



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Eş Zamanlı Veri Transferi ile Lcr-Metre ve Doğru Akım Kaynaklarının Senkron Çalıştırılması Sağlanarak Yarıiletken Cihazların Karakterizasyonunda Yeni Yöntem Geliştirilmesi

 Gülçin ERSÖZ DEMİR^{a,*},  İbrahim YÜCEDAĞ^b,  Ercan ŞAHİN^b,  Yakup BAKIŞ^c

^a Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İşletme Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^c İRADETS, İnovatif Radyasyon Dedektör Sistemleri, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: glcnersoz@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1171603

ÖZ

Organik elektronik alanında üretilen yarıiletken aygıtlar yüksek elektrik alanlar altında tetiklenmektedir ve bu tür aygıtların dielektrik analizini 100-200 V'luk gerilim altında yapan cihazlar piyasada bulunmamaktadır. Bu problemi çözebilmek için yüksek gerilim altında dielektrik analiz yapabilen niteliklere sahip bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bunun için geniş bir frekans aralığında birkaç voltluk AC uygulayarak dielektrik spektroskopisi analizi yapan cihaza, harici bir DC gerilim kaynağı uygun bir şekilde bağlandı. Bu iki cihazın eşzamanlı çalışması gerekmektedir fakat bu işlemin bağımsız iki cihaz için manuel olarak yapılması oldukça zordur. Bu çalışmada, geliştirdiğimiz eş zamanlı veri transfer programı kullanılarak DC gerilim kaynağı (yarıiletken malzemeler veya aygıtların Akım-Gerilim (I-V) özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan) ve LCR Metre cihazının (Kapasitans-Gerilim (C-V), Kapasitans-Frekans (C-f), Kondüktans-Gerilim (G-V) ve Kondüktans-frekans (G-f) özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan) eş zamanlı haberleşebilmesi için program geliştirilmiştir. Eş zamanlı veri transfer program ile elde edilen tüm veriler program arayüzünde oluşturulan Excel dosyasına aktararak dielektrik spektroskopik özelliklerine ait bilgiler kayıt edilmektedir. Geliştirilen programın literatürde dielektrik özellikleri daha önceden belirlenmiş malzemeler üzerine yapılan ön çalışmalarda tutarlı ve hassas veriler elde edilebildiği ve yüksek bir performansla çalıştığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dielektrik Spektroskopisi, Eş Zamanlı Programlama, LCR Metre, DC gerilim kaynağı.

Developing A Novel Method for The Characterization of Semiconductor Devices by Providing Synchronous Operation of Lcr-Meters and Direct Current Sources by Using Real-Time Data Acquisition

ABSTRACT

Semiconductor devices produced in the field of organic electronics are triggered under high electric fields, and since such studies are new in the literature, devices that perform dielectric analysis under voltage of 100-200 V are not available in the market. In order to solve this problem, a measurement system with such characteristics was developed. For this purpose, an external DC voltage source was conveniently connected to the device that performs dielectric spectroscopy analysis by applying a few volts of AC over a wide frequency range. These two devices need to be perfectly synchronized, but it is very difficult to do this manually for two independent devices. In this study, a program that enables simultaneous communication between the DC voltage source (used in the determination of the Current-Voltage (I-V) properties of semiconductor materials and devices) and the LCR Meter

1794

device (used to determine the basic properties such as Capacitance-Voltage (C-V), Capacitance-Frequency (C-f), Conductance-Voltage (G-V), and Conductance-frequency (G-f)) was developed using real-time data acquisition program. All data obtained with the program can be transferred to the Excel file created in the program interface, and information on dielectric spectroscopic properties can be recorded. It was observed that the developed program was able to obtain consistent and sensitive data in preliminary studies on materials whose dielectric properties were previously determined in the literature, and that it worked with a high performance.

Keywords: Dielectric Spectroscopy, Simultaneous Programming, LCR Meter, Source Meter.

I. GİRİŞ

Elektromanyetik özelliklerle ilgili yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde, geniş frekans aralıklarında analiz ve inceleme yapma yönünde ilerlediği görülmektedir[1]–[6]. Modern araştırma laboratuvarları her yıl ölçüm sistemlerini ve cihazlarını revize etmektedir. Verileri toplama ve işlemede kullanılan ölçüm araçları ve yazılımlar doğru seçildiğinde daha doğru ve bilimsel gerçekliğe daha yakın sonuçlar edilmektedir. Bu durum hem laboratuvar ortamının etkin kullanımını hem de araştırmacıların zamanını verimli kullanılmasını sağlayarak, laboratuvarında çalışanların üretkenliğini ve bilimsel çalışmaların sayısını artırmaktadır.

Genellikle sistem esnekliği ve gelişmiş otomasyon, evrensel ölçüm sistemi ve yazılım yolu ile elde edilmektedir. Bilgisayar ve bağlantılar arasındaki iletişim ve uyum; donanım, yazılım ve tasarım araçlarının kombinasyonu ile sağlanmaktadır[7], [8]. Ölçüm sistemi ve bilgisayar etkileşimini sağlama, ölçülen değerleri işleme ve sanal ölçüm sistemleri geliştirmeyi sağlayan yazılım arayüzlerinden biri de eş zamanlı veri transfer programlama sistemidir. Eş zamanlı veri transfer programının kullanılmasıyla uygulamaların yapılabirliği hem pratikleşmekte hem de hata oranları azalmaktadır[9], [10]. Özellikle araştırma laboratuvarlarında dielektrik spektroskopi ölçüm sistemi, fotovoltajik ölçüm sistemi, manyetik ölçüm sistemleri, fiziksel, kimyasal ölçüm sistemleri ve daha birçok cihaz farklı eş zamanlı veri transfer programları yönetilebilmektedir. Bu ölçüm sistemlerinden dielektrik spektroskopi ölçüm sistemi, ışık, sıcaklık ve harici dış dc gerilim gibi değişik tetiklemelerin eş zamanlı programlanmasıyla sürekli olarak geliştirilebilmektedir[7], [11]–[13].

A. DIELEKTRİK SPEKTROSKOPİ

Genel olarak dielektrik spektroskopi, geniş bir frekans aralığında uygulanan düşük elektrik alanları altında malzemelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Malzemelerin elektrik ve dielektrik özelliklerinin hassas ve doğru bir şekilde incelenmesi, yapılan çeşitli ticari veya teknolojik uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalarda bazı organik malzeme tabanlı cihazlarda cihazın aktif hale gelmesi için yüksek elektriksel alan uygulanmasının gerektiği görülmüş, bu nedenle de yüksek elektrik alan altında malzemelerin değişen elektrik alan altındaki davranışları araştırma konusu olmuştur[14]–[21]. Bu tür organik elektronik cihazların çalışma gerilimi kimi zaman DC yüksek alan gerektirmektedir. Bu durum cihazların iç yük dengesinde çeşitli elektriksel kutuplanma mekanizmalarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ortaya çıkan elektriksel kutuplanma mekanizmaları elektronik cihazlarının performansının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Kutuplanma mekanizmalarını açıklayabilmek ve hesaplayabilmek için elektronik cihazların dielektrik spektroskopisi yöntemiyle dielektrik parametrelerinin hesaplanabilmeleri gerekmektedir. Bu çalışmalarda malzemelere geniş bir frekans aralığında AC uygulanırken aynı zamanda ikinci bir kaynakla harici DC uygulanarak malzemelerin farklı elektriksel zorlamalar altında çok daha geniş kapsamlı elektriksel analizleri yapılabilmektedir. Ancak bu özelliklerin ikisine birden sahip olan cihazlar çok yüksek maliyetli olmakla birlikte uygulanan DC bias gerilimleri ± 40 V'u geçememektedir.

Literatürde dielektrik spektroskopisi ölçüm cihazları kendinden DC beslemeli ve maksimum ± 40 V aralığında çalışmaktadır. Bu değer bile bazı yüksek DC tetiklemesi gerektiren uygulamalar için yetersiz gelmektedir. GW Instek 8105 LCR metre cihazı ise yine kendinden DC beslemeli bir cihaz olup

maksimum ± 2 V aralığında DC gerilim sağlamaktadır. Bu sebeple, hem yüksek DC ön gerilim isteyen çalışmaları gerçekleştirebilmek amacıyla hem de GW Instek 8105 LCR metre cihazının DC ön gerilim aralığını artırabilmek amacıyla ikinci bir kaynak ile DC yüksek elektrik alan uygulama yoluna gidilmiştir. Bu şekilde ± 200 V DC yüksek ön gerilimli elektrik alanda AC frekansa karşı dielektrik özelliklerin değişiminin incelenmesi sağlanacaktır.

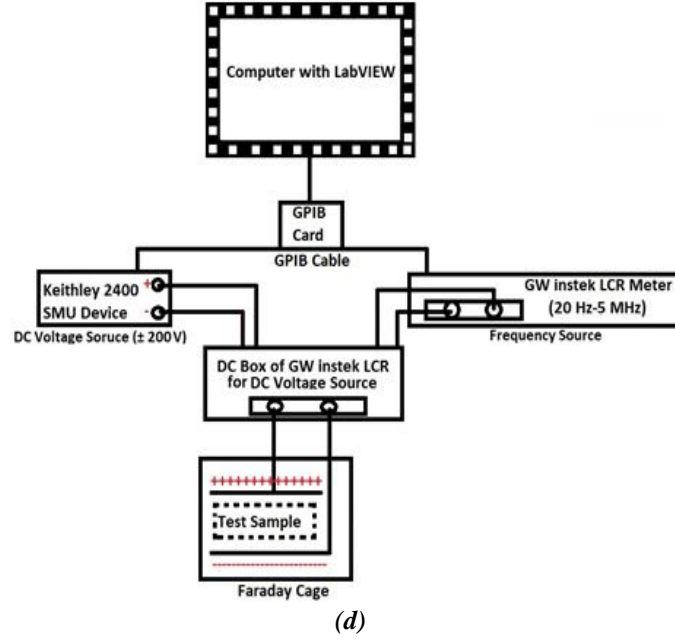
Dielektrik spektroskopisi analizleri için örnek verilebilecek en önemli fiziksel ölçüm sistemlerinden biri de LCR (Bobin (L), kondansatör (C) ve direnç (R)) metrelerdir. Bu cihazlar çeşitli frekanslarda küçük elektrik alan uygulayarak (1 V/cm^2) geçen AC akım şiddetini ve faz farkını ölçerek kapasitans (C) ve kondüktans (G) değerlerini belirlemektedir. Bu iki değer kullanılarak çeşitli matematiksel eşitlikler yardımı ile dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), reel ve imajiner elektrik modülü (M' ve M''), reel ve imajiner empedans (Z' ve Z'') gibi her bir malzemenin farklı elektrik ve dielektrik özelliğini tanımlamada kullanılan temel parametreler hesaplanabilmektedir[22]–[26].

Bu çalışmada; harici bir DC gerilim kaynağı (Keithley 2400 SMU) ile LCR Metre (GW Instek 8105 LCR) cihazlarının eş zamanlı veri transfer programı kullanılarak eş zamanlı haberleşmesini sağlayan ve dielektrik özelliklere ait elde edilen verileri Excel dosyasına aktaran program geliştirilmiştir. Kullandığımız programın arayüzüne temel dielektrik parametreleri hesaplamak ve ölçüm sürecini otomatikleştirmek amacıyla çeşitli modüller eklenmiştir. GW Instek 8105 LCR metre ölçüm cihazı standart olarak 20 Hz ile 5 MHz frekans aralığında çeşitli elektrofiziksel parametreleri ölçebilmekte ve ölçtüğü değerleri kayıt edebilmektedir[27]. Keithley 2400 SMU cihazı ise ± 200 V aralığında ön gerilim uygulayarak malzeme ve cihazların akım-gerilim (I-V) karakteristiğini alabilmektedir[28]. Ayrıca her iki cihaz ön panelinde bulunan butonlar ile manuel olarak da kontrol edilebilmektedir.

II. MATERYAL ve YÖNTEM

Keithley 2400 SMU (Şekil 1 (a)) bir akım kaynağıdır ve analiz edilecek malzemelerin kontaklarına çeşitli değerlerde elektrik alan uygulamak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte GW Instek 8105 LCR (Şekil 1 (b)) dielektrik parametreleri ölçmek için küçük değerlerde malzemelerin kontaklarına AC uygulamaktadır. Keithley 2400 DC kaynak LCR metreye yüksek değerlerde gerilim uygularken aynı zamanda LCR metre de yüksek frekanslarda AC zorlamayı DC kaynağa uygulayacaktır. Bu durum iki cihazın sağlıklı çalışmasına engel olmasının yanı sıra cihazların bozulmasına neden olabilecektir. Bu yüzden olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için GW Instek LCR-8105G-02 DC bias kutusu sisteme dâhil edilmiştir (Şekil 1 (c)). Böylece bu iki farklı özellikteki cihazın birbirini etkilemeden geliştirdiğimiz program yardımıyla eşzamanlı çalışması sağlanmıştır. Bu iki cihazın bir birini etkileyip etkilemediği her iki cihaz bağlantı noktalarından osiloskop yardımıyla kontrol edilerek onaylanmıştır. DC bias kutusunun BNC giriş uçları GW Instek 8105 LCR metreye ve DC volt giriş uçları ise Keithley 2400 SMU cihazına ve ölçüm uçları analiz edilecek numunenin iki kontağına bağlanmıştır. Bu iki cihazın bilgisayarla haberleşmesini sağlayacak bir GPIB kartı ve GPIB kablosu cihazlara takılmış ve GPIB kartının USB girişi de bilgisayara bağlanarak sistem yazılım için uygun hale getirilmiştir. Fiziksel bağlantılar tamamlandıktan sonra ölçüm yapılabilmesi için eş zamanlı veri transfer programı yazılmıştır.





Şekil 1. (a) Keithley 2400 SMU, (b) GW Instek 8105 LCR, (c) GW Instek LCR-8105G-02, (d) Geliştirilen program ile eşzamanlı haberleşme ve dielektrik ölçüm sisteminin şematik gösterimi

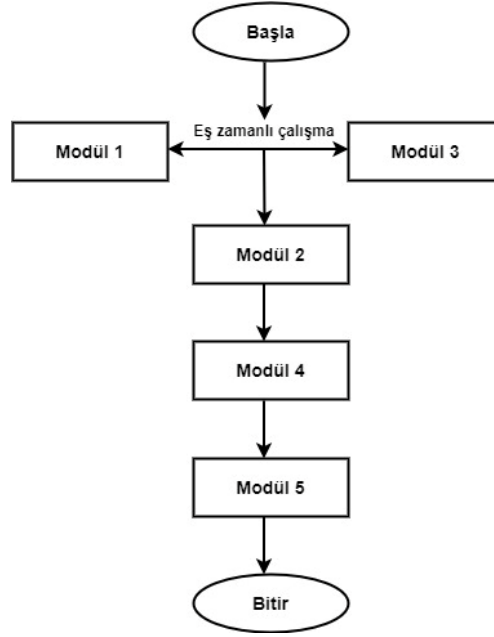
Yazılan programın doğruluğu literatürde bilinen malzemelerin ölçümü ile test edilmiştir. Bu ölçümü yapabilmek için yüksek derecede iletkenliğe sahip olan dikdörtgen şeklinde iki adet metal plaka kullanılmıştır. Plakalar LCR metreden çıkan uçlara bağlanmış ve tamamen dış ortamdan izole edilerek dış alanlardan etkilenmemesi amacıyla bir faraday kafesinin içine konulmuştur. Ölçülen numuneler plakaların boyutlarını geçmeyecek şekilde benzer geometrik boyutlara sahiptir ve plakalar arasındaki dielektrik malzemelerin kalınlığı ise farklıdır. Metal plakalarının uzunluğu 3 ve genişliği 2 cm'dir. Bu sistemin şematik gösterimi Şekil 1 (d)'de verilmiştir.

III. SONUÇLAR

A. MODÜLLER

Sistemin yazılımı için 5 adet komut modül kullanılmış ve bu modüller birleştirilerek ortak program oluşturulmuştur. Bu modüller veri transfer arayüz programında sırasıyla LCR metre sürücüsü, Keithley 2400 SMU sürücüsü, dielektrik parametre hesaplamaları, grafik oluşturma ve hesaplanan dielektrik parametreler, grafikleri kayıt etmek için ve Excel dosyası oluşturulması şeklinde yazılmıştır.

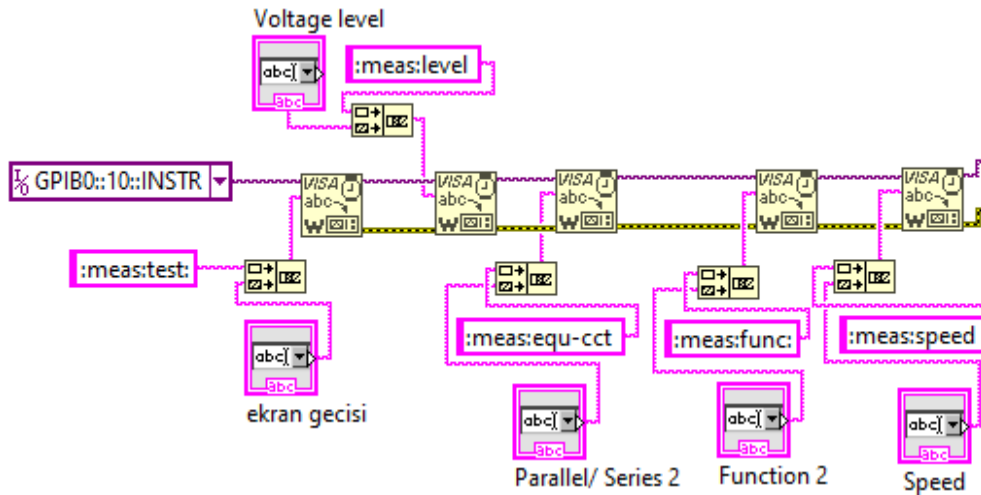
Modüllerin çalışma sırası ise Modül 1 ve Modül 3 ün eş zamanlı çalışmasından sonra Şekil 2'de belirtilen Modül numarasına göre gitmektedir. İlk olarak; Modül 1 yazılmış ve ardından dielektrik spektroskopide hesaplanması gereken parametreler için Modül 2 eklenmiştir. Modül 2'nin doğru veri alabilmesi için Modül 3 yazılmış ve burada Modül 1 ile Modül 3'ün eş zamanlı çalışması sağlanmıştır. Ardından Modül 2 hesaplanan verileri kaydetmiştir. Modül 2 ile hesaplanan parametrelerin grafik arayüzünün oluşturulması için ise Modül 4 çalıştırılmıştır. Grafiksel verileri Excel ortamına aktarmak için Modül 5 yazılmış ve çalıştırılmıştır. Programın çalışma işleyişi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Program çalışma şeması

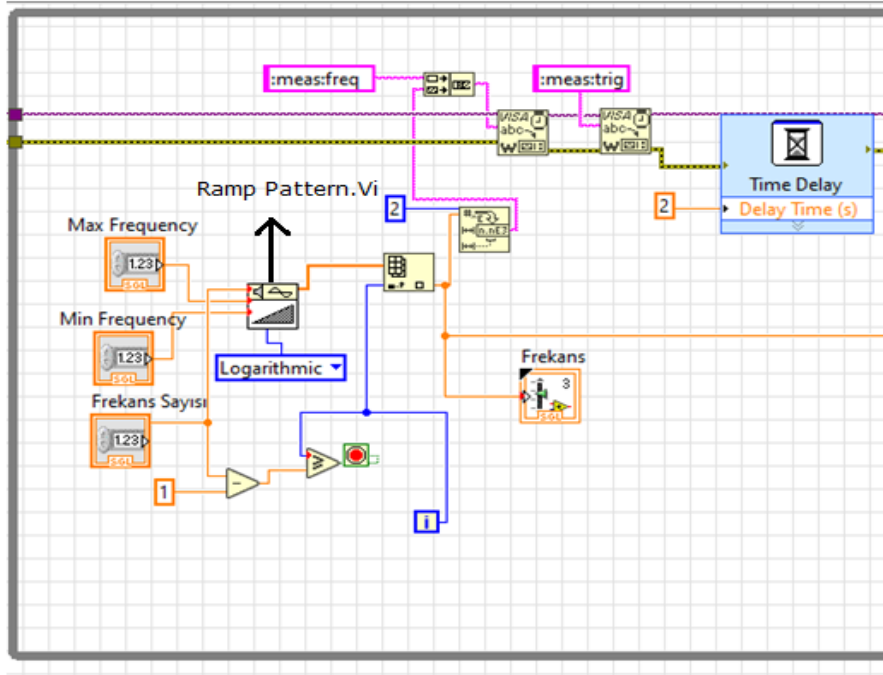
A. 1. Modül 1: GW Instek 8105 LCR Cihazının Program Sürücüsü

GW Instek 8105 LCR cihazının internette hazır bir program sürücüsü bulunmadığı için cihazın programlama manuelinden faydalanılarak GW Instek 8105 LCR'nin giriş parametrelerinin “girdi” olarak cihaza gönderildiği bir komut modülü oluşturuldu. Yazılan komut modülünün blok diyagramı Şekil 3'de verilmiştir. Modülde öncelikle cihazların haberleşmesi için veri transfer programı tarafından geliştirilen K-USB-488B GPIB (IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kart) haberleşme protokolü komut dizini olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. GW Instek 8105 LCR cihazının veri transferi için ölçüm başlangıç parametre giriş modülü

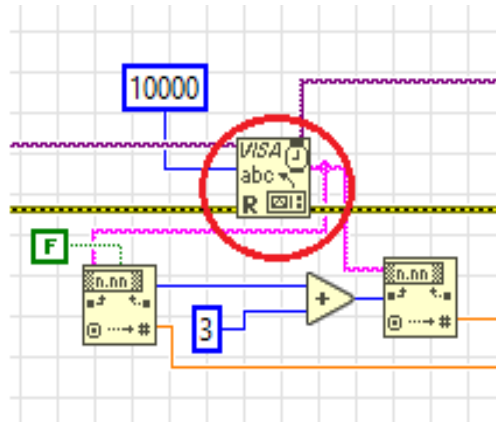
Giriş parametrelerinden biri ölçüm için belirlenen frekans bilgileridir. Bu frekans değerleri sağlıklı bir ölçümün yapılabilmesi için cihaza her ölçüm için bir önceki ölçüm bittikten belli bir süre sonra (delay time tool: ölçülen numunenin ölçümden önceki haline dönmesi için birkaç saniyelik dinlenme (relaksasyon) zamanı) :meas: freq değer komutu ile frekans sayısı kadar tekrarlanan bir komut döngüsü ile gönderilmesi gerekmektedir. Bunun içinde While döngüsü kullanılmıştır.



Şekil 4. Logaritmik Frekans girdilerinin oluşturulması ve cihaza gönderilmesi

Frekans değerleri 20-5.10⁶ Hz gibi oldukça geniş bir aralıkta olduğu için literatürde sıklıkla kullanılan logaritmik bir artışta değerler seçilmektedir. Logaritmik Frekans girdilerinin oluşturulması ve cihaza gönderilmesi için tasarlanan komut modülü Şekil 4'te gösterilmiştir. Logaritmik dağılımı sağlayabilmek için kullanıcı tarafından arayüze girilen başlangıç ve bitiş frekans değerleri veri transfer programının komut sisteminde hazır bir tool olan ve Şekil 4 içinde gösterilen Ramp Patern.Vi tool'u kullanılmıştır.

Bir sonraki aşamada gönderilen frekans ve diğer başlangıç ölçüm komutlarının sonucunda cihazın okuduğu değerin veri olarak alınmasını sağlayan Şekil 5'teki Read tool'u kullanılmıştır.



Şekil 5. Veri Transfer programında Read Tool'unun blok görünümü

A. 2. Modül 2: Eş Zamanlı Veri Transfer Programı ile Dielektrik Parametrelerin Hesaplanması

Kapasitans (C) ve kondüktans (G) değerleri ± 200 V ve 20 Hz ile 5 MHz aralığında ölçülebilmektedir. C ve G verilerinden hesaplanan; ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$) ve dielektrik sabiti ve kaybı (ϵ' ve ϵ''), reel ve imajiner elektrik modülü (M' ve M''), reel ve imajiner empedans (Z' ve Z'') olmak üzere toplamda 8 adet dielektrik parametre program arayüzünde Şekil 6'da verilen modül ve

denklemlerden hesaplanmaktadır. Hesaplamanın yapılabilmesi için ölçülen numunenin çap, kalınlık değerleri ile her ortam için sabit bir değer olan ϵ_0 (serbest uzayın dielektrik sabiti) değeri girdi olarak kullanıcı tarafından girilmektedir. Bu girdiler ile elde edilecek hesaplamalar veri transfer programına aşağıdaki fiziksel formüllerle yaptırılmakta ve bu formüller komut olarak programa aktarılmaktadır. Numunenin çap ve kalınlık değerlerinin belirlenmesi ile birlikte öncelikle πr^2 formülünden metal kontak temas alanı A hesaplanabilmekte ve Denklem 1'de aşağıdaki gibi kullanılmaktadır[29].

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

Burada C_0 ; serbest uzayın (boşluğun) kapasitansı, ϵ_0 ; serbest uzayın dielektrik sabiti ve değeri $8,85 \times 10^{14}$ F/cm², A; metal kontak temas alanı ve d; numunenin kalınlığıdır. Geliştirdiğimiz programın arayüzüne numunenin kalınlığı ve çapı girildikten sonra C_0 otomatik olarak program tarafından hesaplanmaktadır. C_0 'ın belirlenmesinden sonra dielektrik parametreler veri transfer programında aşağıda verilen formüllerle tanımlanmış ve hesaplatılmıştır.

Dielektrik sabiti ve kaybı için denklem 2 kullanılmıştır[30]:

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad , \quad \epsilon'' = \frac{G}{C_0} \quad (2)$$

Dielektrik kayıp açısı için denklem 3 kullanılmıştır[31]:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

Reel ve imajiner elektrik modülü için denklem 4 kullanılmıştır[32], [33]:

$$M' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}, \quad M'' = \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (4)$$

Reel ve imajiner empedans için denklem 5 kullanılmıştır[32]:

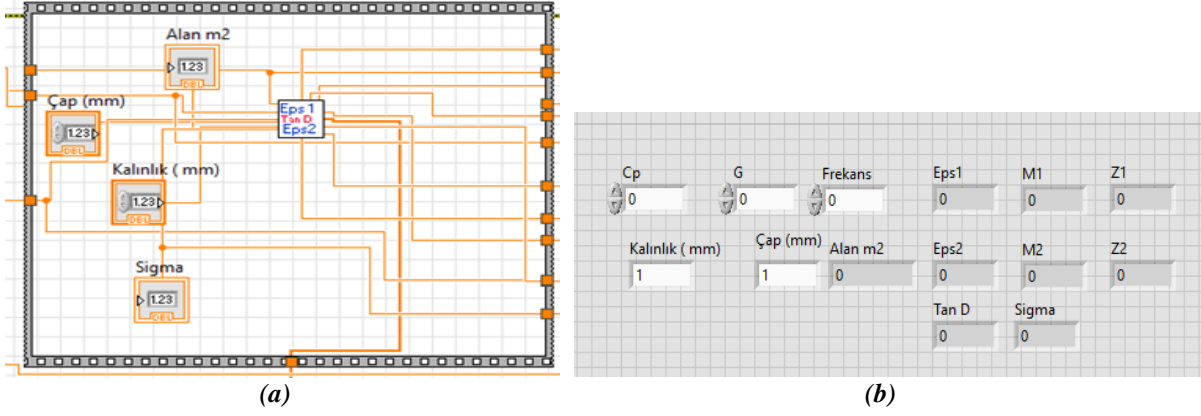
$$Z' = \frac{G}{G^2 + (\omega C)^2}, \quad Z'' = \frac{1}{\omega C} \quad (5)$$

Ac elektriksel iletkenlik için aşağıdaki denklem 6 kullanılmıştır[34]:

$$\sigma_{ac} = \epsilon'' \epsilon_0 \omega \quad (6)$$

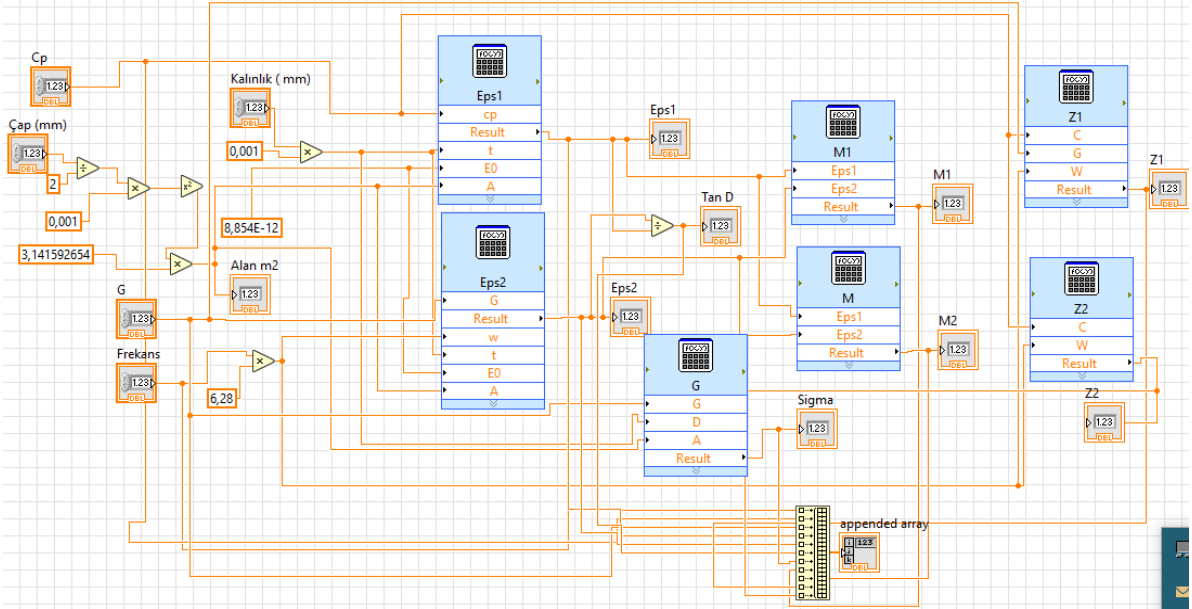
Bu denklemlerde ω açısal frekanstır ve $2\pi f$ ile ifade edilmektedir.

Bu hesaplamaları yaparken aynı zamanda veri olarak kaydeden ve Denklem 1-6'daki tüm parametreleri işleyen bir algoritma tool'u oluşturulmuştur. Komut modülü olarak geliştirdiğimiz bu tool, dielektrik parametreleri hesaplayan ve Şekil 6'da blok ve ön paneli gösterilen sabit değerler ve EPS1&TAND&EPS2.Vi algoritmasıdır. Bu algoritmanın ön panel görünümünde şekilde görülen beyaz renkli değerler girdi buna karşılık hesaplanan değerler (gri) çıktı olarak programa aktarılmaktadır.



Şekil 6. Sabit değerler ve EPS1&TAND&EPS2.Vi algoritması (a) Blok diyagram (b) Ön panel görünümü

Denklem 1-6'daki tüm dielektrik parametreleri program içerisinde işleten ve hesaplayan alt program tool'u Şekil 6(a)'daki EPS1&TAND&EPS2.Vi algoritması çok büyük ve geniş yer kaplayacağı için ayrı olarak oluşturulmuş ve programın kendisine bir alt program olarak ilave edilmiştir. Bu algoritmanın ayrıntılı komut modülü Şekil 7'de gösterilmiştir.



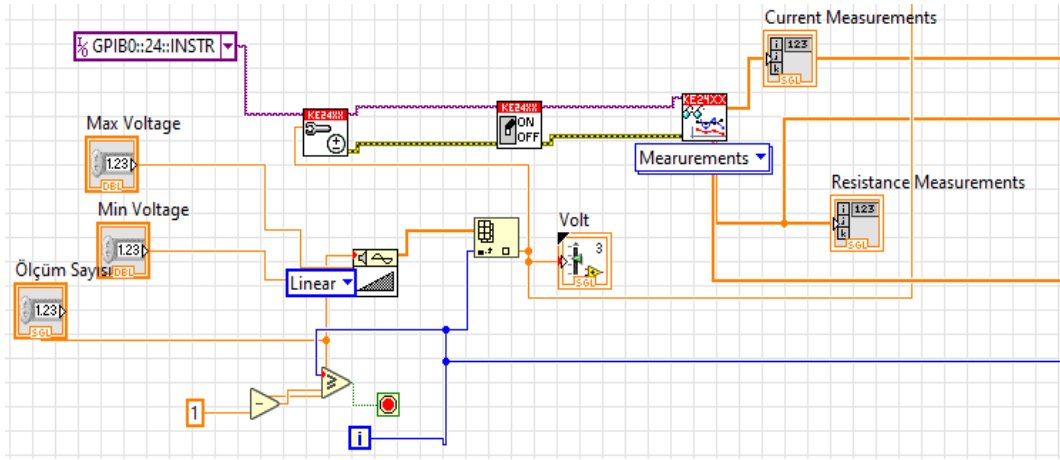
Şekil 7. Eş zamanlı veri transfer programı ile dielektrik parametrelerin hesaplanması için oluşturulan EPS1&TAND&EPS2.Vi komut modülü

A. 3. Modül 3: Keithley 2400 SMU Cihazının Veri Transfer Program Sürücüsü

Yukarıda bahsedilen frekans ölçüm döngüsü belirlenen logaritmik aralıktaki frekanslarda bir kere tamamlandıktan sonra Keithley 2400 SMU cihazına belirlenen DC bias bilgisi için farklı bir GPIB haberleşme kanalı kullanılarak giriş bilgileri gönderilir ve istenilen bias değeri göndermesi sağlanır ve her bir bias değeri için yukarıdaki frekans döngüsü tekrarlanmaktadır. Ayrıca ölçüm süreci saatleri bulabildiği için başlangıç ve bitiş değerlerini kullanıcı girdikten ve program başlatıldıktan sonra sistem otomatik olarak süreci işletmektedir.

Bias kısmındaki program parçasından bahsedecek olursak; Keithley 2400 SMU cihazının veri transfer program sürücüsü ve örnek komut alt program parçaları cihaz üreticisi firma tarafından internette paylaşılmıştır. Bu komut parçaları kullanılarak elde edilen alt program modülünün blok diyagramı Şekil

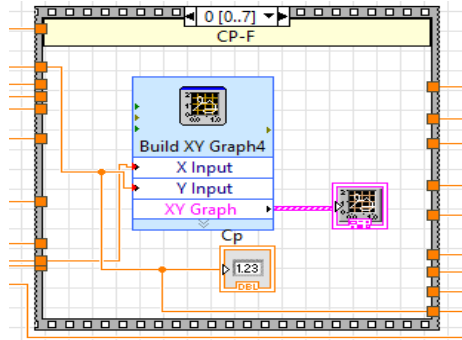
8'deki gibidir. Bu modülde; başlangıçta çıkış voltaj değerlerinin bir minimum ve maksimum arasında belirli linear artışlarla cihaza bildirilmesi ve bunun döngüsel olarak sağlanması için hazırlanan blok diyagram aşağıdadır. Cihaza gönderilen değerlerle birlikte cihaz aynı zamanda DC olarak numunenin direncini ve devreden geçen akım değerini de okumaktadır.



Şekil 8. Keithley 2400 SMU cihazının veri transfer program sürücü modülü

A. 4. Modül 4: Eş Zamanlı Veri Transfer ile Grafikselleştirme

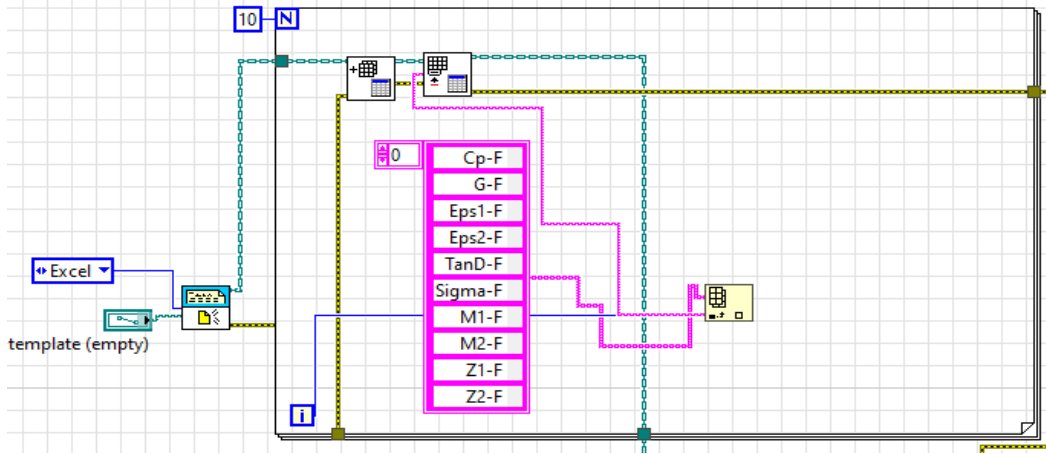
LCR cihazının doğrudan verdiği C ve G değerlerinin yanı sıra yukarıda hesaplamaları elde edilen parametrelerin de dâhil olduğu toplam 8 adet grafik (C-f, G-f, ϵ'' -f, ϵ'' -f, $\tan\delta$ -f, ϵ'' - ϵ' (cole-cole plot), M'-M" (Argand Diagram) ve Z'-Z" (Nyquist Diagram)) aşağıda Şekil 9 ile verilen modülde ekrana aktarılmaktadır. Şekil 9'da çerçevenin en üst ortasında yer alan sayılar (0...7) görselin kaçınıcı grafiğe ait olduğunu göstermektedir. Grafik geçişi için sayının sağında ve solundaki oklar kullanılmaktadır. Bu çerçeveye yukarıda bahsedilen toplam 8 adet (0...7 arası) grafik ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Tüm hesaplanan ve ölçülen değerler frekansa bağlı değişimi veren grafiksel görünüm için görselleştirilmektedir.



Şekil 9. Eş zamanlı veri transfer programında grafiksel arayüz oluşturmak için yapılan modül

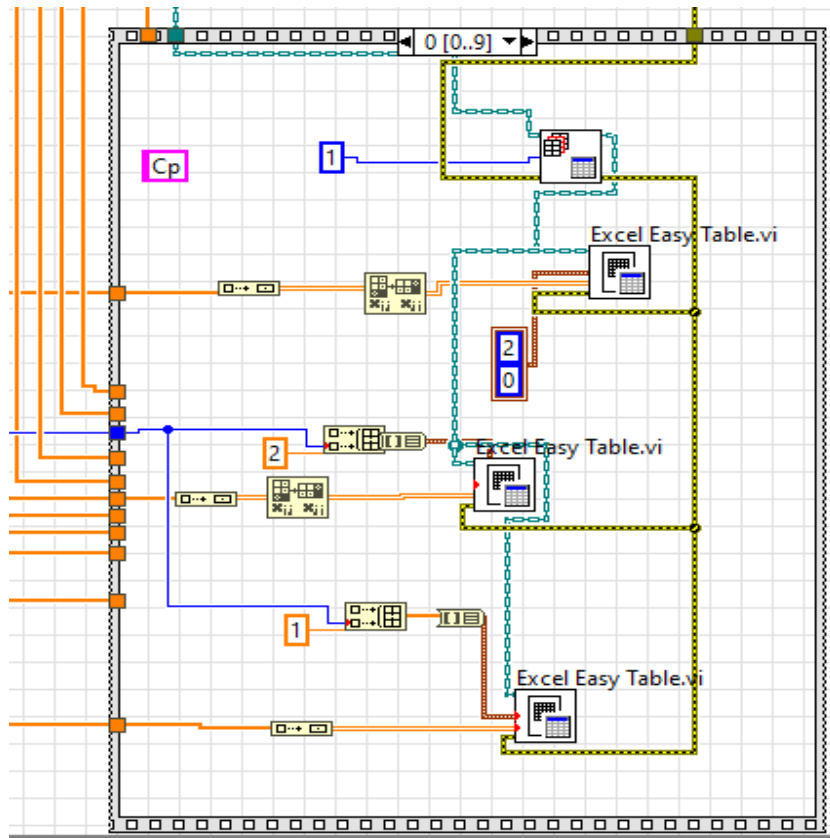
A. 5. Modül 5: Eş Zamanlı Veri Programı ile Excel Oluşturma ve Veri Aktarma

Yazılan programda son kısım ise ölçülen dataların doğru bir şekilde işlenebilmesi ve Excel ortamına doğrudan aktarılmasıdır. Bunun için veri transfer programında yukarıdaki modüller ile hesaplanan ve ekrana grafik olarak aktarılan verilerin Excel'de toplanması ve bilgisayara kaydedilmesi için aşağıda Şekil 10 ile verilen modül kullanılmıştır.



Şekil 10. Veri transfer programı ile Excel oluşturma ve elde edilen verileri Excel'e aktarma modülü.

Bu kısımda 10 farklı (C-f, G-f, ϵ -f, ϵ'' -f, $\tan\delta$ -f, σ_{ac} -f, M'-f, M''-f, Z'-f, Z''-f) dielektrik hesaplamının daha sonra araştırmacı tarafından herhangi bir ayrıştırmaya gerek duymadan kolayca kullanılabilmesi için her bir veri grubu, kendi ismini taşıyan bir Excel sekmesine aktarılacak şekilde kurgulanmıştır. Bunun için yine program içinde bulunan ve blok diyagramları Şekil 11'de verilen New report.vi, Excel get worksheet.vi ve Excel easy table.vi tool paketlerinden yararlanılmıştır.



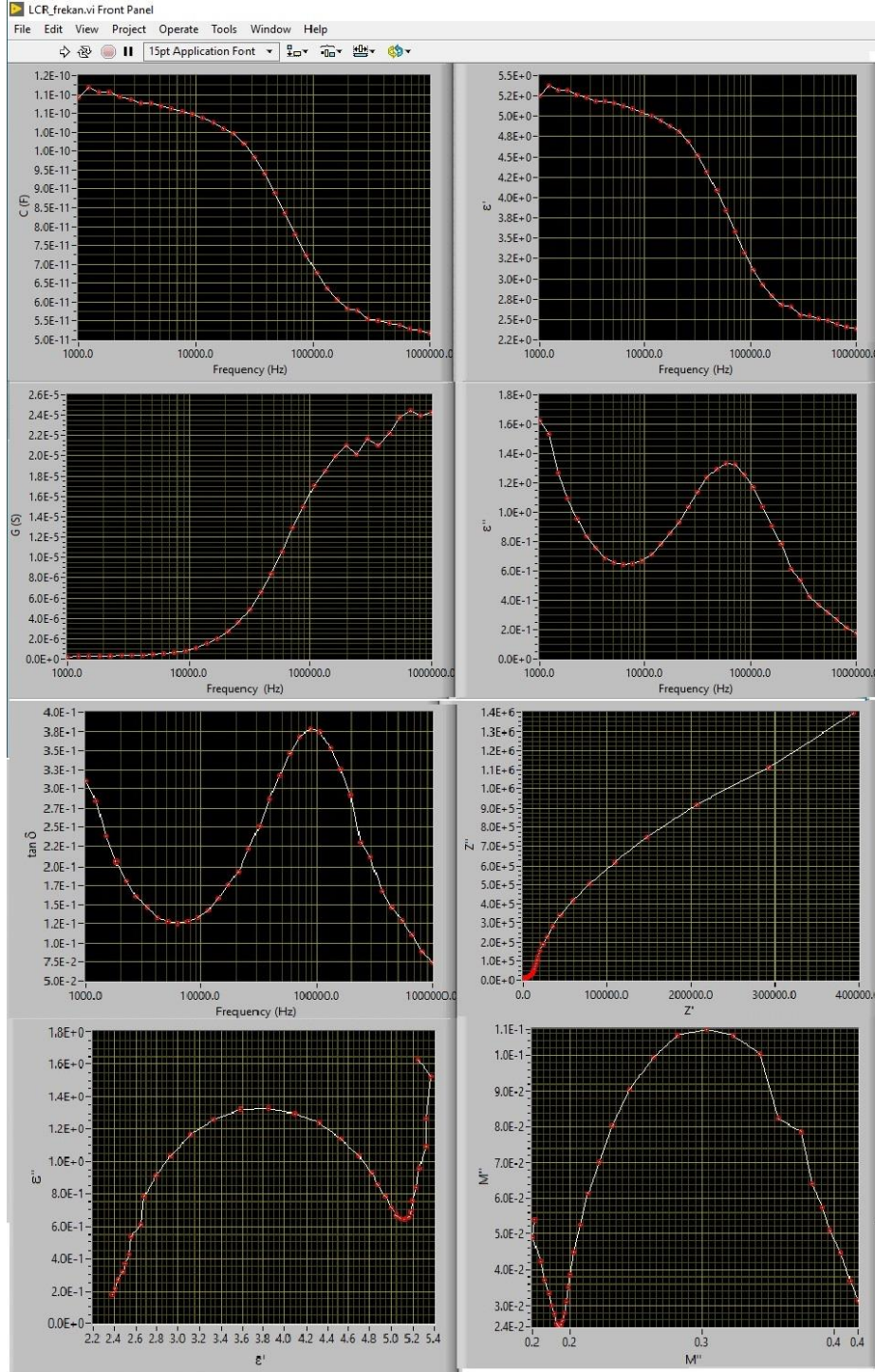
Şekil 11. New report.vi, Excel get worksheet.vi ve Excel easy table.vi tool paketlerinin blok diyagramı

Gerek cihazlara girdi olarak kullanılan değerler gerekse cihazlardan okunan sayısal değerler, integer, double, array, gibi farklı formatlarda olmaktadır ve bu farklı formatlar bazen aynı alt programda kullanılması gerekmektedir. Başka bir deyişle kullanılan alt programın girdisi veya çıktısı ile verilerin formatları uyuşmamaktadır. Bu durumda veri transfer programı içerisinde yer alan Built array, Transpse

2D array, array to cluster, 2D array to Dynamic data gibi çeşitli veri dönüştürücüleri program içinde çeşitli yerlerde kullanılmıştır.

B. SONUÇ ÇIKTILARI

Ölçümler için, literatürde çok kez uygulanmış ve pratik uygulanması sebebiyle kapasitif yöntem [5] seçilmiştir. Bunun yanı sıra literatürde dielektrik değerleri doğrulanmış sonuçlarla belirlenmiş olan PMMA (Poly(methyl methacrylate)) polimerinin ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümde aşağıda Şekil 12 ile verilen ekran görüntüsü elde edilmiştir.



Şekil 12. LCR&Keithley 2400 arayüzü ölçüm sonuçları

Ayrıca elde edilen verilerin aktarıldığı Excel çıktısı oluşturulurken her bir parametre için ayrı sayfa oluşturulması üzerine program geliştirilmiştir. Elde edilen Excel çıktısının ekran görüntüsü Şekil 13'de verilmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Frequency (Hz)	Cp (F)	G (S)	Eps'	Eps''	tanδ	σ _{sc} (S.cm)	M'	M''	Z' (Ω)	Z'' (Ω)		
2	2.00E+01	1.18E-10	2.28E-07	5.41	1.67	3.09E-01	9.30E-08	1.69E-01	5.21E-02	3.82E+05	1.35E+06		
3	2.88E+01	1.17E-10	2.45E-07	5.38	1.47	2.72E-01	9.98E-08	1.73E-01	4.71E-02	2.81E+05	1.11E+06		
4	4.15E+01	1.15E-10	2.64E-07	5.30	1.29	2.43E-01	1.08E-07	1.78E-01	4.33E-02	2.11E+05	9.20E+05		
5	5.99E+01	1.16E-10	2.69E-07	5.33	1.07	2.01E-01	1.10E-07	1.80E-01	3.63E-02	1.44E+05	7.48E+05		
6	8.63E+01	1.15E-10	2.82E-07	5.30	0.92	1.73E-01	1.15E-07	1.83E-01	3.17E-02	1.03E+05	6.14E+05		
7	1.24E+02	1.14E-10	3.16E-07	5.24	0.84	1.60E-01	1.29E-07	1.86E-01	2.98E-02	7.90E+04	5.07E+05		
8	1.79E+02	1.13E-10	3.45E-07	5.22	0.75	1.43E-01	1.41E-07	1.88E-01	2.68E-02	5.81E+04	4.15E+05		
9	2.58E+02	1.13E-10	3.91E-07	5.19	0.69	1.33E-01	1.59E-07	1.89E-01	2.52E-02	4.45E+04	3.41E+05		
10	3.73E+02	1.12E-10	4.64E-07	5.17	0.67	1.29E-01	1.89E-07	1.90E-01	2.46E-02	3.55E+04	2.79E+05		
11	5.37E+02	1.11E-10	5.42E-07	5.13	0.64	1.24E-01	2.21E-07	1.92E-01	2.39E-02	2.81E+04	2.30E+05		
12	7.74E+02	1.11E-10	6.70E-07	5.09	0.64	1.27E-01	2.73E-07	1.94E-01	2.45E-02	2.35E+04	1.89E+05		
13	1.12E+03	1.10E-10	8.53E-07	5.05	0.67	1.33E-01	3.48E-07	1.95E-01	2.58E-02	2.02E+04	1.55E+05		
14	1.61E+03	1.09E-10	1.12E-06	5.00	0.72	1.43E-01	4.55E-07	1.96E-01	2.80E-02	1.79E+04	1.28E+05		
15	2.32E+03	1.08E-10	1.49E-06	4.95	0.78	1.57E-01	6.07E-07	1.97E-01	3.10E-02	1.62E+04	1.06E+05		
16	3.34E+03	1.06E-10	2.02E-06	4.87	0.86	1.76E-01	8.21E-07	1.99E-01	3.51E-02	1.50E+04	8.75E+04		
17	4.81E+03	1.05E-10	2.67E-06	4.84	0.93	1.92E-01	1.09E-06	1.99E-01	3.83E-02	1.33E+04	7.19E+04		
18	6.94E+03	1.02E-10	3.52E-06	4.70	1.00	2.13E-01	1.44E-06	2.04E-01	4.33E-02	1.23E+04	6.04E+04		
19	1.00E+04	9.86E-11	4.93E-06	4.54	1.14	2.52E-01	2.01E-06	2.07E-01	5.22E-02	1.21E+04	5.11E+04		
20	1.44E+04	9.42E-11	6.55E-06	4.33	1.24	2.86E-01	2.67E-06	2.13E-01	6.10E-02	1.15E+04	4.36E+04		
21	2.08E+04	8.92E-11	8.46E-06	4.10	1.31	3.18E-01	3.45E-06	2.21E-01	7.04E-02	1.09E+04	3.76E+04		
22	2.99E+04	8.34E-11	1.06E-05	3.84	1.34	3.48E-01	4.32E-06	2.32E-01	8.10E-02	1.02E+04	3.28E+04		
23	4.32E+04	7.77E-11	1.29E-05	3.58	1.32	3.70E-01	5.24E-06	2.46E-01	9.09E-02	9.35E+03	2.87E+04		
24	6.22E+04	7.23E-11	1.50E-05	3.33	1.26	3.79E-01	6.12E-06	2.63E-01	9.95E-02	8.35E+03	2.52E+04		
25	8.97E+04	6.77E-11	1.70E-05	3.12	1.16	3.73E-01	6.92E-06	2.82E-01	1.05E-01	7.19E+03	2.20E+04		
26	1.29E+05	6.37E-11	1.87E-05	2.93	1.04	3.56E-01	7.60E-06	3.03E-01	1.08E-01	6.02E+03	1.91E+04		
27	1.86E+05	6.07E-11	1.99E-05	2.79	0.91	3.25E-01	8.11E-06	3.24E-01	1.05E-01	4.80E+03	1.63E+04		
28	2.68E+05	5.84E-11	2.10E-05	2.69	0.78	2.90E-01	8.54E-06	3.43E-01	9.95E-02	3.70E+03	1.38E+04		
29	3.87E+05	5.71E-11	2.15E-05	2.63	0.65	2.48E-01	8.74E-06	3.59E-01	8.91E-02	2.71E+03	1.16E+04		
30	5.58E+05	5.60E-11	2.12E-05	2.58	0.53	2.04E-01	8.66E-06	3.72E-01	7.62E-02	1.89E+03	9.62E+03		
31	8.04E+05	5.55E-11	2.31E-05	2.56	0.47	1.83E-01	9.40E-06	3.79E-01	6.92E-02	1.40E+03	7.92E+03		
32	1.16E+06	5.47E-11	2.33E-05	2.52	0.38	1.53E-01	9.50E-06	3.88E-01	5.93E-02	9.79E+02	6.56E+03		
33	1.67E+06	5.35E-11	2.33E-05	2.46	0.31	1.28E-01	9.50E-06	4.00E-01	5.10E-02	6.88E+02	5.48E+03		
34	2.41E+06	5.30E-11	2.36E-05	2.44	0.26	1.07E-01	9.62E-06	4.05E-01	4.32E-02	4.75E+02	4.51E+03		
35	3.47E+06	5.25E-11	2.40E-05	2.42	0.22	8.91E-02	9.77E-06	4.10E-01	3.66E-02	3.28E+02	3.71E+03		
36	5.00E+06	5.19E-11	2.38E-05	2.39	0.17	7.31E-02	9.71E-06	4.16E-01	3.04E-02	2.23E+02	3.07E+03		
37													

Şekil 13. Veri transfer programından Excel'e verilerin aktarımı

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada; GW Instek 8105 LCR metre cihazının dielektrik spektroskopisi ölçümlerinde kapasitif yöntemle $\pm 2V$ gibi dar bir DC gerilim aralığında ölçüm yapmasından dolayı daha geniş aralıklı harici bir DC gerilim kaynağını GW Instek 8105 LCR ile eş zamanlı çalıştırılmasına yönelik bir program geliştirilmiştir. Bunun için ilk olarak harici DC kaynak için Keithley 2400 SMU ($\pm 200V$) cihazı seçilmiştir. DC yüksek elektrik alan gereksinimi literatürde ve gelişen sanayi ve teknolojiye gittikçe ihtiyaç haline dönüşmektedir. Literatürde dielektrik spektroskopisi ölçüm cihazları kendinden DC beslemeli ve maksimum $\pm 40 V$ aralığında çalışmaktadır. Bu değer bile bazı yüksek DC tetiklemesi gerektiren uygulamalar için yetersiz gelmektedir. GW Instek 8105 LCR metre cihazı ise yine kendinden

DC beslemeli bir cihaz olup maksimum ± 2 V aralığında DC gerilim sağlamaktadır. Bu sebeple, hem yüksek DC ön gerilim isteyen çalışmaları gerçekleştirebilmek amacıyla hem de GW Instek 8105 LCR metre cihazının DC ön gerilim aralığını artırabilmek amacıyla ikinci bir kaynak ile DC yüksek elektrik alan uygulama yoluna gidilmiştir. Böylelikle ± 200 V DC yüksek ön gerilimli elektrik alanda AC frekansa karşı dielektrik özelliklerim değişiminin incelenebilmesi sağlanmış olacaktır. Hem Keithley 2400 SMU hem de GW Instek 8105 LCR iki ayrı ölçüm cihazı olmakla birlikte bu çalışmada Keithley 2400 SMU cihazı dış DC kaynak olarak işlev görmektedir. Bunu sağlayabilmek için her iki cihaz IEEE 488 standartlarına uygun bir USB-GPIB kart ve GPIB kablo yardımıyla bilgisayara bağlanmıştır. Keithley 2400 SMU cihazının harici DC kaynağı olarak LCR'ye katkı yapmasını sağlamak amacıyla her iki cihazı da olumsuz etkilerden koruyacak DC bias kutusu sisteme dâhil edilmiştir. Tüm fiziksel birleşmelerin tamamlanmasıyla birlikte bilgisayar tabanlı dielektrik spektroskopisi ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu işlemi otomatik olarak yapabilmek amacı ile test ve ölçüm cihazlarını otomatik kontrol etmek ve verileri toplayabilmek için hem endüstride hem de akademik araştırma laboratuvarlarında eş zamanlı veri transfer programlarının büyük önem arz etmektedir. Eş zamanlı veri transfer programı ile geliştirilen bu ölçüm programında karakterizasyon işlemi için iki farklı cihazın bilgisayarla eş zamanlı haberleşmesini sağlayacak ve gerekli veri girdi-çıkıtları sırasında verilerin gerekli manipülasyonunu sağlayacak programlar yazılmıştır. Bu programları modül ve alt program tool paketleri olarak sınıflayacak olursak; program içinden delay time.vi, Ramp Patern.vi, Read.vi, New report.vi, Excel get worksheet.vi ve Excel easy table.vi gibi 6 adet hazır tool ve bizim geliştirdiğimiz EPS1&TAND&EPS2.Vi olmak üzere toplam 7 adet tool ve bu tool paketlerinin çalıştırdığı toplamda 5 adet komut modülü birleştirilmiştir. Yapılan deneme ölçümlerinde tam doğrulukla ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlar; yapılan bu çalışmanın gelecek çalışmalara ışık tutacağını ve eş zamanlı ölçüm sistemi geliştirmelerde umut vaat edeceğini açıkça göstermektedir. Ayrıca otomasyon sistem ve programlarının kullanıcı tarafından özgün olarak birebir geliştirilmesi sayesinde verilen hazır programların sınırlayıcı etkilerinden de kurtulmaya yardımcı olacağı ön görülmektedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] T. J. Kelleners, D. A. Robinson, P. J. Shouse, J. E. Ayars ve T. H. Skaggs, "Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils," *Soil Science Society of America Journal*, c. 69, s. 1, ss. 67–76, 2005.
- [2] T. Zhang, C. Zhang, H. Yuan ve M. Xu, "Dielectric and ferroelectric properties of $\text{Nd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$," *Solid State Communications*, c. 305, ss. 113766, 2020.
- [3] M. H. Abdullah ve A. N. Yusoff, "Frequency dependence of the complex impedances and dielectric behaviour of some Mg-Zn ferrites," *Journal of Materials Science*, c. 32, s. 21, ss. 5817–5823, 1997.
- [4] G. E. Demir ve İ. Yücedağ, "Determination of main electrical parameters of Au-4H-n-SiC (MS) and Au- Al_2O_3 -4H-n-SiC (MIS) devices," *Surface Review and Letters*, c. 28, s. 5, ss. 1–10, 2021.
- [5] S. K. Patri, R. N. P. Choudhary ve B. K. Samantaray, "Studies of structural, dielectric and impedance properties of $\text{Bi}_9\text{Fe}_5\text{Ti}_3\text{O}_{27}$ ceramics," *Journal of Electroceramics*, c. 20, s. 2, ss. 119–126, 2008.
- [6] Y. Karakuş, M. Okutan, A. Kösemen, S. E. San, Z. Alpaslan ve A. Demir, "Electrical properties of Zn-phthalocyanine and poly (3-hexylthiophene) doped nematic liquid crystal," *Journal of Nanomaterials*, c. 2011, ss. 1-5, 2011.
- [7] S. Yıldırım, "Sol-gel döner kaplama yöntemiyle oluşturulmuş Ta_2O_5 ince film kondansatörün düşük sıcaklık bölgesi dielektrik özellikleri ve ac iletkenlik davranışı," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, c. 6, s. 4, ss. 851–861, 2018.

- [8] V. K. Abrahamyan, N. H. Hakobyan, V. M. Aroutiounian, V. G. Babajanyan, H. L. Margaryan, D. L. Hovhannisyanyan, A. T. Poghosyan ve D. K. Pokhsranyan “Investigation of characteristics of electrically-controlled liquid-crystal retarders,” *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, c. 44, s. 2, ss. 84–90, 2009.
- [9] M. Demirtaş ve G. Gezer, “PI denetleyicili DC/DC dönüştürücü çıkış geriliminin labview kullanılarak incelenmesi analyzing of PI controlled DC/DC converter output voltage using labview,” *IEEE 18.Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Diyarbakır, Türkiye, 2010, ss. 704–707.
- [10] S. Şahin, M. Bayraktar, A. E. Kavur ve K. E. Şahin, “Arduino ve labview kullanarak emg verilerinden eşik seviye belirleme ile motor kontrol düzeneği tasarımı,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 22, s. 2, ss. 736–739, 2018.
- [11] G. Luo, C. Song, P. Hongjie, Z. Li, W. Xu, G.S.V. Raghavan, H. Chen ve G. Jin, “Optimization of the microwave drying process for potato chips based on the measurement of dielectric properties,” *Drying Technology*, c. 37, s. 11, ss. 1329–1339, 2019.
- [12] M. Jin, “Labview-based fuzzy controller design of a lighting control labview-based fuzzy controller design of a lighting control system,” *Journal of Marine Science and Technology*, c. 17, s. 2, ss. 116-121, 2009.
- [13] A. Sakaamini, M. Harvey, A. J. Murray, A. Sakaamini, M. Harvey ve A. James, “An experimental control system for electron spectrometers using arduino and labview interfaces,” *The Review of Scientific Instruments*, c. 91, s. 10, ss. 103104, 2020.
- [14] V. A. Polyansky ve I. L. Pankrat, “On ionization of electronically excited molecules in hydrocarbon combustion under strong electric field,” *Journal of Electrostatics*, c. 70, s. 2, ss. 201–206, 2012.
- [15] A. Tazzoli, G. Meneghesso, F. Zanon, F. Danesin, E. Zanoni, P. Bove, R. Langer ve J. Thorpe, “Microelectronics reliability electrical characterization and reliability study of HEMTs on composite substrates under high electric fields,” *Microelectronics Reliability*, c. 48, s. 8-9, ss. 1370–1374, 2008.
- [16] J. Cheng, L. Cai, Y. Shi, F. Pan, Y. Dong, X. Zhu, H. Jiang, X. Zhang, Z. Xiang ve W. Lu, “Polarization loss-enhanced honeycomb-like MoS₂ nanoflowers/undaria pinnatifida-derived porous carbon composites with high-efficient electromagnetic wave absorption,” *Chemical Engineering Journal*, c. 431, s. 3, ss. 134284, 2022.
- [17] A. Ashery, H. Shaban, S. A. Gad ve B. A. Mansour, “Materials science in semiconductor processing investigation of electrical and capacitance-voltage characteristics of GO/TiO₂/n-Si MOS device,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, c. 114, ss. 105070, 2020.
- [18] A. Ashery, M. M. M. Elnasharty ve I. M. El Radaf, “Current transport and dielectric analysis of Ni/SiO₂/P-Si diode prepared by liquid phase epitaxy,” *Silicon*, c. 14, ss. 153–163, 2022.
- [19] A. Demir, S. Bağcı, S. E. San ve Z. Doğruyol, “Pentacene-based organic thin film transistor with SiO₂ gate dielectric,” *Surface Review and Letters*, c. 22, s. 2, ss. 1550038, 2015.
- [20] İ. Yücedağ, A. Kaya, Ş. Altındal ve İ. Uslu, “Electrical and dielectric properties and intersection behavior of G/ω-V plots for Al/Co-PVA/p-Si (MPS) structures at temperatures below room temperature,” *Journal of the Korean Physical Society*, c. 65, s. 12, ss. 2082–2089, 2014.
- [21] G. Ersöz, İ. Yücedağ, S. Bayrakdar, Ş. Altındal ve A. Gümüş, “Investigation of photo-induced effect on electrical properties of Au/PPy/n-Si (MPS) type schottky barrier diodes,” *Journal of Materials*

Science: Materials in Electronics, c. 28, s. 9, ss. 6413–6420, 2017.

[22] N. Baraz, İ. Yücedağ, Y. Azizian-Kalandaragh, G. Ersöz, İ. Orak, Ş. Altındal, B. Akbari ve H. Akbari “Electric and dielectric properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) structures in the frequency range of 10-200 kHz,” *Journal of Electronic Materials*, c. 46, s. 7, ss. 4276–4286, 2017.

[23] H. Liu, M. Zhang, Y. Ye, J. Yi, Y. Zhang ve Q. Liu, “Porous cobalt ferrite microspheres decorated two-dimensional MoS₂ as an efficient and wideband microwave absorber,” *Journal of Alloys and Compounds*, c. 892, ss. 162126, 2021.

[24] A. Huang, F. Liu, Z. Cui, H. Wang, X. Song, L. Geng, H. Wang ve X. Peng, “Novel PTFE/CNT composite nanofiber membranes with enhanced mechanical, crystalline, conductive, and dielectric properties fabricated by emulsion electrospinning and sintering,” *Composites Science and Technology*, c. 214, ss. 108980, 2021.

[25] İ. Yücedağ, A. Kaya ve Ş. Altındal, “On the frequency dependent negative dielectric constant behavior in Al/Co-doped (PVC + TCNQ)/p-Si structures,” *International Journal of Modern Physics B*, c. 28, s. 23, ss. 1–15, 2014.

[26] A. Gümüş, G. Ersöz, İ. Yücedağ, S. Bayrakdar ve Ş. Altındal, “Comparative study of the temperature-dependent dielectric properties of Au/PPy/n-Si (MPS)-type schottky barrier diodes,” *Journal of the Korean Physical Society*, c. 67, s. 5, ss. 889–895, 2015.

[27] A. R. Noviyanti, Y. T. Malik, I. Rahayu, D. R. Eddy ve U. Pratomo, “Electrochemical properties of La_{0.933}Si₆O₂₆(LSO)–La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{2.55}(LSGM) electrolyte over NiO and La_{0.1}Ca_{0.9}MnO₃(LCM) electrodes,” *Materials Research Express*, c. 8, ss. 115505, 2021.

[28] D. Rubi, F. G. Marlasca, M. Reinoso, P. Bonville ve P. Levy, “Magnetism and electrode dependant resistive switching in Ca-doped ceramic bismuth ferrite,” *Materials Science and Engineering: B*, c. 177, s. 6, ss. 471–475, 2012.

[29] W. Wu, X. Liu, Z. Qiang, J. Yang, Y. Liu, K. Huai, B. Zhang, S. Jin, Y. Xia, K. K. Fu, J. Zhang ve Y. Chen, “Inserting insulating barriers into conductive particle channels: A new paradigm for fabricating polymer composites with high dielectric permittivity and low dielectric loss,” *Composites Science and Technology*, c. 216, ss. 109070, 2021.

[30] S. A. Yerişkin, G. E. Demir ve İ. Yücedağ, “On the frequency-voltage dependence profile of complex dielectric, complex electric modulus and electrical conductivity in Al/ZnO/p-GaAs type structure at room temperature,” *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, c. 14, s. 8, ss. 1126–1132, 2019.

[31] Y. Azizian-Kalandaragh, İ. Yücedağ, G. E. Demir ve Ş. Altındal, “Investigation of the variation of dielectric properties by applying frequency and voltage to Al/(CdS-PVA)/p-Si structures,” *Journal of Molecular Structure*, c. 1224, ss. 29325, 2021.

[32] B. Gowtham, V. Balasubramani, S. Ramanathan, M. Ubaidullah, S. F. Shaikh ve G. Sreedevi, “Dielectric relaxation, electrical conductivity measurements, electric modulus and impedance analysis of WO₃ nanostructures,” *Journal of Alloys and Compounds*, c. 888, ss. 161490, 2021.

[33] S. Karadaş, S. A. Yerişkin, M. Balbaş ve Y. Azizian-kalandaragh, “Complex dielectric, complex electric modulus, and electrical conductivity in Al/(Graphene-PVA)/p-Si (metal-polymer-semiconductor) structures,” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, c. 148, ss. 109740, 2021.

[34] I. K. Er, A. O. Çağırtekin, M. Artuç ve S. Acar, “Synthesis of Al/HfO₂/p-Si schottky diodes and the investigation of their electrical and dielectric properties,” *Journal of Materials Science: Materials*

in Electronics, c. 32, ss. 1677–1690, 2021.