve rezistivite ölçme sistemini el ile kontrol eden deneysel düzenekler, bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle yerini otomatik kontrol sistemlerine bırakmıştır.

Hall ve öz direnç ölçüm sistemi, tamamı labotaruvar imkanları içerisinde gerçekleştirilen bu çalışmayla bilgisayar kontrolüne alınmıştır. Sistemin güvenilirliğini test etmek amacıyla van der Pauw tekniği esas alınarak kare geometride hazırlanmış n-Si kristaline ait elektriksel parametreler elde edilmiştir. Deneysel olarak bulunan elektron mobilitesinin literatürdeki bilgiyle karşılaştırılması şekil 5.1'de verilmiştir.

Genel maksatlı bir kontrol sistemi olarak geliştirilen bu deneysel düzeneğin bir monokromatör ile birleştirilmesiyle yapılabilecek Foto-Hall olayı ölçümlerinden, yarıiletkenlerdeki derin tuzak seviyelerinin enerjileri ve yoğunlukları hakkında bilgi elde edilebilecektir. Yarıiletkenlerin optik karakterizasyonunda önemli bir nicelik olan taşıyıcı ömür sürelerinin belirlenmesi için yapılan karanlık iletkenlik ve fotoiletkenlik deneyleri de bu deneysel düzenek üzerinde mümkün olabilecektir. Bundan dolayı başlangıçta elektriksel karakterizasyon amaçlı geliştirilen bu sistemle numuneye ait optik parametreler elde edilebilecektir.

Bu sistemle yarıiletken numuneler üzerinde magnetorezistans ölçümleri de yapılabilmesi için, geliştirilen ünitelere ek olarak, magnetik alanın enine ve boyuna durumlarını sağlayacak bir ünitenin de geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece öz direnç ve Hall etkisinin, değişen magnetik alandan ne şekilde etkilendiği tesbit edilerek numunenin magnetik özellikleri daha iyi belirlenmiş olacaktır.



Şekil 5.1 Deneysel olarak bulunan elektron mobilitelerinin (Δ) -50, +50°C bölgesinde, literatürdeki bilgiyle karşılaştırılması (Beadle, et al, 1985)

EK AÇIKLAMALAR**Ek A. Kryostatı Sürücü Motoru Kontrol Ünitesinde Kullanılan Malzeme Listesi****DİRENÇLER**

R1-R2:2K
R3:4K7
R4:2K
R5:10K
R6-R8:4K7
R10-R11:10K
R12:1K

KONDANSATÖRLER

C1-C2:1 μ F
C3:10 μ F, 100V

DİYOTLAR

D1-D4:1N4148
D5:Kırmızı LED
D6-D7:1N4007

TRANZİSTÖRLER

Q1:BC 107
Q2-Q3:BC 141

RÖLELER

RL-1,RL-2:Çift Kontaklı

ENTEĞRELER

U1:7400 TTL

EK B. Magnet Yön Kontrol Ünitesinde Kullanılan Malzeme Listesi**DİRENÇLER**

R1-R3:2K
R5:680R
R6:2K
R7-R8:680R
R9:2K2
R10-R12:2K

KONDANSATÖRLER

C1-C2:680nF

DİYOTLAR

D1:Kırmızı LED

TRANZİSTÖRLER

Q1:BC 141
Q2:BC 237
Q3:BC 141
Q4:BC 141

RÖLELER

RL-1:Tek Kontaklı
RL-2:Çift Kontaklı
RL-3:Kontaktör(100A)

ENTEĞRELER

U1:7475 TTL
U2:7400 TTL
PC1:PC 817

EK C. Programlanabilir Sabit Akım Kaynağı Malzeme ListesiDİRENÇLER

R1:1K2
R2:2K2
R3:1K2
R4:2K2
R5:1K2
R6:2K2
R7:1K2
R8:2K2
R9:1K2
R10:2K2
R11:1K2
R12:2K2
R13:1K2
R14:2K2
R15:1K2
R16:2K2
R17:4K7
R18:4K7
R19-R23:75K
R24:270R

Değişken Dirençler

RV1:5K
RV2-5:10K
RV6:500R
RV7:5K
RV8:50K
RV9:500K
RV10:2M
RV11:100K

KONDANSATÖRLER

C1:47pF
C2-C7:10nF
C8:47pF
C9:1 μ F - 16V

DİYOTLAR

D1-D6:Kırmızı LED
D7:Yeşil LED
D8-D9:5V6 Zener
D10:Yeşil LED

TRANZİSTÖRLER

Q1-Q6:BC 237
Q7:BC 141
Q8-Q10:BF 245

RÖLELER

RL-1-RL5:Tek Kontaklı
RL-6:Çift Kontaklı

ENTEĞRELER

U1-U2:7400 TTL
U3:I408L8 DAC
U4-U7: KF 351
U8:7400 TTL
U9:7427 TTL
U10:7408 TTL
U11:7475 TTL
U12:74138 TTL
U13:7476 TTL
U14:KF 351
PC1-PC8:PC 817

EK D. Ticari Hall Olayı Cihazları

1988 yılı itibariyle, Hall olayı otomasyon sistemi yapan ve satan şirketlerin adı, adresleri ve özellikleri Tablo D.1'de verilmiştir.

Tablo D.1 Ticari Hall Olayı Cihazları (1988 yılı itibariyle)

<u>Şirketler</u>	<u>Özellikleri</u>
(1) Bio-Rad Sem. Meas.Sys. 19 Blackstone St. Cambridge, MA 02139	Magnet, sıvı azot devar v.s.'den oluşan komple sistem
(2) DCL Sem. 1851 Stonewood Dr. Dayton, OH 45432	Magnet, sıvı azot devar v.s.'den oluşan komple sistem
(3) Keithley Instr. 30500 Bainbridge Rd. Cleveland, OH 44139	Yüksek direnç kapasiteli, magnet ve kryojenik sistemden oluşan komple sistem
(4) MMR Techonologies 1400 Stierlin Rd. ,# A-5 Mountain View, CA 94043	Kryojenik sistem
(5) Systems for Science P.O. Box 844 Chesterland, OH 44026	Yüksek direnç kapasiteli, magnet ve kryojenik sistemden oluşan komple sistem

Ek E. Programlanabilir Sabit Akım Kaynağının Ayarlanması

1. İlk olarak, kart üzerindeki test noktalarını dikkate alarak, simetrik olarak beslenen OP-AMP entegrelerinin *off-set* ayarlarının yapılması gerekmektedir. U3 entegresi devredeki soketinden çıkarılarak 4 nolu terminal topraklanır. Ayrıca RV11 potansiyel bölücüsü üzerindeki gerilim de toprağa çekilerek U4 toplama devresine giden analog gerilimler sıfırlanır. Bundan sonra U4 işlemsel kuvvetlendiricisinden başlayarak her bir işlemsel kuvvetlendiricinin çıkışındaki gerilim sıfırlanır.

2. Entegrelerin *off-set* ayarları yapıldıktan sonra birinci skala seçilip, DAC'ın girişine 6 sayısına ait binary bilgi gönderilir. RV11 değişken direnci ile akım kaynağının çıkış akımı birinci skalanın minimumu 0.5 mA'e ayarlanır. Daha sonra DAC girişine 256 sayısına ait binary bilgi verilerek yine birinci skalanın maksimum değeri olan 5mA, akım kaynağının çıkışından okunmak üzere RV1 direnci ayarlanır.

3. Diğer skalalar için, DAC girişine 6 sayısına ait binary bilgi gönderilerek her bir skalanın minimumu olan 0.05, 0.005, 0.0005 ve 0.00005 mA elde etmek üzere RV7-RV10 değişken dirençleri ayarlanır.

KAYNAKLAR

- Blood, P. and Orton, J.W., 1992, *The Electrical Characterization of Semiconductors*, Academic Press, 93-99, 131, 151.
- Van der Pauw, L. J., 1958, *Philips Rep.*, 13, 1.
- Look, D., 1989, *Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices*, John Wiley & Sons Ltd., 1-4, 40-43.
- Hemenger, P. M., 1973, *Rev. Sci. Instr.*, 44(6), 698-670.
- Lyakhu, G. L., Korotchenkov, G. S., Molodyan I. P., 1979, *Plenum Publishing Corp.*, 2, 196-197.
- Forbes, L., Tillinghast, J., 1981, *Rev. Sci. Instr.*, 52(7), 1047-1050.
- Keithley Test & Measurement, 1993-1994, *Catalog and Reference Guide*, 102-105.
- Leach, M. F., 1977, *J. Phys. E-Sci. Instr.*, 10, 879.
- Gaonkar, R. S., 1984, *Microprocessor Architecture, Programming and Applications with the 8085/8080A*, 382, 570.
- Beadle, W. E., Tsai J. C. C., Plummer, R. D., 1985, *Quick Reference Manual For Silicon Integrated Circuit Technology*, John Wiley & Sons, 2-53.