



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Reaktif Duh. Tek. ile Haz. İnce Film. Diele. Özel. Al. Bağlı Dağ.

Doktora Tezi

GÜZİN AKTULGA

T. C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK BÖLÜMÜ

1168

**REAKTİF BUHARLAŞTIRMA TEKNİĞİ İLE HAZIRLANAN
AL₂O₃ VE AL-AL₂O₃ İNCE FİMLERİNİN
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
ALANA BAĞLI DEĞİŞİMLERİ**

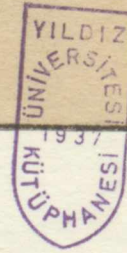
DOKTORA TEZİ

GÜZİN AKTULGA

İSTANBUL - 1985

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
GENEL KİTAPLIĞI

Kot : R. 210
Alındığı Yer : Fen Bil. Ens. 23
Tarih : 16.9.1987
Fatura : ---
Fiatı : 1500 TL.
Ayniyat No : 1/6
Kayıt No : 44910
UDC : 537.24
Ek : 378.242



XCOMP.

T. C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK BÖLÜMÜ

**REAKTİF BUHARLAŞTIRMA TEKNİĞİ İLE HAZIRLANAN
AL_x VE Al - AL_x İNCE FİMLERİNİN
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
ALANA BAĞLI DEĞİŞİMLERİ**

23

DOKTORA TEZİ

GÜZİN AKTULGA

İSTANBUL - 1985

ÖZET

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Genel Fizik Ana Bilim Dalında Prof. Dr. Hülya Demiryont yönetiminde başlatılmıştır. Kendisinin Üniversiteden ayrılmasından sonra Prof. Dr. Nezihe Taşköprülü yönetiminde sürdürülmüştür. Değerli katkılarından dolayı hocalarım Sayın Prof. Dr. Hülya Demiryont'a ve Sayın Prof. Dr. Nezihe Taşköprülü'ye teşekkür ederim.

Çalışmanın devamı boyunca gösterdiği yakın ilgi ve çalışmanın teorik bölümünün gerçekleştirilmesindeki yoğun yardımları için sevgili eşim ve meslekdaşım Dr. Ender Aktulga'ya teşekkür etmekten büyük bir zevk duyuyorum.

Sevgili kuzenim Mimar Tülin Sevin şekillerin çizilmesinde, sevgili arkadaşım Mine Arşık da tezin daktilosunda sonsuz özveri, özen ve sabır gösterdiler. Kendilerine minnet borçluyum.

ÖZET

Bu çalışmada reaktif buharlaştırma tekniği ile hazırlanan saf AlO_x ve sermet $Al-AlO_x$ filmlerinin dielektrik özellikleri incelendi.

Reaktif buharlaştırma tekniği ile hazırlanan filmlerin her iki yüzü alüminyum elektrotlarla kaplanarak oluşturulan kondansatörlerin, kompleks kapasite bileşenlerinin, değişik frekanslar için değerleri, Schering köprüsünde ölçüldü ve relaksasyon spektrumları elde edildi.

Doğru elektrik alanın relaksasyon spektrumları üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin Schering köprüsünde doğru alan altında ölçülmesini sağlayan bir devre geliştirildi ve örneklere ait relaksasyon spektrumlarının alana bağlı değişimleri gözlemlendi. Bu değişimlerin eskime ile gerçekleşen değişimlere benzerliği vurgulandı.

Relaksasyona neden olan yapısal özelliklerin anlaşılmasını ve alanın yapı üzerindeki etkilerinin araştırılmasını sağlamak üzere geliştirilen yöntem yardımıyla, arayüz polarizasyon mekanizmasının oluşturduğu bu relaksasyonun, heterojen yapılarda ortaya çıkan bir Maxwell-Wagner relaksasyonu olduğu belirlendi.

Söz konusu yöntemin uygulanması ile elde edilen Maxwell-Wagner eşdeğer devre elemanlarının, alana bağlı değişimleri analiz edildi.

Heterojenliğin ölçüsünü veren bir parametre tanımlandı ve bu parametrenin alana bağlı değişimlerinden, alanla yapının heterojenliğinin daha da arttığı anlaşıldı.

İÇİNDEKİLER

1. BÖLÜM : GİRİŞ	1
SUMMARY BÖLÜM : PASİF BUNARLAŞTIRMA TEKNİĞİ	4
II:A = Film Hazırlama Tekniği	4

In this study, the dielectric properties of the thin films of pure AlO_x and cermet $Al-AlO_x$ have been investigated. These films were prepared using reactive evaporation technique.

The both faces of the films investigated, have been coated with the aluminium electrodes to form the capacities. The values of the components of the complex capacities for the films studied have been measured as a function of frequency using Schering Bridge and from the results the relaxation spectrums have been obtained.

For the investigation of the effect of dc field on the relaxation spectrums, the new experimental system has been developed. This system incorporates with Schering Bridge. The variation with the applied dc field of the relaxation spectrums of the films investigated have been studied. It was found that this variation is similar to the variation with aging.

The new method in determining the equivalent circuit elements of Maxwell-Wagner has been developed to understand the structural properties causing the relaxational behaviour and to investigate the field effect on the structure of the films studied. It has been confirmed that the relaxation which is caused by the mechanism of the interface polarization, is the relaxation of Maxwell-Wagner found in the heteroan structures.

The variations with the dc field of the equivalent circuit elements obtained by the new method which has been mentioned, have been analyzed.

The new parameter which gives a measure of the heterogeneity has been defined and from the variations with the field of this parameter have been understood that the heterogeneity of the structure is increased by the applied dc field.

İÇİNDEKİLER

I.	BÖLÜM	: GİRİŞ	1
II.	BÖLÜM	: REAKTİF BUHARLAŞTIRMA TEKNİĞİ	4
	II.A	: Film Hazırlama Tekniği	4
	II.B	: Oksit Filmlerindeki Metal Konsantrasyonunun Belirlenmesi Yöntemi	5
III.	BÖLÜM	: DİELEKTRİKLER	9
	III.A	: Dielektriklerin Elektrik Özellikleri	9
	III.A.1	: Polarizasyon	9
	III.A.2	: Kompleks Permittivite ve Kompleks Kapasite ...	14
	III.A.3	: Permittivite Bileşenlerinin Frekans Spektrumu	19
	III.A.4	: Relaksasyon ve Rezonans Spektrumlarının Eşdeğer Devreleri	21
	III.A.5	: Maxwell-Wagner Relaksasyonu ve Eşdeğer Devresi	27
	III.A.6	: Argand Diyagramları	36
	III.B	: Kompleks Kapasitenin Ölçülmesi (Schering Köprüsü)	37
IV.	BÖLÜM	: $A1O_x$ ve $A1-A1O_x$ FİMLERİNDE KOMPLEKS KAPASİTE ÖLÇMELERİ VE ELDE EDİLEN DENEL SONUÇLAR	41
	IV.A	: $A1O_x$ ve $A1-A1O_x$ Film Örneklerinin Hazırlanması	41
	IV.B	: Örneklerin Kompleks Kapasitelerinin dc Alana Bağlı Frekans Spektrumları	43
	IV.B.1	: Örneklerin Kompleks Kapasitelerinin dc Alan Altında Kapasite Köprüsü ile Ölçülmesi Tekniği (Mixer Devresi)	43
	IV.B.2	: Ölçü Sonuçları ve Değerlendirilmesi	47
	IV.C	: Örneklerin Kompleks Kapasitelerinin Zamana Bağlı Frekans Spektrumları	84
	IV.D	: Örneklerin Kompleks Kapasite Ölçü Sonuçlarının Tartışılması	91

V. BÖLÜM	:	KOMPLEKS KAPASİTENİN FREKANSA BAĞLI DEĞİŞİM EĞRİLERİNDEN ELEKTRİK EŞDEĞER DEVRE ELEMANLARININ BELİRLENMESİ	92
V.A	:	Yöntem	92
V.B	:	Yöntemin Denel Eğrilere Uygulanması	99
V.C	:	Eşdeğer Devre Elemanlarının Alana Bağlı Değişimleri ve Tartışması	116
VI. BÖLÜM	:	GENEL DEĞERLENDİRME	119
EKLER	:	121
EK-1	:	AYNI \bar{C} KONDANSATÖRÜNE EŞDEĞER PARALEL VE SERİ DEVRELERİN ELEMANLARI ARASINDAKİ DÖNÜŞÜM BAĞINTILARI	121
EK-2	:	McDONALD-FRİAUF, MAXWELL-GARNET, McDONALD FRİAUF-MAXWELL GARNET EŞDEĞER DEVRELERİNİN ADMİTANSLARININ HESAPLANMASI VE KOMPLEKS KAPASİTELERİNİN GERÇEL VE SANAL BİLEŞENLERİNİN ELDE EDİLMESİ	123
EK-3	:	MAXWELL-WAGNER EŞDEĞER DEVRESİNİN ADMİTANSLARININ HESAPLANMASI VE KOMPLEKS KAPASİTESİNİN GERÇEL VE SANAL BİLEŞENLERİNİN ELDE EDİLMESİ	129
KAYNAKLAR	:	132

I. BÖLÜM

GİRİŞ

İnce filmler gösterdikleri fiziksel özellikleri nedeniyle dünümüz teknolojisinde geniş bir yer tutmaktadır.

Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucu kullanım alanları gün geçtikçe çoğalmakta ve yaygınlaşmaktadır. Bu kullanım alanları içinde, anahtarlama ve bellek özelliği taşıyan elektrik devre elemanları^(1, 2), bilgisayar bellekleri⁽³⁾, ışık denetimli anahtarlama sistemleri^(4, 5), foto alıcılar⁽⁶⁾, istenilen özelliklerde yansıtma ve geçirme filtreleri⁽⁷⁾, mekanik dayanıklılığı arttırıcı veya dış etkilerden koruyucu kaplamalar⁽⁸⁾ ve ısı yansıtıcı filmler⁽⁹⁾ sayılabilir.

İnce filmlerin hazırlanış parametreleri filmlerin gösterdikleri fiziksel özelliklerle yakından ilgilidir. Bu yüzden filmlerin gösterdiği özelliklerin yanısıra, filmin hazırlanma koşulları ve kullanılan ölçü teknikleri birlikte verilmelidir.

Film hazırlama teknikleri, kullanılacak malzemenin özelliklerine bağlı olarak; vakumda ısısal buharlaştırma^(10, 11, 12), anodik oksidasyon⁽¹³⁾, sputtering^(14, 15) gibi tekniklerdir. Kullanılan ölçü teknikleri ise sonuçların presizyonu açısından önem taşımaktadır. Hazırlanan filmlerdeki presizyon ölçmeleri, filmlerin üzerinde oluşturulduğu taşıyıcının, yüzey düzgünlüğüne ve optik parametrelerine bağlı olduğundan taşıyıcıların, optik işlenmiş veya kristal olarak seçilmesi gerekmektedir⁽¹⁶⁾.

Film kalınlıklarının belirlenmesinde ise Fizeau franjlarından yararlanılan^(17, 18) ya da Feco franjlarından yararlanılan⁽¹⁹⁾ duyarlı interferometrik yöntemler kullanılır.

Fiziksel özellikleri araştırılan film, içinde metal parçacıkların bulunduğu sermet yapıda bir oksit filmi ise bu durumda incelenecek filmde bulunan metal parçacıkların konsantrasyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Konsantrasyon belirlenmesi için iki yöntem geçerlidir. Bunlar, tünel eklem yöntemi⁽²⁰⁾ ve optik absorpsiyon yöntemidir⁽²¹⁾.

Bu çalışmada reaktif buharlaştırma tekniği kullanılarak ve vakum parametreleri uygun seçilerek hazırlanan saf AlO_x ve düşük konsantras-

yonda alüminyum metal parçacıkları içeren sermet $Al-AlO_x$ ince filmlerinin dielektrik özellikleri incelendi. Bir cam taşıyıcı üzerine buharlaştırılan alüminyum alt elektrod, üzerine reaktif yolla buharlaştırılan film ve filmde üzerine alt elektroda çapraz olarak buharlaştırılan alüminyum üst elektrodların kaplanması ile elde edilen örneklerin, kompleks kapasite bileşenleri 400 Hz-15000 Hz frekans aralığında Schering Köprüsünde ölçüldü.

Elde edilen frekans spektrumlarının analizinden, bu spektrumların Maxwell-Wagner relaksasyon spektrumlarına benzerliği görüldü.

Daha sonra, örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin doğru alan altındaki değişimlerini incelemek amacıyla Schering Köprüsüne uygulanabilen bir mixer devresi geliştirildi. Böylece örneklere ait relaksasyon spektrumlarının doğru alan altındaki değişimleri incelendi.

Arayüz polarizasyon mekanizmasının⁽²²⁾ neden olduğu Maxwell-Wagner relaksasyonunun⁽²³⁾ heterojen yapılarda görüldüğü ve doğru alan altında ise yapının daha heterojen bir yapıya dönüştüğü kanısına varıldı. Bunun teorik olarak sağlanması için geliştirilen yöntem aracılığı ile denel relaksasyon eşrilerine ait Maxwell-Wagner eşdeğer devrelerinin devre elemanları hesaplandı ve bu elemanların doğru alandaki değişimlerinden, uygulanan alanın etkisiyle örneklerin daha heterojen bir yapı gösterdikleri, tanımlanan bir heterojenlik parametresi aracılığı ile açıklandı.

Çalışmada I. Bölüm olarak verilen giriş bölümünden sonra, reaktif buharlaştırma tekniğiyle uygun vakum koşullarında istenilen özellikteki filmlerin hazırlanması ve bu filmlerin içindeki metal konsantrasyonunun belirlenmesi yönteminin verildiği II. Bölüm, daha sonra filmlerin dielektrik özelliklerinin anlatıldığı III. Bölüm yer almaktadır. IV. Bölümde hazırlanan AlO_x ve $Al-AlO_x$ filmlerinin elde edilme koşulları ve bu filmlerin doğru alan altında, kompleks kapasite bileşenlerinin ölçülmesi ile elde edilen denel sonuçlar verilmekte ve bu sonuçların değerlendirilmesi yapılmaktadır. V. Bölümde de örneklerin kompleks kapasitelerinin frekansa bağlı değişim eğrilerinden, elektrik eşdeğer devre elemanlarının belirlenmesi yöntemi verilmekte ve yöntemin denel eğrilere uygulanması sağlanarak sonuçların eşdeğer devre elemanları

cinsinden alana bağıllığı tartışılmaktadır. Ve son bölüm olan VI. Bölüm de ise elde edilen sonuçların genel değerlendirilmesi yapılmaktadır.

II. A. FİLM HAZIRLAMA TEKNİKLERİ

Saf metallerin 10^{-4} - 10^{-7} torr artık gaz basıncında ve uygun vakum koşullarında, termik olarak buharlaştırılması tekniği, reaktif buharlaştırma tekniği olarak adlandırılır.

Buharlaştırılan metaller, vakum parametrelerine bağlı olarak; metalik yapı, metal-metaloksit karışımı yapı (sermet yapı) veya saf metaloksit yapı dösterirler.

Reaktif buharlaştırma tekniği ile elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri, örneklerin elde edildiği sırasındaki vakum parametrelerine sıkı sıkıya bağlıdır. Bu parametreler arasında,

- 1- Vakum mertebesi
- 2- Kaynak-tasıyıcı arası uzaklığı
- 3- Buharlaştırma hızı
- 4- Buharlaştırılan malzemenin cinsi
- 5- Vakumdaki artık gazın cinsi
- 6- Tasıyıcı sıcaklığı ve cinsi
- 7- Isıtıcının gücü

Filmlerin hazırlanışı sırasında, örneklerin yapısına ve delaysıyla fiziksel özelliklerine etki eden bu vakum parametrelerinin sayısı oldukça fazladır. Ancak, bu vakum parametrelerinden ilk üçü filmlerin isletilen koşullarda elde edilebilmesinde en etkin olan parametrelerdir.

Bir vakumda buharlaştırma işlemi sırasında etkin olan bu üç parametrenin uygun olarak seçilmesi durumunda tasıyıcı üzerine kaplanan film metalik fazda oluyorsa, buharlaştırma hızının azaltılması ile filmin metal fazında bir azalma olur. Ancak aynı buharlaştırma hızında, kaynak-tasıyıcı uzaklığını arttırsak, ortalama serbest yol uzunluğundan buharlaşan metal parçacıklarının reaktif gaz atomlarıyla çarpışma olasılığı artar ve filmin metalik fazında bir azalma

II. BÖLÜM

REAKTİF BUHARLAŞTIRMA TEKNİĞİ

II.A FİLM HAZIRLAMA TEKNİĞİ

Saf metallerin 10^{-4} - 10^{-7} torr artık gaz basıncında ve uygun vakum koşullarında, termik olarak buharlaştırılması tekniği, reaktif buharlaştırma tekniği olarak adlandırılır.⁽²⁷⁾

Buharlaştırılan metaller, vakum parametrelerine bağlı olarak; metalik yapı, metal-metaloksit karışımı yapı (sermet yapı) veya saf metaloksit yapı gösterirler.

Reaktif buharlaştırma tekniği ile elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri, örneklerin elde edilişi sırasındaki vakum parametrelerine sıkı sıkıya bağlıdır. Bu parametreler arasında,

- 1- Vakum mertebesi
- 2- Kaynak-taşıyıcı arası uzaklığı
- 3- Buharlaştırma hızı
- 4- Buharlaştırılan malzemenin cinsi
- 5- Vakumdaki artık gazın cinsi
- 6- Taşıyıcı sıcaklığı ve cinsi
- 7- Isıtıcının gücü

sayılabilir.

Filmlerin hazırlanışı sırasında, örneklerin yapısına ve dolayısıyla fiziksel özelliklerine etki edebilen vakum parametrelerinin sayısı oldukça fazladır. Ancak, bu vakum parametrelerinden ilk üçü filmlerin istenilen koşullarda elde edilebilmesinde en etkin olan parametrelerdir.

Bir vakumda buharlaştırma işlemi sırasında, etkin olan bu üç parametrenin uygun olarak seçilmesi durumunda taşıyıcı üzerine kaplanan film metalik fazda oluyorsa, buharlaştırma hızının azaltılması ile filmin metal fazında bir azalma olur. Ancak aynı buharlaştırma hızında, kaynak-taşıyıcı uzaklığını arttırsak, ortalama serbest yol uzayacağından buharlaşan metal parçacıklarının reaktif gaz atomları ile çarpışma olasılığı artar ve filmin metalik fazında bir azalma

olur. Yapı metal-metaloksit karışımı demek olan sermet bir yapı biçimine dönüşür.

Bu kez de buharlaştırma hızı ve kaynak-taşıyıcı uzaklığı birlikte aynı kalmak koşulu ile vakum mertebesi düşürülürse ortamdaki reaktif gaz atomlarının sayısı artacağından, buharlaşan metal parçacıkları ortamdaki reaktif gaz atomları ile daha fazla çarpışma olanağı bulur ve filmin yapısında oksit faza doğru kayma gözlenir. Ve bu vakum parametreleri aynı yönde daha da ileri götürülürse sonunda bütün buharlaşan metal parçacıkları, reaktif gaz atomlarıyla çarpışarak taşıyıcı üzerine oturur ve film saf metaloksit bir yapıya dönüşmüş olur.

Diğer bütün vakum parametreleri aynı kalmak koşulu ile artık gazın cinsi değiştirilirse (örneğin oksijen gazı), buharlaşan metal parçacıkları ile çarpışma yapabilen gaz moleküllerinin sayısı artar ve dolayısıyla filmin saf metaloksit olma olasılığı artar.

Taşıyıcının cinsi, buharlaşacak malzemenin de cinsine bağlı olarak, parçacıkların taşıyıcı üzerine yapışma veya yüzeyden vansıma oranını değiştirir. Taşıyıcı sıcaklığı ise metalik fazda taşıyıcı üzerine gelen parçacıkların kimyasal reaksiyonunu hızlandırıcı yönde etki yapar.

II.B OKSİT FİLMLERİNDEKİ METAL KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ YÖNTEMLERİ

Oksit filmlerindeki, optik absorpsiyon, akım geçiş özellikleri ve dielektrik özellikler metal-metaloksit filmlerindeki metal konsantrasyonuna bağlıdır.

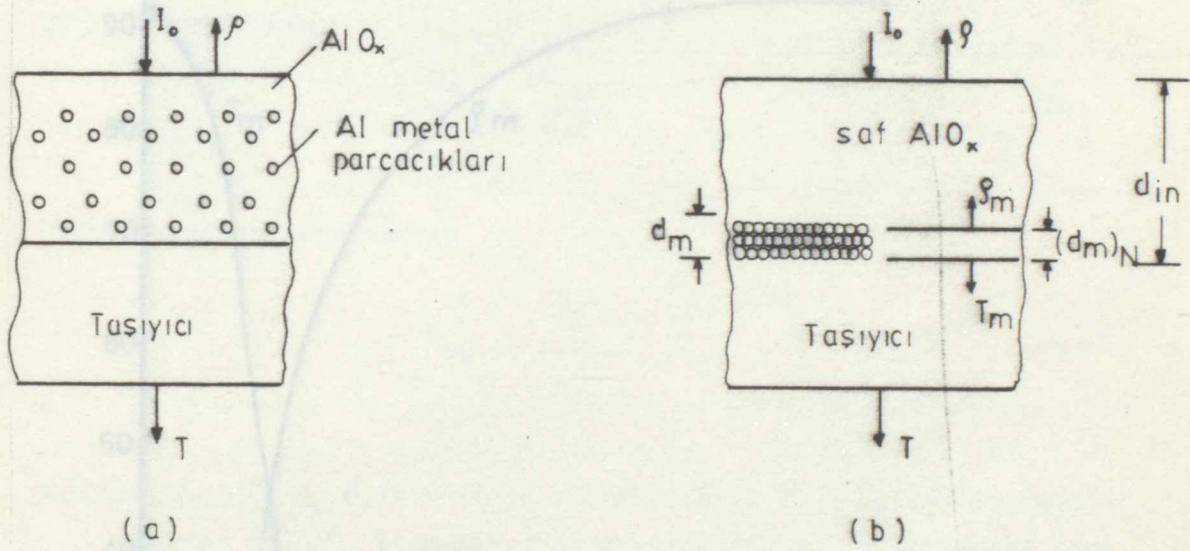
Sermet yapıdaki oksit filmlerinin içinde bulunan metal konsantrasyonunun belirlenmesinde kullanılan iki farklı yöntem vardır.

- 1- Tünel Eklem yöntemi⁽²⁰⁾
- 2- Optik Absorpsiyon yöntemi⁽²¹⁾

Burada konsantrasyon belirleme yöntemlerinden ikincisi olan "Optik Absorpsiyon Yöntemi" kısa olarak verilecektir.

İçinde metal parçacıkları bulunan bir oksit filminin interferometre ile ölçülen kalınlığı d_{in} , yansıtma gücü ρ ve geçirgenliği T olsun (Sekil-1a).

İncelenen örnekte saçılma nedeniyle ışık kaybı, toplam absorpsiyon yanında yok sayılacak kadar küçükse, böyle bir filmi; taşıyıcı üzerinde, oksit içindeki metal parçacıklarının biraraya gelmesiyle oluşturduğu kalınlık d_m , yansıtma gücü ρ_m ve geçirgenliği T_m olan ince metal filmi ve onun üzerinde bir oksit filmi olacak şekilde (taşıyıcı + metal + oksit) düşünelim.



Şekil-1 Metal-Metaloksit filmlerinde optik absorpsiyon modeli

Şekil-1a'da içinde alüminyum metal parçacıklarının homojen olarak dağıldığı oksit filmi, Şekil-1b'de ise alüminyum metal parçacıklarının biraraya gelmesi ile oluşturulan d_m kalınlıklı metal filmi ve bu filmin üzerinde $(d_{in} - d_m)$ kalınlıklı saf oksit filmi görülmektedir.

Örnekteki toplam absorpsiyon A_t , metalik absorpsiyon A_m ile saçılma yoluyla absorpsiyon A_s nin toplamı olup,

$$A_t = A_m + A_s \quad (1)$$

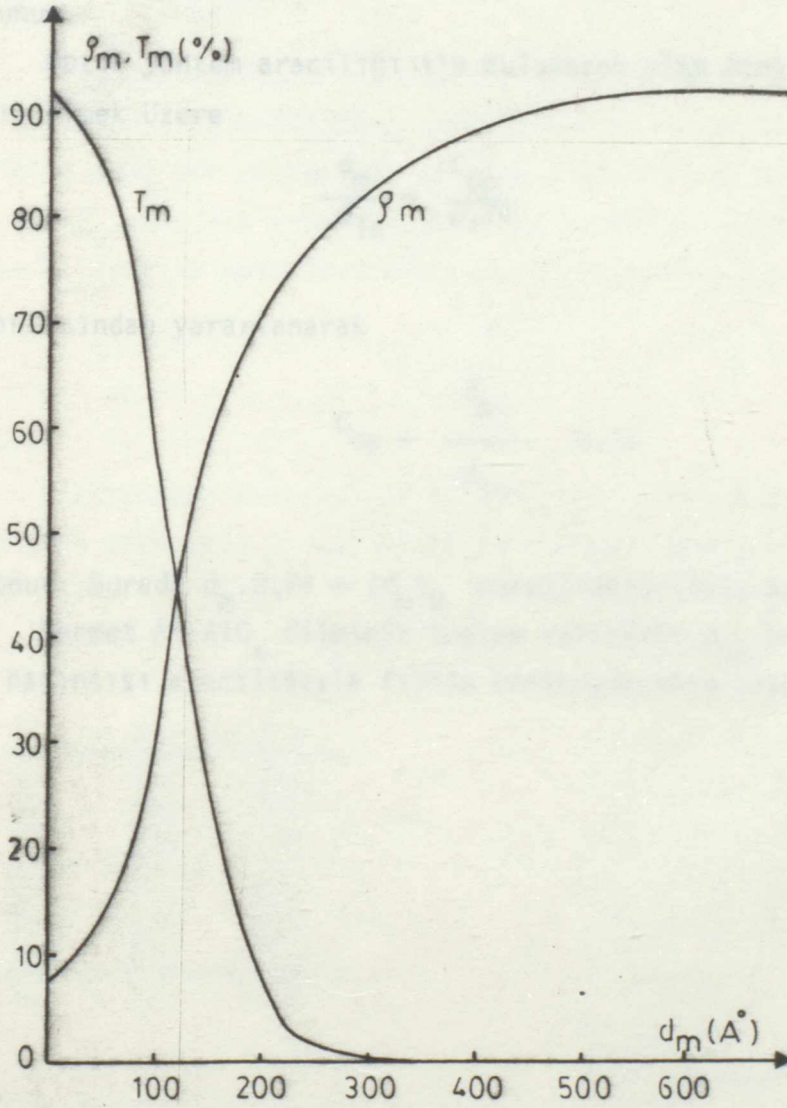
ayrıca

$$\rho + T + A_t = 1 \quad (2)$$

dir. A_s çok küçük olduğundan

$$A_t = A_m \quad (3)$$

toplam absorpsiyon, metalik absorpsiyona eşit olur.



Şekil-2 Reaktif buharlaştırma tekniğiyle elde edilen saf alüminyum metal filmlerinin yansıtma gücü ve geçirgenliğinin film kalınlığı ile değişimi

Örneklerdeki alüminyum konsantrasyonunu belirlemek amacıyla 10^{-5} torr basınçta alüminyumun termik buharlaştırılmasıyla elde edilen 50 \AA° - 600 \AA° kalınlıktaki Al metal filmlerinin yansıtma ve geçirgenlik eğrisi Şekil-2'de verilmiştir.

Bu eğri yardımıyla elektrik veya dielektrik özellikleri incelenen örneklerin ölçülen ρ ve T değerlerine karşılık olan ρ_m ve T_m değerleri ve dolayısıyla oksit içindeki, d_m metal filminin kalınlığı bulunur.

Optik yöntem aracılığıyla bulunacak olan konsantrasyon C_{op} ile gösterilmek üzere

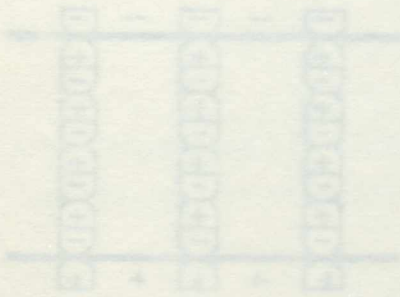
$$\frac{d_m}{d_{in}} = \frac{C_{op}}{0,74} \quad (4)$$

bağıntısından yararlanarak

$$C_{op} = \frac{d_m}{d_{in}} \cdot 0,74 \quad (5)$$

Burada $d_m \cdot 0,74 = (d_m)_N$ normalleştirilmiş kalınlığa eşittir.

Sermet Al- AlO_x filminin toplam kalınlığı d_{in} bilindiğine göre (5) bağıntısı aracılığıyla filmin konsantrasyonu hesaplanır.



Şekil-3 Dielektrik polarizasyonun sematik olarak gösterilmesi.

Elektrodlar arasına yerleştirilen bir dielektrik ortamda, elektrik alan etkisiyle oluşan dipol zincirleri, Şekil-3'te de gösterilmiştir. Burada $d_m \cdot 0,74 = (d_m)_N$ normalleştirilmiş kalınlığa eşittir. Sermet Al- AlO_x filminin toplam kalınlığı d_{in} bilindiğine göre (5) bağıntısı aracılığıyla filmin konsantrasyonu hesaplanır.

III. BÖLÜM

DİELEKTRİKLER

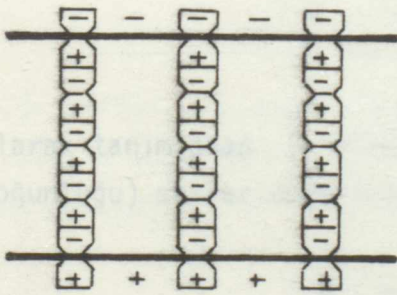
III.A DİELEKTRİKLERİN ELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

III.A.1 Polarizasyon

Elektrodlarının arası boş olan bir kondansatör bir doğru gerilim kaynağına bağlandığında, kondansatör elektrodlarında, kaynak gerilimine eşit bir potansiyel farkına ulaşıncaya kadar yük birikir. Biriken Q_0 yükü ile V kaynak gerilimi arasında sabit bir oran vardır ve bu C_0 oranına kondansatörün boşluk (geometrik) kapasitesi denir:

$$C_0 = \frac{Q_0}{V} \quad (6)$$

Elektrodlar arasına yerleştirilen bir dielektrik ortamda, elektrik alan etkisiyle oluşan dipol zincirleri, Şekil-3'de de gösterildiği gibi, elektrodlardaki bir kısım yüklerin nötralize olmalarına yol açarlar. Elektrodlar arasındaki gerilimin aynı değeri koruması, serbest kalan yüklerin Q_0 'a ulaşması ile sağlanacağından, elektrodlarda biriken yük artarak Q ya ulaşır. Bu Q yükünün; Q_0 kadar serbest, $(Q-Q_0)$ kadar ise bağlı yüklerdir.



Şekil-3 Dielektrik polarizasyonun şematik olarak gösterilişi

Dielektrik ortam, dolayısıyla, kondansatörün kapasitesini C_0 dan C ye çıkartmıştır:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (7)$$

Dielektrik ortamın ϵ_r' bağıl permitivitesi

$$\epsilon_r' = \frac{C}{C_0} \quad (8)$$

olarak tanımlandığına göre (6) ve (7)

$$Q_0 = \frac{Q}{\epsilon_r'} \quad (9)$$

elde edilir. Son bağıntı, kondansatör elektrodlarında biriken Q yükünün Q/ϵ_r' kadarının serbest yük, $Q(1-1/\epsilon_r')$ kadarının da bağlı yük olduğunu göstermektedir.

Bunlara göre, Q yükünün elektrod yüzeyindeki dağılımını veren yüzey yük yoğunluğu q ise, serbest yük yoğunluğu q/ϵ_r' , bağlı yük yoğunluğu da $q(1-1/\epsilon_r')$ dir.

Öte yandan, Gauss yasasının paralel plaklı kondansatöre uygulanması ile

$$\vec{D} = \epsilon_r' \vec{E} = \epsilon_r' \epsilon_0 \vec{E} \quad (10)$$

olarak tanımlanan \vec{D} elektrik indüksiyon vektörünün (elektrik akı yoğunluğu) skaler değerinin, q yük yoğunluğuna eşit olduğu bulunur.

$$|\vec{D}| = q \quad (11)$$

Kondansatör plakları arasında dielektrik ortamın bulunmaması durumunda elektrik akı yoğunluğu vektörü

$$\vec{D}_0 = \epsilon_0 \vec{E} \quad (12)$$

elektrodlardaki yük yoğunluğu da q/ϵ_r' olduklarından

$$|\vec{D}_0| = \epsilon_0 |\vec{E}| = q/\epsilon_r' \quad (13)$$

dir. Kondansatör plakları arasında bir dielektrik ortamın yerleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan elektrik akı yoğunluğu artışı polarizasyon olarak tanımlanır.

$$\vec{P} = \vec{D} - \vec{D}_0 \quad (14a)$$

$$\vec{P} = \vec{D} - \epsilon_0 \vec{E} \quad (14b)$$

$$\vec{P} = \epsilon_r' \vec{E} - \epsilon_0 \vec{E} \quad (14c)$$

$$\vec{P} = (\epsilon_r' - 1) \epsilon_0 \vec{E} \quad (14d)$$

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (14e)$$

χ ye elektrik süsseptibilite denir. (11) ve (13) bağıntıları yardımıyla (14a) dan

$$|\vec{P}| = (1 - 1/\epsilon_r') q \quad (15)$$

elde edilir. Bu, polarizasyonun miktarca bağılı yük yoğunluğuna eşit olduğunu göstermektedir. (13) ve (15) bağıntıları yardımıyla da (14e) den süsseptibilite için

$$\chi = \frac{(1 - 1/\epsilon_r') q}{q/\epsilon_r'} \quad (16)$$

yazılabilir. Bu da, süsseptibilitenin bağılı yük yoğunluğunun serbest yük yoğunluğuna oranı olduğunu göstermektedir.

Birbirlerinin d kadar uzağında zıt polariteli $+Q$, $-Q$ yük çifti, bir elektrik dipol oluşturur.

Bu dipollerin polarizlenme mekanizmaları ve bunlara bağlı polarizlenebilirlikler aşağıdaki gibidir:

$$\vec{\mu} = Q d \quad (17)$$

olarak tanımlanan $\vec{\mu}$ elektrik dipol moment vektörü ile temsil edilir. $\vec{\mu}$ vektörünün yönü eksi yükten, artı yüke doğrudur. Buna göre, dielektrik ortamın toplam dipol moment miktarı, elektrodlardaki toplam bağlı yük ile elektrodlar arası uzaklığın çarpımına, başka deyişle de bağlı yük yoğunluğunun plaklar arasındaki hacimle çarpımına eşittir. Bağlı yük yoğunluğunun, polarizasyon vektörünün skaler değerine eşit olduğu, dielektriğin elektrik dipol momentinin de elektrik alan yönünde, dolayısıyla da \vec{P} polarizasyonu yönünde olduğu gözönüne alınır, polarizasyonun, dielektrik ortamın birim hacminin dielektrik dipol momentine özdeş olduğu görülür.

Dielektrik ortamın birim hacminin dielektrik dipol momentini, birim hacimdeki N elemanter dipolün toplam etkinliğinin sonucu olacağına göre, bu dipollerin ortalama momentleri olmak üzere, polarizasyon

$$\vec{P} = N \vec{\mu} \quad (18)$$

olarak yazılabilir. Ayrıca $\vec{\mu}$ momentinin dielektrik içindeki lokal (yerel) elektrik alanı ile orantılı olduğu kabul edilebilir. Dipole etki eden bu yerel alan E_1 ile gösterilecek olursa

$$\vec{\mu} = \alpha \vec{E}_1 \quad (19)$$

ile tanımlanan α ya dipolün polarizlenebilirliği (polarizebilitesi) denir. Buna göre \vec{P} vektörü için

$$\vec{P} = (\epsilon_r' - 1) \epsilon_0 \vec{E} = N \alpha \vec{E}_1 \quad (20)$$

Clausius denklemi yazılabilir.

Dipoller, atomlar ve moleküllerce değişik mekanizmalar aracılığıyla oluşturulurlar. α polarizebilitesi, bu mekanizmalara ait polarizebilite bir bileşkesidir.

Polarizlenme mekanizmaları ve bunlara bağlı polarizlenebilirlikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Optik Polarizlenme

Bir atomun, pozitif yüklü bir iç kabuk ve bunu saran bir elektron bulutundan oluştuğu gözönüne alınabilir. Bir alan uygulandığında, elektron bulutu, atom merkezine oranla küçük bir ötelenme yaparak bir dipol momentin oluşmasına neden olur. Bu mekanizma, görülür ışığın frekanslarına eşit ya da daha büyük öztitreşim frekansları veren, elektronların elastik ötelenmesi modelinin karakteristiklerini taşır. Elektronik polarizlenme olarak da adlandırılan bu polarizlenmeye ilişkin polarizlenebilirliğe α_e optik (elektronik) polarizlenebilirlik denir.

Moleküler Polarizlenme

İki değişik atomdan oluşan bir molekül ele alınacak olursa, atomlar arasındaki etkileşim nedeni ile elektronların, atomlar arasındaki yeni bir dağılım gösterecekleri bu dağılımın, atomları birleştiren eksene göre simetrik olacağı, ancak genelde sözkonusu eksen boyunca bir dipol momentin ortaya çıkacağı düşünülür. Dipol momentleri olan iki yada daha çok atomlu moleküllere polar molekül denir. Atomları özdeş olan iki atomlu bir molekülün dipol momentini simetri nedeniyle sıfır olacaktır. Bu moleküller polar değildir.

Polar moleküller, bir alan uygulandığında iki mekanizmanın etkisinde kalırlar. Birincisinde, alan atomların ötelenmesine, dolayısıyla da molekülün dipol momentinin değişmesine yol açabilir. Buna atomik polarizlenme denir. Atomik polarizlenebilirlik de α_a ile gösterilir. İkinci olarak da, molekül bir bütün olarak, dipolün yönünü alanın yönüne çevirmek için dönme eğilimi gösterir. Buna da yönelme (oryantasyon) polarizasyonu denir. Yönelme polarizlenebilirliği de α_d ile gösterilir.

Arayüz Polarizlenmesi

Bir kristal içindeki çeşitli kusurlar, uygulanan elektrik alanın etkisiyle kristal boyunca ilerleyen serbest yük taşıyıcılarını tuzaklayarak, buralarda birikmelerine yol açarlar. Böylece oluşan

·lokal yük yığılmaları, buradaki yüklerin elektrotlarda kendi kar-
şıtlarını indükleyerek dipol momentlerin oluşmalarına yol açarlar.
Kristallerdeki bu farklı mekanizmaya arayüz polarizlenmesi denir.
Arayüz polarizlenebilirliği de α_i ile gösterilir. (25c)

Dielektrik ortamın α polarizlenebilirliği, dielektrik mal-
zemenin özelliğine ve uygulanan alanın zamana bağlı biçimine göre,
yukarıda sayılan polarizlenebilirliklerin bir kısmı ya da tümüncü
yapılan değişik ağırlıktaki katkılarıyla oluşturulur:

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \alpha_i \quad (21)$$

III.A.2 Kompleks Permittivite ve Kompleks Kapasite

Permittivite, Coulomb Yasası tarafından ortamın bir özelliği
olarak tanımlanır. ϵ permittivitesinin, boşluğun ϵ_0 permittivite-
sine oranı olan

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (22)$$

ϵ_r ye ortamın bağlı permittivitesi denir. Boşluğun permittivitesi ise

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Farad/metre} \quad (23)$$

dir.

Paralel plaklı boşluk kondansatörünün kapasitesi, plakların
yüzeyi A, plakların arasındaki uzaklık da d olmak üzere

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (24)$$

olarak verilir. Plaklar arasına, ϵ_r bağlı permittiviteli, polar ol-
mayan bir ideal yalıtkan ortam yerleştirildiğinde kapasitenin değe-
ri

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (25a)$$

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (25b)$$

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (25c)$$

olur.

Kondansatöre uygulanan bir V gerilimi, kondansatör plaklarında Q yükünün birikmesine neden olur.

$$Q = C V \quad (26)$$

Uygulanan gerilim bir $V = V_0 \exp(j\omega t)$ alternatif gerilimi ise, plaklardaki yük, bu gerilim ile aynı fazda bir değişim gösterir:

$$Q = C V_0 \exp(j\omega t) \quad (27)$$

Bu durumda dış devrede

$$I = \frac{dQ}{dt} = j\omega C V_0 \exp(j\omega t) \quad (28a)$$

$$I = j\omega C V \quad (28b)$$

akımı vardır. Akım gerilimin 90° ilerindedir.

Kondansatör plakları arasındaki polar olmayan ortam, ideal yalıtkan değilse akımın (28b) ile verilen değerine bir de gerilim ile aynı fazda olan küçük bir $G V$ iletkenlik bileşeni eklemek gerekir:

$$I = (j\omega C + G) V \quad (29)$$

Serbest yüklerin hareketinden kaynaklanan, ve dolayısıyla frekansa bağlı olmayan G iletkenliği, dielektrik ortamın boyutlarına

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (30)$$

olarak bağlıdır. σ , iletkenlik katsayısı adını alır. İletkenliğin tersi ise dirençtir ve R ile gösterilir. (25c) ve (30) bağıntılarıyla yardımıyla (29) bağıntısı

$$\frac{I}{A} = (j\omega\epsilon + \sigma) \frac{V}{d} \quad (31)$$

biçiminde yazılabilir.

Kondansatör plakları arasındaki E elektrik alan şiddetinin, gerilim ve plaklar arasındaki uzaklığa

$$E = \frac{V}{d} \quad (32)$$

olarak bağlı olduğu, J akım yoğunluğunun da

$$J = \frac{I}{A} \quad (33)$$

olarak tanımlandığı bilindiğine göre (31) bağıntısı

$$J = (j\omega\epsilon + \sigma) E \quad (34)$$

olarak yazılabilir. Son bağıntı

$$J = j\omega\bar{\epsilon} E \quad (35)$$

olarak da yazılabilir. Bu bağıntıda yer alan $\bar{\epsilon}$ kompleks büyüklüğüne, kompleks permitivite denir. (34) ve (35) bağıntılarına göre,

$$\bar{\epsilon} = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (36)$$

dir.

$$\epsilon' = \epsilon \quad (37a)$$

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad (37b)$$

alınarak kompleks permitivitenin

$$\bar{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (38)$$

biçiminde yazılması sağlanır.

Bağıl kompleks permitivite, (22) bağıntısına benzer biçimde

$$\bar{\epsilon}_r = \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_0} \quad (39)$$

olarak tanımlanır. Buna göre

$$\epsilon'_r = \epsilon'/\epsilon_0 = \epsilon/\epsilon_0 = \epsilon_r \quad (40a)$$

$$\epsilon''_r = \epsilon''/\epsilon_0 = \sigma/\omega\epsilon_0 \quad (40b)$$

olmak üzere, bağlı kompleks permitivite

$$\bar{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (41)$$

dir.

Mutlak ve bağlı permitivitelere göre

$$\bar{C} = \bar{\epsilon} \frac{A}{d} \quad (42a)$$

$$\bar{C} = \bar{\epsilon}_r \epsilon_0 \frac{A}{d} = \bar{\epsilon}_r C_0 = \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_0} C_0 \quad (42b)$$

$$\bar{C} = \epsilon'_r C_0 - j\epsilon''_r C_0 = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} C_0 - j \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} C_0 \quad (42c)$$

olarak tanımlanan \bar{C} kompleks kapasitesi, bileşenleri

$$C' = \epsilon'_r C_0 = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} C_0 = \epsilon' \frac{A}{d} = \epsilon' \frac{A}{d} = C \quad (43a)$$

$$C'' = \epsilon_r'' C_0 = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} C_0 = \epsilon'' \frac{A}{d} = \frac{\sigma}{\omega} \frac{A}{d} = \frac{G}{\omega} = \frac{1}{\omega R} \quad (43b)$$

olmak üzere

$$\bar{C} = C' - jC'' \quad (44)$$

biçiminde de yazılabilir. Bu kompleks kapasitenin admitansı

$$Y = j\omega\bar{C} = j\omega C' + \omega C'' \quad (45)$$

ya da (43a) ve (43b) bağıntıları kullanılırsa

$$Y = j\omega C + G = j\omega C + \frac{1}{R} \quad (46)$$

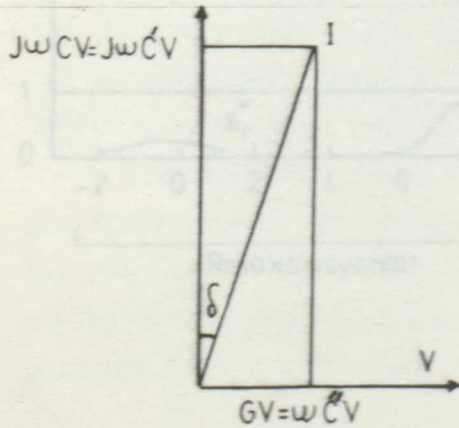
biçiminde yazılabilir. Bunlara göre (29) bağıntısı

$$I = j\omega\bar{C}V \quad (47a)$$

$$I = (j\omega C' + \omega C'') V \quad (47b)$$

olarak da yazılabilir.

Şekil-4 de akımın bileşenleri gösterilmektedir. Dielektriğin



Şekil-4 Kayıplı kondansatördeki akım bileşenleri

ideal olmaması, akımın δ açısı kadar geri kalmasına yol açmaktadır. Dielektrikdeki iletkenlikten doğan kaybın bir ölçüsü olan bu açı, kayıp açısı, açının tanjantı da kayıp tanjantı veya kayıp faktörü olarak adlandırılır.

Şekil-4 den

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C''}{C'} \quad (48)$$

olarak elde edilir. (43a) ve (43b) bağıntılarına göre de

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\epsilon \omega} \quad (49)$$

dır.

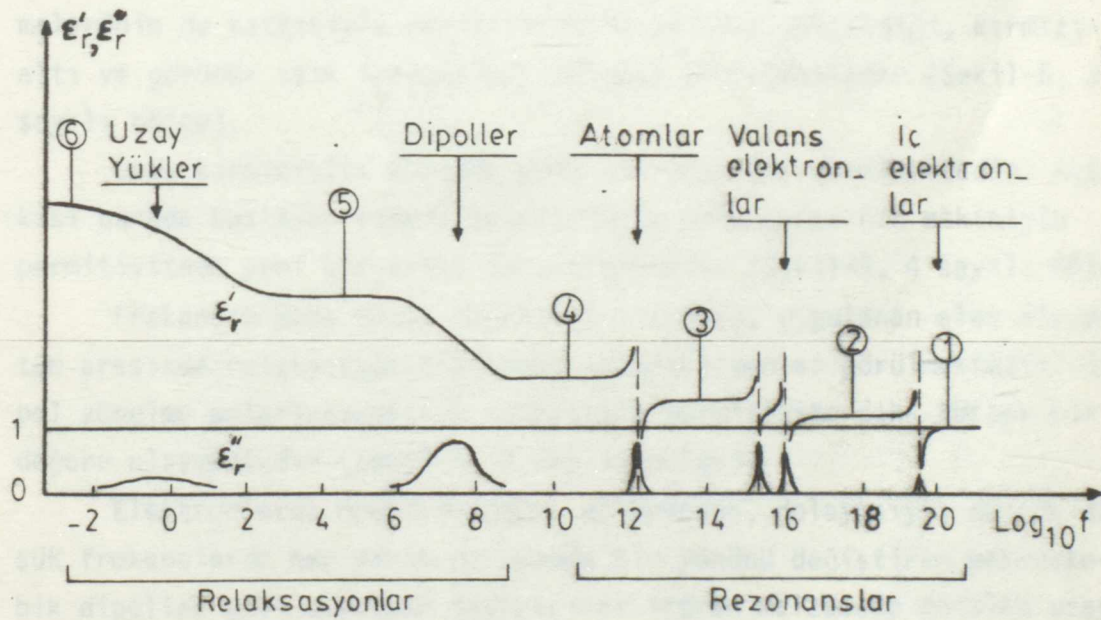
Kondansatör plakları arasındaki ortamın polar bir dielektrik olması durumunda iletkenliğe serbest yüklerin yanısıra, bağlı yükler de katkıda bulunacaklardır. Bu nedenle G ve σ nun kendileri de frekansa bağlı kompleks büyüklükler olacaklardır.

Bu durumda

$$\bar{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (38)$$

kompleks permitivitesinin her ikisi de frekansa bağımlı ϵ' ve ϵ'' bileşenlerinin permitivite ve iletkenliğe bağılılığı (37a) ve (37b) bağıntıları ile verilenden daha karmaşık olurlar.

III.A.3 Permitivite Bileşenlerinin Frekans Spektrumu



Şekil-5 Bağıl kompleks permitivitenin gerçel ve sanal bileşenlerinin frekans spektrumu

Şekil-5 uzay yüklerini de içeren tipik bir polar ortamın kompleks permitivitesinin gerçel ve sanal bileşenlerinin frekans spek-

trumunu göstermektedir. (23)

Söz konusu spektrum, ortamdaki değişik polarizlenme mekanizmalarının frekansa göre değişen katkılarının toplamından oluşmaktadır. Her mekanizma belli bir kritik frekansa (öz titreşim frekansı) sahiptir. Bu frekansın üstünde söz konusu mekanizmanın etkisi giderek tükenmektedir. Küçük frekanslara gidildikçe daha çok sayıda mekanizmanın katkısı görülmektedir. 10^{20} Hz ve daha yüksek frekanslardaki alanların, ortamda, polarizlenme etkisi yapmadıkları görülmektedir. (Şekil-5, 1 sayılı bölge). 10^{19} Hz mertebesindeki bir frekansta (X-ışınları mertebesi) iç elektronların optik polarizlenmesine ilişkin rezonans görülmektedir. Daha düşük frekanslarda da süren bu polarizlenme bağlı permitivitenin gerçel bileşenini, boşluğun bağlı permitivitesi olan birimin üzerine çıkarmaktadır (Şekil-5, 2 sayılı bölge).

Daha düşük frekanslarda valans elektronlarının rezonansları görülmektedir. Bunların altında ise, dış elektronların optik polarizlenmelerinin de katkısıyla permitivitenin yeniden yükseldiği, kırmızı-altı ve görünür ışık frekansları bölgesi yer almaktadır (Şekil-5, 3 sayılı bölge).

Uzak kırmızıaltı bölgede yeni bir rezonans görülmektedir. Katkısı burada başlayan atomik polarizlenme mekanizmasının etkisiyle permitivitede yeni bir artış daha olmaktadır (Şekil-5, 4 sayılı bölge).

Frekansın daha küçük değerlerine inince, uygulanan alan ile ortam arasında relaksasyon tipindeki interaksiyonlar görülmektedir. Dipol yönelme polarizasyonunun katkısıyla permitivite daha yüksek bir değere ulaşmaktadır (Şekil-5, 5 sayılı bölge).

Elektrodlarda rekombinasyona elvermeyen, dolayısıyla da çok düşük frekanslarda her yarım periyotta bir yönünü değiştiren makroskobik dipoller gibi davranan taşıyıcılar içeren malzemede görülen uzay yük polarizasyonunun katkısıyla permitivite son bir yükselme daha gösterir (Şekil-5, 6 sayılı bölge).

III.A.4 Relaksasyon ve Rezonans Spektrumlarının Eşdeğer Devreleri

Kondansatör plaklarına uygulanan $V = V_0 \exp(j\omega t)$ geriliminin,

$$I = j\omega \bar{C} V \quad (47a)$$

akımına yol açtığı, \bar{C} kompleks kapasitesinin

$$\bar{C} = C' - j\omega C'' \quad (44)$$

olarak tanımlandığı, dolayısıyla bu kapasitenin admitansının

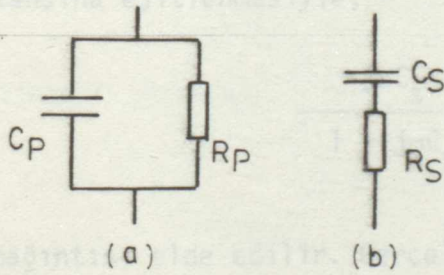
$$Y = j\omega \bar{C} = j\omega C' + \omega C'' \quad (45)$$

olduğu, C' ve C'' nün de

$$C' = \epsilon_r' C_0 = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} C_0 \quad (43a)$$

$$C'' = \epsilon_r'' C_0 = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} C_0 \quad (43b)$$

oldukları bilinmektedir. (25)



Şekil-6 Paralel ve seri eşdeğer devreler
a- Paralel eşdeğer devre
b- Seri eşdeğer devre

\bar{C} kondansatörü, C_p kapasiteli bir kayıpsız kondansatör ile buna paralel olarak bağlı R_p direnci ile temsil edilebilir (Şekil-6a). Bu eşdeğer devrenin admitansı, \bar{C} kondansatörünün (45) ile verilen admitansına eşit olmalıdır.

$$j\omega C_p + \frac{1}{R_p} = j\omega C' + \omega C'' \quad (50)$$

Buna göre kompleks kapasitenin C' ve C'' bileşenleri ile eşdeğer devre elemanları arasında-

ki dönüşüm bağıntıları

$$C' = C_p \quad (51a)$$

$$C'' = \frac{1}{\omega R_p} \quad (51b)$$

biçimindedir. Bu durum da

$$\text{tg} \delta = \frac{C''}{C'} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (52a)$$

$$\epsilon_r' = \frac{C'}{C_0} = \frac{C_p}{C_0} \quad (52b)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{C''}{C_0} = \frac{1}{\omega R_p C_0} \quad (52c)$$

bağıntıları elde edilir.

\bar{C} kondansatörü, kayıpsız bir C_s kondansatörü ile buna seri olarak bağlı bir R_s direnci ile de temsil edilebilir (Şekil-6b).

Seri eşdeğer devrenin admitansının, \bar{C} kondansatörünün admitansına eşitlenmesiyle,

$$\frac{j\omega C_s}{1 + j\omega C_s R_s} = j\omega C' + \omega C'' \quad (53)$$

bağıntısı elde edilir. Gerçel ve sanal terimlerin eşitlenmesiyle de

$$C' = \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (54a)$$

$$C'' = \frac{\omega C_s^2 R_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (54b)$$

elde edilir. Bu durumda da

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C''}{C'} = \omega C_s R_s \quad (55a)$$

$$\epsilon_r' = \frac{C'}{C_0} = \frac{C_s/C_0}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} = \frac{C_s/C_0}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (55b)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{C''}{C_0} = \frac{\omega C_s R_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} = \frac{C_s}{C_0} \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (55c)$$

bağıntılarına varılır.

Aynı \bar{C} kondansatörüne eşdeğer paralel ve seri devrelerin elemanları arasındaki dönüşüm bağıntıları Ek-1 de gösterildiği üzere

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (56a)$$

$$R_p = \frac{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2}{\omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (56b)$$

$$C_s = \frac{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}{\omega^2 C_p R_p^2} \quad (57a)$$

$$R_s = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (57b)$$

gibidir. Ayrıca

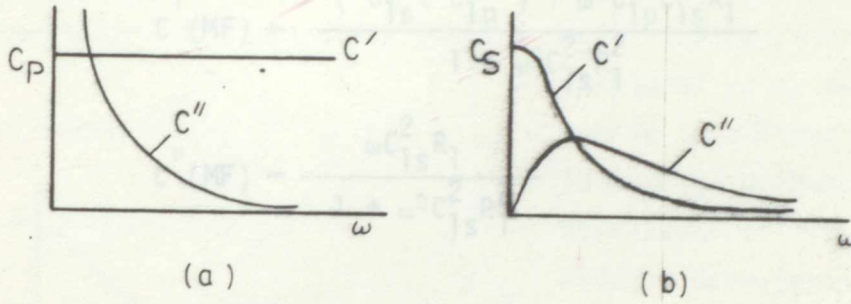
$$\omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (58)$$

olduğu görülmektedir.

\bar{C} kapasitesinin, Şekil-6 da gösterilen C_p, R_p paralel devreyle ya da C_s, R_s seri devresiyle temsil edilmesinin yalnızca sabit bir frekans için anlamı vardır. Bu eşdeğer devreler, permitivite bileşenlerinin frekans aralığında gösterdikleri relaksasyon ve rezonans spektrumlarını karşılayamamaktadırlar (Şekil-7).

Verilen admittansına eşitlenerek, kompleks \bar{C} kapasitesinin C' ve C'' bileşenleri elde edilir. Böylece,

McDonald-Friauf eşdeğer devresi için

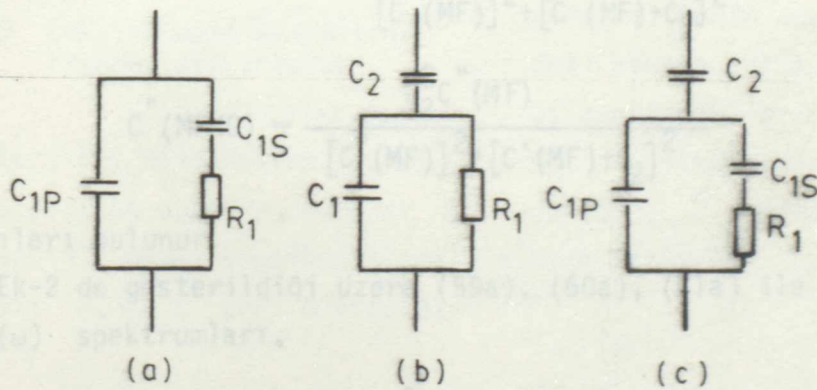


Maxwell-Garnet eşdeğer devresi için

Şekil-7 Paralel R_p, C_p ve seri R_s, C_s devrelerinin frekans spektrumları

- a- Paralel devrenin frekans spektrumu
b- Seri devrenin frekans spektrumu

Relaksasyon spektrumlarını karşılamak için önerilen eşdeğer devreler Şekil-8 de gösterilmektedir. Bu devrelerin admittansları Ek-2 de gösterildiği üzere hesaplanıp, \bar{C} nin (45) bağıntısı ile



Şekil-8 Relaksasyon spektrumlarının eşdeğer devreleri
a- McDonald-Friauf eşdeğer devresi (MF)
b- Maxwell-Garnet eşdeğer devresi (MG)
c- McDonald-Friauf - Maxwell-Garnet eşdeğer devresi (MFMG)

verilen admitansına eşitlenerek, kompleks \bar{C} kapasitesinin C' ve C'' bileşenleri elde edilir. Böylece, McDonald-Friauf eşdeğer devresi için

$$C'(\text{MF}) = \frac{(C_{1s} + C_{1p}) + \omega^2 C_{1p} C_{1s}^2 R_1^2}{1 + \omega^2 C_{1s}^2 R_1^2} \quad (59a)$$

$$C''(\text{MF}) = \frac{\omega C_{1s}^2 R_1}{1 + \omega^2 C_{1s}^2 R_1^2} \quad (59b)$$

Maxwell-Garnet eşdeğer devresi için

$$C'(\text{MG}) = \frac{C_2 [1 + \omega^2 (C_1 + C_2) C_1 R_1^2]}{1 + \omega^2 (C_1 + C_2)^2 R_1^2} \quad (60a)$$

$$C''(\text{MG}) = \frac{\omega C_2^2 R_1}{1 + \omega^2 (C_1 + C_2)^2 R_1^2} \quad (60b)$$

McDonald Friauf - Maxwell Garnet eşdeğer devresi için

$$C'(\text{MFMG}) = \frac{C_2 ([C''(\text{MF})]^2 + C'(\text{MF}) [C'(\text{MF}) + C_2])}{[C''(\text{MF})]^2 + [C'(\text{MF}) + C_2]^2} \quad (61a)$$

$$C''(\text{MFMG}) = \frac{C_2^2 C''(\text{MF})}{[C''(\text{MF})]^2 + [C'(\text{MF}) + C_2]^2} \quad (61b)$$

bağıntıları bulunur.

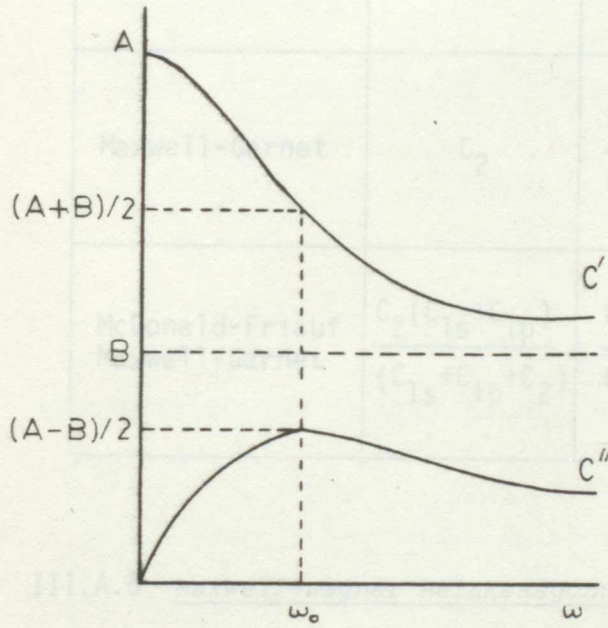
Ek-2 de gösterildiği üzere (59a), (60a), (61a) ile verilen $C = C'(\omega)$ spektrumları,

$$C' = \frac{A + B(\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} = B + \frac{A - B}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (62)$$

bağıntısına, (59b), (60b), (61b) ile verilen $C'' = C''(\omega)$ spektrumları da

$$C'' = \frac{A - B}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (\omega/\omega_0) \quad (63)$$

bağıntısına uyarlar. Şekil-9 da (62) ve (63) ile verilen spektrumlar görülmektedir. Bu spektrumlar Şekil-5 deki relaksasyonlar ile, bu



Şekil-9 Şekil-8 deki devrelerin frekans spektrumları

şekildeki yatay eksenin frekansın logaritmasına göre bölümlendiği gözönüne alınarak karşılaştırılırsa, söz konusu eşdeğer devrelerin relaksasyon spektrumlarına uygun spektrumlar gösterdiği anlaşılacaktır. (62) ve (63) bağıntılarında yer alan A, B ve ω_0 sabitlerinin eşdeğer devrelerdeki elemanlar cinsinden ifadeleri Ek-2 de gösterildiği üzere Tablo-1 deki gibi elde edilirler. $C' = C'(\omega)$ eğrisi maksimumdan $\omega = \omega_0$ da geçmektedir.

Rezonans spektrumları, permitivitenin sanal bileşenindeki keskin artışlar ve gerçel bileşenindeki hızlı değişme öz-

zellikleri ile relaksasyon spektrumlarından ayrılmaktadır. Bu özellikleri karşılayan eşdeğer devreler L indüktörü, C kondansatörü ve R direncinin uygun kombinezonları ile elde edilirler. Bu devrelerin en basiti R, L, C seri devresidir. ^(25, 26)

TABLO-1

Relaksasyon spektrumlarının eşdeğer devrelerine ait ortak bağıntılarda yer alan katsayıların eşdeğer devre elemanları cinsinden ifadeleri

Eşdeğer devre	A	B	ω_0
McDonald-Friauf	$C_{1s} + C_{1p}$	C_{1p}	$\frac{1}{R_1 C_{1s}}$
Maxwell-Garnet	C_2	$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$\frac{1}{R_1 (C_1 + C_2)}$
McDonald-Friauf Maxwell-Garnet	$\frac{C_2 (C_{1s} + C_{1p})}{(C_{1s} + C_{1p} + C_2)}$	$\frac{C_{1p} C_2}{C_{1p} + C_2}$	$\frac{C_{1s} + C_{1p} + C_2}{R_1 C_{1s} (C_{1p} + C_2)}$

III.A.5 Maxwell-Wagner Relaksasyonu ve Eşdeğer Devresi

Plaklarının arası boşken kapasitesi

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

olan kondansatörün, aralarındaki uzaklık d olan plaklarının arasına, polar olmayan ve permitivitesi ϵ_1 , iletkenliği σ_1 olan bir malzemedir d_1 kalınlığında bir tabaka, yine polar olmayan ve permitivitesi ϵ_2 , iletkenliği σ_2 olan malzemedir de, ilk tabakadan artan boşluğu tümüyle kapatacak d_2 kalınlığında bir tabaka yerleştirilmesiyle sağlanan \bar{C} kapasitesi, tabakaların (42a) bağıntısına göre

$$\bar{C}_1 = \bar{\epsilon}_1 \frac{A}{d_1} \quad (64a)$$

$$\bar{C}_2 = \bar{\epsilon}_2 \frac{A}{d_2} \quad (64b)$$

olan kapasitelerinden elde edilir:

$$\frac{1}{\bar{C}} = \frac{1}{\bar{C}_1} + \frac{1}{\bar{C}_2} \quad (65)$$

\bar{C} , \bar{C}_1 ve \bar{C}_2 nin (45) bağıntısına göre

$$Y = j\omega\bar{C} \quad (66a)$$

$$Y_1 = j\omega\bar{C}_1 \quad (66b)$$

$$Y_2 = j\omega\bar{C}_2 \quad (66c)$$

olan admitansları yardımıyla (65) bağıntısının

$$\frac{1}{Y} = \frac{1}{Y_1} + \frac{1}{Y_2}$$

olarak yazılabileceği; (64a), (64b), (66b), (66c), (36), (25c), (30) bağıntılarının birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen

$$\begin{aligned} Y_1 = j\omega\bar{C}_1 &= j\omega\bar{\epsilon}_1 \frac{A}{d_1} = j\omega\left(\epsilon_1 - \frac{\sigma_1}{\omega}\right) \frac{A}{d_1} = \sigma_1 \frac{A}{d_1} + j\omega\epsilon_1 \frac{A}{d_1} \\ &= \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \end{aligned} \quad (67a)$$

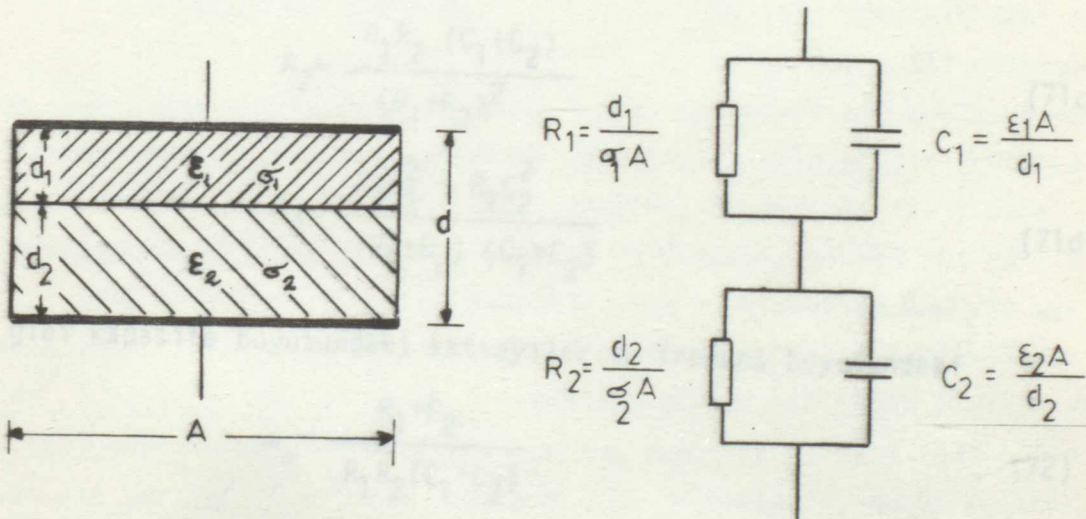
$$Y_2 = j\omega\bar{C}_2 = j\omega\epsilon_2 \frac{A}{d_2} = j\omega\left(\epsilon_2 - \frac{\sigma_2}{\omega}\right) \frac{A}{d_2} = \sigma_2 \frac{A}{d_2} + j\omega\epsilon_2 \frac{A}{d_2}$$

$$= \frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \quad (67b)$$

bağıntıları yardımıyla da

$$\frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} \quad (68)$$

biçimine dönüşeceği görülür. Buna göre iki tabakalı \bar{C} kondansatörünün admitansı, bir kolunda $R_1 = d_1/A\sigma_1$ direnci, diğer kolunda $C_1 = \epsilon_1 A/d_1$ kayıpsız kondansatörü bulunan paralel bir devre ile bir kolunda $R_2 = d_2/A\sigma_2$ direnci, diğerinde de $C_2 = \epsilon_2 A/d_2$ kondansatörü bulunan ikinci bir paralel devrenin seri olarak bağlanması ile elde edilen devrenin admitansına eşittir (Şekil-10).



Şekil-10 İki tabakalı kondansatör ve eşdeğer devresi

(68) bağıntısı, Y nin (45) bağıntısındaki ifadesi yardımıyla

$$\frac{1}{\omega C'' + j\omega C'} = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \quad (69)$$

biçimine dönüştürülür. Bağıntının gerçel ve sanal bileşenlere ayrılması ile, \bar{C} kompleks kapasitesinin gerçel ve sanal bileşenleri olarak

$$C' = \frac{(R_1^2 C_1 + R_2^2 C_2) + \omega^2 R_1^2 R_2^2 C_1 C_2 (C_1 + C_2)}{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 R_1^2 R_2^2 (C_1 + C_2)^2} \quad (70a)$$

$$C'' = \frac{(R_1 + R_2) + \omega^2 R_1 R_2 (R_1 C_1^2 + R_2 C_2^2)}{\omega [(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 R_1^2 R_2^2 (C_1 + C_2)^2]} \quad (70b)$$

elde edilir. Bu bağıntılar,

$$A_1 = \frac{R_1^2 C_1 + R_2^2 C_2}{(R_1 + R_2)^2} \quad (71a)$$

$$B_1 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (71b)$$

$$A_2 = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{(R_1 + R_2)^2} \quad (71c)$$

$$B_2 = \frac{R_1 C_1^2 + R_2 C_2^2}{(R_1 + R_2) (C_1 + C_2)} \quad (71d)$$

gibi kapasite boyutundaki katsayılar ve frekans boyutundaki

$$\omega_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \quad (72)$$

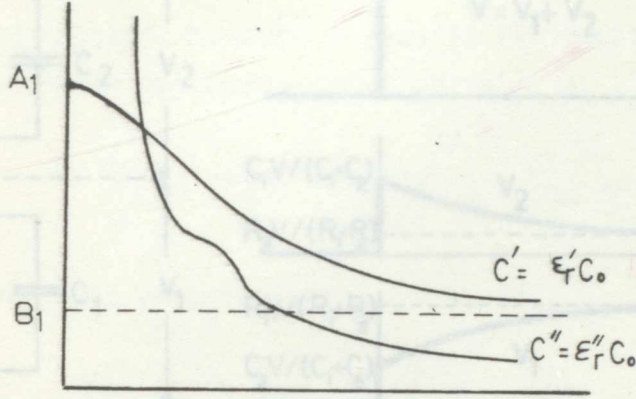
katsayısı yardımıyla

$$C' = \frac{A_1 + B_1 (\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} = B_1 + \frac{A_1 - B_1}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (73)$$

$$C'' = \frac{A_2 + B_2 (\omega/\omega_0)^2}{(\omega/\omega_0) [1 + (\omega/\omega_0)^2]} = \frac{A_2}{(\omega/\omega_0)} + \frac{B_2 - A_2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0) \quad (74a)$$

$$C'' = \frac{A_2}{(\omega/\omega_0)} + \frac{A_1 - B_1}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0) \quad (74b)$$

olarak yazılabilirler. C' ve C'' bileşenlerinin, dolayısıyla da $\epsilon_r' = C'/C_0$ ve $\epsilon_r'' = C''/C_0$ permitivite bileşenlerinin frekansa göre değişimleri Şekil-11 de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı



Şekil-11 İki tabaka kondansatörünün relaksasyon spektrumu

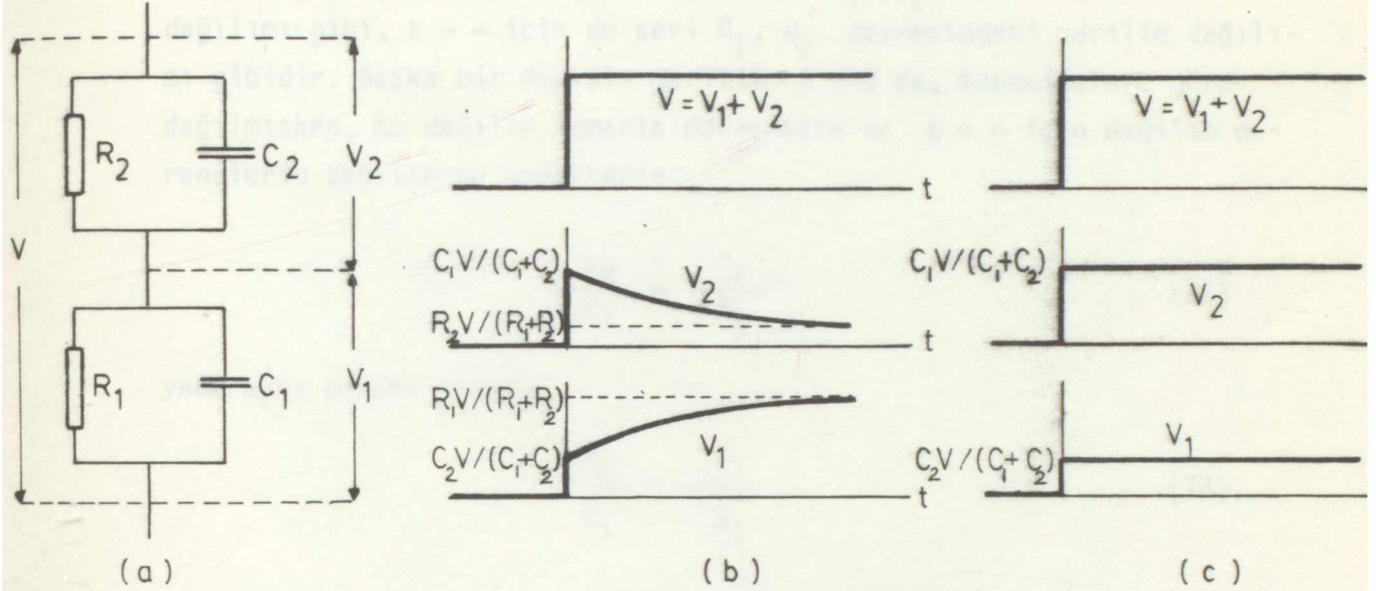
üzere, kondansatör plakları arasındaki iki tabakanın permitivite ve iletkenliklerinin frekansla değişmemelerine karşın, iki tabakanın toplam permitivite bileşenleri frekansa bağlı bir değişim göstermektedir. (73) bağıntısı (62) bağıntısıyla karşılaştırılırsa Şekil-10 daki eşdeğer devre ile relaksas-

yon spektrumlarını karşılayan Şekil-8 deki devrelere ait gerçeğin kapasite bileşeninin dolayısıyla gerçeğin permitivite bileşeninin frekansa bağlı değişimlerinin aynı oldukları görülür. Bu nedenle iki tabakalı kondansatörün frekans spektrumundan da relaksasyon olarak söz edilir.

(74) bağıntısı ile (63) bağıntısı ise birbirlerine tümüyle uymamaktadır. (74b) bağıntısında, (63) bağıntısından farklı olarak yer alan $A_2/(\omega/\omega_0)$ terimi küçük frekanslara gidildikçe etkin olmakta ve C'' bileşeninin sonsuza yaklaşmasına yol açmaktadır, oysa (63) bağıntısı ile verilen $C'' = C''(\omega)$ değişimi, C'' bileşeninin, küçük frekanslar yönünde sıfıra yönelmesini öngörmektedir.

Sanal kapasite bileşeninin frekansa bağlı değişiminin, dipol oryantasyon relaksasyonunu karşılayan eşdeğer devreye ait sanal kapasite bileşeninin değişiminden değişik olması nedeniyle, iki tabaka kondansatörünün relaksasyonu değişik bir relaksasyon türü oluşturmaktadır.⁽²⁶⁾ Bu relaksasyona Maxwell-Wagner relaksasyonu, Şekil-10 daki devreye de Maxwell-Wagner eşdeğer devresi denir. Önceki relaksasyon türü ise Debye relaksasyonu olarak bilinir.^(23, 26)

İki tabakalı kondansatör uçlarına V doğru gerilimi uygulanırsa, gerilimin tabakalara göre dağılımı zamana bağlı bir değişim gösterir. Şekil-12b de gösterildiği üzere birinci tabaka sınır yüzeyleri



Şekil-12 Maxwell-Wagner eşdeğer devresine uygulanan doğru gerilimin paralel devrelere dağılımının zamana bağlı değişimi
 a- Maxwell-Wagner eşdeğer devresi
 b- Uygulanan gerilim ve gerilim dağılımının zamana bağlı değişimleri ($C_2/C_1 \neq R_1/R_2$)
 c- Uygulanan gerilim ve gerilim dağılımının zamana bağlı değişimleri ($C_2/C_1 = R_1/R_2$)

arasındaki V_1 gerilimi, $C_2V/(C_1+C_2)$ den $R_1V/(R_1+R_2)$ ye eksponansiyel bir değişme gösterirken, ikinci tabaka sınır yüzeyleri arasındaki V_2 gerilimi de $C_1V/(C_1+C_2)$ den $R_2V/(R_1+R_2)$ ye eksponansiyel olarak değişmektedir.

Buna göre gerilimin uygulandığı andaki gerilimler arasındaki oran

$$\left[\frac{V_1}{V_2} \right]_{t=0} = \frac{\frac{C_2V}{C_1+C_2}}{\frac{C_1V}{C_1+C_2}} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (75)$$

olmakta ve bu oran zamanla

$$\left[\frac{V_1}{V_2} \right]_{t \rightarrow \infty} = \frac{\frac{R_1V}{R_1+R_2}}{\frac{R_2V}{R_1+R_2}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (76)$$

değerine yaklaşmaktadır.

$t = 0$ için gerilim dağılımı, seri C_1, C_2 devresindeki gerilim dağılımı gibi, $t \rightarrow \infty$ için de seri R_1, R_2 devresindeki gerilim dağılımı gibidir. Başka bir deyişle gerilim $t = 0$ da, kapasitelere göre dağılmışken, bu dağılım zamanla değişmekte ve $t \rightarrow \infty$ için dağılım dirençlerin dağılımına uymaktadır.

$$\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (77)$$

yada aynı anlama gelen,

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{R_1}{R_2} \quad (78)$$

koşulu V_1 ve V_2 geriliminin, buna bağlı olarak da V_1/V_2 gerilim dağılımının sabit kalmasına yol açacaktır (Şekil-12c).

(78) koşulu (71a-d) bağıntılarına ve (72) bağıntısına yerleştirildiğinde

$$A_1 = B_1 = A_2 = B_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{R_1 C_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_2 C_2}{R_1 + R_2} \quad (79)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{R_2 C_2} \quad (80)$$

bağıntıları ve bunlar yardımıyla da

$$C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = B_1 \quad (81)$$

$$C'' = \frac{1}{(R_1 + R_2) \omega} \quad (82)$$

elde edilir. C_1 ve C_2 kapasitelerinin seri eşdeğeri

$$C_e = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (83)$$

ile R_1 ve R_2 dirençlerinin seri eşdeğeri de

$$R_e = R_1 + R_2 \quad (84)$$

ile gösterilirse (81) ve (82) bağıntıları

$$C' = C_e \quad (85)$$

$$C'' = \frac{1}{R_e \omega} \quad (86)$$

olarak da yazılabilir. Bunlara göre (77) koşuluna uyan iki tabakalı kondansatörün eşdeğeri, bir kolunda C_e kapasiteli kondansatörün, diğer kolunda da R_e direncinin bulunduğu bir paralel devredir ve Şekil-7a daki frekans spektrumunu gösterir.

Öte yandan, iki tabakalı kondansatör için çıkartılan tüm bağıntılar

ϵ_1, σ_1 ve ϵ_2, σ_2 ile belirtilen iki değişik ortamın, Şekil-13

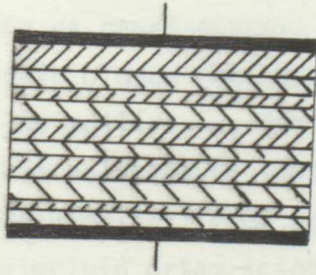
de gösterildiği üzere çok katlılık göstermesi durumunda da tümüyle ge-

çerlidir: ϵ_1 ve σ_1 li tabakaların direnc, kapasite ve kalınlıkları

R_{1i}, C_{1i}, d_{1i} tabakaların toplam kalınlığı da d_1 ile; ϵ_2 ve σ_2 li

tabakalarınkiler de R_{2i}, C_{2i}, d_{2i} ve d_2 ile gösterilmek üzere Y toplam

admitansı



Şekil-13 İki değişik ortamın oluşturduğu çok tabakalı kondansatör

$$\frac{1}{Y} = \Sigma \left[\frac{1}{\frac{1}{R_{1i}} + j\omega C_{1i}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{2i}} + j\omega C_{2i}} \right]$$

$$\frac{1}{Y} = \Sigma \left[\frac{1}{\frac{\sigma_1 A}{d_{1i}} + j\omega \frac{\epsilon_1 A}{d_{1i}}} + \frac{1}{\frac{\sigma_2 A}{d_{2i}} + j\omega \frac{\epsilon_2 A}{d_{2i}}} \right]$$

(87)

$$\frac{1}{Y} = \Sigma \left[\frac{d_{1i}}{\sigma_1 A + j\omega \epsilon_1 A} + \frac{d_{2i}}{\sigma_2 A + j\omega \epsilon_2 A} \right]$$

$$\frac{1}{Y} = \frac{d_1}{\sigma_1 A + j\omega \epsilon_1 A} + \frac{d_2}{\sigma_2 A + j\omega \epsilon_2 A} = \frac{1}{\frac{\sigma_1 A}{d_1} + j\omega \frac{\epsilon_1 A}{d_1}} + \frac{1}{\frac{\sigma_2 A}{d_2} + j\omega \frac{\epsilon_2 A}{d_2}}$$

$$\frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}$$

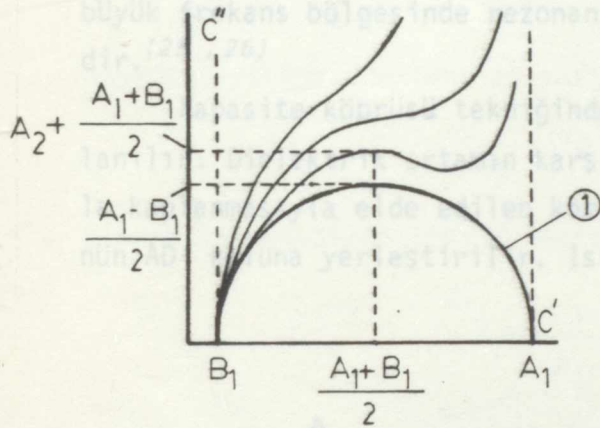
olarak elde edilir. Sonuncu bağıntı iki tabaka için yazılan (68) bağıntısının aynıdır.

Daha da genel olarak, her tabakanın ϵ_i , σ_i gibi değişik katsayılarına sahip olduğu çok tabakalı bir örnek alındığında da benzer özellikler elde edilir. ϵ_i nin dağılımı ile σ_i nin dağılımı farklı olduğu oranda relaksasyon spektrumları elde edilecektir.

Arayüz polarizlenme mekanizması, yüklerin biriktiği süreksizlik bölgelerinin ortam içindeki dağılımı ile ilgili olması nedeniyle Maxwell-Wagner relaksasyonuna uyan bir relaksasyona neden olmaktadır. Ancak bu relaksasyonun ortaya çıkması permitivitenin uzaysal dağılımının, iletkenliğin uzaysal dağılımından değişik olmasını gerektirdiğinden, homojen yapılarda Maxwell-Wagner relaksasyonu gözlenemez. Bu bakımdan Maxwell-Wagner relaksasyonu yapının heterojenliğinin göstergesi, bunun da ötesinde bir ölçüsüdür.

III.A.6. Argand Diyagramları (Schering Köprüsü)

Dielektrik ortamın kompleks permitivitesinin sanal bileşeninin, gerçel bileşene göre değişimini, ya da plakların arasında söz konusu dielektriğin bulunduğu kondansatörün kompleks kapasitesinin C'' sanal bileşeninin, C' gerçel bileşenine göre değişimi Argand diyagramı olarak bilinir. Debye relaksasyonunun Argand diyagramı, bu relaksasyona ait (62) ve (63) bağıntılarından (ω/ω_0) ın yok edilmesiyle elde edilen



Şekil-14 Relaksasyon spektrumlarının Argand diyagramları

denkleminin öngördüğü üzere, C' eksenini B ve A da kesen bir yarım dairedir (Şekil-14, 1 sayılı eğri).

$$\left[C' - \frac{A+B}{2} \right]^2 + C''^2 = \left[\frac{A-B}{2} \right]^2 \quad (88)$$

Maxwell-Wagner relaksasyonunun Argand diyagramı ise (73) ve (74b) bağıntılarından elde edilebilen

$$\left[C' - B_1 \right] \left[A_1 + A_2 - C' \right]^2 = \left[A_1 - C' \right] C''^2 \quad (89)$$

bağıntısının öngördüğü üzere, C' eksenini B_1 de kesen ve $C' = A_1$ düşey doğrusuna asimtotik olarak yaklaşan bir eğridir (Şekil-14, 2, 3 ve 4 sayılı eğriler).

C_2/C_1 oranı R_1/R_2 oranına yaklaştıkça, başka deyişle de ϵ_2/ϵ_1 oranı σ_2/σ_1 oranına yaklaştıkça, Şekil-14 deki küçük sayılı eğrilerden, büyük sayılı eğrilere geçilir. Bu iki oranın eşit olması durumunda da, (81) bağıntısının da öngördüğü üzere (Şekil-14, 5 sayılı eğri), $C' = B_1$ düşey doğrusu elde edilir.

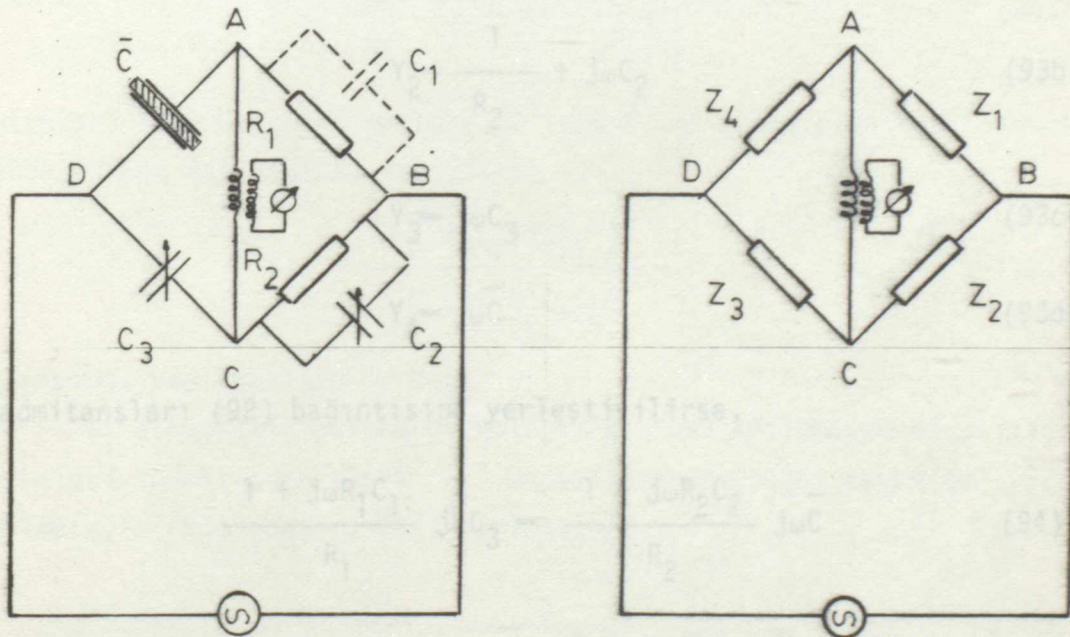
Buna göre Maxwell-Wagner relaksasyonuna ait Argand eğrileri küçük sayılı eğrilere benzediği ölçüde ortamın heterojen, büyük sayılı eğrilere benzeyen eğriler elde edildiği ölçüde de ortamın homojen olduğu kanısına varılabilir.

III.B Kompleks Kapasitenin Ölçülmesi (Schering Köprüsü)

Bu koşul Şekil-15 deki büyüklüklere göre:

Dielektrik örneklerin kompleks permitivitelere ölçülmesi için seçilecek teknikler, ölçünün yapılacağı frekans aralığına göre değişiklik gösterirler. Düşük frekanslardaki permitivite ölçmelerinde, kapasite köprüsünden yararlanılır. Bu teknik 10^7 sn^{-1} lik frekanslara kadar etkili olabilmektedir. Bu frekans aralığının 10^4 sn^{-1} den büyük büyük frekans bölgesinde rezonans devresi tekniği de kullanılabilir. (25, 26)

Kapasite köprüsü tekniğinde, Şekil-15 deki Schering Köprüsü kullanılır. Dielektrik ortamın karşılıklı iki paralel yüzünün elektrodlarla kaplanmasıyla elde edilen kompleks kapasiteli \bar{C} kondansatörü, köprü-nün AD koluna yerleştirilir. İstenilen frekans için köprü, değişken



Şekil-15. Schering köprüsü

a- Schering köprüsü

b- Schering köprüsü (şematik)

devre elemanlarının ayarlanması ile, dengeye getirilir. (25)

Köprü orta kolun bir yanında kalan kollardaki empedansların oranını, diğer yandaki kollardan empedanslarının oranına eşit olması koşu-

luyula dengeye gelir.

Bu koşul Şekil-15 deki büyüklüklere göre;

$$\frac{Z_4}{Z_3} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (90)$$

ya da

$$Z_2 Z_4 = Z_1 Z_3 \quad (91)$$

empedans yerine admitanslar yazılırsa da,

$$Y_1 Y_3 = Y_2 Y_4 \quad (92)$$

olarak ifade edilebilir. Kolların

$$Y_1 = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \quad (93a)$$

$$Y_2 = \frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \quad (93b)$$

$$Y_3 = j\omega C_3 \quad (93c)$$

$$Y_4 = j\omega \bar{C} \quad (93d)$$

admitansları (92) bağıntısına yerleştirilirse,

$$\frac{1 + j\omega R_1 C_1}{R_1} j\omega C_3 = \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{R_2} j\omega \bar{C} \quad (94)$$

bağıntısı ve bu bağıntıdan da \bar{C} kompleks kapasitesi için

$$\bar{C} = \frac{R_2}{R_1} C_3 \frac{1 + j\omega R_1 C_1}{1 + j\omega R_2 C_2} \quad (95)$$

ya da

$$\bar{C} = \frac{R_2}{R_1} C_3 \frac{[1 + \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2] + j\omega [R_1 C_1 - R_2 C_2]}{1 + \omega^2 R_2^2 C_2^2} \quad (96)$$

elde edilir. \bar{C} kompleks kapasitesi, C' gerçel ve C'' sanal bileşenleri cinsinden yazılabilir.

$$\bar{C} = C' - jC'' \quad (97)$$

Köprüden geçen akımın, köprüden oluşan R_2 direnci ve C_2 kapasitesinin etkisiyle, söz konusu bileşenlerin, köprü elemanlarının dengede alacakları değerlere bağlı ifadeleri, (96) bağıntısı uyarınca,

$$C' = \frac{R_2}{R_1} C_3 \frac{1 + \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{1 + \omega^2 R_2^2 C_2^2} \quad (97)$$

$$C'' = \frac{R_2}{R_1} C_3 \frac{\omega [R_2 C_2 - R_1 C_1]}{1 + \omega^2 R_2^2 C_2^2} \quad (98)$$

olurlar. (48) bağıntısına göre, C'' 'nin C' ne oranı olan $\text{tg} \delta$ kayın faktörü de son iki bağıntı yardımıyla

$$\text{tg} \delta = \frac{\omega [R_2 C_2 - R_1 C_1]}{1 + \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (99)$$

biçiminde yazılabilir.

R_1 direncinin bulunduğu koldaki kontrol edilemeyen kapasitif etkileri temsil eden küçük C_1 kapasitesinin (stray kapasite) yok sayılmasıyla (97) (98) ve (99) bağıntıları

$$C' = \frac{R_2}{R_1} \frac{C_3}{1 + \omega^2 R_2^2 C_2^2} \quad (100)$$

$$C'' = \frac{R_2}{R_1} \frac{C_3}{1 + \omega^2 R_2^2 C_2^2} \omega R_2 C_2 \quad (101)$$

$$\text{tg} \delta = \omega R_2 C_2 \quad (102)$$

bağıntılarına indirgenir. (100) bağıntısı, (102) yardımıyla

$$C' = \frac{R_2}{R_1} \frac{C_3}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (103)$$

olarak da yazılabilir.

Köprünün R_1 ve R_2 dirençleri kademeli olarak, C_2 ve C_3 kapasiteleri ise sürekli olarak değiştirilebilir. Denge sağlandığında, önce uygulanan frekans, köprüden okunan R_2 direnci ve C_2 kapasitesinden (102) bağıntısı yardımıyla $\operatorname{tg} \delta$, sonra R_2/R_1 oranı ve C_3 kapasitesinden ve $\operatorname{tg} \delta$ dan (103) yardımıyla C' bileşeni bulunur. C'' bileşeni de (48) bağıntısı uyarınca C' ile $\operatorname{tg} \delta$ nın çarpımıdır:

$$C'' = C' \operatorname{tg} \delta \quad (104)$$

Dielektrik ortamın bağıl kompleks permitivitesinin gerçel ve sanal bileşenleri ise, elektrodların A yüzeyi ve elektrodlar arası d uzaklığından,

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (24)$$

olarak hesaplanan C_0 yardımıyla, (43a) ve (43b) bağıntıları uyarınca yazılan

$$\epsilon_r' = \frac{C'}{C_0} \quad (105)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{C''}{C_0} \quad (106)$$

bağıntılarından hesaplanır.

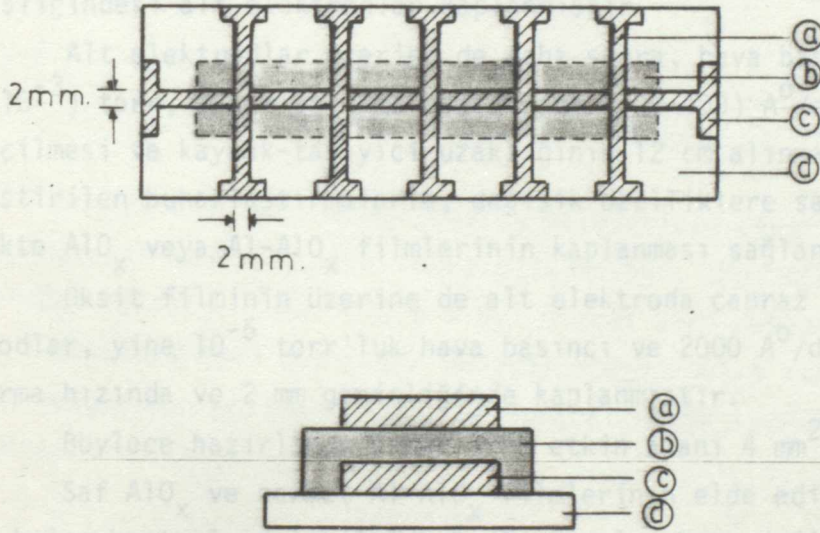
Dielektrik ölçmelerin yapıldığı örnekler, düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek termik iletkenliğe sahip Corning 7058 mikroskop camları üzerine hazırlanmıştır. Camlar, önce deterjan ile mekanik olarak temizlenmiş ve saf sudan geçirildikten sonra, sıcak kromik asit çözeltisinde bir süre bekletilmişlerdir. Daha sonra saf su ile yıkanan camlar 200°C derecede üç saat kurutulmuş ve vakumdaki yerine yerleştirilmişlerdir.

IV. BÖLÜM

AlO_x ve $Al-AlO_x$ FILMLERİNDE KOMPLEKS KAPASİTE ÖLÇMELERİ VE ELDE EDİLEN DENEL SONUÇLAR

IV.A AlO_x ve $Al-AlO_x$ FİLM ÖRNEKLERİNİN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada saf AlO_x filmleri ile düşük konsantrasyonlu sermet $Al-AlO_x$ filmlerinin dielektrik özellikleri incelenmek istendiğinden, örneklerin karşılıklı iki yüzü alüminyum elektrodlarla kaplanarak, kompleks kapasiteli kondansatörler oluşturulmuştur.⁽²⁷⁾



Şekil-16 Hazırlanan örneklerin geometrisi (plan ve kesit)
 a- Üst elektrodlar, b- AlO_x veya $Al-AlO_x$ filmleri,
 c- Alt elektrodlar, d- Taşıyıcı cam tabaka

Dielektrik ölçmelerin yapıldığı örnekler, düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek termik iletkenliğe sahip Corning 7058 mikroskop camları üzerine hazırlanmıştır. Camlar, önce deterjan ile mekanik olarak temizlenmiş ve saf sudan geçirildikten sonra, sıcak kromik asit çözeltisinde bir süre bekletilmişlerdir. Daha sonra saf su ile yıkanan camlar $200^{\circ}C$ deki etüvde iki saat kurutulmuş ve vakumdaki yerine yerleştirilmişlerdir.

Vakumdaki buharlaştırılma işlemleri sırasında flaman olarak 0,5 mm çapında ve 14 cm uzunluğunda spiral şeklinde hazırlanan tungsten teller kullanılmıştır.

Elektrod tutucu, alt ve üst elektrod malzemesi olarak alüminyum seçilmiştir. Elektrodlar ve AlO_x filmler, Johnson Matthey L.T. firmasından sağlanan % 99,999 saflıkta, 0,5 mm çapındaki alüminyum tellerinin vakumda buharlaştırılmasıyla elde edilmiştir. Şekil-16 da geometrisi verilen örneklerin hazırlanışı şu sıra ile gerçekleştirilmiştir.

Uygun maskeler kullanılarak, 10^{-5} torr'luk hava basıncı, 2000 A^0 /dak lık buharlaştırma hızı ve 7 cm lik kaynak-taşıyıcı uzaklığı koşullarında yapılan buharlaştırmalarla cam taşıyıcı üzerine önce elektrod tutucuları, sonra da 500-1000 A^0 kalınlığında, 2 mm genişliğindeki alt elektrodlar kaplanmıştır.

Alt elektrodlar üzerine de daha sonra, hava basıncının (10^{-3} - $3 \cdot 10^{-3}$) torr, buharlaştırma hızının da (100-400) A^0 /dak aralıklarında seçilmesi ve kaynak-taşıyıcı uzaklığının 12 cm alınması ile gerçekleştirilen buharlaştırmalarla, değişik özelliklere sahip 4 mm genişlikte AlO_x veya Al- AlO_x filmlerinin kaplanması sağlanmıştır.

Oksit filminin üzerine de alt elektroda çapraz olarak üst elektrodlar, yine 10^{-5} torr'luk hava basıncı ve 2000 A^0 /dak lık buharlaştırma hızında ve 2 mm genişliğinde kaplanmıştır.

Böylece hazırlanan örneklerin etkin alanı 4 mm^2 olmaktadır.

Saf AlO_x ve sermet Al- AlO_x filmlerinin elde edilmesi sırasında, en kolay kontrol edilebilen buharlaştırılma hızı değişken vakum parametresi olarak seçilmiştir. Saf AlO_x filmlerin hazırlanması için bu hız $\sim 100 \text{ A}^0$ /dak ya kadar düşürülmüştür.

Şekil-16 da görüldüğü gibi, aynı taşıyıcı üzerinde benzer özellikte beş kapasitif bölgenin oluşumuna izin veren bir maske seçilmiş, böylece bu bölgelerden birinin dielektrik özelliklerinin doğru alan altındaki değişimleri izlenirken, benzer özelliğe sahip diğer bir kapasitif bölgenin dielektrik özelliklerinin zamana bağlı değişiminin gözlenmesi ve böylece bu iki değişimin karşılaştırılması sağlanmıştır.

Elektrod tutucuları ve alt elektrodu kaplanmış olan cam taşıyıcı, AlO_x filmi kaplanmak için vakuma yerleştirilirken, örneğin yanına, daha sonra bu filmin kalınlığının ölçülmesinde kullanılacak bir cam

taşıyıcı ile geçirgenliğinin ölçülmesinde kullanılacak ikinci bir cam taşıyıcı daha konulmuştur.

Filmlerin kalınlığı, Hilger and Watts L.T. yapımı N-130 tipindeki interferometre ile $(100 \pm 10) \text{ \AA}$ hata ile ölçülmüştür.

Filmlerin geçirgenlikleri, dalga boyunun fonksiyonu olarak 4000-8000 \AA arasındaki spektral bölgede çalışan Carl Zeis Jena'nın spektrofotometresi ile ölçülmüş ve konsantrasyonları, Bölüm II.B de verilen optik absorpsiyon yöntemi ile ve alüminyum metal filmlerinin geçirgenliklerinin kalınlığa bağlı değişim eğrileri yardımıyla (5) bağıntısından hesaplanmıştır.

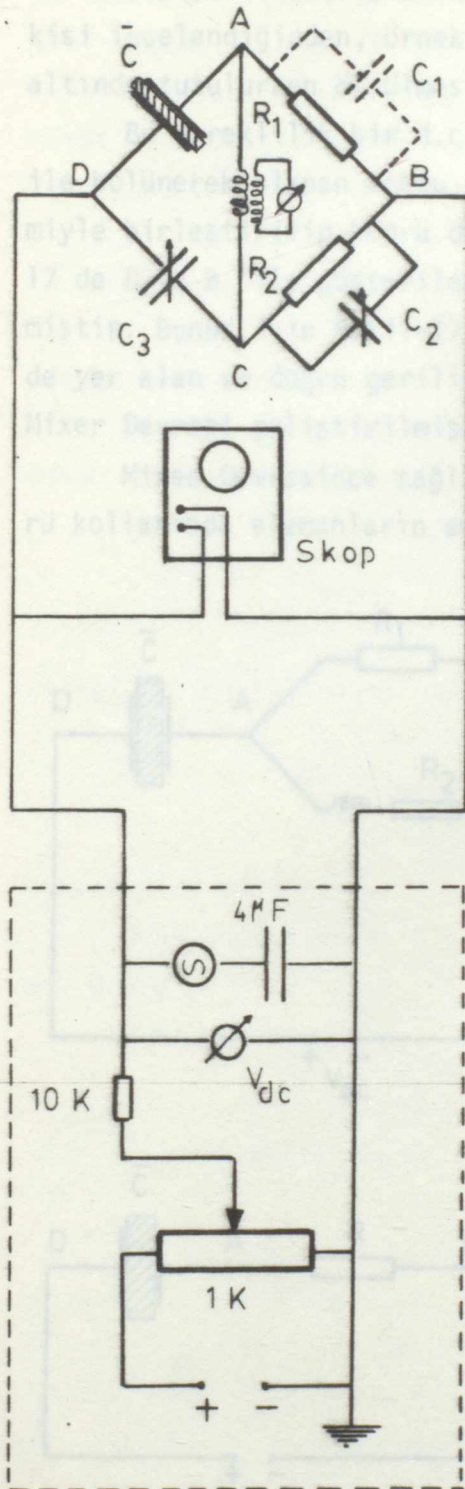
IV.B ÖRNEKLERİN KOMPLEKS KAPASİTELERİNİN d.c. ALANA BAĞLI FREKANS SPEKTRUMLARI

IV.B.1 Örneklerin Kompleks Kapasitelerinin d.c. Alan Altında Kapasite Köprüsüyle Ölçülmesi Tekniği (Mixer Devresi)

Örneklerin kompleks kapasite bileşenleri General Radio 716-C tipinde bir Schering köprüsünde ölçülmüştür. Köprünün normal koşullardaki hatası 10^3 Hz için $\pm \% 0,1$ olarak verilmektedir. Kapasite köprüsünü besleyen osilatör General Radio 1301-A tipindedir. Köprünün dengesinin gözlenmesinde ise General Radio 1232-A tipindeki detektör kullanılmıştır.

TABLO-2
Schering Köprüsünün direnç kademeleri

Kademe Sıra Sayısı	R_2 (Ω)	R_1 (Ω)	R_2/R_1
1	200 K	200 K	1
2	20 K	20 K	1
3	20 K	2 K	10
4	20 K	200	100
5	20 K	20	1000
6	2 K	2 K	1
7	200	200	1



Şekil-17 Mixer Devresi (kesik çizgili çerçeve içinde) ve Schering Köprüsüne bağlanması

Şekil-15 ve Şekil-17 de görülen R_1 ve R_2 dirençleri kademeli olarak, C_2 ve C_3 kapasiteleri de sürekli olarak değişmektedir. Tablo-2 köprünün direnç kademelerindeki dirençleri ve oranlarını göstermektedir.

Kompleks kapasite bileşenlerinin, köprü elemanlarının denge durumundaki değerleri cinsinden ifadeleri Bölüm III.B de çıkarılmıştır. Bunlara göre ilk olarak osilatörden okunan f frekansına ait $\omega = 2\pi f$ açısal frekansından, bulunan direnç kademesine ait R_2 direncinden ve değişken C_2 kondansatörüne ait skaladan okunan C_2 kapasitesinden

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_2 C_2 \quad (102)$$

bağıntısı yardımıyla, $\operatorname{tg} \delta$ kayıp faktörü elde edilir. İkinci olarak kademenin R_2/R_1 oranı ve değişken C_3 kondansatörünün skalasından okunan C_3 kapasitesi ve (102) den hesaplanan $\operatorname{tg} \delta$ kayıp faktöründen

$$C' = \frac{R_2}{R_1} \frac{C_3}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (103)$$

bağıntısı yardımıyla kompleks kapasitenin C' gerçel bileşeni ve son olarak da $\operatorname{tg} \delta$ ve C' den

$$C'' = C' \operatorname{tg} \delta \quad (104)$$

bağıntısı yardımıyla kompleks kapasitenin C'' sanal bileşeni elde edilmektedir.

bu kademedeki değerlerinden, 3 sayılı kademe için $R = 1,818 K\Omega$, 4 sayılı kademe için de $R = 198 \Omega$ hesaplanır. D ve A noktaları arasındaki direnç değeri ise, \bar{C} kompleks kapasitesinin, söz konusu frekansa ait eşdeğer paralel devresindeki R_p direncidir. (51b) bağıntısına göre bu değer, C'' sanal bileşeninden

$$R_p = \frac{1}{\omega C''} \quad (108)$$

olarak hesaplanır.

Bunlara göre, örnek elektrodları arasındaki $V_{\text{örnek}}$ gerilimin, Mixer Devresinin sağladığı d.c. gerilim bileşeni V ye bağımlılığı

$$V_{\text{örnek}} = \frac{R_p}{R_p + R} V \quad (109)$$

olarak, (108) bağıntısı yardımıyla da

$$V_{\text{örnek}} = \frac{1}{1 + \omega C'' R} V \quad (110)$$

olarak elde edilir.

Örneği etkileyen E d.c. alanı, d örneğin kalınlığını göstermek üzere

$$E = \frac{V_{\text{örnek}}}{d} = \frac{1}{d} \frac{V}{1 + \omega C'' R} \quad (111)$$

IV.B.2 Ölçü Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Örneklerin Başlangıç Kapasiteleri ve Dirençleri

Değişik vakum koşullarında Bölüm IV.A da anlatıldığı biçimde hazırlanan örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin, önce uygulanan a.c. alanın frekansına bağlılığı incelenmiştir. Daha sonra da örneklere Bölüm IV.B.1 de anlatılan ve Şekil 17 de devre şeması gösterilen Schering köprüsü bağlantılı bir Mixer devresi aracılığı ile hem a.c. hem de a.c.+d.c. alan uygulanmış ve örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin, sabit d.c. alan altında a.c. alanın frekansına göre değişimleri ve sabit a.c. alan frekanslarında d.c. alanın şiddetine göre değişimleri gözlenmiştir.

Ancak, örneklerde alınan ölçüler ve sonuçlarına geçmeden önce hazırlanan örneklerin özellikleri ve başlangıç kapasitif değerleri Tablo-3 aracılığı ile gösterilmiştir. Tablo-3 de yer alan kapasitif değerler, örneklerin vakumdan çıkışlarını izleyen ilk dört saat içinde alınmış değerlerdir. Bu tablonun ilk sütununda örnek numaraları yer almıştır. İkinci ve üçüncü sütunda, Schering köprüsünden okunan C_3 ve $tg\delta = \omega R_2 C_2$ değerleri gösterilmiştir. Daha sonraki üç sütunda ise örneklerin (103), (104) ve (108) bağıntılarından hesaplanan C' , C'' ve R_p değerlerine yer verilmiştir.

Tablo-4 de ise örneklerin interferometre ile ölçülen kalınlıkları d_{in} , optik geçirgenlikleri $T(\%)$, optik absorpsiyon yöntemi ile bulunan örneklerdeki metal konsantrasyonları $C_{op}(\%)$ ve örneklerin bağıl permitivite bileşenlerinin hesabında kullanılan A/d oranları ve (24) bağıntısından hesaplanan C_0 kapasiteleri gösterilmiştir.

Tablo-4 de verilen (d_{in}) film kalınlıkları, buharlaştırma işlemi sırasında örneğin yanına yerleştirilen ayrı bir cam taşıyıcı üzerine kaplanan filme ait interferometrede $(100 \pm 10) A^0$ hata ile ölçülmüş kalınlık değerleridir, dolayısıyla söz konusu örneğe ait ortalama bir kalınlıktır.

Kalınlık ölçmekte kullanılan bu cam taşıyıcının, örneklerdeki beş ayrı kapasitif bölgenin herbirine olan değişik uzaklıkları da değerlendirilecek olursa, bu ortalama kalınlığın, her bir kapasitif bölgenin kalınlığını tam olarak temsil edemeyeceği açıktır.

Uygulanan tekniğin, kalınlıkların kesin olarak belirlenmesine

TABLO-3

Örneklerin Başlangıç Kapasiteleri ve Dirençleri
($f = 1$ KHz sabit)

Örnek No.	C_3 (nF)	$\text{tg} \delta$	$C' = C_p$ (nF)	C'' (nF)	R_p (K Ω)
N12-B1	51,58	0,51	40,93	20,88	7,6
N12-B2	10,37	0,173	10,07	1,74	365,5
N12-B3	91,64	>0,56	-	-	<4,1
N12-B4	94,34	>0,56	-	-	<3,9
N12-B5	95,10	>0,56	-	-	<3,9
N13-B1	22,90	0,203	21,99	4,46	356,5
N13-B2	19,84	0,208	19,02	3,96	402,4
N13-B3	22,10	0,222	21,06	4,68	340,4
N13-B4	21,26	0,256	19,95	5,11	311,6
N13-B5	26,75	0,223	25,48	5,68	280,1
N14-B1	51,3	0,25	48,3	12,07	13,2
N14-B2	76,5	0,533	59,58	31,75	5,0
N14-B3	174,0	0,523	136,63	71,46	2,2
N14-B4	132,0	0,472	107,95	50,95	3,1
N14-B5	140,0	>0,56	-	-	<2,7
N15-B1	15,52	0,241	14,67	3,54	45,0
N15-B2	17,93	0,239	16,96	4,05	39,3
N15-B3	19,28	0,244	18,20	4,44	35,8
N15-B4	16,9	0,24	15,98	3,83	41,5
N15-B5	15,77	0,303	14,44	4,38	27,5
N17-B1	45,52	0,25	42,84	10,71	14,9
N17-B2	46,24	0,261	43,29	11,30	14,1
N17-B3	-	-	-	-	-
N17-B4	-	-	-	-	-
N17-B5	46,72	0,222	44,52	9,88	16,1
N18-B1	58,68	0,103	58,06	5,98	26,6
N18-B2	59,48	0,115	58,70	6,75	23,6
N18-B3	60,58	0,122	59,69	7,28	21,9
N18-B4	61,70	0,127	60,72	7,71	20,6
N18-B5	52,48	0,115	51,79	5,96	26,7

TABLO-4

Örnek No.	$d_{in}(A^0)$	T(%)	$C_{op}(\%)$	A/d(m)	$C_0(nF)$
N12	720	77	8,8	55,55	0,491
N13	400	100	0	100,0	0,885
N14	390	95	7,4	102,56	0,907
N15	420	97	5	95,24	0,843
N17	350	100	0	114,3	1,011
N18	200	100	0	200	1,770

elvermemesi ve kalınlığın zamana ve uygulanan alana bağlı olarak değişmediği varsayımının kesin olmaması nedenleriyle, doğru alanın elektrik özelliklere etkisi ile ilgili analizlerde, kalınlığa bağlı permitivite bileşenleri yerine, doğrudan ve $\pm 0,1$ hata ile ölçülebilen kapasite bileşenleri esas alınmıştır.

Şekil-17 de şematik olarak gösterilen mixer devresinin Schering köprüsüne uygulanmasıyla sağlanan a.c.+d.c. alanının etkisiyle örneklerde gözlenen, kompleks kapasite bileşenlerinin, farklı ve sabit d.c. alan şiddeti değerlerinde a.c. alanın frekansına bağlı değişimleri ile, a.c. alanın farklı ve sabit frekanslarında d.c. alanın şiddetine bağlı değişimleri aşağıda verilmektedir.

Şekil-19 ve Şekil-20 de N12-B1 numaralı örneğe ait kompleks kapasitenin $C' = C_p$ gerçel ve C'' sanal kapasite bileşenlerinin, sabit d.c. alan değerlerinde, a.c. alanın frekansına bağlı değişimleri gösterilmiştir.

Şekil-21 de ise aynı örneğin (108) bağıntısından hesaplanan R_p direncinin, a.c. alanın frekansına bağlı değişimleri verilmiştir.

Şekil-22, Şekil-23 ve Şekil-24 de ise yine N12-B1 numaralı örneğin C' ve C'' kapasite bileşenlerinin ve R_p direncinin sabit frekanslardaki d.c. alan şiddetine bağlı değişimleri çizilmiştir. Bu grafiklerin çizilmesine olanak sağlayan N12-B1 numaralı örneğin ölçü sonuçları Tablo-5 de gösterilmektedir.

Bu tablo ve arkasından gelen 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı tablolarda, ilk sütunda örneklere uygulanan d.c. alan şiddetinin değerleri, ikinci ve üçüncü sütunda kapasite köprüsü yardımıyla her (f) frekansında ölçülen C_3 ve $tg\delta$ değerleri gösterilmiştir. Daha sonraki üç sütunda, bu bölümün başında verildiği biçimde hesaplanan, örneklerin kompleks kapasitelerinin C' , C'' bileşenleri ve R_p dirençleri gösterilmiştir. Son iki sütunda ise köprüye uygulanan V gerilimine karşılık örneklerin her frekansta aldığı R_p direnç değerlerinden, (109) bağıntısı yardımıyla hesaplanan ($V_{\text{örnek}}$) gerilimleri ve bu gerilimlerin kalınlığa bölünmesiyle bulunan ($E_{\text{örnek}}$) alan değerleri sıralanmıştır.

Örnek numaralarındaki son sayı, aynı örnekte yer alan beş kapasitif bölgeden hangisinde ölçmenin yapıldığını göstermektedir. Bu durumda N12-B1, 12 numaralı örneğin, 1 inci kapasitif bölgesinde ölçü yapıldığını anlatmaktadır.

Şekil-19 ve Şekil-20 den de görüldüğü gibi örneğe, d.c. alan uygulandığında kompleks kapasitelerinin hem gerçel hem de sanal bileşenlerinde bir azalma gözlenmektedir. Bu azalma uygulanan alan şiddetine bağlıdır.

Şekil-21 de ise örneğin R_p direncinin alan altındaki değişimi incelenmiştir. Burada da örneğin direncinde d.c. alanın şiddetine bağlı olarak bir artma göze çarpmaktadır. Örneğin N12-B1 no.lu örneğin $f = 1$ KHz deki R_p direnci $E_{d.c.} = 0$ alan değerinde $25 \text{ K}\Omega$ iken $E_{d.c.} = 6,9 \times 10^5 \text{ V/cm}$ alan değerinde $142 \text{ K}\Omega$ a yükselmiştir. Bu durumda örneğin R_p direnci $\sim 5,5$ katı kadar artma göstermiştir.

Şekil-22, Şekil-23 ve Şekil-24 de C' , C'' ve R_p değerlerindeki, d.c. alan şiddetine bağlı bu değişimler daha açık bir biçimde görülmektedir. Ve N12-B1 no.lu örnekte C' ve C'' nün d.c. alan şiddeti ile azalması, küçük alan değerlerinden başlayarak oluşmuştur. C' ve C'' nün alan şiddetiyle azalması, küçük alan değerlerinde daha hızlı olmuş ve alan şiddetinin artması ile bu azalmada yavaşlamıştır. Ve dolayısıyla Şekil-24 deki R_p nin de alan şiddetiyle değişimi küçük alan şiddetlerinde daha büyük artışlar göstermiş ve $4 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ den sonra R_p direncinin artışında da yavaşlama gözlenmiştir.

TABLO-5

N12-B1 Numaralı Örnekte, d.c. Alanı Altında
Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)	
V = 0 E = 0	600								
	750	21,8	0,38	19,042	7,246	29,29	-	-	
	1000	20,22	0,353	17,979	6,347	25,07	-	-	
	1500	18,56	0,33	16,734	5,526	19,20	-	-	
	2000	17,51	0,316	15,918	5,033	15,81	-	-	
	3000	16,18	0,301	14,832	4,471	11,86	-	-	
	4000	15,38	0,282	14,24	4,028	9,83	-	-	
	5000	14,80	0,277	13,742	3,812	8,35	-	-	
	6000	14,40	0,26	13,482	3,517	7,54	-	-	
	7500	13,91	0,249	13,095	3,265	6,50	-	-	
	10000	13,51	0,245	12,743	3,126	5,09	-	-	
	15000	13,21	0,252	12,416	3,138	3,38	-	-	
	V = 1V E = 1,33x10 ⁵ V/cm	600							
		750	20,44	0,357	18,118	6,485	32,72	0,99	1,38
		1000	19,22	0,342	17,206	5,885	27,04	0,99	1,38
1500		17,61	0,317	16,0	5,074	20,91	0,99	1,37	
2000		16,66	0,306	15,232	4,662	17,07	0,99	1,37	
3000		15,50	0,293	14,227	4,254	12,47	0,98	1,37	
4000		14,75	0,269	13,749	3,709	10,73	0,98	1,36	
5000		14,24	0,265	13,301	3,532	9,01	0,98	1,36	
6000		13,70	0,241	12,946	3,124	8,49	0,98	1,36	
7500		13,22	0,229	12,559	2,88	7,37	0,97	1,35	
10000		12,82	0,222	12,215	2,717	5,86	0,97	1,34	
15000		12,56	0,229	11,931	2,739	3,37	0,95	1,32	
V = 2V E = 2,77x10 ⁵ V/cm		600	17,00	0,304	15,553	4,742	55,93	1,99	2,76
		750	16,24	0,287	14,997	4,317	49,15	1,99	2,76
		1000	15,44	0,271	14,381	3,901	40,80	1,99	2,76
	1500	14,44	0,250	13,586	3,405	31,16	1,99	2,76	
	2000	13,74	0,234	13,021	3,059	26,01	1,98	2,75	
	3000	12,92	0,216	12,341	2,671	19,86	1,98	2,75	
	4000	12,42	0,207	11,905	2,474	16,08	1,97	2,74	
	5000	12,08	0,188	11,664	2,202	14,45	1,97	2,74	
	6000	11,80	0,180	11,429	2,057	12,89	1,97	2,73	
	7500	11,56	0,171	11,228	1,928	11,00	1,96	2,72	
	10000	11,34	0,165	11,038	1,824	8,72	1,96	2,71	
	15000	11,18	0,178	10,836	1,929	5,50	1,93	2,68	

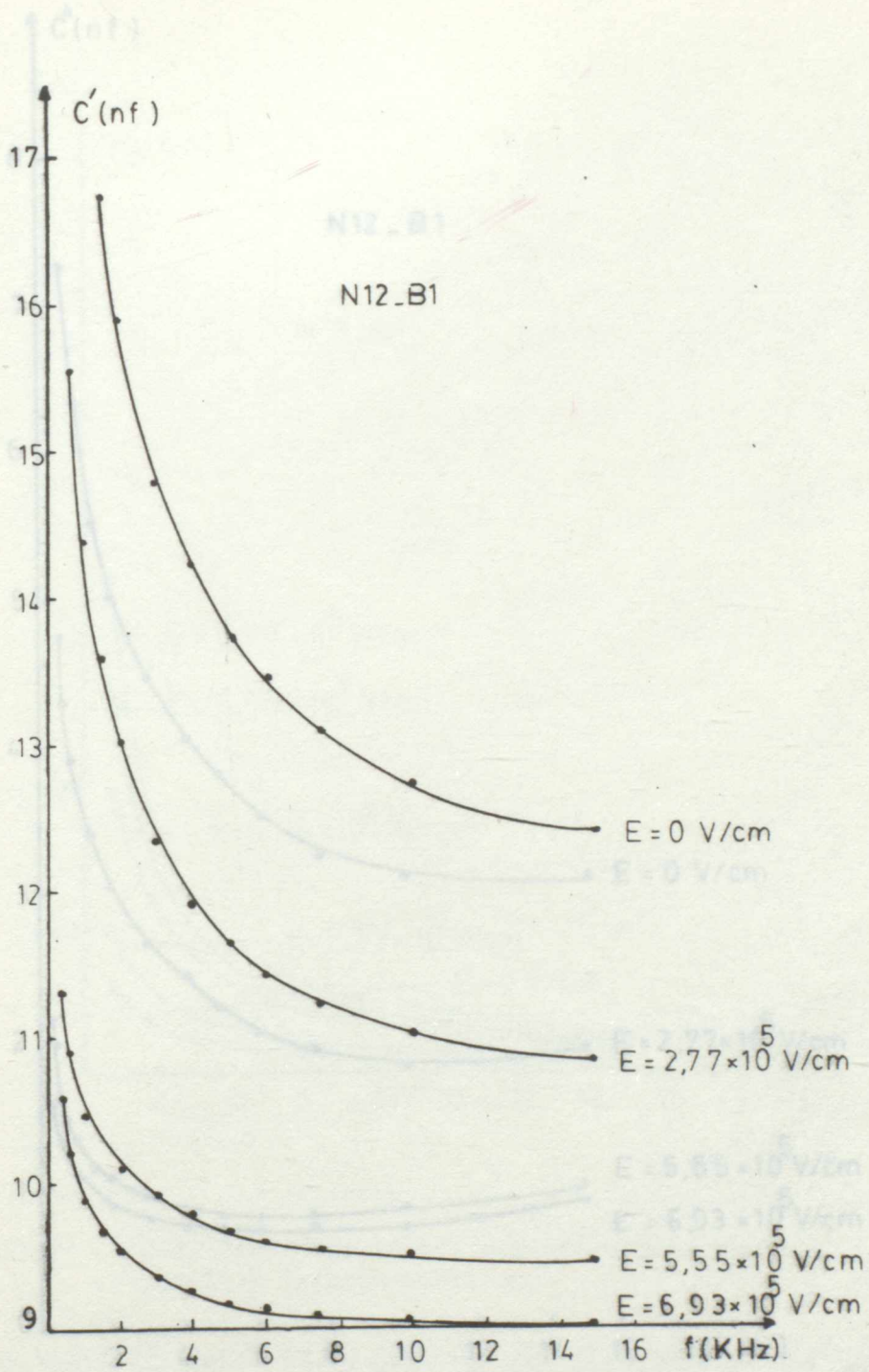
TABLO-5/1

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)
V = 3 V E = 4,16x10 ⁵ V/cm	600	12,65	0,241	11,954	2,833	91,99	2,99	4,15
	750	11,94	0,187	11,536	2,157	98,35	2,99	4,15
	1000	11,44	0,159	11,155	1,781	89,31	2,99	4,15
	1500	11,06	0,136	10,86	1,48	71,64	2,99	4,15
	2000	10,83	0,124	10,664	1,329	59,85	2,99	4,15
	3000	10,56	0,108	10,437	1,31	46,89	2,99	4,14
	4000	10,40	0,102	10,292	1,05	37,88	2,98	4,14
	5000	10,26	0,096	10,164	0,985	32,31	2,98	4,14
	6000	10,18	0,094	10,09	0,951	27,89	2,98	4,13
	7500	10,10	0,093	10,012	0,934	22,71	2,97	4,12
	10000	10,06	0,097	9,965	0,971	16,38	2,96	4,11
E 15000	10,04	0,110	9,918	1,097	9,67	2,94	4,08	
V = 4 V E = 5,55x10 ⁵ V/cm	600	11,16	0,15	10,912	1,643	161,40	4,0	5,54
	750	10,92	0,138	10,713	1,487	142,70	3,99	5,54
	1000	10,63	0,127	10,462	1,324	120,13	3,99	5,54
	1500	10,34	0,109	10,217	1,118	94,88	3,99	5,54
	2000	10,19	0,107	10,073	1,084	73,36	3,99	5,53
	3000	10,01	0,094	0,92	0,941	56,34	3,99	5,53
	4000	9,84	0,086	9,767	0,843	47,17	3,98	5,52
	5000	9,74	0,084	9,671	0,814	39,06	3,98	5,52
	6000	9,66	0,082	9,594	0,791	33,51	3,98	5,51
	7500	9,62	0,083	9,553	0,797	26,60	3,97	5,51
	10000	9,56	0,086	9,489	0,816	19,50	3,96	5,49
E 15000	9,56	0,1	9,463	0,954	11,12	3,93	5,45	
V = 5 V E = 6,93x10 ⁵ V/cm	600	10,39	0,131	10,232	1,347	196,87	4,99	6,93
	750	10,22	0,123	10,067	1,24	171,13	4,99	6,93
	1000	10,0	0,112	9,874	1,113	142,96	4,99	6,93
	1500	9,76	0,099	9,665	0,975	110,86	4,99	6,92
	2000	9,61	0,091	9,529	0,875	90,89	4,99	6,92
	3000	9,41	0,082	9,346	0,772	68,66	4,99	6,91
	4000	9,32	0,079	9,261	0,733	54,26	4,98	6,91
	5000	9,23	0,076	9,176	0,698	45,58	4,98	6,90
	6000	9,18	0,077	9,125	0,703	37,70	4,97	6,90
	7500	9,14	0,076	9,087	0,692	30,66	4,97	6,89
	10000	9,10	0,079	9,042	0,718	22,14	4,96	6,87
E 15000	9,10	0,098	9,012	0,886	11,96	4,92	6,82	

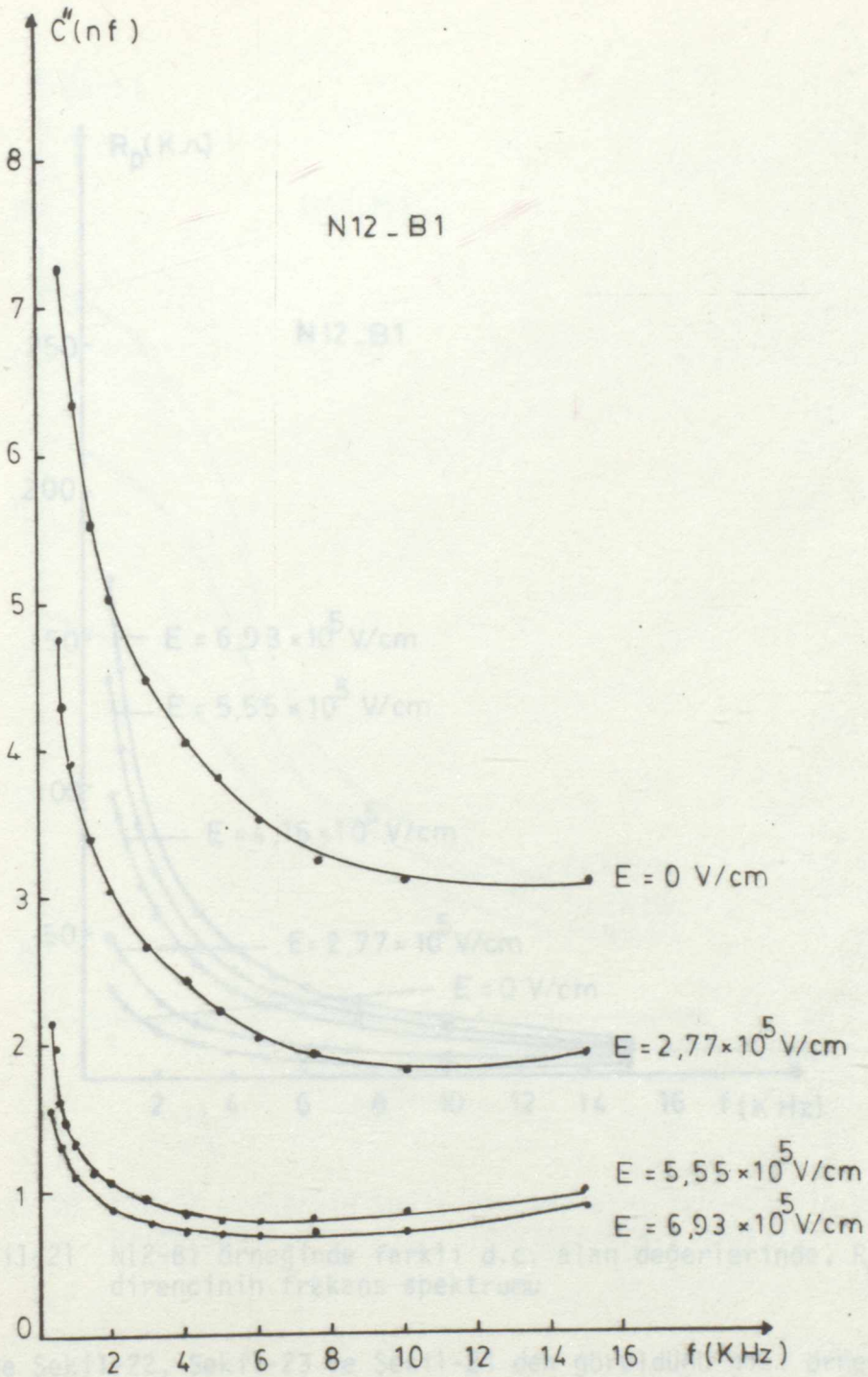
TABLO-5/1

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)
V = 3 V E = 4,16x10 ⁵ V/cm	600	12,65	0,241	11,954	2,833	91,99	2,99	4,15
	750	11,94	0,187	11,536	2,157	98,35	2,99	4,15
	1000	11,44	0,159	11,155	1,781	89,31	2,99	4,15
	1500	11,06	0,136	10,86	1,48	71,64	2,99	4,15
	2000	10,83	0,124	10,664	1,329	59,85	2,99	4,15
	3000	10,56	0,108	10,437	1,31	46,89	2,99	4,14
	4000	10,40	0,102	10,292	1,05	37,88	2,98	4,14
	5000	10,26	0,096	10,164	0,985	32,31	2,98	4,14
	6000	10,18	0,094	10,09	0,951	27,89	2,98	4,13
	7500	10,10	0,093	10,012	0,934	22,71	2,97	4,12
	10000	10,06	0,097	9,965	0,971	16,38	2,96	4,11
E	15000	10,04	0,110	9,918	1,097	9,67	2,94	4,08
V = 4 V E = 5,55x10 ⁵ V/cm	600	11,16	0,15	10,912	1,643	161,40	4,0	5,54
	750	10,92	0,138	10,713	1,487	142,70	3,99	5,54
	1000	10,63	0,127	10,462	1,324	120,13	3,99	5,54
	1500	10,34	0,109	10,217	1,118	94,88	3,99	5,54
	2000	10,19	0,107	10,073	1,084	73,36	3,99	5,53
	3000	10,01	0,094	0,92	0,941	56,34	3,99	5,53
	4000	9,84	0,086	9,767	0,843	47,17	3,98	5,52
	5000	9,74	0,084	9,671	0,814	39,06	3,98	5,52
	6000	9,66	0,082	9,594	0,791	33,51	3,98	5,51
	7500	9,62	0,083	9,553	0,797	26,60	3,97	5,51
	10000	9,56	0,086	9,489	0,816	19,50	3,96	5,49
E	15000	9,56	0,1	9,463	0,954	11,12	3,93	5,45
V = 5 V E = 6,93x10 ⁵ V/cm	600	10,39	0,131	10,232	1,347	196,87	4,99	6,93
	750	10,22	0,123	10,067	1,24	171,13	4,99	6,93
	1000	10,0	0,112	9,874	1,113	142,96	4,99	6,93
	1500	9,76	0,099	9,665	0,975	110,86	4,99	6,92
	2000	9,61	0,091	9,529	0,875	90,89	4,99	6,92
	3000	9,41	0,082	9,346	0,772	68,66	4,99	6,91
	4000	9,32	0,079	9,261	0,733	54,26	4,98	6,91
	5000	9,23	0,076	9,176	0,698	45,58	4,98	6,90
	6000	9,18	0,077	9,125	0,703	37,70	4,97	6,90
	7500	9,14	0,076	9,087	0,692	30,66	4,97	6,89
	10000	9,10	0,079	9,042	0,718	22,14	4,96	6,87
E	15000	9,10	0,098	9,012	0,886	11,96	4,92	6,82

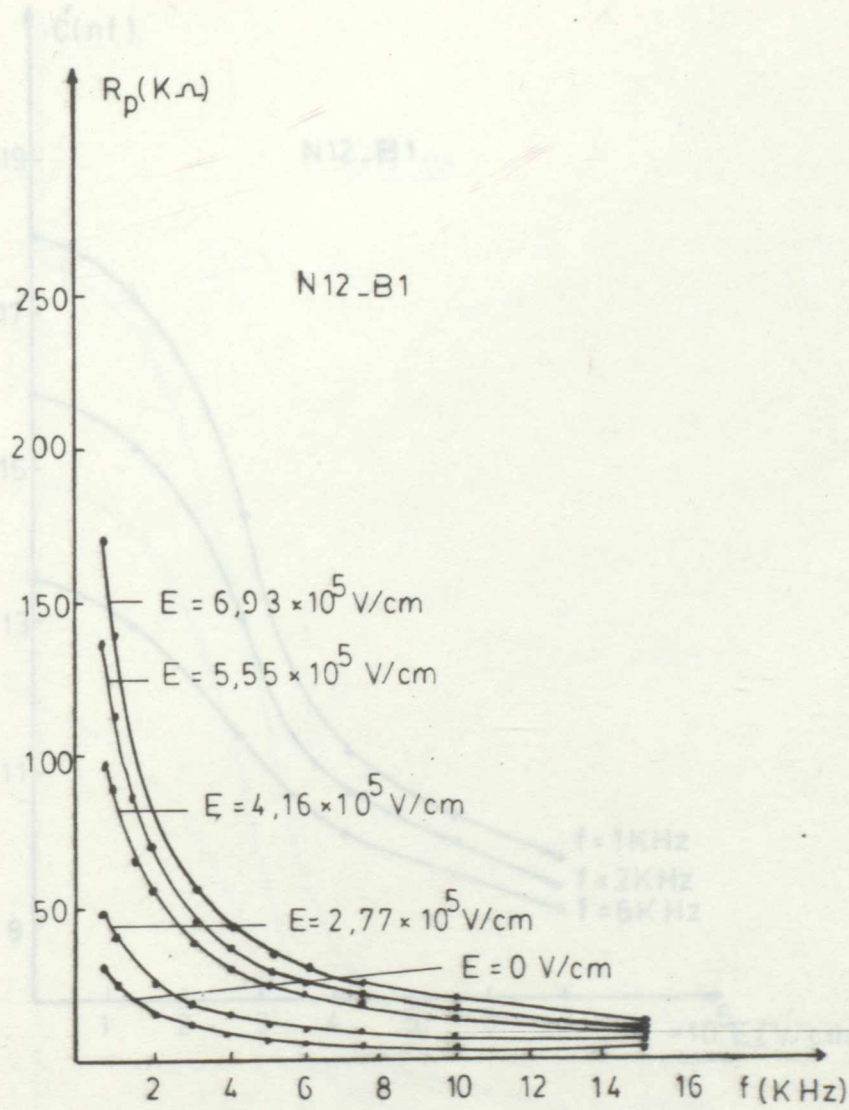
Sekil-19 412-81 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde kapasite-
nir-gerilme bileşeninin frekans spektrumu



Şekil-19 N12-B1 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde kapasitenin gerçel bileşeninin, frekans spektrumu

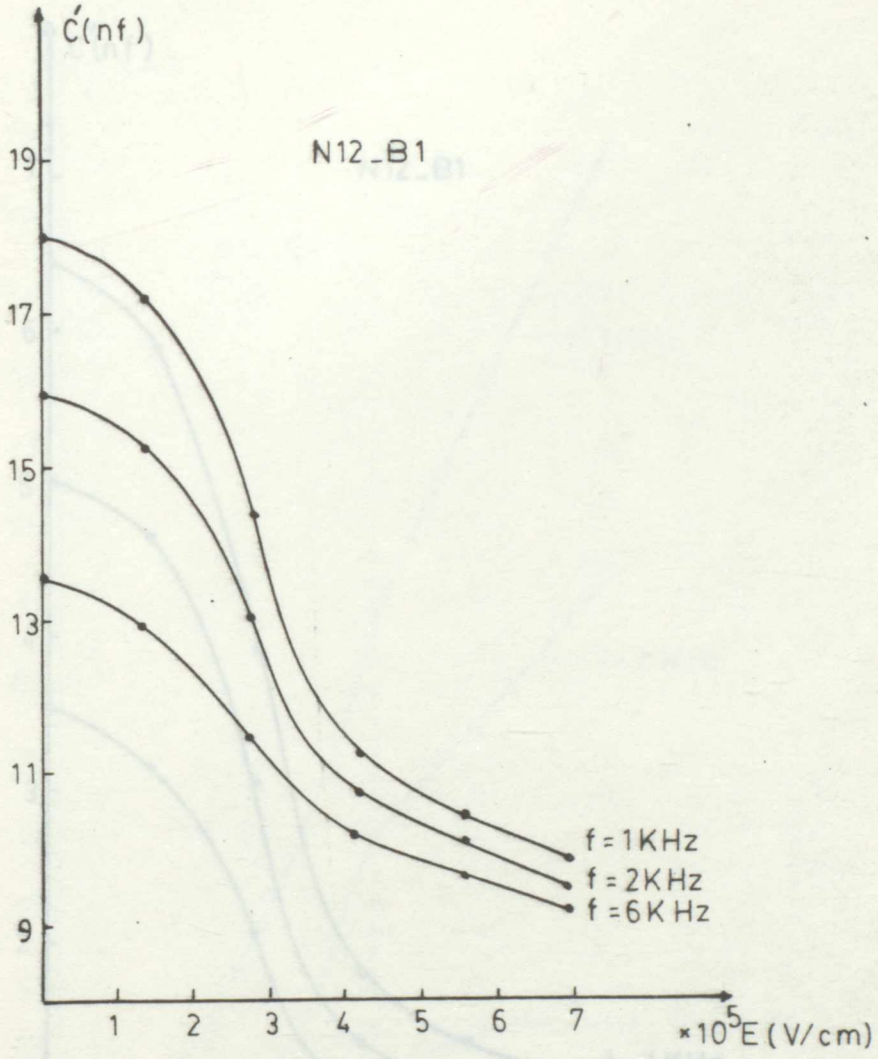


Şekil-20 N12-B1 örneğinde, farklı d.c. alan değerlerinde, kapasitenin sanal bileşeninin, frekans spektrumu



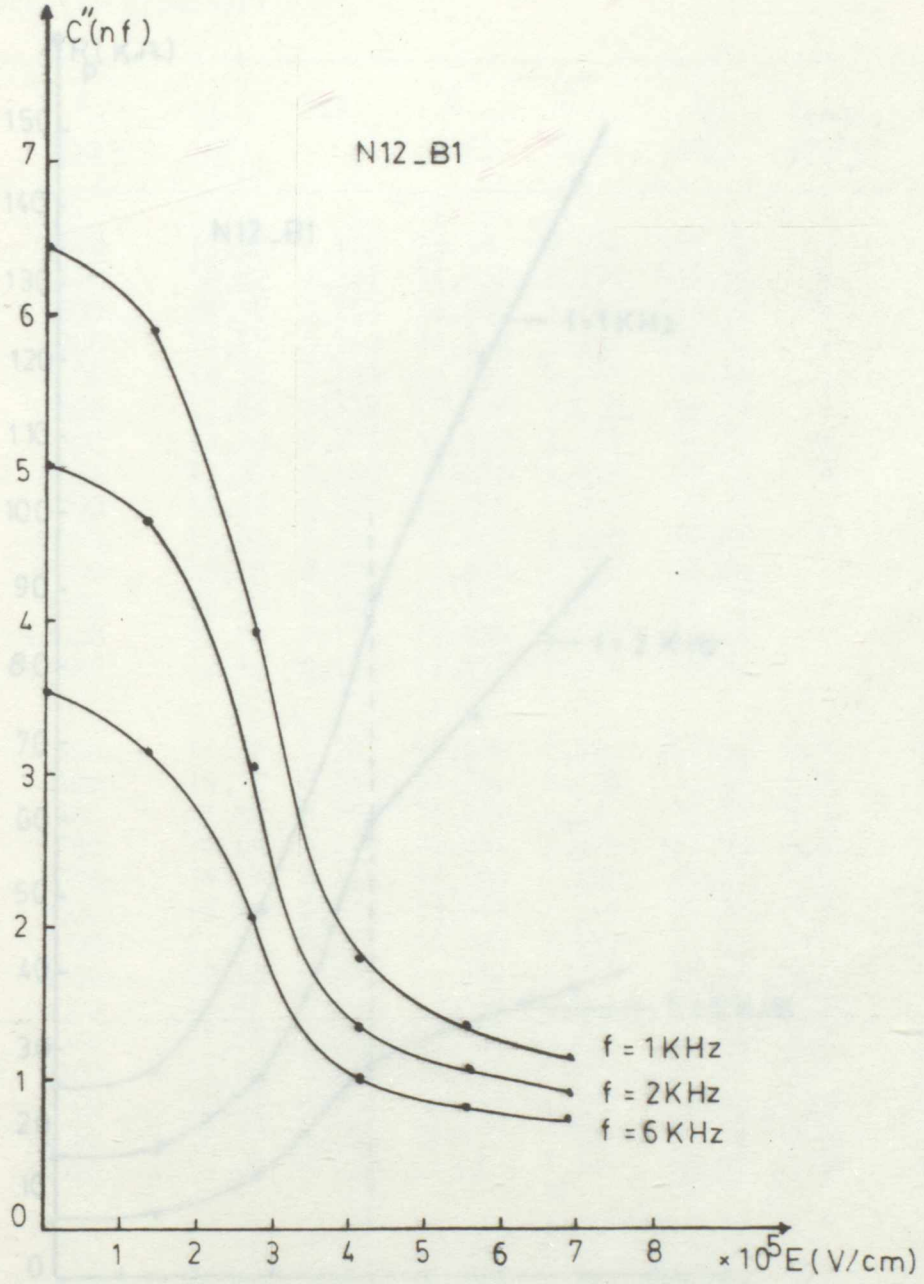
Şekil-21 N12-B1 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde, R_p direncinin frekans spektrumu

Yine Şekil-22, Şekil-23 ve Şekil-24 den görüldüğü gibi örneğin C' ve C'' kapasite bileşenlerinin küçük alan değerlerindeki frekans bağımlılıkları, alanın artması ile azalmıştır. İkinci olarak da yüksek frekanslarda kapasitif bileşenlerin d.c. alandan etkilenmeleri azalmıştır.



Şekil-22 N12-B1 örneğinin sabit frekanslarda kapasitenin gerçel bileşeninin d.c. alan şiddetine bağlı değişimi

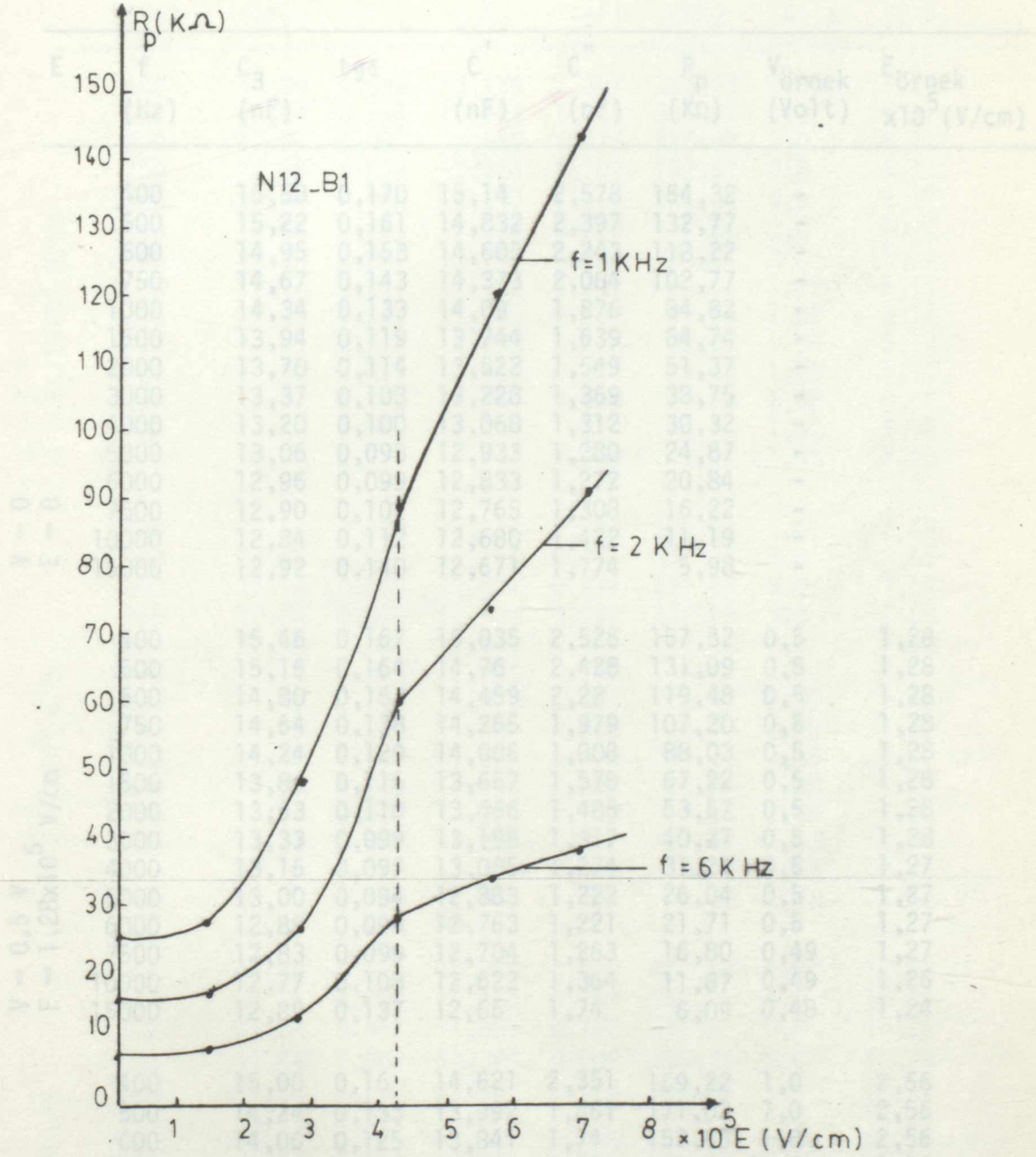
Şekil-23 N12-B1 örneğinin kapasitesinin sanal bileşeni C'' nin d.c. alan şiddetine bağlı değişimi



Şekil-23 N12-B1 no.lu örneğin kapasitesinin sanal bileşeni C'' nün d.c. alan şiddetine bağlı değişimi

TABLO-6

N13-B3 Numaralı Örnekte, d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçümleri



Şekil-24 N12-B1 örneğinin kapasitesinin R_p direncinin d.c. alan şiddetine bağlı değişimi

TABLO-6

N13-B3 Numaralı Örnekte, d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	P _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)
V = 0 E = 0	400	15,58	0,170	15,14	2,578	154,32	-	-
	500	15,22	0,161	14,832	2,397	132,77	-	-
	600	14,95	0,153	14,605	2,243	118,22	-	-
	750	14,67	0,143	14,373	2,064	102,77	-	-
	1000	14,34	0,133	14,09	1,876	84,82	-	-
	1500	13,94	0,119	13,744	1,639	64,74	-	-
	2000	13,70	0,114	13,522	1,549	51,37	-	-
	3000	13,37	0,103	13,228	1,369	38,75	-	-
	4000	13,20	0,100	13,068	1,312	30,32	-	-
	5000	13,06	0,098	12,933	1,230	24,87	-	-
	6000	12,96	0,099	12,833	1,272	20,84	-	-
	7500	12,90	0,102	12,765	1,308	16,22	-	-
	10000	12,84	0,112	12,680	1,422	11,19	-	-
	15000	12,92	0,140	12,671	1,774	5,98	-	-
	V = 0,5 V E = 1,28x10 ⁵ V/cm	400	15,46	0,167	15,035	2,525	157,52	0,5
500		15,16	0,164	14,76	2,428	131,09	0,5	1,28
600		14,80	0,153	14,459	2,22	119,48	0,5	1,28
750		14,54	0,138	14,265	1,979	107,20	0,5	1,28
1000		14,24	0,129	14,006	1,808	88,03	0,5	1,28
1500		13,84	0,115	13,657	1,578	67,22	0,5	1,28
2000		13,63	0,110	13,466	1,485	53,57	0,5	1,28
3000		13,33	0,099	13,198	1,317	40,27	0,5	1,28
4000		13,16	0,097	13,035	1,274	31,21	0,5	1,27
5000		13,00	0,094	12,883	1,222	26,04	0,5	1,27
6000		12,88	0,095	12,763	1,221	21,71	0,5	1,27
7500		12,83	0,099	12,704	1,263	16,80	0,49	1,27
10000		12,77	0,108	12,622	1,364	11,67	0,49	1,26
15000		12,89	0,137	12,65	1,74	6,09	0,48	1,24
V = 1V E = 2,56x10 ⁵ V/cm		400	15,00	0,16	14,621	2,351	169,22	1,0
	500	14,24	0,133	13,992	1,861	171,02	1,0	2,56
	600	14,06	0,125	13,841	1,74	152,43	1,0	2,56
	750	13,86	0,117	13,670	1,61	131,73	1,0	2,56
	1000	13,60	0,108	13,442	1,457	109,21	1,0	2,56
	1500	13,32	0,098	13,192	1,295	81,92	1,0	2,56
	2000	13,12	0,098	12,993	1,28	62,15	1,0	2,56
	3000	12,86	0,083	12,77	1,071	49,52	1,0	2,55
	4000	12,76	0,082	12,673	1,044	38,07	0,99	2,55
	5000	12,64	0,082	12,554	1,037	30,68	0,99	2,55
	6000	12,56	0,084	12,471	1,053	25,18	0,99	2,54
	7500	12,54	0,088	12,441	1,107	19,17	0,99	2,54
	10000	12,50	0,099	12,376	1,236	12,87	0,98	2,52
	15000	12,60	0,126	12,402	1,564	6,78	0,97	2,49

TABLO-6/1

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)
V = 2 V E = 5,13x10 ⁵ V/cm	400	13,24	0,099	13,109	1,307	304,28	2,0	5,12
	500	13,04	0,094	12,924	1,219	261,08	2,0	5,12
	600	12,94	0,091	12,832	1,173	226,07	2,0	5,12
	750	12,86	0,086	12,764	1,102	192,51	2,0	5,12
	1000	12,68	0,080	12,597	1,016	156,05	2,0	5,12
	1500	12,46	0,075	12,388	0,939	112,89	2,0	5,12
	2000	12,30	0,069	12,241	0,844	94,21	2,0	5,12
	3000	12,16	0,066	12,106	0,807	65,66	1,99	5,11
	4000	12,06	0,067	12,005	0,809	49,16	1,99	5,11
	5000	11,96	0,069	11,903	0,823	38,67	1,99	5,10
	6000	11,92	0,071	11,859	0,844	31,40	1,99	5,10
	7500	11,92	0,076	11,85	0,909	23,34	1,98	5,08
	10000	11,89	0,086	11,801	1,024	15,53	1,97	5,06
	15000	12,00	0,115	11,841	1,368	7,54	1,95	5,00
	V = 3 V E = 7,69x10 ⁵ V/cm	400	12,40	0,083	12,315	1,022	389,0	3,0
500		12,24	0,078	12,164	0,96	331,36	3,0	7,69
600		12,14	0,075	12,071	0,911	291,10	3,0	7,69
750		12,04	0,074	11,973	0,895	237,10	3,0	7,69
1000		11,90	0,068	11,845	0,806	197,42	3,0	7,68
1500		11,72	0,063	11,674	0,733	144,77	3,0	7,68
2000		11,62	0,059	11,579	0,687	115,77	2,99	7,68
3000		11,48	0,058	11,44	0,668	79,40	2,99	7,67
4000		11,40	0,059	11,36	0,673	59,12	2,99	7,67
5000		11,33	0,060	11,288	0,688	46,24	2,99	7,66
6000		11,30	0,063	11,254	0,713	37,19	2,98	7,65
7500		11,28	0,068	11,226	0,772	27,47	2,98	7,64
10000		11,26	0,078	11,19	0,88	18,08	2,97	7,61
15000		11,38	0,105	11,254	1,19	8,92	2,93	7,52
V = 4 V E = 1,02x10 ⁶ V/cm		400	11,82	0,074	11,755	0,872	456,23	4,0
	500	11,64	0,069	11,584	0,799	389,01	4,0	10,25
	600	11,54	0,066	11,489	0,763	347,6	4,0	10,25
	750	11,44	0,061	11,396	0,704	301,35	4,0	10,25
	1000	11,32	0,058	11,58	0,663	239,82	4,0	10,25
	1500	11,12	0,052	11,088	0,587	180,62	4,0	10,25
	2000	11,04	0,052	11,01	0,574	138,54	3,99	10,24
	3000	10,90	0,05	10,872	0,549	96,51	3,99	10,24
	4000	10,84	0,051	10,811	0,559	71,15	3,99	10,23
	5000	10,76	0,054	10,728	0,579	54,90	3,99	10,22
	6000	10,74	0,056	10,705	0,605	43,84	3,98	10,21
	7500	10,73	0,06	10,69	0,65	32,63	3,98	10,19
	10000	10,72	0,07	10,666	0,752	21,16	3,96	10,16
	15000	10,80	0,095	10,701	1,026	10,33	3,92	10,06

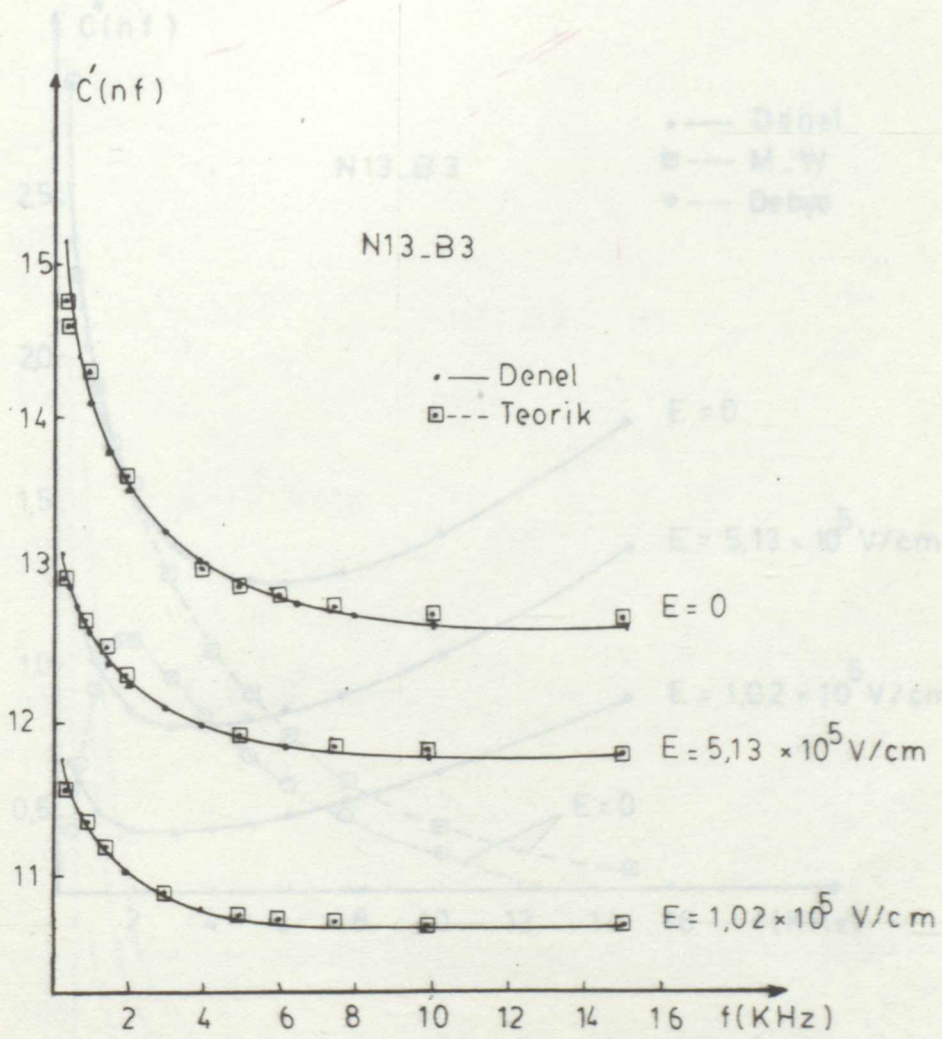
TABLO-6/2

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)
V = 5 V E = 1,28x10 ⁶ V/cm	400	10,90	0,062	10,857	0,678	586,73	5,0	12,82
	500	10,80	0,058	10,763	0,63	505,23	5,0	12,82
	600	10,72	0,054	10,688	0,577	458,95	5,0	12,81
	750	10,64	0,052	10,611	0,554	382,60	5,0	12,81
	1000	10,54	0,050	10,513	0,53	299,8	5,0	12,81
	1500	10,40	0,045	10,378	0,467	227,12	5,0	12,81
	2000	10,33	0,044	10,31	0,453	175,41	4,99	12,81
	3000	10,24	0,043	10,22	0,444	119,45	4,99	12,80
	4000	10,18	0,044	10,159	0,455	87,29	4,99	12,79
	5000	10,13	0,046	10,107	0,471	67,45	4,99	12,78
	6000	10,10	0,049	10,075	0,495	53,55	4,98	12,77
	7500	10,10	0,054	10,07	0,544	38,95	4,97	12,76
	10000	10,10	0,063	10,059	0,635	25,25	4,96	12,71
	15000	10,18	0,086	10,105	0,87	12,19	4,92	12,61

Tablo-6 da, N13-B3 numaralı örneğe ait d.c. alan altındaki kapasitif ölçme sonuçları verilmiştir. Bu örnek Tablo-4 den de anlaşılacağı üzere $d = 400 \text{ \AA}$ kalınlığında ve saf olarak hazırlanmış bir örnektir.

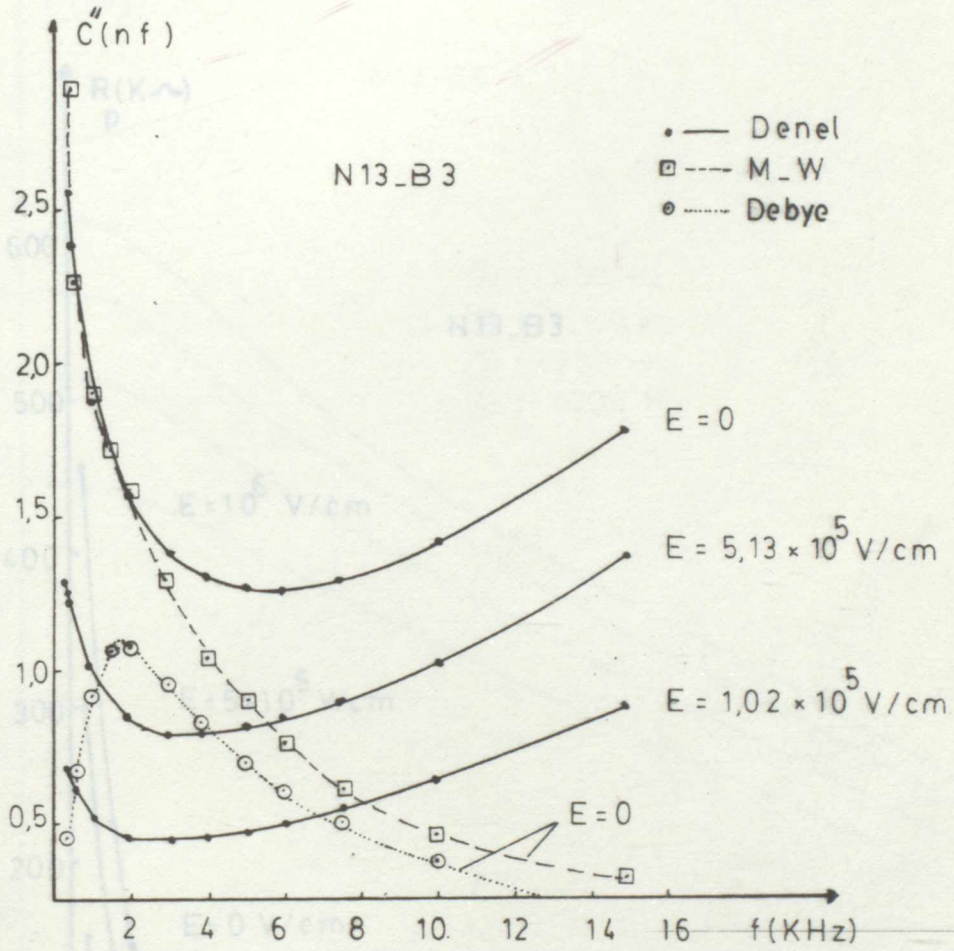
Şekil-25, Şekil-26 ve Şekil-27 de sabit d.c. alan değerlerinde örnekteki kapasite bileşenlerinin frekansa bağlı değişimleri; Şekil-28, Şekil-29 ve Şekil-30 da ise sabit frekanslarda, aynı bileşenlerin d.c. alana bağlı değişimleri incelenmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere d.c. alan şiddetinin artması ile örneğin C' ve C'' bileşenlerinde önceki örnekte görülen azalmalara benzer azalmalar görülmüş, ancak örneklerin kalınlıklarına, konsantrasyonlarına göre bu C' ve C'' bileşenlerinin azalma hızları farklı d.c. alan şiddetlerinde farklılıklar göstermiştir.

Şekil-25 ve Şekil-26 da görülen ve ilerideki şekillerde de görülecek olan kesikli çizgiler, V. Bölümde açıklanan yöntem yardımıyla çizilen Maxwell-Wagner relaksasyonuna ait teorik eğriler olup açıklaması V. Bölümde yapılacaktır. Şekil-26 da ayrıca noktalı çizgilerle gösterilen eğri ise, yine V. Bölümde açıklaması yapılacak olan Debye tipi bir relaksasyon gösteren ve Maxwell-Garnet eşdeğer devresine ait N13-B3 örneğinin $E = 0$ için frekans spektrumunu vermektedir.



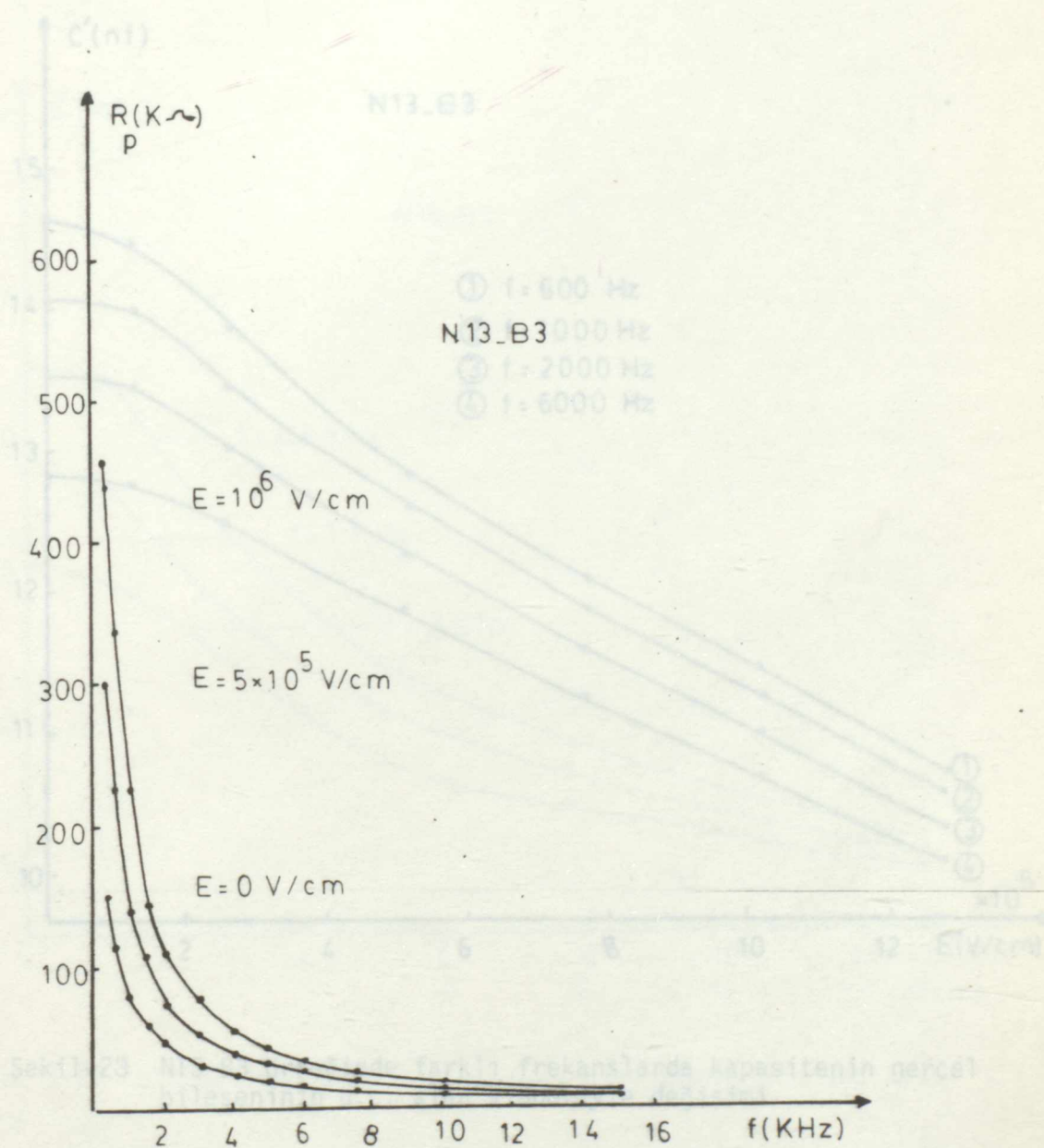
Şekil-26 N13-B3 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde kapasitenin sanal bileşeninin frekans spektrumu.

Şekil-25 N13-B3 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde kapasitenin gerçel bileşeninin frekans spektrumu

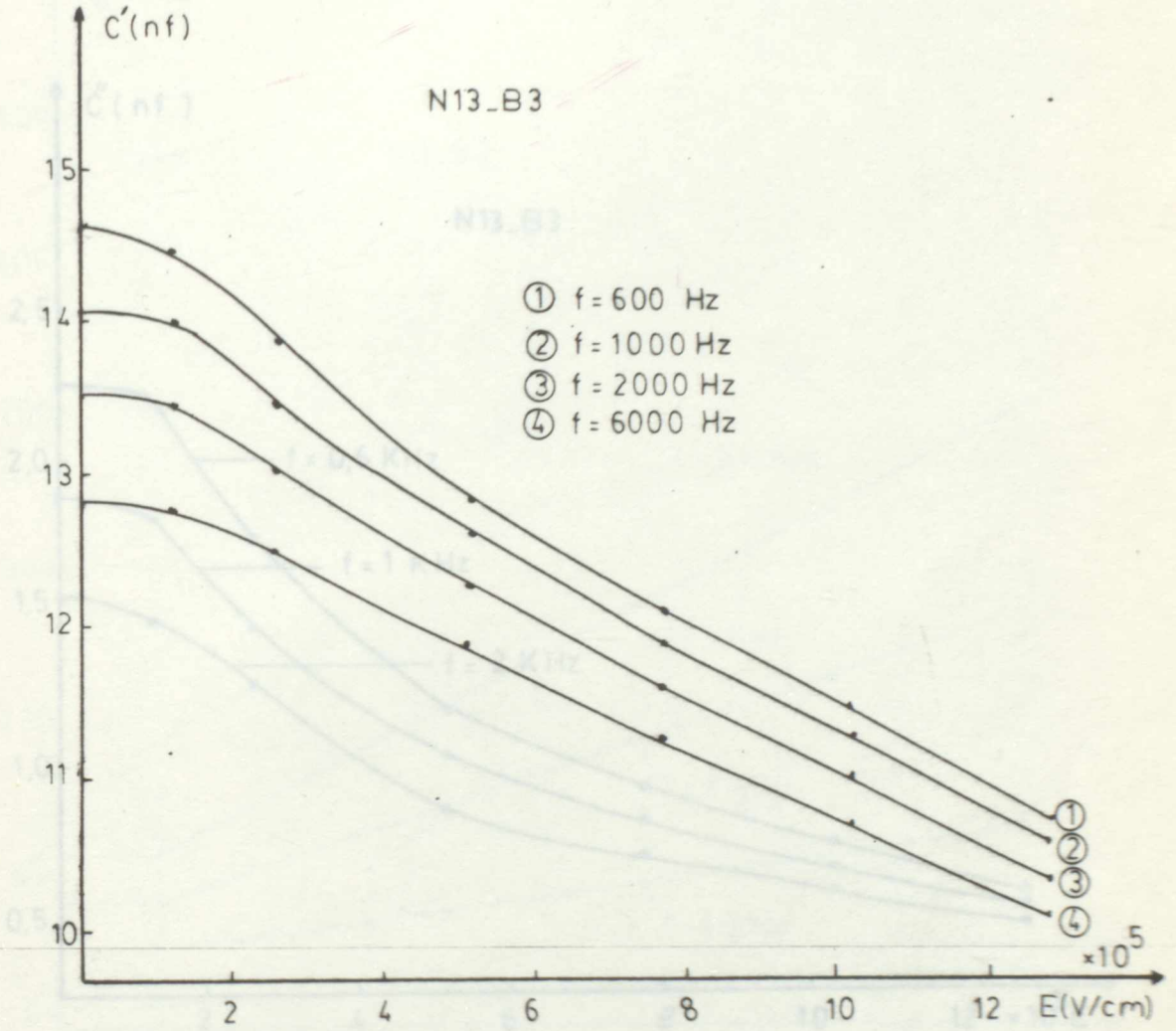


Şekil-26 N13-B3 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde kapasitenin sanal bileşenin frekans spektrumu

Şekil-27 N13-B3 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde R_p direncinin frekans spektrumu

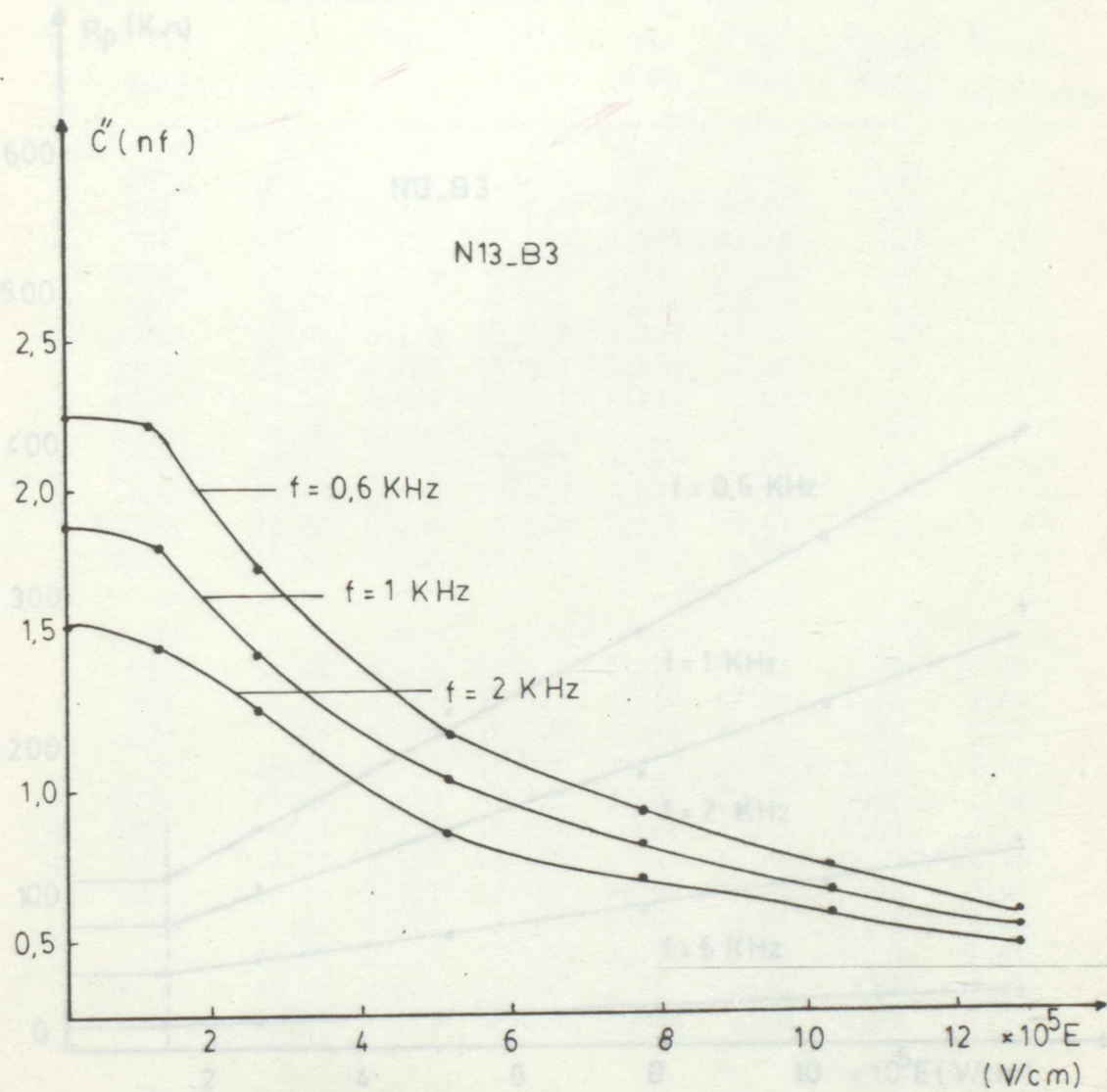


Şekil-27 N13-B3 örneğinde farklı d.c. alan değerlerinde R_p direncinin frekans spektrumu



Şekil-23 N13-B3 örneğinde farklı frekanslarda kapasitenin gerçel bileşeninin d.c. alan şiddetiyle değişimi

Şekil-22 ile Şekil-28 karşılaştırılacak olursa; Şekil-22 de, d.c. alan şiddetinin sıfırdan $0,5 \times 10^5$ V/cm'e kadar C' değerlerinde küçük azalmalar olduğu, daha sonra $\sim 4 \times 10^5$ V/cm alan değerine kadar C' nün hızla azaldığı 4×10^5 V/cm den büyük değerlerde ise doğrusal olarak azaldığı gözlenebilir. Buna karşılık Şekil-28 de N13-B3 numaralı örneğin C' değeri $\sim 1,4 \times 10^5$ V/cm alan değerine kadar yaklaşık olarak sabit kalmakta

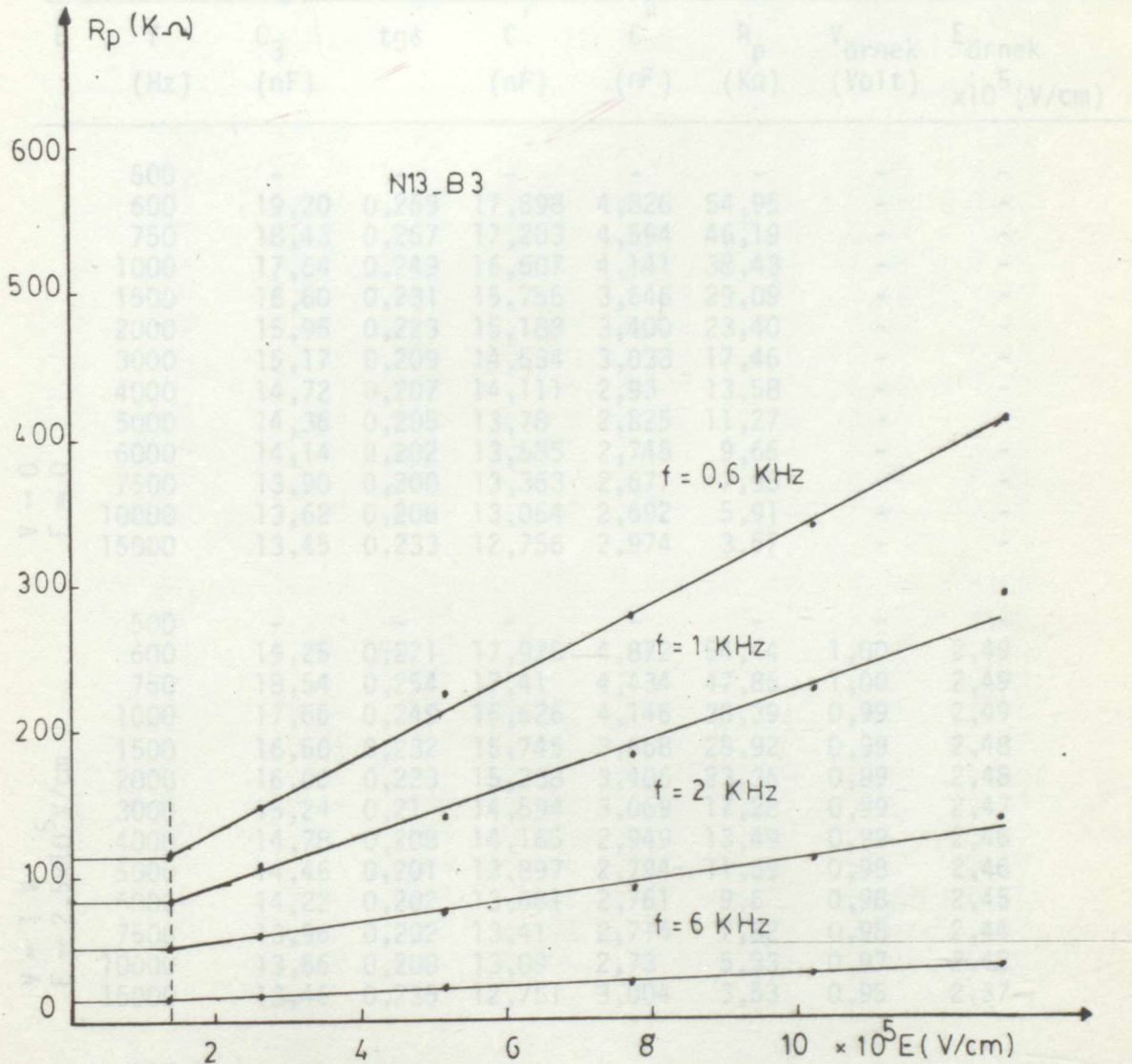


Şekil-29 N13-B3 örneğinde C'' nün, d.c. alan şiddetiyle değişimi

ve bu alan değerinden başlayarak doğrusal olarak azalmaya devam etmektedir. N12-B1 numaralı örneğe ait Şekil-23 eğrisi ile N13-B3 numaralı örneğe ait Şekil-29 eğrisi de karşılaştırılırsa benzer farklılıklar gözlenir. Aynı örneklerin R_p dirençlerinin alana bağlı değişimlerini gösteren Şekil-24 ile Şekil-30 un karşılaştırılması durumunda da N12-B1'e ait R_p direncinin önce hızla arttığı ve $4,16 \times 10^6$ V/cm alan değerinden sonra doğrusal olarak artmaya devam ettiği, oysa

TABLO-7

N14-B4 Numaralı Örnekte d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri



Şekil-30 N13-B3 örneğinde R_p direncinin d.c. alan şiddetiyle değişimi

N13-B3'e ait (Şekil-30) R_p direncinin $1,28 \times 10^5$ V/cm alan değerine kadar sabit kaldıktan sonra doğrusal olarak artmaya başladığı görülebilmektedir.

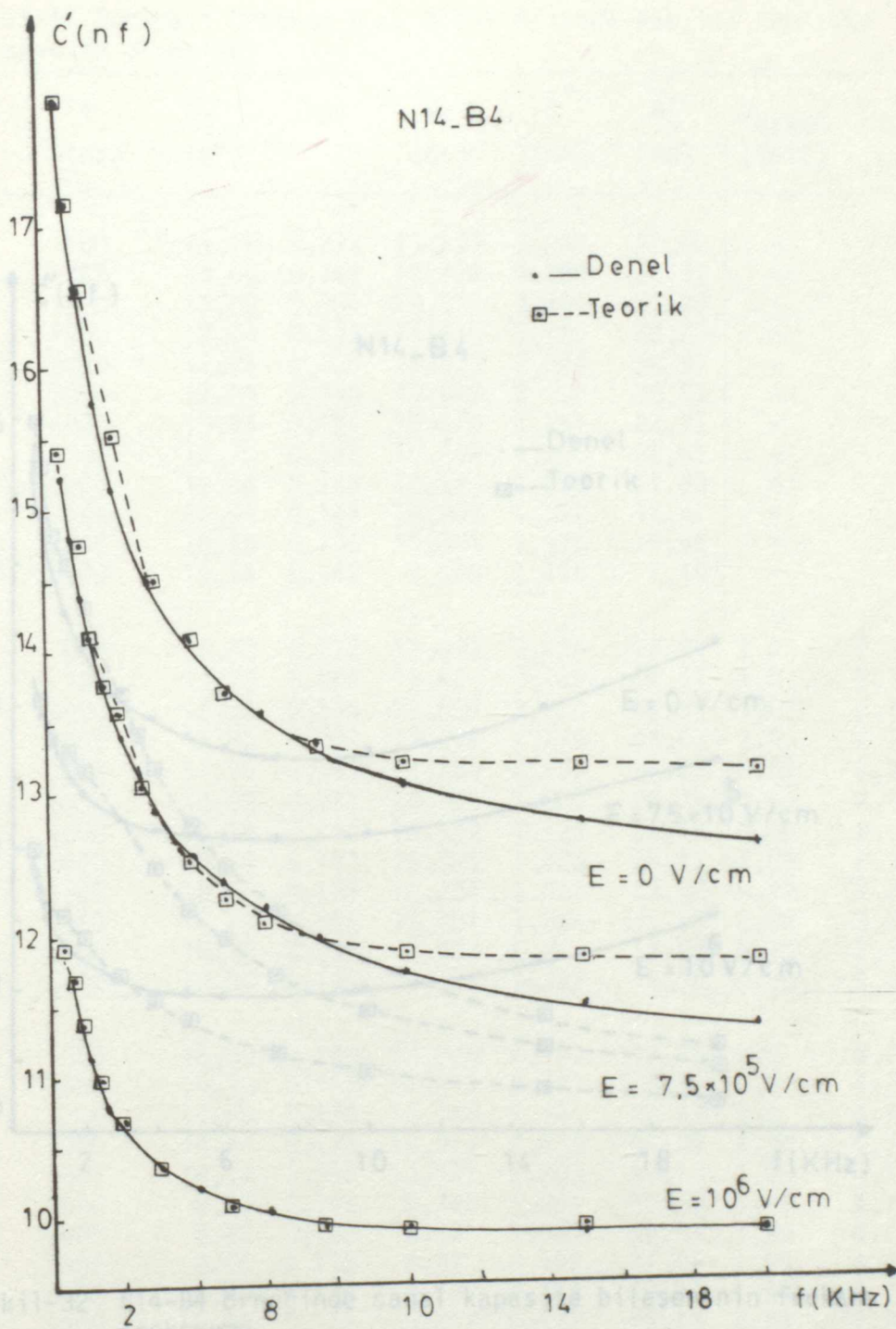
TABLO-7

N14-B4 Numaralı Örnekte d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)	
V = 0 E = 0	500	-	-	-	-	-	-	-	
	600	19,20	0,269	17,898	4,826	54,95	-	-	
	750	18,43	0,267	17,203	4,594	46,19	-	-	
	1000	17,64	0,249	16,607	4,141	38,43	-	-	
	1500	16,60	0,231	15,756	3,646	29,09	-	-	
	2000	15,95	0,223	15,188	3,400	23,40	-	-	
	3000	15,17	0,209	14,534	3,033	17,46	-	-	
	4000	14,72	0,207	14,111	2,93	13,58	-	-	
	5000	14,36	0,205	13,78	2,825	11,27	-	-	
	6000	14,14	0,202	13,535	2,745	9,66	-	-	
	7500	13,90	0,200	13,363	2,677	7,93	-	-	
	10000	13,62	0,206	13,064	2,692	5,91	-	-	
	15000	13,45	0,233	12,756	2,974	3,57	-	-	
	V = 1 V E = 2,5x10 ⁵ V/cm	500	-	-	-	-	-	-	-
		600	19,25	0,271	17,925	4,872	54,44	1,00	2,49
750		18,54	0,254	17,41	4,434	47,85	1,00	2,49	
1000		17,66	0,249	16,626	4,146	38,39	0,99	2,49	
1500		16,60	0,232	15,745	3,668	28,92	0,99	2,48	
2000		16,00	0,223	15,238	3,406	23,36	0,99	2,48	
3000		15,24	0,21	14,594	3,069	17,28	0,99	2,47	
4000		14,78	0,208	14,165	2,949	13,49	0,99	2,46	
5000		14,46	0,201	13,897	2,794	11,39	0,98	2,46	
6000		14,22	0,202	13,661	2,761	9,6	0,98	2,45	
7500		13,96	0,202	13,41	2,714	7,82	0,98	2,44	
10000		13,66	0,208	13,09	2,73	5,33	0,97	2,42	
15000		13,46	0,235	12,751	3,004	3,53	0,95	2,37	
V = 2 V E = 5x10 ⁵ V/cm		500	-	-	-	-	-	-	-
		600	19,04	0,27	17,737	4,806	55,19	1,99	4,98
	750	18,24	0,254	17,128	4,362	48,64	1,99	4,98	
	1000	17,36	0,25	16,337	4,087	38,94	1,99	4,97	
	1500	16,34	0,227	15,536	3,532	30,04	1,99	4,97	
	2000	15,72	0,213	15,036	3,206	24,82	1,98	4,96	
	3000	15,00	0,199	14,427	2,875	18,45	1,98	4,95	
	4000	14,58	0,198	14,026	2,787	14,24	1,97	4,93	
	5000	14,27	0,192	13,757	2,654	11,99	1,97	4,92	
	6000	14,00	0,192	13,5	2,596	10,22	1,96	4,90	
	7500	13,79	0,192	13,296	2,56	8,29	1,95	4,88	
	10000	13,56	0,199	13,04	2,602	6,12	1,94	4,84	
	15000	13,41	0,223	12,772	2,853	3,72	1,90	4,74	

TABLO-7/1

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)	
V = 3V E = 7,5x10 ⁵ V/cm	500	16,50	0,224	15,706	3,529	90,18	2,99	7,48	
	600	15,90	0,21	15,224	3,207	82,69	2,99	7,48	
	750	15,42	0,199	14,828	2,961	71,66	2,99	7,48	
	1000	14,93	0,189	14,409	2,737	58,14	2,99	7,47	
	1500	14,26	0,18	13,811	2,488	42,64	2,99	7,46	
	2000	13,84	0,176	13,419	2,374	33,51	2,98	7,46	
	3000	13,26	0,17	12,884	2,198	24,13	2,98	7,44	
	4000	12,96	0,17	12,593	2,149	18,51	2,97	7,42	
	5000	12,74	0,172	12,371	2,134	14,91	2,96	7,40	
	6000	12,56	0,172	12,196	2,106	12,59	2,95	7,38	
	7500	12,34	0,174	11,974	2,092	10,14	2,94	7,35	
	10000	12,12	0,181	11,733	2,13	7,47	2,92	7,30	
	15000	11,94	0,205	11,458	2,349	4,52	2,87	7,18	
	V = 4V E = 10 ⁶ V/cm	500	12,40	0,179	12,012	2,158	147,49	3,99	9,99
		600	12,04	0,161	11,734	1,893	140,07	3,99	9,99
750		11,66	0,149	11,404	1,706	124,38	3,99	9,98	
1000		11,36	0,134	11,157	1,504	105,82	3,99	9,98	
1500		10,94	0,12	10,783	1,299	31,67	3,99	9,93	
2000		10,74	0,113	10,603	1,204	66,08	3,99	9,97	
3000		10,46	0,103	10,349	1,071	49,53	3,98	9,96	
4000		10,30	0,099	10,199	1,014	39,23	3,98	9,95	
5000		10,20	0,098	10,101	0,999	31,84	3,98	9,94	
6000		10,14	0,096	10,046	0,971	27,30	3,97	9,93	
7500		10,06	0,097	9,965	0,972	21,83	3,96	9,91	
10000		10,00	0,103	9,894	1,02	15,59	3,95	9,87	
15000		10,00	0,121	9,854	1,119	8,85	3,91	9,78	

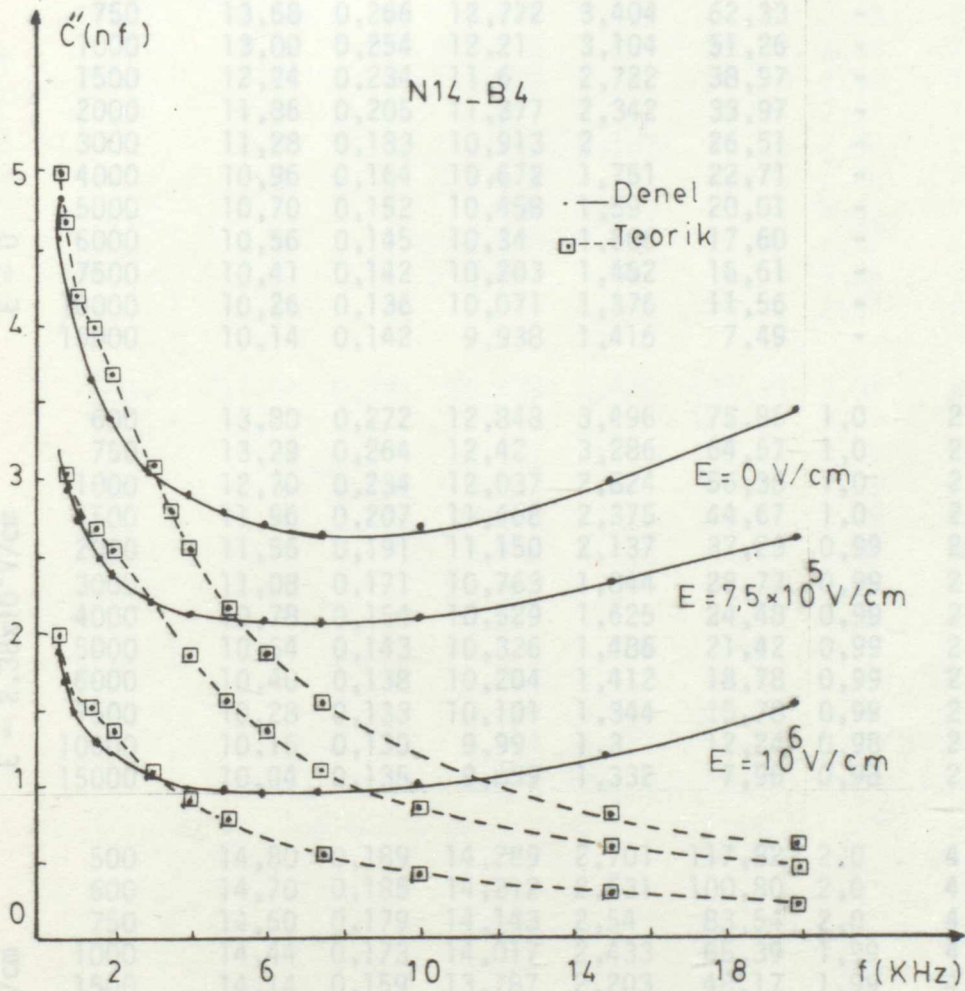


Şekil-31 N14-B4 örneğinde gerçel kapasite bileşeninin frekans spektrumu

TABLO-2.

N15-B5 Numaralı Örnekte d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

E	f	C ₃	tgδ	C'	C''	R _p	V _{örnek}	E _{örnek}
	(Hz)	(nF)		(nF)	(nF)	(kΩ)	(Volt)	x10 ⁵ V/cm
	600	14,10	0,275	13,177	3,634	72,98		
	750	13,68	0,266	12,772	3,404	62,33		
	1000	13,00	0,254	12,21	3,104	51,26		
	1500	12,34	0,235	11,59	2,722	38,97		
	2000	11,86	0,205	10,913	2,342	33,97		
	3000	11,28	0,183	10,313	2,081	26,51		
	4000	10,96	0,164	10,072	1,881	22,71		
	5000	10,70	0,152	10,058	1,781	20,01		
	6000	10,56	0,145	10,34	1,682	17,60		
	7500	10,41	0,142	10,203	1,582	15,51		
	10000	10,26	0,136	10,071	1,476	11,56		
	15000	10,14	0,142	9,938	1,416	7,45		



Şekil-32 N14-B4 örneğinde sanal kapasite bileşeninin frekans spektrumu

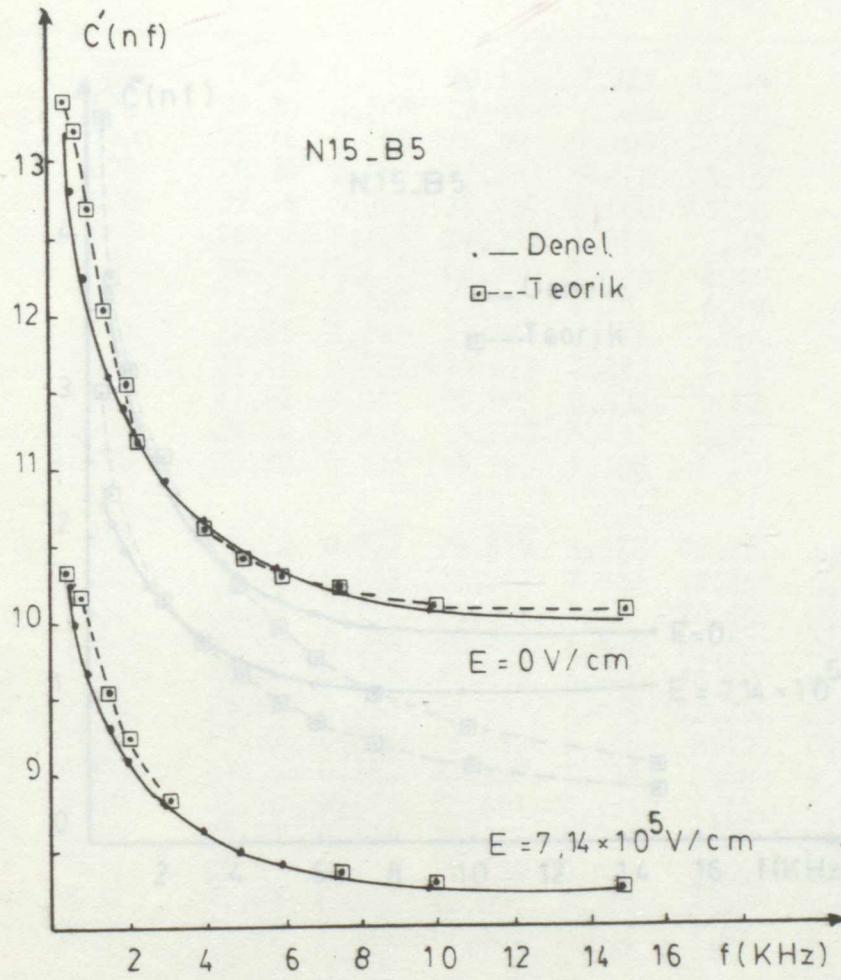
TABLO-8

N15-B5 Numaralı Örnekte d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ V/cm	
V = 0 E = 0	600	14,18	0,275	13,177	3,634	72,98	-	-	
	750	13,68	0,266	12,772	3,404	62,33	-	-	
	1000	13,00	0,254	12,21	3,104	51,26	-	-	
	1500	12,24	0,234	11,6	2,722	38,97	-	-	
	2000	11,86	0,205	11,377	2,342	33,97	-	-	
	3000	11,28	0,183	10,913	2	26,51	-	-	
	4000	10,96	0,164	10,672	1,751	22,71	-	-	
	5000	10,70	0,152	10,458	1,59	20,01	-	-	
	6000	10,56	0,145	10,34	1,506	17,60	-	-	
	7500	10,41	0,142	10,203	1,452	16,61	-	-	
	10000	10,26	0,136	10,071	1,376	11,56	-	-	
	15000	10,14	0,142	9,938	1,416	7,49	-	-	
	V = 1 V E = 2,38x10 ⁵ V/cm	600	13,80	0,272	12,848	3,496	75,86	1,0	2,37
		750	13,29	0,264	12,42	3,286	64,57	1,0	2,37
		1000	12,70	0,234	12,037	2,824	56,36	1,0	2,37
1500		11,96	0,207	11,468	2,375	44,67	1,0	2,37	
2000		11,56	0,191	11,150	2,137	37,23	0,99	2,37	
3000		11,08	0,171	10,763	1,844	28,77	0,99	2,36	
4000		10,78	0,154	10,529	1,625	24,48	0,99	2,36	
5000		10,54	0,143	10,326	1,486	21,42	0,99	2,36	
6000		10,40	0,138	10,204	1,412	18,78	0,99	2,36	
7500		10,28	0,133	10,101	1,344	15,78	0,99	2,35	
10000	10,16	0,130	9,99	1,3	12,24	0,98	2,34		
15000	10,04	0,135	9,859	1,332	7,96	0,98	2,32		
V = 2 V E = 4,76x10 ⁵ V/cm	500	14,80	0,189	14,289	2,701	117,82	2,0	4,75	
	600	14,70	0,185	14,212	2,631	100,80	2,0	4,75	
	750	14,60	0,179	14,143	2,54	83,54	2,0	4,75	
	1000	14,44	0,173	14,017	2,433	65,39	1,99	4,75	
	1500	14,14	0,159	13,787	2,203	48,17	1,99	4,74	
	2000	8,94	0,149	8,745	1,304	60,99	1,99	4,75	
	4000	8,62	0,128	8,48	1,087	36,60	1,99	4,74	
	5000	8,49	0,119	8,37	0,999	31,85	1,99	4,73	
	6000	8,40	0,116	8,287	0,964	27,52	1,99	4,73	
	7500	8,32	0,111	8,217	0,917	23,12	1,98	4,72	
10000	8,24	0,112	8,137	0,912	17,44	1,98	4,71		
15000	8,18	0,114	8,074	0,923	11,49	1,97	4,68		

TABLO-8/1

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ (V/cm)
V = 3 V E = 7,14x10 ⁵ V/cm	500	10,95	0,224	10,423	2,342	135,88	3,00	7,13
	600	10,70	0,219	10,207	2,242	118,29	2,99	7,13
	750	10,42	0,209	9,979	2,095	101,26	2,99	7,13
	1000	10,04	0,195	9,669	1,892	84,11	2,99	7,13
	1500	9,56	0,174	9,276	1,621	65,42	2,99	7,12
	2000	9,36	0,167	9,105	1,522	52,23	2,99	7,12
	3000	9,04	0,154	8,828	1,365	38,85	2,98	7,11
	4000	8,80	0,138	8,635	1,191	33,39	2,98	7,10
	5000	8,66	0,13	8,516	1,107	28,75	2,98	7,09
	6000	8,56	0,123	8,431	1,042	25,44	2,98	7,09
	7500	8,46	0,12	8,333	1,007	21,06	2,97	7,08
	10000	8,36	0,12	8,24	0,991	16,05	2,96	7,05
	15000	8,34	0,125	8,21	1,029	10,31	2,94	7,01
	V = 4 V E = 9,52x10 ⁵ V/cm	500	11,04	0,231	10,479	2,424	131,30	3,99
600		10,72	0,222	10,215	2,27	116,85	3,99	9,51
750		10,38	0,211	9,935	2,101	100,97	3,99	9,50
1000		9,96	0,192	9,603	1,85	85,98	3,99	9,50
1500		9,51	0,174	9,228	1,611	65,85	3,99	9,49
2000		9,19	0,163	8,949	1,466	54,25	3,99	9,49
3000		8,85	0,151	8,652	1,308	40,54	3,98	9,48
4000		8,70	0,133	8,548	1,137	34,97	3,98	9,47
5000		8,52	0,123	8,392	1,036	30,72	3,97	9,46
6000		8,40	0,118	8,283	0,983	26,96	3,97	9,45
7500		8,34	0,115	8,229	0,954	22,24	3,96	9,44
10000		8,23	0,112	8,127	0,911	17,46	3,95	9,42
15000		8,12	0,113	8,017	0,906	11,70	3,93	9,36



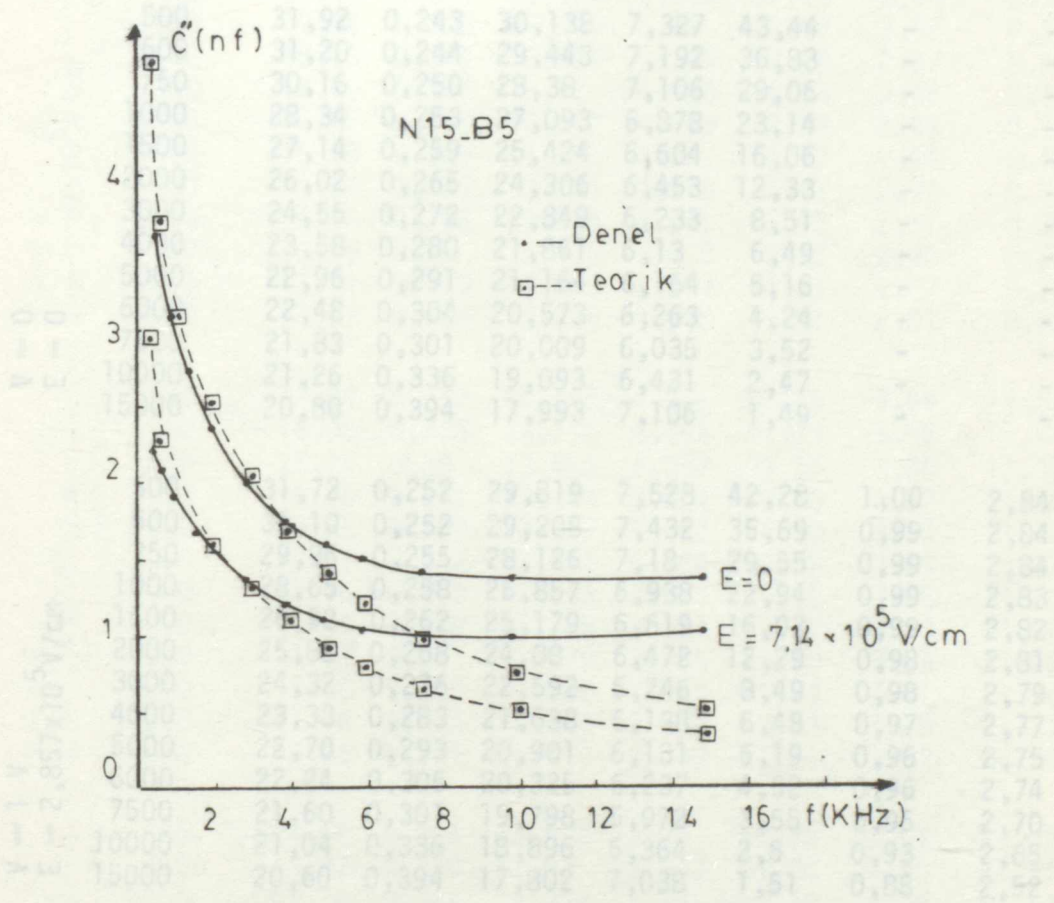
Şekil-34 N15-B5 örneğinde kapasitenin sanal bileşeninin frekans spektrumu.

Şekil-33 N15-B5 örneğinde gerçel kapasite bileşeninin frekans spektrumu.

TABLO-9

N17-06 Numaralı Örnekte d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

E	f	C ₀	tgδ	C'	C''	R _p	V _{örnek}	E _{örnek}
	(Hz)	(nF)		(nF)	(nF)	(kΩ)	(Volt)	x10 ⁵ V/cm



Şekil-34 N15-B5 örneğinde kapasitenin sanal bileşeninin frekans spektrumu

f (kHz)	C'' (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (kΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} (x10 ⁵ V/cm)
7500	31,92	0,243	30,138	7,327	43,44	-	-
10000	31,20	0,244	29,443	7,192	36,33	-	-
15000	30,16	0,250	28,38	7,106	29,06	-	-
2000	28,34	0,257	27,093	6,978	23,14	-	-
3000	27,14	0,257	25,424	6,604	16,06	-	-
4000	26,02	0,265	24,306	6,453	12,33	-	-
5000	24,55	0,272	22,913	6,333	8,51	-	-
6000	23,58	0,280	21,713	6,243	6,49	-	-
7000	22,96	0,291	20,713	6,173	5,16	-	-
8000	22,48	0,304	20,573	6,263	4,24	-	-
9000	21,83	0,301	20,009	6,035	3,52	-	-
10000	21,26	0,336	19,893	6,421	2,47	-	-
11000	20,80	0,394	17,993	7,106	1,49	-	-
12000	19,72	0,252	29,619	7,528	42,28	1,00	2,84
13000	19,17	0,252	29,265	7,432	35,69	0,99	2,84
14000	18,62	0,255	28,126	7,18	29,55	0,99	2,84
15000	18,08	0,258	27,887	6,988	24,91	0,99	2,83
16000	17,54	0,262	27,179	6,618	20,91	0,99	2,83
17000	17,00	0,265	26,819	6,478	17,49	0,98	2,82
18000	16,46	0,268	26,459	6,338	14,07	0,98	2,81
19000	15,92	0,271	26,100	6,198	10,65	0,97	2,80
20000	15,38	0,274	25,740	6,058	7,23	0,97	2,79
21000	14,84	0,277	25,381	5,918	3,81	0,97	2,77
22000	14,30	0,280	25,021	5,778	3,39	0,96	2,75
23000	13,76	0,283	24,662	5,638	3,49	0,96	2,74
24000	13,22	0,286	24,302	5,498	3,49	0,96	2,74
25000	12,68	0,289	23,943	5,358	3,49	0,96	2,74
26000	12,14	0,292	23,583	5,218	3,49	0,96	2,74
27000	11,60	0,295	23,224	5,078	3,49	0,96	2,74
28000	11,06	0,298	22,864	4,938	3,49	0,96	2,74
29000	10,52	0,301	22,505	4,798	3,49	0,96	2,74
30000	10,00	0,304	22,145	4,658	3,49	0,96	2,74
31000	9,46	0,307	21,786	4,518	3,49	0,96	2,74
32000	8,92	0,310	21,426	4,378	3,49	0,96	2,74
33000	8,40	0,313	21,067	4,238	3,49	0,96	2,74
34000	7,86	0,316	20,707	4,098	3,49	0,96	2,74
35000	7,32	0,319	20,348	3,958	3,49	0,96	2,74
36000	6,80	0,322	19,988	3,818	3,49	0,96	2,74
37000	6,26	0,325	19,629	3,678	3,49	0,96	2,74
38000	5,72	0,328	19,269	3,538	3,49	0,96	2,74
39000	5,20	0,331	18,910	3,398	3,49	0,96	2,74
40000	4,66	0,334	18,550	3,258	3,49	0,96	2,74
41000	4,14	0,337	18,191	3,118	3,49	0,96	2,74
42000	3,60	0,340	17,831	2,978	3,49	0,96	2,74
43000	3,08	0,343	17,472	2,838	3,49	0,96	2,74
44000	2,54	0,346	17,112	2,698	3,49	0,96	2,74
45000	2,02	0,349	16,753	2,558	3,49	0,96	2,74
46000	1,48	0,352	16,393	2,418	3,49	0,96	2,74
47000	0,96	0,355	16,034	2,278	3,49	0,96	2,74
48000	0,42	0,358	15,674	2,138	3,49	0,96	2,74
49000	0,00	0,361	15,315	1,998	3,49	0,96	2,74
50000	0,00	0,364	14,955	1,858	3,49	0,96	2,74
51000	0,00	0,367	14,596	1,718	3,49	0,96	2,74
52000	0,00	0,370	14,236	1,578	3,49	0,96	2,74
53000	0,00	0,373	13,877	1,438	3,49	0,96	2,74
54000	0,00	0,376	13,517	1,298	3,49	0,96	2,74
55000	0,00	0,379	13,158	1,158	3,49	0,96	2,74
56000	0,00	0,382	12,798	1,018	3,49	0,96	2,74
57000	0,00	0,385	12,439	878	3,49	0,96	2,74
58000	0,00	0,388	12,079	738	3,49	0,96	2,74
59000	0,00	0,391	11,720	598	3,49	0,96	2,74
60000	0,00	0,394	11,360	458	3,49	0,96	2,74

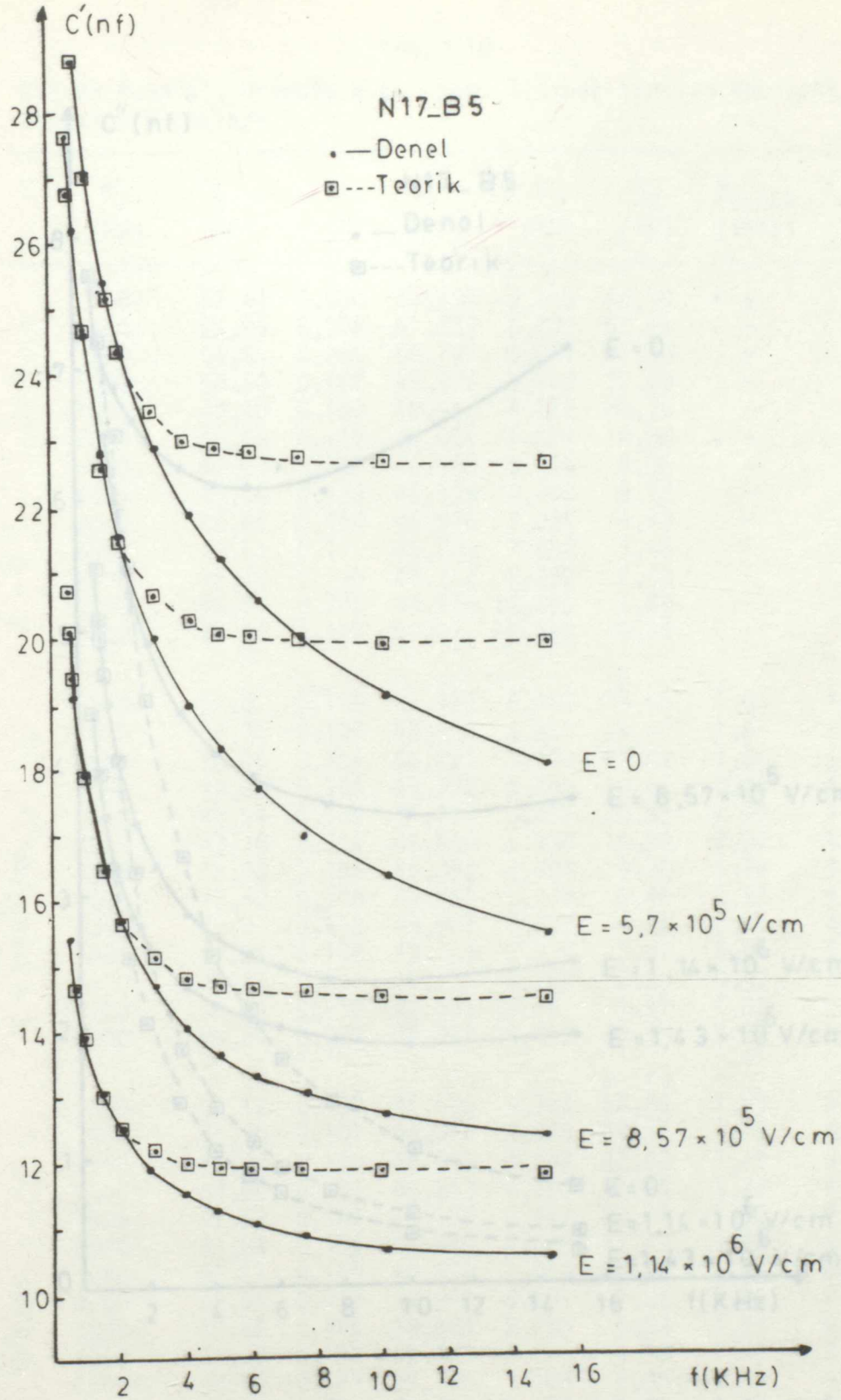
TABLO-9

N17-B5 Numaralı Örnekte d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

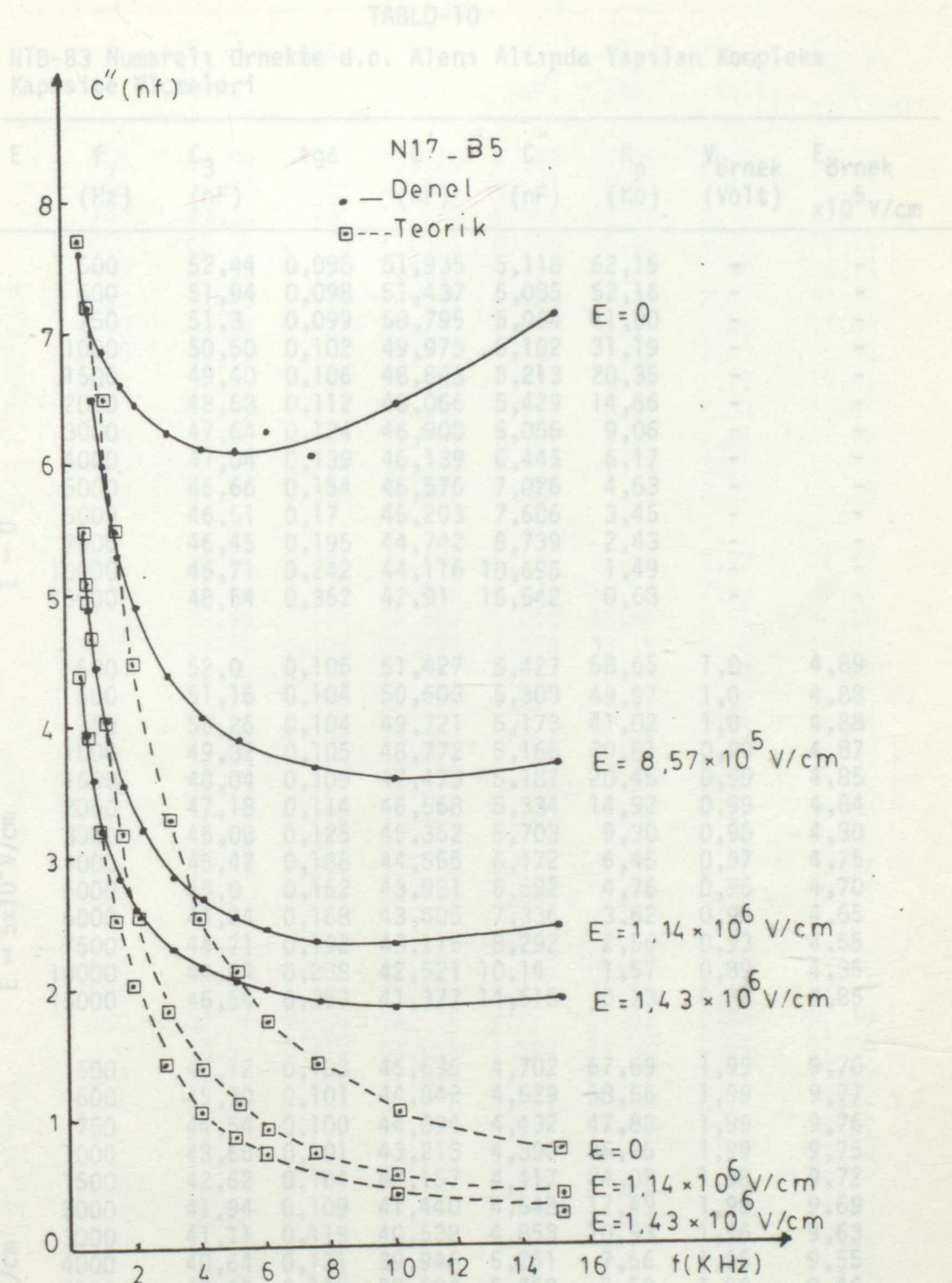
E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ V/cm	
V = 0 E = 0	500	31,92	0,243	30,138	7,327	43,44	-	-	
	600	31,20	0,244	29,443	7,192	36,83	-	-	
	750	30,16	0,250	28,38	7,106	29,06	-	-	
	1000	28,34	0,253	27,093	6,878	23,14	-	-	
	1500	27,14	0,259	25,424	6,604	16,06	-	-	
	2000	26,02	0,265	24,306	6,453	12,33	-	-	
	3000	24,55	0,272	22,849	6,233	8,51	-	-	
	4000	23,58	0,280	21,861	6,13	6,49	-	-	
	5000	22,96	0,291	21,164	6,164	5,16	-	-	
	6000	22,48	0,304	20,573	6,263	4,24	-	-	
	7500	21,83	0,301	20,009	6,035	3,52	-	-	
	10000	21,26	0,336	19,093	6,431	2,47	-	-	
	15000	20,80	0,394	17,993	7,106	1,49	-	-	
	V = 1 V E = 2,857x10 ⁵ V/cm	500	31,72	0,252	29,819	7,528	42,28	1,00	2,84
		600	31,10	0,252	29,208	7,432	35,69	0,99	2,84
750		29,96	0,255	28,126	7,18	29,55	0,99	2,84	
1000		28,65	0,258	26,857	6,938	22,94	0,99	2,83	
1500		26,92	0,262	25,179	6,619	16,03	0,99	2,82	
2000		25,82	0,268	24,08	6,472	12,29	0,98	2,82	
3000		24,32	0,276	22,592	6,246	8,49	0,98	2,81	
4000		23,33	0,283	21,638	6,138	6,48	0,97	2,77	
5000		22,70	0,293	20,901	6,131	5,19	0,96	2,75	
6000		22,24	0,306	20,325	6,237	4,52	0,96	2,74	
7500		21,60	0,301	19,798	5,972	3,55	0,95	2,70	
10000		21,04	0,336	18,896	6,364	2,5	0,93	2,65	
15000		20,60	0,394	17,802	7,038	1,51	0,88	2,52	
V = 2 V E = 5,7x10 ⁵ V/cm		500	-	-	-	-	-	-	-
		600	29,92	0,285	27,659	7,906	33,55	1,99	5,68
	750	28,36	0,29	26,155	7,593	27,94	1,99	5,67	
	1000	26,82	0,298	24,622	7,356	21,64	1,98	5,66	
	1500	24,87	0,303	22,774	6,908	15,36	1,97	5,64	
	2000	23,61	0,309	21,547	6,665	11,94	1,97	5,62	
	3000	21,96	0,314	19,981	6,288	8,44	1,95	5,58	
	4000	20,86	0,314	18,944	6,024	6,60	1,94	5,55	
	5000	20,20	0,326	18,259	5,952	5,35	1,93	5,51	
	6000	19,70	0,333	17,724	5,917	4,48	1,91	5,47	
	7500	19,06	0,369	16,77	6,196	3,42	1,90	5,40	
	10000	18,40	0,353	16,359	5,777	2,75	1,86	5,33	
	15000	17,83	0,394	15,423	6,091	1,74	1,79	5,13	

TABLO-9/1

F	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ V/cm
V = 3 V E = 3,57x10 ⁵ V/cm	600	-	-	-	-	-	-	-
	750	21,40	0,341	19,166	6,542	32,43	2,98	8,52
	1000	19,94	0,333	17,939	5,99	26,57	2,98	8,51
	1500	18,23	0,321	16,524	5,308	19,99	2,97	8,49
	2000	17,26	0,312	15,72	4,919	16,18	2,96	8,47
	3000	16,02	0,299	14,697	4,409	12,03	2,95	8,43
	4000	15,28	0,288	14,105	4,07	9,77	2,94	8,40
	5000	14,84	0,285	13,721	3,918	8,12	2,93	8,37
	6000	14,50	0,295	13,334	3,941	6,73	2,91	8,32
	7500	14,16	0,28	13,129	3,678	5,77	2,90	8,28
	10000	13,74	0,279	12,743	3,563	4,47	2,87	8,20
15000	13,37	0,296	12,286	3,648	2,91	2,81	8,02	
V = 4 V E = 1,143x10 ⁶ V/cm	600	17,04	0,319	15,465	4,935	53,75	3,99	11,39
	750	16,06	0,302	14,716	4,446	47,73	3,98	11,38
	1000	15,14	0,29	13,963	4,052	39,27	3,98	11,37
	1500	14,06	0,271	13,094	3,554	29,85	3,97	11,35
	2000	13,41	0,259	12,562	3,263	24,38	3,97	11,34
	3000	12,61	0,242	11,911	2,884	18,39	3,96	11,31
	4000	12,16	0,233	11,533	2,687	14,80	3,95	11,28
	5000	11,84	0,229	11,246	2,583	12,32	3,94	11,25
	6000	11,62	0,221	11,075	2,455	10,80	3,93	11,22
	7500	11,40	0,215	10,892	2,351	9,03	3,91	11,18
	10000	11,14	0,215	10,643	2,298	6,93	3,89	11,11
15000	10,96	0,229	10,411	2,339	4,44	3,83	10,94	
V = 5 V E = 1,429x10 ⁶ V/cm	600	14,64	0,291	13,495	3,93	60,49	4,98	14,24
	750	13,92	0,278	12,92	3,593	59,06	4,98	14,24
	1000	13,16	0,261	12,316	3,222	49,39	4,98	14,23
	1500	12,28	0,245	11,584	2,839	37,37	4,97	14,21
	2000	11,80	0,232	11,197	2,597	30,63	4,97	14,19
	3000	11,16	0,213	10,671	2,283	23,23	4,96	14,16
	4000	10,78	0,208	10,33	2,154	18,47	4,95	14,13
	5000	10,54	0,201	10,13	2,037	15,62	4,94	14,11
	6000	10,40	0,197	10,01	1,974	13,44	4,93	14,08
	7500	10,20	0,191	9,839	1,882	11,27	4,91	14,04
	10000	10,20	0,189	9,671	1,835	8,67	4,89	13,96
15000	9,86	0,198	9,484	1,886	5,62	4,83	13,79	



Şekil-35 N17-B5 örneğinde kapasitenin gerçel bileşeninin frekans spektrumu



Şekil-36 N17-B5 örneğinde kapasitenin sanal bileşeninin frekans spektrumu

TABLO-10

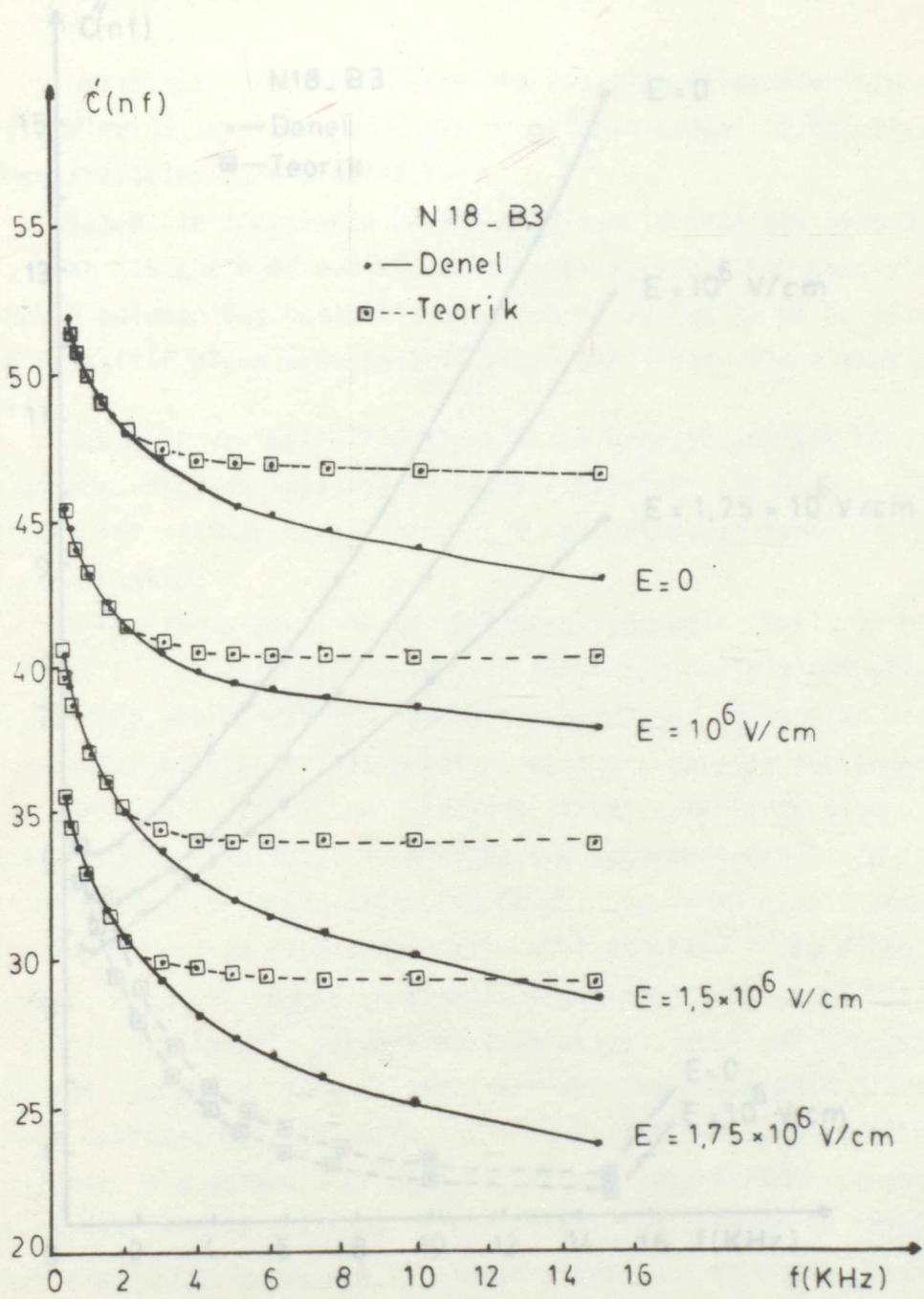
N18-B3 Numaralı Örnekte d.c. Alanı Altında Yapılan Kompleks Kapasite Ölçmeleri

E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ V/cm	
V = 0 E = 0	500	52,44	0,098	51,935	5,118	62,19	-	-	
	600	51,94	0,098	51,437	5,085	52,16	-	-	
	750	51,3	0,099	50,795	5,064	41,90	-	-	
	1000	50,50	0,102	49,979	5,102	31,19	-	-	
	1500	49,40	0,106	48,843	5,213	20,35	-	-	
	2000	48,63	0,112	48,066	5,429	14,66	-	-	
	3000	47,64	0,124	46,903	5,356	9,06	-	-	
	4000	47,04	0,139	46,139	6,445	6,17	-	-	
	5000	46,66	0,154	45,576	7,026	4,53	-	-	
	6000	46,51	0,17	45,203	7,686	3,45	-	-	
	7500	46,45	0,195	44,742	8,739	2,43	-	-	
	10000	46,71	0,242	44,116	10,696	1,49	-	-	
	15000	48,54	0,362	42,91	15,542	0,68	-	-	
	V = 1V E = 5x10 ⁵ V/cm	500	52,0	0,105	51,427	5,427	58,65	1,0	4,89
		600	51,16	0,104	50,603	5,303	49,97	1,0	4,88
750		50,26	0,104	49,721	5,173	41,02	1,0	4,88	
1000		49,32	0,105	48,772	5,166	30,81	0,99	4,87	
1500		48,04	0,109	47,473	5,187	20,45	0,99	4,85	
2000		47,18	0,114	46,568	5,334	14,92	0,99	4,84	
3000		46,08	0,125	45,362	5,703	9,30	0,98	4,80	
4000		45,42	0,138	44,565	6,172	6,45	0,97	4,75	
5000		45,0	0,152	43,981	6,692	4,76	0,96	4,70	
6000		44,84	0,168	43,605	7,336	3,62	0,95	4,65	
7500		44,71	0,192	43,115	8,292	2,56	0,93	4,55	
10000		44,94	0,238	42,521	10,14	1,57	0,89	4,35	
15000		46,54	0,353	41,377	14,615	0,73	0,78	3,85	
V = 2V ₆ E = 10 ⁶ V/cm		500	46,12	0,103	45,635	4,702	67,69	1,99	9,78
		600	45,30	0,101	44,842	4,529	58,56	1,99	9,77
	750	44,54	0,100	44,094	4,432	47,88	1,99	9,76	
	1000	43,66	0,101	43,213	4,390	36,25	1,99	9,75	
	1500	42,62	0,104	42,157	4,417	24,02	1,98	9,72	
	2000	41,94	0,109	41,440	4,548	17,49	1,98	9,69	
	3000	41,11	0,119	40,528	4,853	10,93	1,96	9,63	
	4000	40,64	0,131	39,946	5,261	7,56	1,95	9,55	
	5000	40,46	0,145	39,624	5,753	5,53	1,93	9,46	
	6000	40,43	0,161	39,407	6,346	4,18	1,91	9,36	
	7500	40,42	0,183	39,105	7,169	2,96	1,87	9,18	
	10000	40,72	0,225	38,749	8,738	1,82	1,80	8,83	
	15000	42,1	0,332	37,914	12,579	0,84	1,62	7,92	

TABLO-10/1

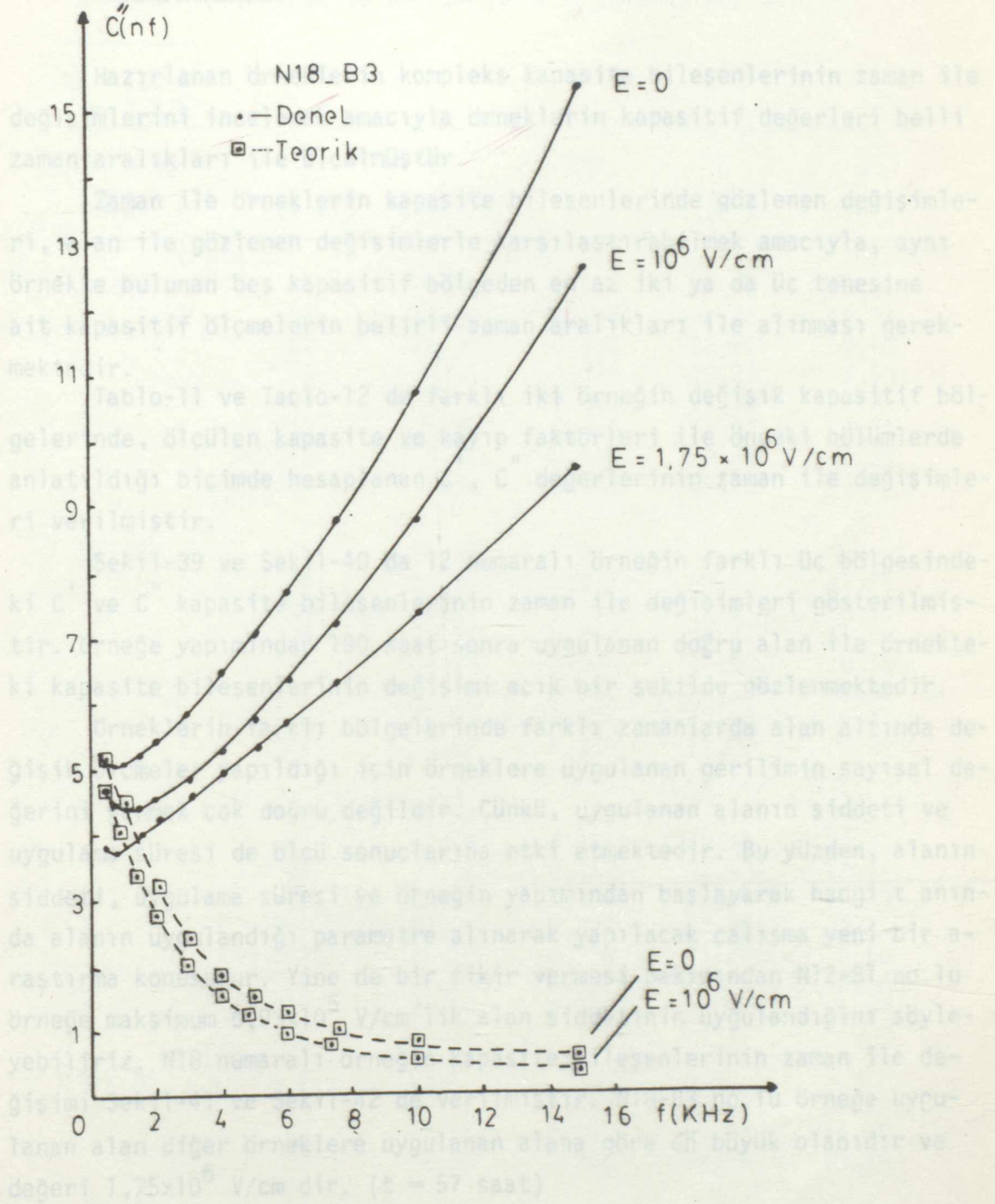
E	f (Hz)	C ₃ (nF)	tgδ	C' (nF)	C'' (nF)	R _p (KΩ)	V _{örnek} (Volt)	E _{örnek} x10 ⁵ V/cm	
V = 2,5 V E = 1,25x10 ⁶ V/cm	500	45,59	0,105	45,090	4,747	67,05	2,49	12,22	
	600	44,38	0,102	43,917	4,504	58,88	2,49	12,21	
	750	43,36	0,101	42,915	4,368	48,53	2,49	12,20	
	1000	42,46	0,103	42,005	4,368	36,44	2,49	12,19	
	1500	41,36	0,109	40,873	4,46	23,79	2,48	12,15	
	2000	40,63	0,115	40,096	4,625	17,20	2,47	12,11	
	3000	39,68	0,127	39,047	4,968	10,68	2,45	12,03	
	4000	39,15	0,141	38,379	5,438	7,32	2,43	11,93	
	5000	38,8	0,157	37,864	5,951	5,35	2,41	11,81	
	6000	38,64	0,173	37,509	6,512	4,07	2,38	11,68	
	7500	38,46	0,199	36,993	7,364	2,88	2,34	11,46	
	10000	38,56	0,244	36,385	8,894	1,79	2,25	11,02	
	15000	39,7	0,359	35,162	12,630	0,84	2,02	9,90	
	V = 3 V E = 1,5x10 ⁶ V/cm	500	40,92	0,101	40,499	4,125	77,15	2,99	14,67
		600	39,89	0,102	39,478	4,032	65,77	2,99	14,66
750		38,98	0,104	38,562	4,012	52,89	2,99	14,65	
1000		37,78	0,108	37,337	4,065	39,15	2,98	14,63	
1500		36,68	0,116	36,187	4,219	25,14	2,98	14,60	
2000		35,74	0,126	35,175	4,457	17,85	2,97	14,54	
3000		34,62	0,142	33,933	4,825	10,99	2,95	14,44	
4000		33,84	0,159	32,998	5,268	7,55	2,92	14,33	
5000		33,31	0,177	32,296	5,720	5,56	2,90	14,20	
6000		32,90	0,195	31,685	6,203	4,28	2,87	14,05	
7500		32,64	0,223	31,093	6,934	3,06	2,82	13,80	
10000		32,54	0,273	30,276	8,277	1,92	2,72	13,32	
15000		33,2	0,392	28,774	11,284	0,94	2,47	12,13	
V = 3,5 V E = 1,75x10 ⁶ V/cm		500	36,23	0,105	35,829	3,788	34,02	3,49	17,12
		600	35,28	0,106	34,883	3,718	71,34	3,49	17,11
	750	34,34	0,109	33,932	3,72	57,03	3,49	17,10	
	1000	33,44	0,115	33,001	3,806	41,82	3,48	17,08	
	1500	32,33	0,126	31,818	4,034	26,30	3,47	17,03	
	2000	31,39	0,138	30,797	4,271	18,63	3,46	16,97	
	3000	29,9	0,157	29,179	4,586	11,57	3,44	16,87	
	4000	29,0	0,175	28,132	4,941	8,05	3,42	16,74	
	5000	28,42	0,194	27,383	5,328	5,97	3,39	16,60	
	6000	28,06	0,212	26,847	5,706	4,65	3,36	16,45	
	7500	27,68	0,240	26,16	6,304	3,37	3,30	16,20	
	10000	27,38	0,289	25,264	7,31	2,18	3,21	15,72	
	15000	27,66	0,401	23,826	9,557	1,11	2,97	14,54	

Sekil-37 NiB-23 örneğinde kapasitenin gerçe? bileşeninin frekans spektrumu



Şekil-37 N18-B3 örneğinde kapasitenin gerçel bileşeninin frekans spektrumu

IV.C ÖRNEKLERİN KOMPLEKS KAPASİTELERİNİN ZAMAN BAĞLI FREKANS SPECTRUMLARI



Şekil-38 N18-B3 örneğinde kapasitenin sanal bileşeninin frekans spektrumu

IV.C ÖRNEKLERİN KOMPLEKS KAPASİTELERİNİN ZAMANA BAĞLI FREKANS N12 SPEKTRUMLARI

Hazırlanan örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin zaman ile değişimlerini incelemek amacıyla örneklerin kapasitif değerleri belli zaman aralıkları ile ölçülmüştür.

Zaman ile örneklerin kapasite bileşenlerinde gözlenen değişimleri, alan ile gözlenen değişimlerle karşılaştırabilmek amacıyla, aynı örnekte bulunan beş kapasitif bölgeden en az iki ya da üç tanesine ait kapasitif ölçmelerin belirli zaman aralıkları ile alınması gerekmektedir.

Tablo-11 ve Tablo-12 de farklı iki örneğin değişik kapasitif bölgelerinde, ölçülen kapasite ve kayıp faktörleri ile önceki bölümlerde anlatıldığı biçimde hesaplanan C' , C'' değerlerinin zaman ile değişimleri verilmiştir.

Şekil-39 ve Şekil-40 da 12 numaralı örneğin farklı üç bölgesindeki C' ve C'' kapasite bileşenlerinin zaman ile değişimleri gösterilmiştir. Örneğe yapımından 190 saat sonra uygulanan doğru alan ile örnekteki kapasite bileşenlerinin değişimi açık bir şekilde gözlenmektedir.

Örneklerin farklı bölgelerinde farklı zamanlarda alan altında değişik ölçmeler yapıldığı için örneklere uygulanan gerilimin sayısal değerini vermek çok doğru değildir. Çünkü, uygulanan alanın şiddeti ve uygulama süresi de ölçü sonuçlarına etki etmektedir. Bu yüzden, alanın şiddeti, uygulama süresi ve örneğin yapımından başlayarak hangi t anında alanın uygulandığı parametre alınarak yapılacak çalışma yeni bir araştırma konusudur. Yine de bir fikir vermesi bakımından N12-B1 no.lu örneğe maksimum $6,93 \times 10^5$ V/cm lik alan şiddetinin uygulandığını söyleyebiliriz. N18 numaralı örneğin kapasite bileşenlerinin zaman ile değişimi Şekil-41 ve Şekil-42 de verilmiştir. N18-B3 no.lu örneğe uygulanan alan diğer örneklere uygulanan alana göre en büyük olanıdır ve değeri $1,75 \times 10^6$ V/cm dir. ($t = 57$ saat)

310	19,16	0,231	18,09	4,18
364	19,00	0,234	18,01	4,23

Örneklerle gerilim uygulandığını göstermektedir.

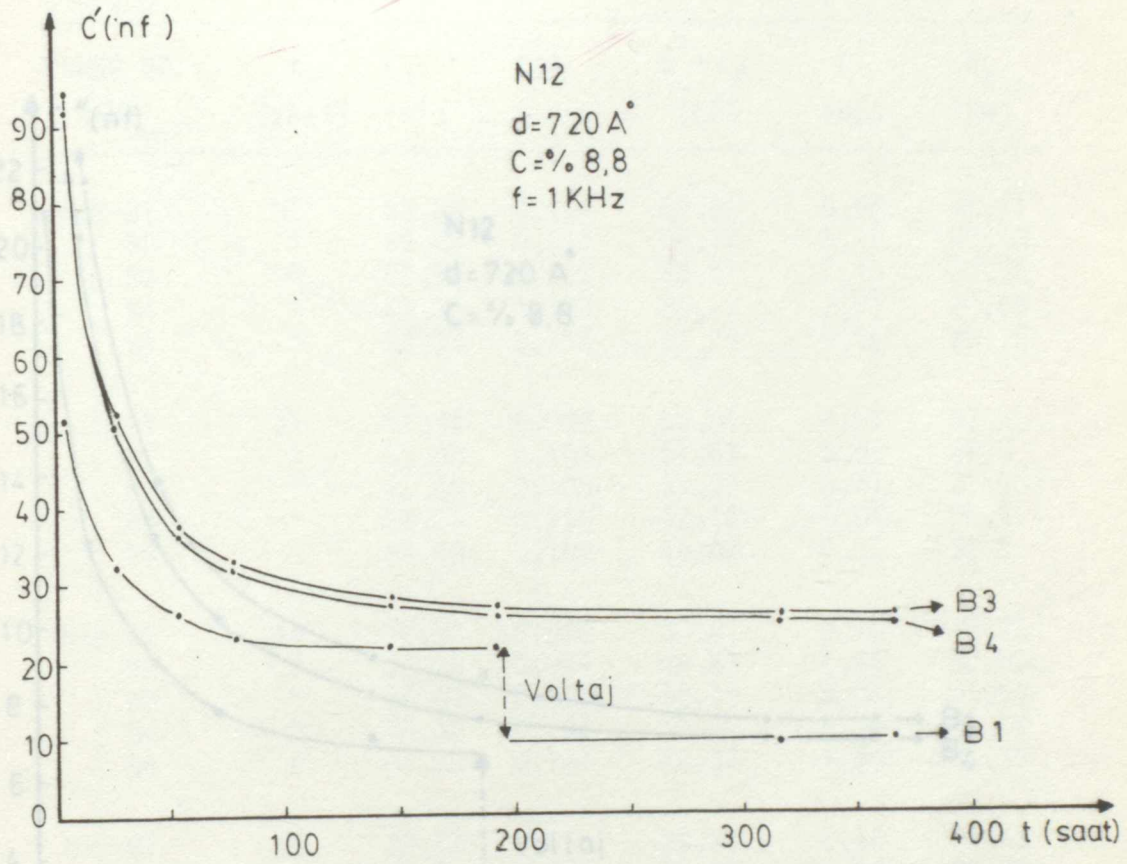
TABLO-11

N12 Örneğinde Kapasite Bileşenlerinin Zamanla Değişimi

$d = 720 \text{ A}^0$
 $C = \% 8,8$

ÖRNEK NO.	t	C_3	$\tan \delta$	C'	C''
N12	(saat)	(nF)		(nF)	(nF)
N12-B1	4	51,58	0,57	41,03	20,81
	24	32,50	0,454	26,94	12,24
	54	26,24	0,408	22,49	9,18
	78	23,16	0,376	20,29	7,63
	144	22,1	0,361	19,55	7,04
	192	20,22	0,353	17,97	6,36
	318	+ 9,92	+ 0,139	9,73	1,35
	364	9,98	0,145	9,78	1,41
N12-B3	4	91,64	-	-	-
	24	52,16	0,535	40,43	21,71
	54	38,0	0,432	32,6	13,85
	78	33,18	0,404	28,52	11,53
	144	28,23	0,37	24,83	9,19
	192	27,10	0,361	23,97	8,65
	318	25,54	0,315	23,23	9,33
	364	25,42	0,319	23,07	7,37
N12-B4	4	94,34	-	-	-
	24	52,42	0,475	42,76	20,33
	54	37,14	0,383	32,38	12,42
	78	32,34	0,358	28,65	10,28
	144	27,51	0,332	24,73	3,23
	192	26,12	0,319	23,71	7,56
	318	24,8	0,287	22,91	6,59
	364	24,64	0,289	22,73	5,59
N12-B5	4	95,1	-	-	-
	24	59,24	0,457	48,99	22,41
	54	47,56	0,39	41,26	16,13
	78	42,64	0,366	37,59	13,78
	144	+ +	+ +		
	192				
	318	19,06	0,231	18,09	4,18
	364	19,00	0,234	18,01	4,23

+ Örneklerle gerilim uygulandığını göstermektedir.

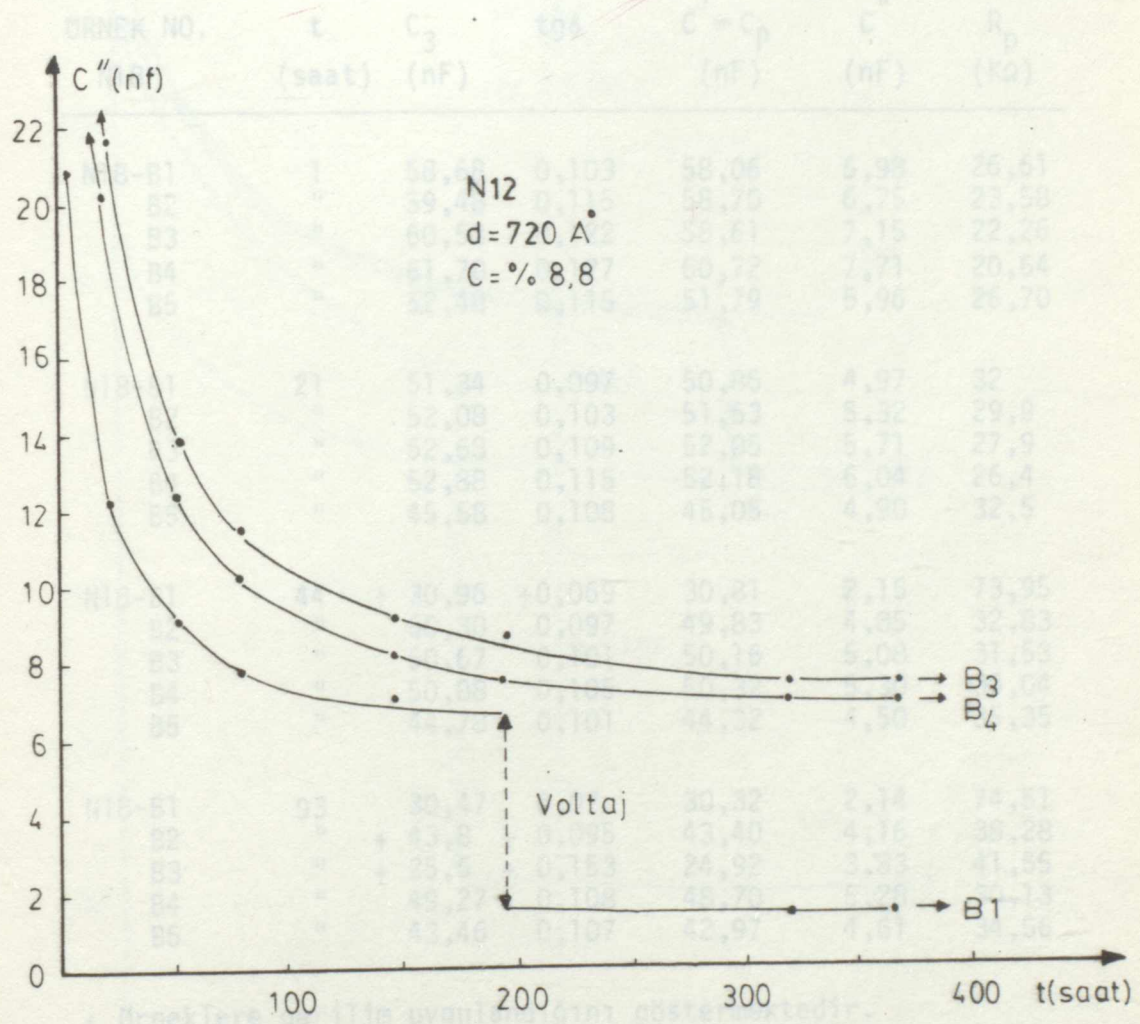


Şekil-39 N12 örneğinde gerçel kapasite bileşeninin zamanla değişimi

Şekil-40 N12 örneğinde sanal kapasite bileşeninin zamanla değişimi

TABLO-12

N-18 Örneğinde Kapasite Bileşenlerinin Zamanla Değişimi

 $d = 200 \text{ A}^\circ$
 $C = 5.0$
 $f = 1 \text{ KHz.}$


Şekil-40 N12 örneğinde sanal kapasite bileşeninin zaman ile değişimi

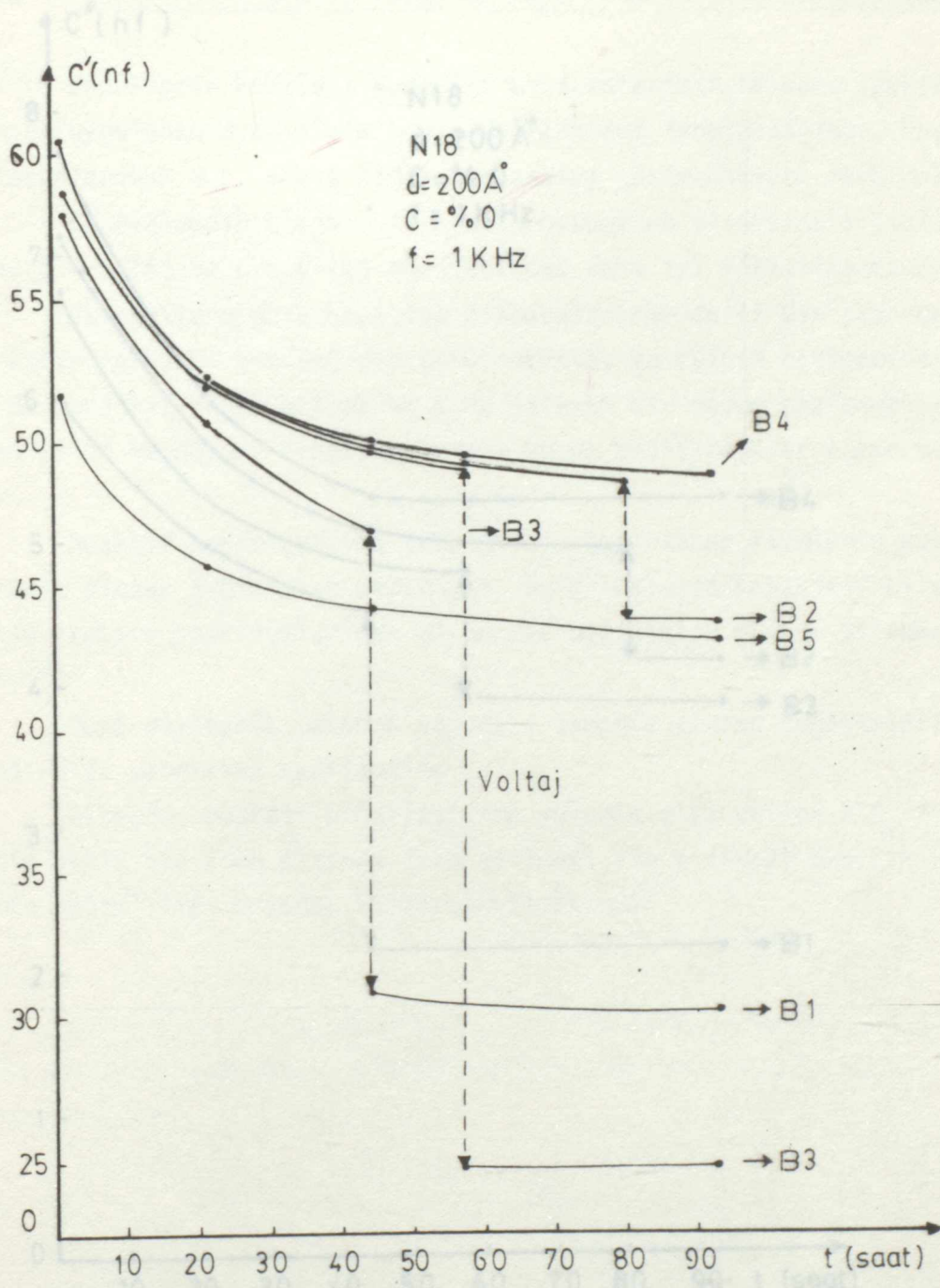
TABLO-12

N-18 Örneğinde Kapasite Bileşenlerinin Zamanla Değişimi

$d = 200 \text{ A}^\circ$
 $C = \% 0$ $f = 1 \text{ KHz.}$

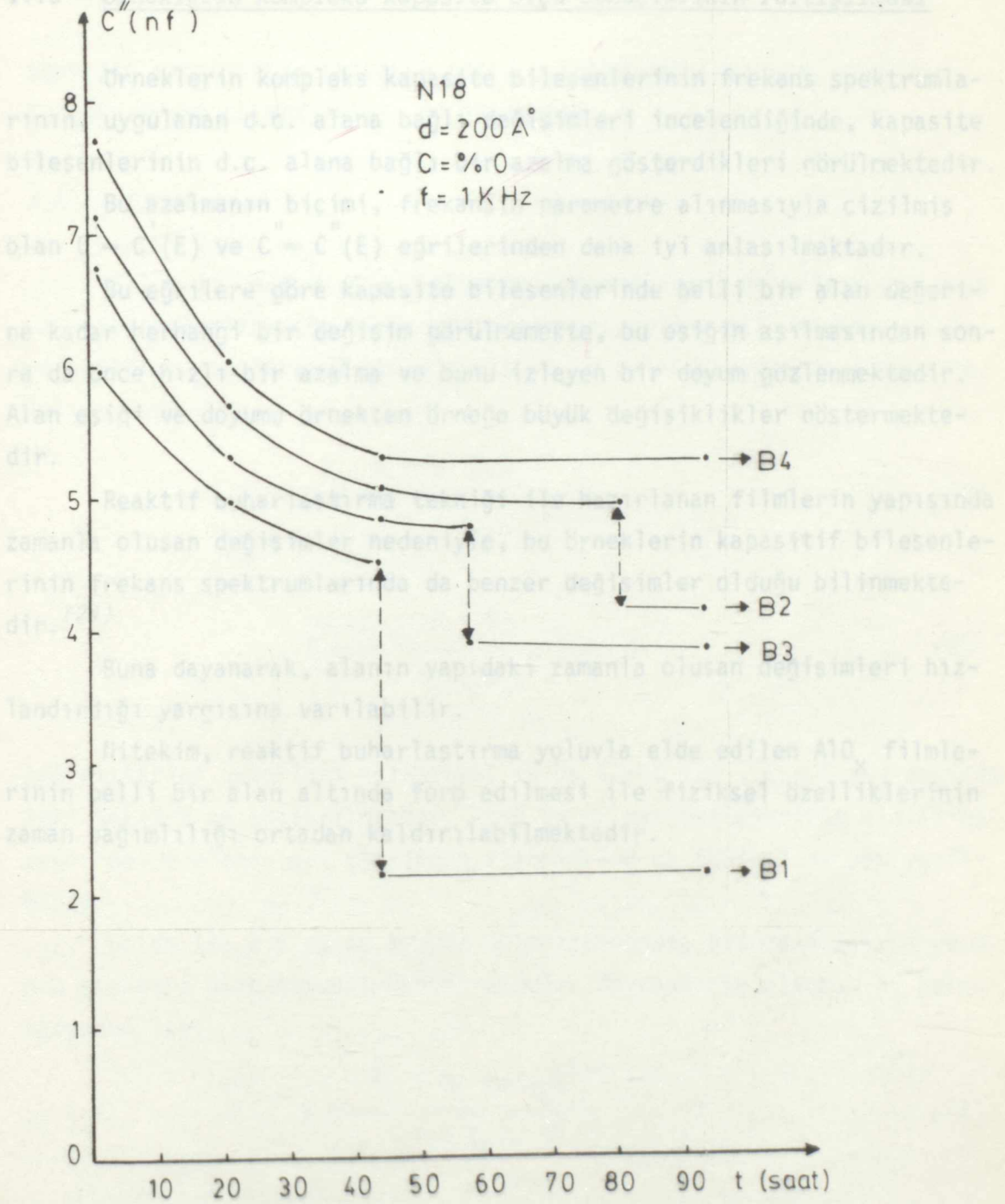
ÖRNEK NO.	t	C_3	$\text{tg}\delta$	$C' = C_p$	C''	R_p
N18	(saat)	(nF)		(nF)	(nF)	($K\Omega$)
N18-B1	1	58,68	0,103	58,06	5,98	26,61
B2	"	59,48	0,115	58,70	6,75	23,58
B3	"	60,53	0,122	58,61	7,15	22,26
B4	"	61,70	0,127	60,72	7,71	20,64
B5	"	52,48	0,115	51,79	5,96	26,70
N18-B1	21	51,34	0,097	50,85	4,97	32
B2	"	52,08	0,103	51,53	5,32	29,9
B3	"	52,63	0,109	52,05	5,71	27,9
B4	"	52,88	0,115	52,18	6,04	26,4
B5	"	45,58	0,108	45,05	4,90	32,5
N18-B1	44	+ 30,96	+0,069	30,81	2,15	73,95
B2	"	50,30	0,097	49,83	4,85	32,83
B3	"	50,67	0,101	50,16	5,08	31,53
B4	"	50,88	0,105	50,32	5,30	30,04
B5	"	44,78	0,101	44,32	4,50	35,35
N18-B1	93	30,47	0,07	30,32	2,14	74,51
B2	"	+ 43,8	+ 0,095	43,40	4,16	38,28
B3	"	+ 25,5	+ 0,153	24,92	3,83	41,55
B4	"	49,27	0,108	48,70	5,28	30,13
B5	"	43,46	0,107	42,97	4,61	34,56

+ Örneklerle gerilim uygulandığını göstermektedir.



Şekil-41 N18 örneğinde gerçel kapasite bileşeninin zaman ile değişimi

IV.D Örneklerin Kompleks Kapasite Bileşenlerinin Zamanla Değişimi



Şekil-42 N18 örneğinde sanal kapasite bileşeninin zaman ile değişimi

IV.D Örneklerin Kompleks Kapasite Ölçü Sonuçlarının Tartışılması

Örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin frekans spektrumlarının, uygulanan d.c. alana bağlı değişimleri incelendiğinde, kapasite bileşenlerinin d.c. alana bağlı bir azalma gösterdikleri görülmektedir.

Bu azalmanın biçimi, frekansın parametre alınmasıyla çizilmiş olan $C' = C'(E)$ ve $C'' = C''(E)$ eğrilerinden daha iyi anlaşılmaktadır.

Bu eğrilere göre kapasite bileşenlerinde belli bir alan değerine kadar herhangi bir değişim görülmemekte, bu eşiğin aşılmasından sonra da önce hızlı bir azalma ve bunu izleyen bir doyum gözlenmektedir. Alan eşiği ve doyumu örnekten örneğe büyük değişiklikler göstermektedir.

Reaktif buharlaştırma tekniği ile hazırlanan filmlerin yapısında zamanla oluşan değişimler nedeniyle, bu örneklerin kapasitif bileşenlerinin frekans spektrumlarında da benzer değişimler olduğu bilinmektedir. (24)

Buna dayanarak, alanın yapıdaki zamanla oluşan değişimleri hızlandırdığı yargısına varılabilir.

Nitekim, reaktif buharlaştırma yoluyla elde edilen AlO_x filmlerinin belli bir alan altında form edilmesi ile fiziksel özelliklerinin zaman bağımlılığı ortadan kaldırılabilir.

$$C = \frac{A_1 + B_1 (\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (73)$$

$$C'' = \frac{A_2 - B_2 (\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (74)$$

V. BÖLÜM

KOMPLEKS KAPASİTENİN FREKANSA BAĞLI DEĞİŞİM EĞRİLERİNDEN, ELEKTRİK EŞDEĞER DEVRE ELEMANLARININ BELİRLENMESİ

V.A YÖNTEM

Bölüm III.A.4 de dipol yönelim (oryantasyon) polarizasyonu veya uzay yük polarizasyonu türündeki polarizasyonlara ait relaksasyonlar ve bunların eşdeğerleri ele alınmış ve bu relaksasyonların (Debye relaksasyonu) göre

$$C' = \frac{A + B (\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (62)$$

$$C'' = \frac{A - B}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0) \quad (63)$$

bağıntılarına uydukları açıklanmış ve bu $C' = C'(\omega)$, $C'' = C''(\omega)$ değişimleri Şekil-9 da gösterilmiştir. A, B ve ω_0 parametrelerinin ilgili eşdeğer devre elemanları cinsinden ifadelerine de Tablo-1 de yer verilmiştir.

Bölüm III.A.5 de de arayüz polarizasyonuna ait relaksasyon ve bunun eşdeğeri olan Maxwell-Wagner eşdeğer devresi ele alınmış bu relaksasyonun ise,

$$C' = \frac{A_1 + B_1 (\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (73)$$

$$C'' = \frac{A_2}{(\omega/\omega_0)} + \frac{A_1 - B_1}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0) \quad (74b)$$

bağıntılarına uyduğu açıklanmış, C' ve C'' nün frekansa bu biçimde bağlı değişimleri de Şekil-11 de gösterilmiştir. A_1 , B_1 , A_2 ve ω_0 parametrelerinin, Şekil-10 da görülen Maxwell-Wagner eşdeğer devresine ait

elemanlar cinsinden ifadeleri de sırasıyla (71a), (71b), (71c) ve (72) bağıntılarıyla verilmiştir.

$C' = C'(\omega)$ değişiminin her iki relaksasyon türü içinde aynı olduğu görülmektedir. $C'' = C''(\omega)$ değişimine gelince frekansın büyük değerleri için her iki relaksasyon aynı değişimi göstermekle birlikte, küçük frekanslara gidildikçe Debye relaksasyonuna ait C'' bileşeni sıfıra yaklaşırken, Maxwell-Wagner relaksasyonunda C'' bileşeni, $A_2(\omega/\omega_0)$ teriminin etkisiyle, hızla artmaktadır.

$C' = C'(\omega)$ ve $C'' = C''(\omega)$ denel eğrilerinden, yukarıdaki bağıntılarda yer alan parametrelerin elde edilmesi teorik olarak çok kolaydır. (73) bağıntısına göre

$$\omega = 0 \rightarrow C' = A_1 \quad (112)$$

$$\omega = \infty \rightarrow C' = B_1 \quad (113)$$

$$C' = [A_1 + B_1] / 2 \rightarrow \omega = \omega_0 \quad (114)$$

ilişkileri, (74b) bağıntısına göre de

$$\omega = \omega_0 \rightarrow C'' = A_2 + \frac{A_1 - B_1}{2} \quad (115)$$

ilişkisi vardır. Bu ilişkilerin sırayla kullanılması ile $C' = C'(\omega)$ eğrilerinden önce A_1 ve B_1 , sonra da bunlar yardımıyla ω_0 elde edilir. $C'' = C''(\omega)$ eğrisinden ω_0 için okunan C'' ve daha önce bulunan A_1 , B_1 parametrelerinden de A_2 elde edilir.

Debye relaksasyonu için $C' = C'(\omega)$ eğrisi yeterlidir. (112), (113) ve (114) bağıntılarından yararlanılarak A_1 , B_1 ve ω_0 elde edilebilir. Debye relaksasyonunda $A_2 = 0$ olduğundan, (115) bağıntısı yalnızca sağlama işlevini yerine getirir.

Ancak pratikte parametrelerin elde edilmesi bu kadar kolay olamamaktadır. IV. Bölümde verilen denel sonuçlardan görülebileceği gibi, ölçü yapılan frekans aralığı, küçük frekanslar tarafında, tg δ kayıp faktörünün, kapasite köprüsünün ölçü alanının dışında kalması nedeniyle sınırlanmakta, dolayısıyla $C' = C'(\omega)$ ve $C'' = C''(\omega)$ eğrilerinin küçük frekanslar bölgesi çizilememektedir. Ayrıca yine IV. Bölümde veri-

len eğrilerden görülebileceği üzere, yüksek frekanslar bölgesinde, örneklerin hazırlanma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan ve bu çalışmada ele alınmayan etkiler (örneğin dipol yönelme relaksasyonu?) nedeniyle $C' = C'(\omega)$ ve $C'' = C''(\omega)$ eğrilerinde yükselme eğilimleri gözükmemektedir. Bu da (113) ilişkisinin, denel eğriye uygulanmasını zorlaştırmakta ya da tümüyle engel olmaktadır.

Bu bakımdan, söz konusu parametrelerin denel eğrilerden elde edilmesi için, bu çalışmada aşağıda verilen yöntem geliştirilmiştir.

(73) bağıntısının düzenlenmesi ile

$$C' + C'(\omega/\omega_0)^2 = A_1 + B_1(\omega/\omega_0)^2 \quad (116a)$$

$$C'_0 \omega_0^2 + C' \omega^2 = A_1 \omega_0^2 + A_1 \omega_0^2 + B_1 \omega^2 \quad (116b)$$

$$A_1 \omega_0^2 - C'_0 \omega_0^2 + B_1 \omega^2 = C' \omega^2 \quad (116c)$$

bağıntıları elde edilir. $C' = C'(\omega)$ eğrisinden alınan üç ω_i , C_i ($i=1,2,3$) çifti (116c) bağıntısına götürülürse,

$$\begin{bmatrix} 1 & -C'_1 & \omega_1^2 \\ 1 & -C'_2 & \omega_2^2 \\ 1 & -C'_3 & \omega_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \omega_0^2 \\ \omega_0^2 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_1 \omega_1 \\ C'_2 \omega_2 \\ C'_3 \omega_3 \end{bmatrix} \quad (117)$$

denklem sistemi elde edilir.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -C'_1 & \omega_1^2 \\ 1 & -C'_2 & \omega_2^2 \\ 1 & -C'_3 & \omega_3^2 \end{vmatrix} \quad (118a)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} C_1' \omega_1 & -C_1' & \omega_1^2 \\ C_2' \omega_2 & -C_2' & \omega_2^2 \\ C_3' \omega_3 & -C_3' & \omega_3^2 \end{vmatrix} \quad (118b)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & C_1' \omega_1 & \omega_1^2 \\ 1 & C_2' \omega_2 & \omega_2^2 \\ 1 & C_3' \omega_3 & \omega_3^2 \end{vmatrix} \quad (118c)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & -C_1' & C_1' \omega_1 \\ 1 & -C_2' & C_2' \omega_2 \\ 1 & -C_3' & C_3' \omega_3 \end{vmatrix} \quad (118d)$$

determinantları yardımıyla

$$A_1 \omega_0^2 = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad (119)$$

$$\omega_0^2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad (120)$$

$$B_1 = \frac{\Delta_3}{\Delta} \quad (121)$$

olarak çözülür. Bunlara göre A_1 , (119) ve (120) bağıntılarından

$$A_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \quad (122)$$

olarak, ω_0 , (120) bağıntısı uyarınca,

$$\omega_0 = \left[\frac{\Delta_2}{\Delta} \right]^{1/2} \quad (123)$$

olarak elde edilir. B_1 de (121) bağıntısına göre hesaplanır. (74b) bağıntısının düzenlenmesiyle de (127) bağıntısı taraf tarafa çıkarılıp düzenlenirse,

$$A_2 = C''(\omega/\omega_0) - \frac{A_1 - B_1}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0)^2 \quad (124)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı yardımıyla parametresi belirlenir. Bu bağıntı (63) bağıntısı ile karşılaştırılacak olursa, Debye relaksasyonu için $A_2 = 0$ elde edilmesi gerektiği ortaya çıkar.

Reaktif buharlaştırma tekniği ile elde edilen dielektrik filmlerin heterojen yapılara sahip olacakları ve bu nedenle de arayüz polarizasyonlarının etken olduğu Maxwell-Wagner relaksasyonlarının gözlenmesine elverecekleri görüşü IV. Bölümde yer alan $C'' = C''(\omega)$ eğrilerine aykırı düşmemekle birlikte, bu eğrinin yukarıda da değinildiği üzere ölçü yapılmamış bulunulan küçük frekanslar bölgesinde maksimumdan geçerek sıfıra yaklaşabileceği ve dolayısıyla bu relaksasyonun bir debye relaksasyonu görünümü kazanabileceği ileri sürülebilir. Böyle bir durumun ortaya çıkmasının koşulu (124) bağıntısı yardımıyla elde edilecek A_2 parametresinin sıfır olarak hesaplanmasıdır. Bölüm IV.B de görüleceği üzere A_2 parametresi sıfırdan farklı olarak hesaplanmakta ve belirlenen parametreler yardımıyla çizilen teorik Maxwell-Wagner relaksasyon eğrileri, deneysel eğrilere çok iyi bir uyum göstermektedir.

Bu nedenle burada, (73) ve (74b) bağıntılarının A_1 , B_1 , A_2 ve ω_0 parametrelerinden, bu parametrelerin bağlı oldukları, Maxwell-Wagner eşdeğer devre elemanlarını hesaplama yöntemi üzerinde durulacaktır.

$$R_1/R_2 = r \quad (125)$$

tanımı yapılırsa A_1 için verilen (71a) ve A_2 için verilen (71c) bağıntıları

$$(1+r)^2 A_1 = r^2 C_1 + C_2 \quad (126)$$

$$(1+r)^2 A_2 = r C_1 + r C_2 \quad (127)$$

bağıntıları elde edilebilir. Son bağıntı

bağıntılarına dönüştürülebilir. (126) bağıntısının her iki tarafı r ile çarpılır ve bu bağıntıdan (127) bağıntısı taraf tarafa çıkartılıp düzenlenirse,

$$C_1 = \frac{(1+r)(A_2 - rA_1)}{r(1-r)} \quad (128)$$

(127) bağıntısının her iki tarafı r ile çarpılır ve bundan (126) bağıntısı taraf tarafa çıkartılıp düzenlenirse de

$$C_2 = \frac{(1+r)(A_1 - rA_2)}{(1-r)} \quad (129)$$

(128) ve (129) bağıntılarında indirilirse C_1 ve C_2 kapasite devir bağıntıları elde edilir. (128) ve (129) bağıntıları, (71b) ye yerleştirilirse,

$$B_1 = \frac{\frac{(1+r)(A_2 - rA_1)}{r(1-r)} - \frac{(1+r)(A_1 - rA_2)}{(1-r)}}{\frac{(1+r)(A_2 - rA_1)}{r(1-r)} + \frac{(1+r)(A_1 - rA_2)}{(1-r)}} \quad (130a)$$

$$B_1 = \frac{1+r}{1-r} \frac{(A_2 - rA_1)(A_1 - rA_2)}{(A_2 - rA_1) + r(A_1 - rA_2)} \quad (130b)$$

$$B_1 = \frac{1+r}{(1-r)} \frac{A_1 A_2 r^2 - (A_1^2 + A_2^2)r + A_1 A_2}{(1-r^2)A_2} \quad (130c)$$

$$(1-r)^2 B_1 A_2 = A_1 A_2 r^2 - (A_1^2 + A_2^2)r + A_1 A_2 \quad (130d)$$

$$(A_1 A_2 - B_1 A_2)r^2 - (A_1^2 + A_2^2 - 2B_1 A_2)r + A_1 A_2 - B_1 A_2 = 0 \quad (130e)$$

bağıntıları elde edilebilir. Son bağıntı

$$q = \frac{A_1^2 + A_2^2 - 2B_1 A_2}{(A_1 - B_1)A_2} = \frac{(A_1 - A_2)}{(A_1 - B_1)A_2} + 2 \quad (131)$$

yardımla

$$r^2 - qr + 1 = 0 \quad (132)$$

olarak ifade edilebilir. (132) ikinci derece denkleminin

$$r = \frac{q - \sqrt{q^2 - 4}}{2} \quad (133)$$

çözümü (128) ve (129) bağıntılarına götürülürse C_1 ve C_2 kapasite değerleri elde edilmiş olur.

Öte yandan (72) bağıntısı, (125) tanımı yardımıyla

$$R_1 = \frac{1 + r}{\omega_0 (C_1 + C_2)} \quad (134)$$

bağıntısına dönüştürülebilir. ω_0 , r , C_1 ve C_2 bilindiklerine göre buradan R_1 , (125) bağıntısından da R_2 hesaplanır.

$C' = C'(\omega)$ ve $C'' = C''(\omega)$ eğrileri yanı sıra, bu değişime ait $C'' = C''(C')$ Argand eğrisinin de çizilmiş olması durumunda A_1 , B_1 , A_2 ve ω_0 parametrelerinin ilk üçü bu eğriden de elde edilebilir.

Şekil-14 de görüldüğü üzere eğri C' eksenini $C' = B_1$ de keser ve $C' = A_1$ düşey doğrusuna da asimtotik olarak yaklaşır. Bu iki değer in ortalaması olan $C' = [A_1 + B_1]/2$ için C'' nün alacağı değer de $C'' = A_2 + [A_1 - B_1]/2$ dir. Buna göre de C' eksen i üzerinde B_1 ile A_1 in orta noktası merkez alınarak çizilen dairenin maksimum noktası ile C'' eğrisi arasındaki düşey uzaklık A_2 dir. ω_0 ise, $C' = C'(\omega)$ eğrisinden okunacak bir (ω, C') çiftinden yararlanılarak elde edilir. Bunun için (116c) bağıntısının dönüştürülmesiyle sağlanan

$$\omega_0 = \left[\frac{C' - B_1}{A_1 - C'} \right]^{1/2} \omega \quad (135)$$

bağıntısı kullanılabilir.

Ancak küçük frekanslarda ölçü yapılmamış olması, Argand eğrisinin düşey asimptoda çok yaklaşımadan kesilmesine yol açabilecektir. Ayrıca yüksek frekanslarda, özellikle de $C'' = C''(\omega)$ eğrisinde görülen yükselmeler de Argand eğrisinin küçük C' ler tarafındaki görünümünü bozacaktır. Bu bakımdan Argand eğrisinden yararlanılan yöntem, uygulamada zorlukların doğmasına yol açmaktadır.

Bölüm V.B de, $C' = C'(\omega)$ eğrisinden alınan üç (ω, C') değer çifti ve $C'' = C''(\omega)$ eğrisinden alınan bir (ω, C'') değer çiftine dayanan yöntem uygulanacak, yüksek frekans etkilerinden kaçınmak için de küçük frekanslar tarafına ağırlık verilecektir.

V.B YÖNTEMİN DENEYSEL EĞRİLERE UYGULANMASI

Bölüm IV. de değişik koşullarda hazırlanan örneklerin, kapasite köprüsünde elde edilen, kompleks kapasite bileşenlerinin frekans spektrumlarının alan altındaki değişimleri verilmiştir. Bu bölümde ise söz konusu spektrumlara ait eşdeğer devrenin belirlenmesi ve bu devreyi oluşturan elemanların elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylece doğru alanın, frekans spektrumlarında gözlenen etkileri de, eşdeğer devre elemanlarındaki değişimlere indirgenerek incelenebilecektir.

Örnekler IV. Bölümdeki sıra ile ele alınmışlardır. Örneğe ait deneysel $C' = C'(\omega)$ eğrisinden okunan üç ω, C' değer çiftinden, Bölüm V.A da verilen yöntem yardımıyla A_1, B_1 ve $f_0 = \omega_0/2\pi$ parametreleri, $C'' = C''(\omega)$ eğrisinden okunan bir ω, C'' değer çiftinden de A_2 parametresi hesaplanmıştır. A_2 parametreleri için, öngörüldüğü üzere sıfırdan farklı değerler elde edilmiş, böylece söz konusu spektrumların, Maxwell-Wagner relaksasyonuna ait oldukları ve dolayısıyla, eşdeğer devrelerinin de bir Maxwell-Wagner eşdeğer devresi (Şekil-10) olduğu belirlenmiştir.

A_1, B_1, A_2 ve ω_0 parametrelerinden, Maxwell-Wagner eşdeğer devresinin R_1, R_2, C_1, C_2 devre elemanları yine Bölüm V.A da verilen yöntemin uygulanmasıyla elde edilmiştir.

Deneysel eğrilerden okunan değer çiftleri, hesaplanan A_1, B_1, A_2 ve f_0 parametreleri, eşdeğer devre elemanları, örneğe uygulanan doğru ala-

nın şiddetine bağlı olarak sıralanmış ve her örnek için ayrı bir tablo düzenlenmiştir. Bu tablolara ayrıca R_1C_1 , R_2C_2 ve R_2C_2/R_1C_1 büyüklüklerine ait değerler de hesaplanarak eklenmiştir. (Tablo-13, 15, 17, 19, 21 ve 23)

Denel eğrilerden elde edilen A_1 , B_1 , A_2 ve ω_0 parametrelerinin temsil ettiği teorik Maxwell-Wagner relaksasyonu eğrilerinin, denel eğrilerle olan uyumunu göstermek üzere bu parametrelerden (73) ve (74b) bağıntıları yardımıyla teorik $C' = C'(f)$ ve $C'' = C''(f)$ değişimleri elde edilmiş, bu değişimlere ait değerler için ayrı tablolar düzenlenmiş (Tablo-14, 16, 18, 20, 22 ve 24), eğrileri ise yalnız bir örnek için Şekil-43 ve Şekil-44 de diğer örnekler için Bölüm IV de çizilen denel eğrileriyle birlikte verilmiştir.

A_1 , B_1 ve ω_0 parametreleri yardımıyla (63) bağıntısına göre elde edilebilecek teorik $C'' = C''(f)$ değişimi, Debye relaksasyonuna aittir. Bu relaksasyona ait $C'' = C''(f)$ eğrileri, denel $C'' = C''(f)$ eğrilerini karşılayamamakta, buna karşılık Maxwell-Wagner relaksasyonuna ait $C'' = C''(f)$ eğrileri denel eğrilerle iyi bir uyum göstermektedir. Maxwell-Wagner eğrilerine ait değerlerin verildiği tablolarda, teorik Debye eğrilerine ait değerlere de yer verilmiş, ancak yalnızca N13-B3 No.lu örneğe ait teorik Debye eğrisi, IV. Bölüm Şekil-26 da denel ve teorik Maxwell-Wagner $C'' = C''(f)$ eğrileriyle birlikte gösterilmiştir.

Denel $C' = C'(f)$ ve $C'' = C''(f)$ eğrilerinin, bunların düşük frekans bölgelerinden yararlanılarak elde edilen teorik $C' = C'(f)$ ve $C'' = C''(f)$ eğrileriyle karşılaştırılması sonucunda, bazı örneklerin $C' = C'(f)$ denel eğrisinin, yüksek frekanslarda teorik olarak öngörülen asimtotik değerinin altına düşme eğilimi gösterdiği, $C'' = C''(f)$ denel eğrisinin de bir artma eğilimine girdiği gözlemlenmektedir.

Bu eğilimlerin görünür duruma geldiği frekanslar, örneklerin hazırlanma koşullarına ve tazeliklerine göre değişmektedir. 17 ve 18 no. lu örneklerde bu frekanslar, Maxwell-Wagner relaksasyonunun görüldüğü frekansların oldukça yakınlarına kadar inmekte ve denel eğrilerle, teorik eğriler arasındaki özellikle de denel $C'' = C''(f)$ ve teorik $C'' = C''(f)$ arasındaki farkın büyük ölçüde artmasına yol açmaktadır.

Konumuz dışında kalan bu olayın ikinci bir relaksasyona, bir dipol oryantasyon relaksasyonuna ait olduğu düşünülebilir.

TABLO-13

ÖRNEK NO. N12-B1

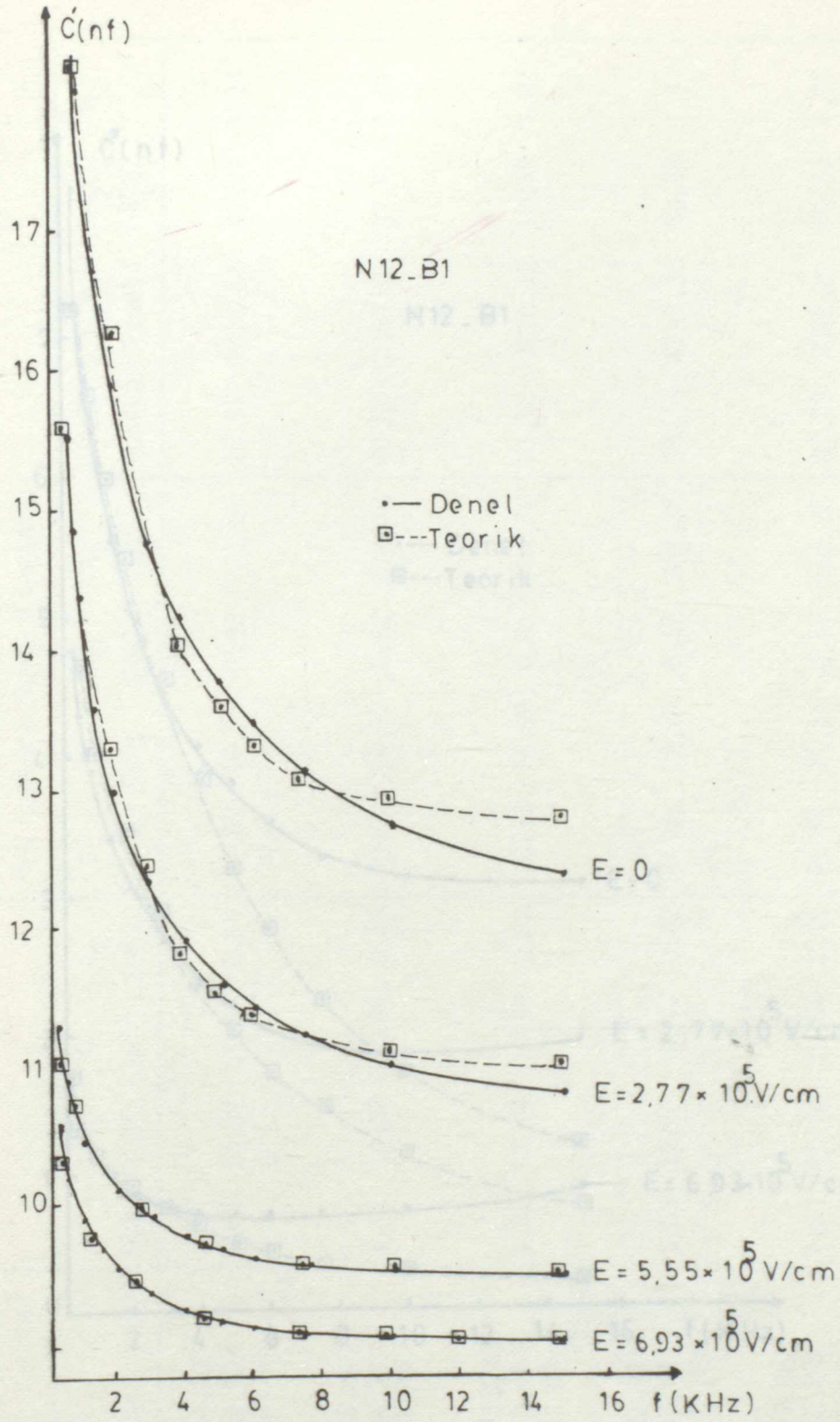
Ex10 ⁵ (V/cm)	Denel Veriler				M-W Eşdeğer Devre Eleman.						h		
	f (Hz)	C (nF)	A ₁ (nF)	B ₁ (nF)	A ₂ (nF)	C ₁ (nF)	C ₂ (nF)	R ₁ (KΩ)	R ₂ (KΩ)	R ₁ C ₁ (µsec)		R ₂ C ₂ (µsec)	$\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$
0	750	19,042	19,98	12,62	1,83	30,62	21,47	1,61	42,62	49,30	915,05	18,56	1,27
2,77	600	15,553	16,04	10,94	1,03	31,52	16,75	1,82	81,73	57,37	1368,98	23,86	1,38
5,55	600	10,912	11,05	9,45	0,37	61,69	11,17	1,14	223,33	70,33	2494,6	30,73	1,48
6,93	600	10,212	10,36	9,02	0,33	66,01	10,45	1,23	283,81	81,19	2965,81	36,53	1,56

TABLO-14

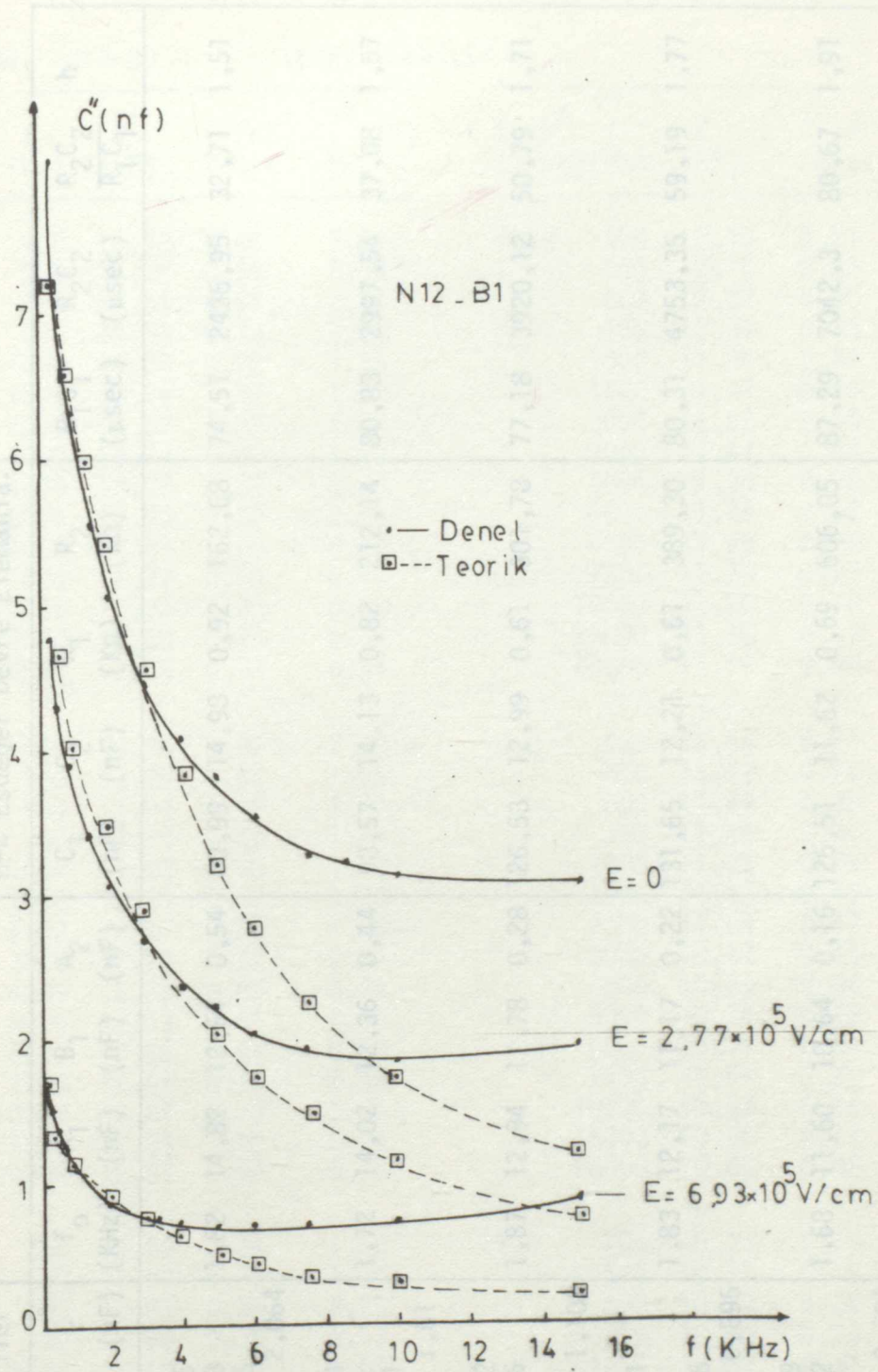
ÖRNEK NO. N12-B1

TEORİK EĞRİLER

$E \times 10^5$ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C'' (nF) M-W	$E \times 10^5$ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C'' (nF) M-W
0	400	19,68	1,14	10,43	6,93	400	10,29	0,30	1,70
	500	19,53	1,76	8,95		500	10,25	0,36	1,48
	600	19,35	2,05	8,05		600	10,21	0,42	1,35
	750	19,15	2,32	7,46		750	10,17	0,47	1,27
	1000	18,46	2,97	6,57		1000	10,02	0,59	1,14
	1500	17,27	3,55	5,94		1500	9,77	0,66	1,04
	2000	16,24	3,68	5,48		2000	9,58	0,66	0,94
	3000	14,83	3,37	4,57		3000	9,35	0,57	0,76
	4000	14,05	2,91	3,81		4000	9,23	0,48	0,62
	5000	13,61	2,50	3,22		5000	9,16	0,41	0,52
	6000	13,34	2,18	2,78		6000	9,12	0,35	0,44
	7500	13,10	1,80	2,28		7500	9,09	0,29	0,36
	10000	12,90	1,39	1,75		10000	9,06	0,22	0,28
	15000	12,75	0,95	1,19		15000	9,04	0,15	0,19
	2,77	400	15,81	1,05		5,82			
500		15,69	1,29	5,10					
600		15,55	1,50	4,67					
750		15,40	1,69	4,41					
1000		14,88	2,14	4,04					
1500		14,01	2,50	3,77					
2000		13,29	2,54	3,50					
3000		12,39	2,28	2,91					
4000		11,83	1,94	2,42					
5000		11,55	1,66	2,04					
6000		11,38	1,42	1,75					
7500		11,23	1,19	1,44					
10000	11,10	0,91	1,10						
15000	11,01	0,62	0,75						
5,55	400	10,99	0,32	2,09					
	500	10,95	0,39	1,81					
	600	10,91	0,45	1,64					
	750	10,87	0,51	1,53					
	1000	10,71	0,65	1,36					
	1500	10,45	0,77	1,25					
	2000	10,22	0,80	1,15					
	3000	9,92	0,73	0,96					
	4000	9,75	0,62	0,80					
	5000	9,66	0,54	0,68					
	6000	9,60	0,46	0,58					
	7500	9,55	0,38	0,48					
	10000	9,51	0,30	0,37					
	15000	9,48	0,20	0,25					



Şekil-43 N12-B1 örneğinde gerçel kapasite bileşeninin denel ve teorik frekans spektrumu



Şekil-44 N12-B1 örneğinde sanal kapasite bileşeninin denel ve teorik frekans spektrumu

Ex10 ⁵ (V/cm)	Dene1 Veriler				M-W Eşdeğer Devre Elemanla.										
	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF)	f ₀ (KHz)	A ₁ (nF)	B ₁ (nF)	A ₂ (nF)	C ₁ (nF)	C ₂ (nF)	R ₁ (KΩ)	R ₂ (KΩ)	R ₁ C ₁ (μsec)	R ₂ C ₂ (μsec)	$\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$	h
0	600	14,605		1,82	14,82	12,64	0,54	80,99	14,93	0,92	162,68	74,51	2436,95	32,71	1,51
	3000	13,228													
	7500	12,765	2,064												
	750														
2,61	600	13,841		1,72	14,02	12,36	0,44	98,57	14,13	0,82	212,14	80,83	2997,54	37,08	1,57
	3000	12,77													
	7500	12,441	1,61												
	750														
5,13	600	12,832		1,87	12,94	11,78	0,28	126,53	12,99	0,61	301,78	77,18	3920,12	50,79	1,71
	3000	12,106													
	7500	11,85	1,102												
	750														
7,69	600	12,071		1,83	12,17	11,17	0,22	131,65	12,21	0,61	389,30	80,31	4753,35	59,19	1,77
	3000	11,44													
	7500	11,226	0,895												
	750														
10,2	600	11,489		1,68	11,60	10,64	0,16	126,51	11,62	0,69	606,05	87,29	7042,3	80,67	1,91
	3000	10,872													
	7500	10,69	0,704												
	750														
12,8	600	10,688		1,77	10,76	10,03	0,12	144,42	10,78	0,58	729,73	83,76	7866,49	93,92	1,97
	3000	10,22													
	7500	10,07	0,554												
	750														

TABLO-16

ÖRNEK NO. N13-B3

TEORİK EĞRİLER

Ex10 ⁵ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C''' (nF) M-W	Ex10 ⁵ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C''' (nF) M-W
0	400	14,72	0,46	2,89	7,69	400	12,12	0,21	1,23
	500	14,67	0,56	2,50		500	12,10	0,25	1,07
	600	14,61	0,65	2,27		600	12,07	0,30	0,98
	750	14,54	0,73	2,06		750	12,04	0,33	0,92
	1000	14,31	0,92	1,89		1000	11,94	0,42	0,83
	1500	13,94	1,07	1,72		1500	11,77	0,49	0,76
	2000	13,63	1,08	1,57		2000	11,62	0,50	0,70
	3000	13,23	0,96	1,29		3000	11,44	0,44	0,60
	4000	13,02	0,82	1,06		4000	11,34	0,38	0,48
	5000	12,90	0,70	0,89		5000	11,29	0,32	0,40
	6000	12,83	0,60	0,77		6000	11,25	0,28	0,35
	7500	12,77	0,50	0,63		7500	11,23	0,23	0,28
	10000	12,71	0,38	0,48		10000	11,20	0,18	0,22
	15000	12,68	0,26	0,32		15000	11,18	0,12	0,15
	20000	12,66	0,20	0,24		20000	11,18	0,09	0,11
	2,61	400	13,94	0,37		2,43	10,2	400	11,55
500		13,89	0,45	1,95	500	11,52		0,26	0,78
600		13,84	0,52	1,77	600	11,49		0,30	0,74
750		13,79	0,58	1,65	750	11,46		0,34	0,71
1000		13,60	0,72	1,47	1000	11,35		0,42	0,68
1500		13,30	0,82	1,32	1500	11,17		0,47	0,65
2000		13,07	0,82	1,20	2000	11,04		0,47	0,60
3000		12,77	0,72	0,97	3000	10,87		0,41	0,49
4000		12,62	0,60	0,79	4000	10,79		0,34	0,41
5000		12,53	0,51	0,66	5000	10,74		0,29	0,34
6000		12,48	0,44	0,57	6000	10,71		0,25	0,29
7500		12,44	0,36	0,46	7500	10,69		0,20	0,24
10000		12,41	0,28	0,35	10000	10,67		0,16	0,18
15000		12,38	0,19	0,24	15000	10,66		0,11	0,12
20000		12,37	0,14	0,18	20000	10,65		0,08	0,09
5,13		400	12,89	0,24	1,55	12,8		400	10,73
	500	12,86	0,29	1,34	500		10,71	0,19	0,63
	600	12,83	0,34	0,21	600		10,69	0,22	0,59
	750	12,80	0,38	1,13	750		10,66	0,25	0,56
	1000	12,68	0,48	1,01	1000		10,59	0,31	0,53
	1500	12,49	0,57	0,92	1500		10,46	0,36	0,51
	2000	12,32	0,58	0,84	2000		10,35	0,36	0,47
	3000	12,11	0,52	0,70	3000		10,22	0,32	0,39
	4000	11,99	0,44	0,58	4000		10,15	0,27	0,33
	5000	11,92	0,38	0,48	5000		10,11	0,23	0,27
	6000	11,88	0,33	0,42	6000		10,09	0,20	0,23
	7500	11,85	0,27	0,34	7500		10,07	0,16	0,19
	10000	11,82	0,21	0,26	10000		10,05	0,13	0,15
	15000	11,80	0,14	0,18	15000		10,04	0,09	0,10
	20000	11,79	0,11	0,13	20000		10,04	0,06	0,08

Ex10 ⁵ (V/cm)	Denel Veriler				M-W Eşdeğer Devre Elemanları.										
	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF)	f ₀ (KHz)	A ₁ (nF)	B ₁ (nF)	A ₂ (nF)	C ₁ (nF)	C ₂ (nF)	R ₁ (KΩ)	R ₂ (KΩ)	R ₁ C ₁ (μsec)	R ₂ C ₂ (μsec)	$\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$	h
0	600	17,898		1,85	18,40	13,05	1,11	41,26	19,10	1,45	76,16	59,33	1454,66	24,31	1,39
	3000	14,534													
	7500	13,363	4,594												
	750														
2,5	600	17,925		1,88	18,42	13,10	1,04	41,85	19,06	1,42	80,18	59,43	1536,25	25,85	1,41
	3000	14,594													
	7500	13,41	4,434												
	750														
5	600	17,737		1,83	18,24	13,00	1,03	41,74	18,88	1,46	82,58	60,94	1559,11	25,53	1,41
	3000	14,427													
	7500	13,296	4,362												
	750														
7,51	600	15,224		1,98	15,55	11,73	0,64	44,83	15,88	1,34	123,83	60,07	1966,42	32,74	1,52
	3000	12,884													
	7500	11,974	2,961												
	750														
10	600	11,734		1,62	11,99	9,87	0,42	52,73	12,14	1,52	234,74	80,15	2849,74	35,55	1,55
	3000	10,349													
	7500	9,965	1,706												
	750														

TABLO-18

ÖRNEK NO. N14-B4

TEORİK EĞRİLER

$E \times 10^5$ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C'' (nF) M-W
0	400	18,17	1,10	6,23
	500	18,04	1,34	5,45
	600	17,90	1,57	4,98
	750	17,74	1,77	4,70
	1000	17,20	2,24	4,29
	1500	16,29	2,62	3,98
	2000	15,53	2,67	3,69
	3000	14,53	2,39	3,08
	4000	14,00	2,04	2,55
	5000	13,70	1,74	2,15
	6000	13,52	1,51	1,85
	7500	13,36	1,25	1,52
	10000	13,23	0,96	1,64
	15000	13,16	0,65	0,79
	20000	13,10	0,49	0,59
	7,51	400	15,40	0,74
500		15,32	0,91	3,45
600		15,22	1,06	3,18
750		15,12	1,20	3,02
1000		14,77	1,54	2,81
1500		14,15	1,84	2,69
2000		13,62	1,91	2,55
3000		12,88	1,76	2,18
4000		12,48	1,52	1,84
5000		12,24	1,31	1,56
6000		12,1	1,14	1,35
7500		11,97	0,94	1,11
10000		11,87	0,73	0,85
15000		11,79	0,5	0,58
20000		11,76	0,37	0,44
10		400	11,87	0,49
	500	11,31	0,60	1,94
	600	11,73	0,69	1,81
	750	11,66	0,77	1,73
	1000	11,40	0,95	1,62
	1500	11,01	1,06	1,51
	2000	10,71	1,04	1,37
	3000	10,35	0,89	1,11
	4000	10,17	0,74	0,90
	5000	10,07	0,62	0,76
	6000	10,01	0,53	0,64
	7500	9,97	0,44	0,53
	10000	9,92	0,33	0,40
	15000	9,89	0,23	0,27
	20000	9,88	0,17	0,20

Ex10 ⁵ (V/cm)	Deneil Veriler				M-W Eşdeğer Devre Elemanları										
	f (Hz)	C ⁱ (nF)	C ⁱⁱ (nF)	f ₀ (KHz)	A ₁ (nF)	B ₁ (nF)	A ₂ (nF)	C ₁ (nF)	C ₂ (nF)	R ₁ (KΩ)	R ₂ (KΩ)	R ₁ C ₁ (μsec)	R ₂ C ₂ (μsec)	$\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$	h
0	600	13,177		1,74	13,55	10,02	0,91	34,84	14,07	1,90	98,05	66,27	1379,56	20,82	1,32
	3000	10,913													
	7500	10,203	3,404												
	750														
2,38	600	12,848		1,76	13,19	9,93	0,90	36,29	13,67	1,85	98,73	67,14	1349,64	20,10	1,30
	3000	10,763													
	7500	10,101	3,286												
	750														
7,14	600	10,207		1,88	10,41	8,21	0,53	35,77	10,65	1,85	157,0	66,17	1672,05	25,27	1,40
	3000	8,828													
	7500	8,338	2,095												
	750														
9,52	600	10,215		1,60	10,51	8,13	0,56	33,0	10,78	2,31	177,0	76,23	1908,06	25,03	1,40
	3000	8,652													
	7500	8,229	2,101												
	750														

Ex10 ⁵ (V/cm)	Denel Veriler				M-W Eşdeğer Devre Elemanları										
	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF)	f ₀ (KHz)	A ₁ (nF)	B ₁ (nF)	A ₂ (nF)	C ₁ (nF)	C ₂ (nF)	R ₁ (KΩ)	R ₂ (KΩ)	R ₁ C ₁ (μsec)	R ₂ C ₂ (μsec)	$\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$	h
0	600	29,443		0,93	32,28	22,57	1,78	69,46	33,43	1,69	93,88	117,39	3138,4	26,74	1,43
	1000	27,093													
	2000	24,306	7,192												
	600														
5,7	600	27,659		0,80	32,02	19,86	1,55	49,29	33,27	2,45	125,56	120,76	4177,38	34,49	1,54
	1000	24,622													
	2000	21,547	7,906												
	600														
8,57	750	19,166		0,82	23,10	14,49	2,06	34,82	24,81	3,39	90,94	108,04	2256,22	19,11	1,28
	1000	17,939													
	2000	15,72	6,542												
	750														
11,43	600	15,465		0,74	17,86	11,84	1,62	31,22	19,07	4,44	129,03	138,62	2460,6	17,75	1,25
	1000	13,963													
	2000	12,562	4,935												
	600														
14,29	600	13,495		0,75	15,33	10,61	1,30	30,70	16,22	4,65	158,27	142,76	2567,14	17,98	1,25
	1000	12,316													
	2000	11,197	3,93												
	600														

TABLO-22

ÖRNEK NO. N17-B5

TEORİK EĞRİLER

$\text{Ex}10^5$ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C''' (nF) M-W	$\text{Ex}10^5$ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C''' (nF) M-W
0	400	30,77	3,51	7,68	11,43	400	16,49	2,52	5,50
	500	30,12	4,04	7,37		500	15,97	2,80	5,18
	600	29,44	4,42	7,19		600	15,47	2,95	4,93
	750	28,79	4,66	7,04		750	15,01	3,01	4,71
	1000	27,09	4,85	6,51		1000	13,96	2,83	4,07
	1500	25,28	4,36	5,47		1500	13,01	2,38	3,18
	2000	24,31	3,72	4,56		2000	12,56	1,96	2,55
	3000	23,42	2,76	3,31		3000	12,18	1,40	1,79
	4000	23,07	2,15	2,57		4000	12,04	1,07	1,37
	5000	22,89	1,75	2,09		5000	11,97	0,87	1,11
	6000	22,80	1,48	1,75		6000	11,93	0,73	0,93
	7500	22,71	1,19	1,41		7500	11,90	0,59	0,75
	10000	22,65	0,90	1,07		10000	11,87	0,44	0,56
	15000	22,60	0,60	0,71		15000	11,86	0,30	0,37
5,7	400	29,60	4,86	7,97	14,3	400	14,29	1,96	4,4
	500	28,62	5,46	7,95		500	13,88	2,18	4,13
	600	27,66	5,83	7,91		600	13,50	2,30	3,93
	750	26,76	6,03	7,80		750	13,14	2,35	3,75
	1000	24,62	5,93	7,18		1000	12,32	2,27	3,24
	1500	22,57	5,06	5,88		1500	11,56	1,89	2,54
	2000	21,55	4,2	4,82		2000	11,20	1,55	2,04
	3000	20,67	3,03	3,45		3000	10,89	1,11	1,44
	4000	20,33	2,34	2,65		4000	10,77	0,86	1,1
	5000	20,17	1,90	2,15		5000	10,72	0,69	0,89
	6000	20,08	1,60	1,80		6000	10,69	0,58	0,74
	7500	20,0	1,29	1,45		7500	10,66	0,47	0,60
	10000	19,94	0,97	1,09		10000	10,64	0,35	0,45
	15000	19,90	0,65	0,73		15000	10,63	0,24	0,3
8,57	400	21,44	3,4	7,62					
	500	20,76	3,83	7,21					
	600	20,09	4,11	6,92					
	750	19,46	4,26	6,67					
	1000	17,94	4,22	5,91					
	1500	16,46	3,62	4,75					
	2000	15,72	3,02	3,86					
	3000	15,08	2,19	2,75					
	4000	14,83	1,69	2,11					
	5000	14,71	1,37	1,71					
	6000	14,64	1,15	1,43					
	7500	14,59	0,93	1,15					
	10000	14,54	0,7	0,87					
	15000	14,51	0,47	0,58					

TABLO-24

ÖRNEK NO. N18-B3

TEORİK EĞRİLER

$Ex10^5$ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C''' (nF) M-W	$Ex10^5$ (V/cm)	f (Hz)	C' (nF)	C'' (nF) Debye	C''' (nF) M-W
0	400	52,21	2,12	5,65	12,5	400	45,15	3,08	4,31
	500	51,83	2,47	5,29		500	44,53	3,46	4,44
	600	51,44	2,73	5,09		600	43,92	3,68	4,50
	750	51,04	2,92	4,94		750	43,35	3,80	4,50
	1000	49,98	3,14	4,55		1000	42,01	3,72	4,21
	1500	48,76	2,93	3,87		1500	40,73	3,16	3,48
	2000	48,07	2,55	3,26		2000	40,10	2,62	2,86
	3000	47,41	1,92	2,39		3000	39,56	1,89	2,05
	4000	47,14	1,51	1,87		4000	39,35	1,46	1,58
	5000	47,01	1,24	1,52		5000	39,25	1,12	1,28
	6000	46,93	1,04	1,28		6000	39,19	0,99	1,07
	7500	46,87	0,84	1,03		7500	39,15	0,80	0,86
	10000	46,82	0,64	0,78		10000	39,11	0,60	0,65
	15000	46,78	0,43	0,52		15000	39,08	0,40	0,43
	5	400	51,63	2,73		5,53	15	400	40,85
500		51,12	3,14	5,38	500	40,16		3,85	4,13
600		50,60	3,44	5,31	600	39,48		4,12	4,34
750		50,09	3,64	5,24	750	38,85		4,25	4,44
1000		48,77	3,80	4,92	1000	37,34		4,18	4,32
1500		47,34	3,43	4,18	1500	35,89		3,56	3,65
2000		46,57	2,94	3,50	2000	37,18		2,96	3,02
3000		45,86	2,18	2,56	3000	34,56		2,13	2,18
4000		45,58	1,71	1,99	4000	34,32		1,65	1,68
5000		45,44	1,39	1,62	5000	34,21		1,34	1,36
6000		45,36	1,17	1,36	6000	34,14		1,12	1,15
7500		45,29	0,95	1,10	7500	34,09		0,90	0,92
10000		45,24	0,71	0,83	10000	34,05		0,68	0,69
15000		45,20	0,48	0,55	15000	34,02		0,46	0,46
10		400	45,83	2,52	4,68	17,5		400	35,96
	500	45,33	2,86	4,59	500		35,43	3,24	3,46
	600	44,84	3,09	4,53	600		34,88	3,54	3,72
	750	44,37	3,22	4,46	750		34,36	3,73	3,88
	1000	43,21	3,26	4,12	1000		33,00	3,86	3,97
	1500	42,04	2,84	3,42	1500		31,56	3,46	3,53
	2000	41,44	2,39	2,82	2000		30,80	2,95	3,00
	3000	40,91	1,75	2,03	3000		30,11	2,18	2,21
	4000	40,70	1,35	1,57	4000		29,83	1,70	1,72
	5000	40,60	1,1	1,27	5000		29,69	1,38	1,40
	6000	40,54	0,93	1,07	6000		29,62	1,16	1,18
	7500	40,50	0,75	0,86	7500		29,55	0,94	0,95
	10000	40,46	0,56	0,65	10000		29,50	0,71	0,72
	15000	40,43	0,38	0,43	15000		29,47	0,48	0,48

V.C EŞDEĞER DEVRE ELEMANLARININ ALANA BAĞLI DEĞİŞİMLERİ VE TARTIŞMASI

Bölüm III.A.5 de ayrıntılı olarak görüldüğü üzere heterojen yapılar da ortaya çıkan Maxwell-Wagner relaksasyonuna ait en basit eşdeğer yapı, ϵ_1 , σ_1 katsayılı ve d_1 kalınlıklı bir tabaka ile ϵ_2 , σ_2 katsayılı ve d_2 kalınlıklı ikinci bir tabakanın oluşturdukları iki tabakalı bir kondansatördür.

Bu kondansatörün kompleks kapasite bileşenlerinin bir relaksasyon spektrumu vermeleri, permitivite dağılımı, iletkenlik dağılımından değişik olması koşuluna bağlıdır. Başka bir deyişle tabakaların permitivitesinin ϵ_2/ϵ_1 oranı, tabakaların σ_2/σ_1 iletkenlik oranına eşitse, iki tabakalı kondansatör, homojen bir ortam gibi davranır ve bir Maxwell-Wagner relaksasyonu göstermesi söz konusu olamaz.

Hazırlanmış bir örneğin permitivitesinin hacımsal dağılımı, bu örneğin deneysel relaksasyon eğrilerinden elde edilen Maxwell-Wagner eşdeğer devresinin C_1 ve C_2 elemanlarına ait ϵ_1 ve ϵ_2 permitivitesinin ϵ_2/ϵ_1 oranıyla temsil edilebilir. Öte yandan aynı örneğin iletkenliğinin hacımsal dağılımı da, aynı eşdeğer devrenin R_1 ve R_2 elemanlarına ait σ_1 ve σ_2 iletkenlik katsayılarının σ_2/σ_1 oranıyla temsil edilebilir. Bir örneğin heterojen olması demek, permitivite dağılımı ile, iletkenlik dağılımının birbirinden değişik olması demek olduğundan

$$\frac{\epsilon_2/\epsilon_1}{\sigma_2/\sigma_1}$$

oranı ya da bu oranın tersi heterojenliğin ölçüsüdür. Ve bu oranlar 1 den ne kadar büyük veya sıfıra ne kadar yakın iseler, ortam o kadar heterojendir. Bu bakımdan h heterojenlik katsayısı

$$h = \left| \lg \frac{\epsilon_2/\epsilon_1}{\sigma_2/\sigma_1} \right| \quad (136)$$

olarak tanımlanabilir. Bu tanıma göre, homojenlik $h = 0$ da sağlanır. h nin sıfırdan büyük değerler alması da, heterojenliğin bir göster-

gesidir.

Maxwell-Wagner iki tabaka kondansatörü ve eşdeğer devresini gösteren Şekil-10 da R_1 , R_2 , C_1 ve C_2 elemanları; permitivite, iletkenlik katsayıları ve kalınlıklar cinsinden

$$R_1 = \frac{d_1}{\sigma_1 A} \quad R_2 = \frac{d_2}{\sigma_2 A} \quad C_1 = \frac{\epsilon_1 A}{d_1} \quad C_2 = \frac{\epsilon_2 A}{d_2} \quad (137)$$

olarak verildiklerine göre

$$\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1} = \frac{\epsilon_2 / \sigma_2}{\epsilon_1 / \sigma_1} = \frac{\epsilon_2 / \epsilon_1}{\sigma_2 / \sigma_1} \quad (138)$$

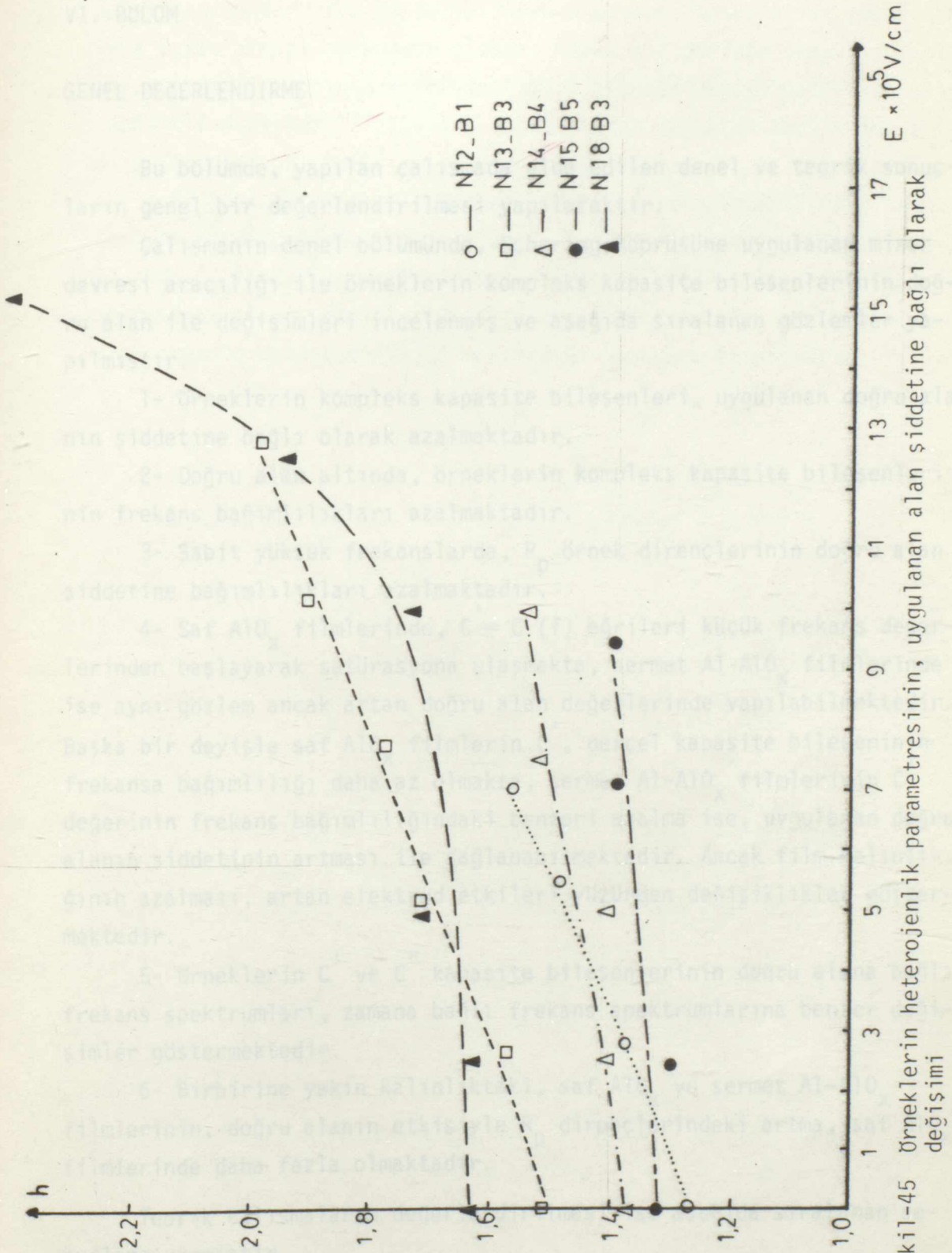
olduğu görülür. Buna göre h heterojenliğini veren (136) bağıntısı; (138) bağıntısı yardımıyla

$$h = \left| \lg \frac{R_2 C_2}{R_1 C_1} \right| \quad (139)$$

bağıntısına dönüştürülebilir.

Her örnek için, doğru alan değerlerine bağlı olarak değişen heterojenlik katsayıları, (139) bağıntısı yardımıyla hesaplanmış ve Bölüm V.B de, eşdeğer devre elemanlarının verildiği tablolarda gösterilmiştir. Şekil-45 de ise örneklerin h heterojenlik katsayılarının, uygulanan doğru alana bağlı değişimleri grafik şeklinde verilmektedir.

Bu analiz yardımıyla elde edilen sonuca göre, reaktif buharlaştırma tekniği ile elde edilen örnekler heterojen yapı göstermektedirler. Uygulanan doğru alanlar ise, bu yapıların daha da heterojenleşmesinde etkili olmaktadır.



VI. BÖLÜM

GENEL DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, yapılan çalışmada elde edilen deneysel ve teorik sonuçların genel bir değerlendirilmesi yapılacaktır.

Çalışmanın deneysel bölümünde, Schering Köprüsüne uygulanan mixer devresi aracılığı ile örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin doğru alan ile değişimleri incelenmiş ve aşağıda sıralanan gözlemler yapılmıştır.

1- Örneklerin kompleks kapasite bileşenleri, uygulanan doğru alanın şiddetine bağlı olarak azalmaktadır.

2- Doğru alan altında, örneklerin kompleks kapasite bileşenlerinin frekans bağımlılıkları azalmaktadır.

3- Sabit yüksek frekanslarda, R_p örnek dirençlerinin doğru alan şiddetine bağımlılıkları azalmaktadır.

4- Saf AlO_x filmlerinde, $C' = C'(f)$ eğrileri küçük frekans değerlerinden başlayarak saturasyona ulaşmakta, sermet Al- AlO_x filmlerinde ise aynı gözlem ancak artan doğru alan değerlerinde yapılabilmektedir. Başka bir deyişle saf AlO_x filmlerin C' , gerçel kapasite bileşeninin frekansa bağımlılığı daha az olmakta, sermet Al- AlO_x filmlerinin C' değerinin frekans bağımlılığındaki benzeri azalma ise, uygulanan doğru alanın şiddetinin artması ile sağlanabilmektedir. Ancak film kalınlığının azalması, artan elektrod etkileri yüzünden değişiklikler göstermektedir.

5- Örneklerin C' ve C'' kapasite bileşenlerinin doğru alana bağlı frekans spektrumları, zamana bağlı frekans spektrumlarına benzer değişimler göstermektedir.

6- Birbirine yakın kalınlıktaki, saf AlO_x ve sermet Al- AlO_x filmlerinin, doğru alanın etkisiyle R_p dirençlerindeki artma, saf AlO_x filmlerinde daha fazla olmaktadır.

Teorik çalışmaların değerlendirilmesi ise aşağıda sıralanan sonuçları vermiştir.

1- Gözlenen relaksasyon bir Maxwell-Wagner relaksasyonudur.

2- Maxwell-Wagner relaksasyonuna temel olan polarizasyon arayüz

polarizasyonudur. Arayüz polarizasyonu yapının kusurlarına yük birikimi veya tuzaklanması nedeniyle oluşur, başka bir deyişle arayüz polarizasyonunun etkisi yapının heterojenliği ölçüsünde ortaya çıkar. Ortamın kapasitif dağılımı, iletkenlik dağılımından ne kadar farklı ise arayüz polarizasyonunun etkisi de o kadar büyük olur.

3- Buna göre Maxwell-Wagner eşdeğer devre elemanlarının doğru alan altındaki değişimleri incelenmiş ve Maxwell-Wagner eşdeğerindeki R_1 , R_2 , C_1 ve C_2 devre elemanları cinsinden verilen heterojenlik parametresinin alan etkisiyle büyüdüğü gözlenmiştir. Böylece uygulanan alanın, ortamın heterojenliğini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

EK-1

AYNI \bar{C} KONDANSATÖRÜNE EŞDEĞER PARALEL VE SERİ DEVRELERİN ELEMANLARI
ARASINDAKİ DÖNÜŞÜM BAĞINTILARI

$\bar{C} = C' - jC''$ kompleks kapasitesinin C' ve C'' bileşenleri, \bar{C} kapasiteli kondansatöre eşdeğer C_p , R_p paralel devresinin elemanları cinsinden

$$C' = C_p \quad (51a)$$

$$C'' = \frac{1}{\omega R_p} \quad (51b)$$

olarak, eşdeğer C_s , R_s seri devresinin elemanları cinsinden de

$$C' = \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (54a)$$

$$C'' = \frac{\omega C_s^2 R_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (54b)$$

olarak ifade edilebilirler. (51a) bağıntısının (54a) ile, (51b) bağıntısının da (54b) bağıntısıyla karşılaştırılmasıyla seri eşdeğer devre elemanları yardımıyla, paralel eşdeğer devre elemanlarının hesaplanmasına elveren dönüşüm denklemleri elde edilir:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (56a)$$

$$R_p = \frac{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2}{\omega^2 C_s^2 R_s} \quad (56b)$$

Bu iki bağıntının çarpımı ile de

$$C_p R_p = \frac{1}{\omega^2 C_s R_s} \quad (136)$$

ve dolayısıyla da

$$\omega C_S R_S = \frac{1}{\omega C_P R_P} \quad (58)$$

elde edilir. (58) bağıntısının her iki tarafının karesi alınır (56a) da yerine konmasıyla

$$C_P = \frac{C_S}{1 + 1/\omega^2 C_P^2 R_P^2} = \frac{\omega^2 C_P^2 R_P^2 C_S}{\omega^2 C_P^2 R_P^2 + 1} \quad (137)$$

bu bağıntının düzenlenmesiyle de

$$C_S = \frac{1 + \omega^2 R_P^2 C_P^2}{\omega^2 C_P R_P^2} \quad (57a)$$

bulunur. (58) bağıntısının aynı biçimde, (56b) bağıntısının her iki tarafının R_S ye bölünmesiyle oluşturulan

$$\frac{R_P}{R_S} = \frac{1 + \omega^2 C_S^2 R_S^2}{\omega^2 C_S R_S^2} \quad (138)$$

bağıntısına uygulanmasıyla

$$\frac{R_P}{R_S} = \frac{1 + 1/\omega^2 C_P^2 R_P^2}{1/\omega^2 C_P R_P^2} = \omega^2 C_P^2 R_P^2 + 1 \quad (139)$$

bu bağıntının düzenlenmesiyle de

$$R_S = \frac{R_P}{1 + \omega^2 C_P^2 R_P^2} \quad (57b)$$

elde edilir. (57a) ve (57b) bağıntıları paralel eşdeğer devre elemanları yardımıyla, seri eşdeğer devre elemanlarının hesaplanabilmesini sağlayan dönüşüm denklemleridir.

EK-2

McDONALD-FRIAUF, MAXWELL-GARNET, McDONALD FRIAUF-MAXWELL GARNET EŞ-DEĞER DEVRELERİNİN ADMİTANSLARININ HESAPLANMASI VE KOMPLEKS KAPASİTELERİNİN GERÇEL VE SANAL BİLEŞENLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Şemasına, Şekil-8a da yer verilen, McDonald-Friauf devresinin admitansı:

$$Y(MF) = j\omega C_{1p} + \frac{1}{R_1 + 1/j\omega C_{1s}} \quad (140)$$

dir. (140) bağıntısının düzenlenmesiyle

$$Y(MF) = \frac{j\omega(C_{1p} + C_{1s}) - \omega^2 C_{1p} C_{1s} R_1}{1 + j\omega C_{1s} R_1} \quad (141)$$

bağıntısı, bu bağıntının $(1 - j\omega C_{1s} R_1)$ ile genişletilmesiyle de

$$Y(MF) = \frac{\omega^2 C_{1s}^2 R_1}{1 + \omega^2 C_{1s}^2 R_1^2} + j\omega \frac{[C_{1p} + C_{1s}] + \omega^2 C_{1p} C_{1s} R_1}{1 + \omega^2 C_{1s}^2 R_1^2} \quad (142)$$

admitans bağıntısı elde edilir.

Şeması, Şekil-8b de gösterilen Maxwell-Garnet devresinin admitansı:

$$Y_1 = j\omega C_1 + 1/R_1 = \frac{1 + j\omega C_1 R_1}{R_1} \quad (143)$$

olan devre ile C_2 kapasiteli kondansatörün seri olarak bağlanmasıyla elde edilen bir devre olduğundan, empedansı

$$Z(MG) = 1/Y_1 + 1/j\omega C_2 \quad (144a)$$

$$Z(MG) = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1} + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (144b)$$

$$Z(MG) = \frac{1 + j\omega(C_1 + C_2)R_1}{j\omega C_2 - \omega^2 C_1 C_2 R_1} \quad (144c)$$

dir. Devrenin admitansı ise buna göre

$$Y(MG) = \frac{j\omega C_2 - \omega^2 C_1 C_2 R_1}{1 + j\omega(C_1 + C_2)R_1} \quad (145)$$

dir. Bu bağıntı, paydasının eşleniği olan $[1 - j\omega(C_1 + C_2)R_1]$ ile genişletilirse

$$Y(MG) = \frac{\omega^2 C_2^2 R_1}{1 + \omega^2(C_1 + C_2)^2 R_1^2} + j\omega \frac{C_2 [1 + \omega^2(C_1 + C_2)C_1 R_1^2]}{1 + \omega^2(C_1 + C_2)^2 R_1^2} \quad (146)$$

olarak da yazılır.

Şekil-8c deki McDonald Friauf-Maxwell Garnet devresi ise admitansı, ifadesi (142) ile verilen $Y(MF)$ olan bir Mac Donald-Friauf devresi ile C_2 kapasiteli kondansatörün seri olarak bağlanmasıyla elde edilmiştir. Bu nedenle empedansı

$$Z(MFMG) = 1/Y(MF) + 1/j\omega C_2 \quad (147a)$$

$$Z(MFMG) = \frac{j\omega C_2 + Y(MF)}{j\omega C_2 Y(MF)} \quad (147b)$$

admitansı da

$$Y(MFMG) = \frac{j\omega C_2 Y(MF)}{j\omega C_2 + Y(MF)} \quad (148)$$

dir.

Öte yandan $\bar{C} = C' - jC''$ kompleks kapasiteli kondansatörün admitansı da

$$Y = j\omega \bar{C} = j\omega C' + \omega C'' \quad (45)$$

dir. Kompleks kapasiteli kondansatörün eşdeğer devresi, bir McDonald-Friauf devresi ise, C' ve C'' kompleks kapasite bileşenleri (142) bağıntısı ile (45) bağıntısının sağ taraflarının eşitlenmesi ile elde edilir.

$$C'(\text{MF}) = \frac{(C_{1p} + C_{1s}) + \omega^2 C_{1p} C_{1s} R_1^2}{1 + \omega^2 C_{1s}^2 R_1^2} \quad (59a)$$

$$C''(\text{MF}) = \frac{\omega C_{1s}^2 R_1}{1 + \omega^2 C_{1s}^2 R_1^2} \quad (59b)$$

Eşdeğer devrenin bir Maxwell-Garnet devresi olması durumunda da (146) bağıntısı ile (45) bağıntısının sağ tarafları eşitlenir:

$$C'(\text{MG}) = \frac{C_2 [1 + \omega^2 (C_1 + C_2) C_1 R_1^2]}{1 + \omega^2 (C_1 + C_2)^2 R_1^2} \quad (60a)$$

$$C''(\text{MG}) = \frac{\omega C_2^2 R_1}{1 + \omega^2 (C_1 + C_2)^2 R_1^2} \quad (60b)$$

Eşdeğer devre her iki devrenin bir karması olan McDonald Friauf-Maxwell Garnet devresi ise önce (148) bağıntısı, (45) bağıntısı uyarınca yazılabilecek olan

$$Y(\text{MF}) = j\omega C'(\text{MF}) + \omega C''(\text{MF}) \quad (149)$$

bağıntısı yardımıyla

$$Y(\text{MFMG}) = \frac{j\omega C_2 (j\omega C'(\text{MF}) + \omega C''(\text{MF}))}{j\omega C_2 + j\omega C'(\text{MF}) + \omega C''(\text{MF})} \quad (150a)$$

$$Y(\text{MFMG}) = \frac{\omega^2 C_2 [jC''(\text{MF}) - C'(\text{MF})]}{\omega C''(\text{MF}) + j\omega [C'(\text{MF}) + C_2]} \quad (150b)$$

biçimlerine, paydanın eşleniği ile genişletilerek de

$$Y(\text{MFMG}) = \frac{\omega C_2^2 C''(\text{MF})}{[C''(\text{MF})]^2 + [C'(\text{MF}) + C_2]^2} + j\omega \frac{C_2 ([C''(\text{MF})]^2 + C'(\text{MF}) [C'(\text{MF}) + C_2])}{[C''(\text{MF})]^2 + [C'(\text{MF}) + C_2]^2}$$

bağıntısına dönüştürülebilir. Bu bağıntının sağ tarafı (45) bağıntısının sağ tarafıyla eşitlenirse de

$$C'(\text{MFMG}) = \frac{C_2([C''(\text{MF})]^2 + C'(\text{MF})[C'(\text{MF})+C_2])}{[C''(\text{MF})]^2 + [C'(\text{MF})+C_2]^2} \quad (61a)$$

$$C''(\text{MFMG}) = \frac{C_2^2 C''(\text{MF})}{[C''(\text{MF})]^2 + [C'(\text{MF})+C_2]^2} \quad (61b)$$

bağıntıları elde edilir.

McDonald-Friauf eşdeğer devresine ait (59a) ve (59b) bağıntıları

$$C_{1p} + C_{1s} = A \quad (152a)$$

$$C_{1p} = B \quad (152b)$$

$$R_1 C_{1s} = 1/\omega_0 \quad (152c)$$

olarak tanımlanan parametreler yardımıyla

$$C' = \frac{A + B(\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} = B + \frac{A-B}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (62)$$

$$C'' = \frac{A-B}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0) \quad (63)$$

biçimlerinde yazılabilirler.

Maxwell-Garnet eşdeğer devresine ait (60a) ve (60b) bağıntıları

da

$$C_2 = A \quad (153a)$$

$$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = B \quad (153b)$$

$$R_1 (C_1 + C_2) = 1/\omega_0 \quad (153c)$$

tanımlarının yapılmasıyla, yine (62) ve (63) bağıntıları biçiminde ifade edilebilirler.

McDonald Friauf-Maxwell Garnet karma devresine ait $C' = C'(\omega)$ ve $C'' = C''(\omega)$ bağıntıları ise (61a) ve (61b) de McDonald-Friauf devresinin $C' = C'(\omega)$ ve $C'' = C''(\omega)$ bağıntıları yardımıyla ifade edilmişlerdir. Bu bağıntılardaki $C'(MF)$ ve $C''(MF)$ ler için (62) ve (63) bağıntılarıyla verilen ifadeler kullanılır, sonra da A , B ve ω_0 parametreleri için (152a) (152b) ve (152c) deki değerler kullanılırsa

$$C' (MFMG) = C_2 \frac{[A-B]^2 (\omega/\omega_0)^2 + [A+B(\omega/\omega_0)^2] [A+B(\omega/\omega_0)^2 + C_2 [1+(\omega/\omega_0)^2]]}{[A-B]^2 (\omega/\omega_0)^2 + [A+B(\omega/\omega_0)^2]^2} \quad (154a)$$

$$C' (MFMG) = C_2 \frac{A[A+C_2] [1+(\omega/\omega_0)^2] + B[B+C_2] [1+(\omega/\omega_0)^2] (\omega/\omega_0)^2}{[A+C_2]^2 [1+(\omega/\omega_0)^2] + [B+C_2]^2 [1+(\omega/\omega_0)^2] (\omega/\omega_0)^2} \quad (154b)$$

$$C' (MFMG) = C_2 \frac{A[A+C_2] + B[B+C_2] (\omega/\omega_0)^2}{[A+C_2]^2 + [B+C_2]^2 (\omega/\omega_0)^2} \quad (154c)$$

$$C' (MFMG) = \frac{C_2 [C_{1s} + C_{1p}] [C_{1s} + C_{1p} + C_2] + C_2 C_{1p} [C_{1p} + C_2] C_{1s}^2 R_1^2 \omega^2}{[C_{1s} + C_{1p} + C_2]^2 + [C_{1p} + C_2]^2 C_{1s}^2 R_1^2 \omega^2} \quad (154d)$$

ve

$$C'' (MFMG) = \frac{C_2^2 [A-B] (\omega/\omega_0) / [1+(\omega/\omega_0)^2]}{([A-B]^2 (\omega/\omega_0)^2 + [A+B(\omega/\omega_0)^2 + C_2 + C_2 (\omega/\omega_0)^2]^2) / [1+(\omega/\omega_0)^2]^2} \quad (155a)$$

$$C'' (MFMG) = \frac{C_2^2 [A-B] (\omega/\omega_0) [1+(\omega/\omega_0)^2]}{[A+C_2]^2 [1+(\omega/\omega_0)^2] + [B+C_2]^2 [1+(\omega/\omega_0)^2] (\omega/\omega_0)^2} \quad (155b)$$

$$C'' \text{ (MFMG)} = \frac{C_2^2 [A-B] (\omega/\omega_0)}{[A+C_2]^2 + [B_2+C_2]^2 (\omega/\omega_0)^2} \quad (155c)$$

$$C'' \text{ (MFMG)} = \frac{C_2^2 C_{1s}^2 R_1 \omega}{[C_{1s}+C_{1p}+C_2]^2 + [C_{1p}+C_2]^2 C_{1s}^2 R_1^2 \omega^2} \quad (155d)$$

elde edilirler.

$$\frac{C_2 [C_{1s}+C_{1p}]}{C_{1s}+C_{1p}+C_2} = A \quad (156a)$$

$$\frac{C_2 C_{1p}}{C_{1p}+C_2} = B \quad (156b)$$

$$\frac{[C_{1p}+C_2] C_{1s} R_1}{C_{1s}+C_{1p}+C_2} = 1/\omega_0 \quad (156c)$$

tanımları yapılırsa (154d) bağıntısının (62) bağıntısına dönüşeceği, (156a) ve (156b) tanımları uyarınca

$$A-B = \frac{C_2 [C_{1s}+C_{1p}] [C_{1p}+C_2] - C_2 C_{1p} [C_{1s}+C_{1p}+C_2]}{[C_{1p}+C_2] [C_{1s}+C_{1p}+C_2]} \quad (157a)$$

$$A-B = \frac{C_2^2 C_{1s}}{[C_{1p}+C_2] [C_{1s}+C_{1p}+C_2]} \quad (157b)$$

olacağından, (155d) bağıntısının da (63) bağıntısına dönüşeceği görülmür.

Bunlara göre adı geçen her üç esedeğe ait $C = C'(\omega)$ ve $C'' = C''(\omega)$ denklemleri de aynı biçimlerde dir.

EK-3

MAXWELL-WAGNER EŞDEĞER DEVRESİNİN ADMİTANSLARININ HESAPLANMASI VE
KOMPLEKS KAPASİTESİNİN GERÇEL VE SANAL BİLEŞENLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Şekil-10 da görülen Maxwell-Wagner devresinin Y admitansı

$$\frac{1}{Y} = \frac{1}{1/R_1 + j\omega C_1} + \frac{1}{1/R_2 + j\omega C_2} \quad (68)$$

bağıntısıyla verilir. Bu bağıntının düzenlenmesiyle

$$\frac{1}{Y} = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2} \quad (158a)$$

$$Y = \frac{[1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2] + j\omega [C_1 R_1 + C_2 R_2]}{[R_1 + R_2] + j\omega R_1 R_2 [C_1 + C_2]} \quad (158b)$$

son bağıntının, $[R_1 + R_2] - j\omega R_1 R_2 [C_1 + C_2]$ ile genişletilmesiyle de

$$Y = \frac{[R_1 + R_2] + \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 [C_1 + C_2]}{[R_1 + R_2]^2 + \omega^2 R_1^2 R_2^2 [C_1 + C_2]^2} + j\omega \frac{[R_1^2 C_1 + R_2^2 C_2] + \omega^2 R_1^2 R_2^2 C_1 C_2 [C_1 + C_2]}{[R_1 + R_2]^2 + \omega^2 R_1^2 R_2^2 [C_1 + C_2]^2} \quad (159)$$

bağıntısı elde edilir.

$\bar{C} = C' - jC''$ kompleks kapasiteli kondansatörün admitansı

$$Y = j\omega \bar{C} = j\omega C' + \omega C'' \quad (45)$$

olduğundan, kompleks kapasiteli kondansatörün eşdeğer devresi bir Maxwell-Wagner devresi olması durumunda, C' ve C'' kompleks kapasite bileşenleri (159) ve (45) bağıntılarının sağ taraflarının eşitlenmesiyle elde edilirler:

$$C' = \frac{[R_1^2 C_1 + R_2^2 C_2] + \omega^2 R_1^2 R_2^2 C_1 C_2 [C_1 + C_2]}{[R_1 + R_2]^2 + \omega^2 R_1^2 R_2^2 [C_1 + C_2]^2} \quad (70a)$$

$$C'' = \frac{[R_1 + R_2] + \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 [C_1 + C_2]}{\omega ([R_1 + R_2]^2 + \omega^2 R_1^2 R_2^2 [C_1 + C_2]^2)} \quad (70b)$$

Bu bağıntılar

$$\frac{R_1^2 C_1 + R_2^2 C_2}{[R_1 + R_2]^2} = A_1 \quad (71a)$$

$$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = B_1 \quad (71b)$$

$$\frac{R_1 R_2 [C_1 + C_2]}{[R_1 R_2]^2} = A_2 \quad (71c)$$

$$\frac{R_1 C_1^2 + R_2 C_2^2}{[R_1 + R_2] [C_1 + C_2]} = B_2 \quad (71d)$$

$$\frac{R_1 R_2 [C_1 + C_2]}{R_1 + R_2} = 1/\omega_0 \quad (72)$$

tanımları yapılırsa

$$C' = \frac{A_1 + B_1 (\omega/\omega_0)^2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} = B_1 + \frac{A_1 - B_1}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \quad (73)$$

$$C'' = \frac{A_2 + B_2 (\omega/\omega_0)^2}{(\omega/\omega_0) [1 + (\omega/\omega_0)^2]} = \frac{A_2}{(\omega/\omega_0)} + \frac{B_2 - A_2}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0) \quad (74a)$$

bağıntılarına dönüşürler.

(74a) bağıntısının ikinci teriminde yer alan $[B_2 - A_2]$ farkının (71c) ve (71d) tanımlarına göre

$$B_2 - A_2 = \frac{[R_1 C_1^2 + R_2 C_2^2] [R_1 + R_2] - R_1 R_2 [C_1 + C_2]^2}{[R_1 + R_2]^2 [C_1 + C_2]} \quad (160a)$$

$$B_2 - A_2 = \frac{R_1^2 C_1^2 + R_2^2 C_2^2 - 2R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_1 + R_2]^2 [C_1 + C_2]} \quad (160b)$$

$$B_2 - A_2 = \frac{[R_1 C_1 - R_2 C_2]^2}{[R_1 + R_2]^2 [C_1 + C_2]} \quad (160c)$$

olduğu görülmektedir. Öte yandan $[A_1 - B_1]$ farkı da (71a) ve (71b) tanımlarından

$$A_1 - B_1 = \frac{[R_1^2 C_1 + R_2^2 C_2] [C_1 + C_2] - [R_1 + R_2]^2 C_1 C_2}{[R_1 + R_2]^2 [C_1 + C_2]} \quad (161a)$$

$$A_1 - B_1 = \frac{R_1^2 C_1^2 + R_2^2 C_2^2 - 2R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_1 + R_2]^2 [C_1 + C_2]} \quad (161b)$$

$$A_1 - B_1 = \frac{[R_1 C_1 - R_2 C_2]^2}{[R_1 + R_2]^2 [C_1 + C_2]} \quad (161c)$$

olarak elde edilmektedir. (160c) ve (161c) bağıntılarının karşılaştırılması ile

$$B_2 - A_2 = A_1 - B_1 \quad (162)$$

olduğu anlaşılır. (74a) bağıntısı, (162) bağıntısı yardımıyla

$$C'' = \frac{A_2}{(\omega/\omega_0)} + \frac{A_1 - B_1}{1 + (\omega/\omega_0)^2} (\omega/\omega_0) \quad (74b)$$

bağıntısına dönüştürülebilir.

KAYNAKLAR Von Hippel, "Dielectrics and Waves", John Wiley, London, 1954

- (1) S.R. Ovshinsky, Phys. Rev. Letters, 21(1968) 1450
- (2) K. Sawamura and M. Saito, Japan J. Appl. Phys., 5(1966)182
- (3) G.R. Neal and J.A. Aseltine, IEEE, ED-20(1973)195
- (4) N. Holonyak and C.R. Thomas, Phys. Rev. Letters, 8(1962)426
- (5) O.J. Marsh, R. Baron and J.W. Mayer, Appl. Phys. Letters, 7(1965)120
- (6) S.W. Ing, M.D. Tabak, IEEE, ED-20(1973)132
- (7) A. Thelen, "Physics of Thin Films", Vol.5, Academic Press, NewYork, 1969
- (8) P. White, Vacuum, 12(1962)15
- (9) A. Hjortsberg at al., Thin Solid Films, 90(1982)323
- (10) H.E. Bennet at al., J. Opt. Soc. Am., 52(1962)1245
- (11) L. Holland, "Vacuum Deposition of Thin Films", J. Wiley, NewYork, 1972
- (12) H.M. Smith and A.F. Turner, Appl. Opt., 4(1965)147
- (13) L. Young, "Anodic Oxide Films", Academic Press, NewYork, 1961
- (14) J.L. Vossen, RCA Rev., 32(1971)289
- (15) R.P. Howson and M.I. Ridge, Thin Solid Films, 77(1981)119
- (16) H.E. Bennet "Ind. Quality Control", No.8, (1964)18
- (17) S. Tolansky, "Multiple-Beam-Interferometry of Surfaces and Films", Oxford Univ. Press, London, 1955
- (18) O.S. Heavens, "Optical Properties of Thin Solid Films", London, 1955
- (19) G.D. Scott at al., J. Appl. Phys., 21(1950)843
- (20) A. Fontain and F. Mennier, Phys. Kondens. Mater., 14(1972)119
- (21) H. Birey, J. Appl. Phys., V.45, 9(1974)3946
- (22) F. Argal and A.K. Jouscher, Thin Solid Films 2(1968)185
- (23) R. Coelho, "Physics of Dielectrics", Elsevier Publ. Com., NewYork 1979
- (24) H. Birey, J. Appl. Phys., 49(5), (1978)2898
- (25) J.C. Anderson, "Dielectrics", Chapman and Hall LTD. London, 1964

- (26) A.R. Von Hippel, "Dielectrics and Waves", John Wiley, London, 1954
- (27) H. Birey, Appl. Phys. Letters, 23(1973)316
- (28) H. Birey, J. Appl. Phys., 48(12), (1977)5209
- (29) A. Akseli, Thin Solid Films, 80(1981)395

