

Schottky eklem yapılarında kapasitans eğrileri üzerinde artık kapasitansın etkisi

Murat GÜLNAHAR*¹

¹Elektrik ve Enerji Bölümü/Meslek Yüksekokulu, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Türkiye

*mgulnahr@erzincan.edu.tr

Özet – Bu çalışmada, metal-yarıiletken kontak yapılarının kapasitans-gerilim (C-V) ölçümlerinde artık kapasitansın etkisi üzerine matematiksel olarak yeni bir model önerildi ve bu model bir Al/p-Si numunenin 300 K'deki C-V ölçümü üzerinde uygulandı. Modifiye edilen yeni modele göre C_0 artık kapasitans değeri $C_0:0.562$ pF olarak hesaplandı. V_d difüzyon potansiyeli ve Na taşıyıcı konsantrasyon değerlerinin önceki modele göre ve bu çalışmada önerilen modele göre hesaplanan değerlerinin karşılaştırılmaları yapılarak modifiye edilen yeni modele göre elde edilen değerlerin daha güvenilir olduğu rapor edildi. Sonuç olarak yeni modelin Schottky eklem yapılarının kapasitans eğrileri üzerinde artık kapasitans değerini daha güvenilir olarak hesaplayıp eklem parametrelerini yorumlayabildiği görüldü.

Anahtar Kelimeler – Schottky yapılar, Kapasitans-gerilim (C-V) eğrileri, Artık kapasitans, Schottky eklem anormallikleri, Si

I. GİRİŞ

Metal-yarıiletken kontaklar katıhal elektroniğinin çok önemli çalışma alanını oluşturmakta ve deneysel çalışmalar akım-gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri halinde devam etmektedir. Eklem özelliklerinin belirlenmesinde I-V ölçümleri bağımsız olarak yetersizdir ve uzay yükü bölgesinin davranışını karakterize eden C-V ölçümleri bu amaç için önem arz etmektedir. Fakat kontakta ideal olmayan durumlara neden olan çeşitli karakteristikler I-V ve C-V ölçümlerinde etkili olmakta ve bu istenmeyen etkenlerin tanımlanması ve yorumlanması kontak özelliklerinin karakterizasyonu için önemli olmaktadır.

Schottky kontak (MIS) yapılar günümüz teknolojisinde güneş pillerinde, fotodedektörlerde, çeşitli optoelektronik devislerde ve çeşitli ışık yayan diyotlarda genişçe kullanım alanı bulmaktadırlar [1-3]. Metal-yarıiletken kontak yapılarında metal ve yarıiletken tabakaları arasında oluşan dielektrik özelliğe sahip arayüzey tabakası bu yapıların doğrultma özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Arayüzey tabakasında bulunan lokalize olmuş arayüzey yüklerinden dolayı oluşmuş olan arayüzey

halleri yarıiletken yasak enerji aralığında bulunan Fermi seviyesinin pozisyonunu değiştirebilmektedir.

Schottky kontak yapılar üzerine gerçekleştirilen kapasitans-gerilim (C-V) ve kondüktans-gerilim (G-V) ölçümleri, arayüzeyde mevcut olan lokalize olmuş arayüzey halleri hakkında derin bir bakış açısının elde edilmesini sağlar [4]. C-V ölçüm tekniği, arayüzeyin yapısı, arayüzey hal yoğunluğu gibi doğrultma yapısını etkileyen parametrelerin analizi için sıklıkla kullanılan bir ölçüm tekniğidir. Ayrıca, eklem yapısından kaynaklanan ve eklem yapısıyla ilişkili olan seri direnç, arayüzey halleri, azınlık taşıyıcı yükleri, deplasyon tabakası içerisinde mevcut olan derin tuzakların yapısı gibi haller hakkında derinlemesine analiz imkânı sağlar.

C-V ölçümleri seri direnç, azınlık taşıyıcılar, arayüzey halleri ve derin seviyelerden etkilenmektedirler. Yarıiletkende aktif ya da inaktif olan derin seviyeler, yüzey halleri, azınlık taşıyıcıları kontakta artık kapasitans oluşumuna neden olmakta ve artık kapasitans C-V ölçümlerini etkilemektedir. Dolaylı olarak C-V ölçümlerinde karşılaşılan homojensizlik C^{-2} -V eğrilerinde

lineersizliklere neden olmaktadır. Bunun sonucunda da C^2-V eğrilerinden elde edilen difüzyon potansiyeli, taşıyıcı konsantrasyonu ve C-V engel yüksekliği gibi parametrelerin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu değerlerin güvenilir olması için C_0 artık kapasitans değerinin elde edilmesi, bu değer $(C-C_0)^2-V$ eğrilerinde kullanılması ve sonuçta gerçek kapasitansın elde edilmesi gerekmektedir.

Şimdiye kadar artık kapasitansı elde etmek için literatürde Vasudev et al., [5] tarafından ortaya konan metod kullanılmaktadır. Artık kapasitansın C 'nin $(V+V_d)^{-1/2}$ 'ye karşı değişimlerinden elde edilen bu metod kullanıldığında az sayıda ölçüm noktasına yapılan bir lineer fitin sonucunda elde edilen C_0 değerleri büyük olmakta ve sonuçta bu model başarısız olmaktadır. Bu modelden elde edilen C_0 değerleriyle $(C-C_0)^2-V$ eğrileri tersi yönde ve daha fazla bükülerek lineerlikten tamamen uzaklaşmaktadır. Bu durumda modelin gerçek diyot karakteristiklerini vermesi için modifiye edilmesi gerekmektedir.

Çalışmamızda Vasudev et al., [5] tarafından ortaya atılan modeli modifiye eden yeni bir grafiksel metod elde edildi ve bu metod, 1 MHz sabit frekansta ve 300 K sabit sıcaklıkta Al/p-Si kontak yapının kapasite-gerilim (C-V) ölçümü üzerinde başarılı bir şekilde uygulandı.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada 1-3 Ω .cm öz direnç değerine sahip olan p tipi yarıiletken numuneler kullanıldı ve p tipi Si üzerine sırasıyla alüminyum ve altın metal tabakalarının fabrikasyon işlemleri termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. İlk işlem olarak p tipi Si numunelerin organik ve inorganik kirliliklerden temizlenmesi için RCA1 ve RCA2 temizleme prosedürleri kullanıldı.

Numunelerin arka kısımlarına uygulanan hidroflorik (HF) asitle temizleme prosedüründen sonra yaklaşık 2×10^{-6} Torr vakum basınç ortamında alüminyumun (Al) termal yöntemle buharlaştırılıp azot gazı ortamında tavlmasıyla omik kontakların yapım işlemleri tamamlanmış oldu. Omik kontak fabrikasyon işleminden sonra numunenin ön yüzeyine Schottky kontak operasyonu önce alüminyumun (Al) sonra altının (Au) termal olarak yaklaşık 2×10^{-6} Torr vakum basınç ortamında 0.5 mm çaplı dairesel gölge maskelerin kullanımıyla

gerçekleştirilerek Schottky kontakların imalat işlemleri tamamlanmış oldu. Numuneler üzerinde kapasite-gerilim (C-V) ölçüm işlemleri otomasyon sistemi içerisinde bir Boonton 72B'nin kullanıldığı otomize bir ölçüm sistemi yardımıyla gerçekleştirildi.

III. TARTIŞMA VE SONUÇ

III.1. Basic Equations

İdeal yapıya sahip olabilen bir metal-yarıiletken kontak yapıda kapasitansın uygulanan gerilime bağlı olarak değişimi [6],

$$C = \left[\frac{2(V_0 + V)}{qA^2 N_a \epsilon_s} \right]^{-1/2} \quad (1)$$

şeklinindedir. Ancak eklemde asal yüzey halleri, nispeten metalle yarıiletken arasında arayüzeyin yapısından kaynaklanan metal-indüklenmiş boşluk hal kusurları (MİGS) ve kontak esnasında kullanılan yarıiletkenin yapısından ya da yapıda başka nedenlerden dolayı kaynaklanan dangling (doymamış) bağlar (2) yüzey hallerine neden olmakta ve bu yüzey halleri artık kapasitansa neden olabildiği gibi Fermi seviyesinin pin olmasına da neden olmaktadır. Ayrıca yarıiletkende derin seviyeler ve proses esnasında omik kontakın yapısından dolayı kaynaklanan azınlık taşıyıcıların enjeksiyonu (3) C-V ölçümlerinde artık kapasitans oluşumuna neden olmakta ve kapasitans ölçümlerini ideal değerlerinden uzaklaştırarak etkilemektedir.

Artık kapasitansı bir sabit olarak ifade etmek mümkündür(1). Böylece Denk. (1),

$$C = \left(\frac{2(V + V_d - V_d + V_d)}{q\epsilon_s N A^2} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

şeklinde düzenlenebilir. Bu denklem tekrar düzenlenirse,

$$C = \left(\frac{4V_0}{q\epsilon_s N_a A^2 (V - V_0)} \right)^{-1/2} \left(1 + \frac{(V - V_0)}{2V_0} \right)^{-1/2} (V - V_0)^{-1/2} \quad (3)$$

denklemini elde edilir. Matematiksel olarak üslü terimin Binom açılımı,

$$(1+x)^{-1/2} = 1 - \frac{1}{2}x + \frac{1.3}{2^2 \cdot 2!}x^2 - \dots + (-1)^n \frac{1.3 \dots (2n-1)}{2^n n!}x^n + \dots \quad (4)$$

şeklinde olduğundan ifade seriye açılırsa,

$$C = \left(\frac{4V_0}{q\epsilon_s N_a A^2 (V - V_0)} \right)^{-1/2} \left(1 + \frac{(V - V_0)}{2V_0} \right)^{-1/2} (V - V_0)^{-1/2} \quad (5)$$

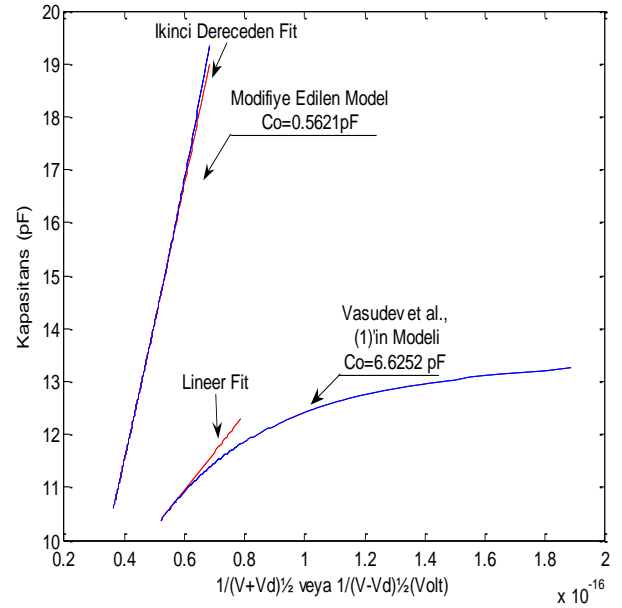
ve

$$C = C_0 + \left(-\frac{1}{q\epsilon_s N_a A^2} + \dots \right) (V - V_0)^{-1/2} \quad (6)$$

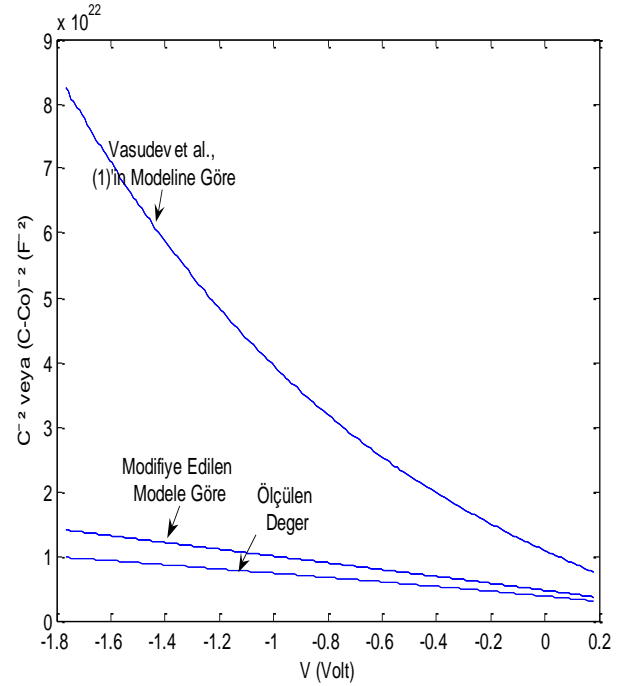
denklemini şeklinde düzenlenmiş olur. Böylece bu denkleme göre $C-(C-V_0)^{-1/2}$ değişiminin y-eksenini kesen nokta C_0 'ı ve dolayısıyla artık kapasitans değerini vermektedir.

III. II. Deneysel Metot

Şekil 1, bir Al/p-Si Schottky eklem yapının 300 K gibi sabit bir sıcaklıkta kapasitans (C)'ye karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ and $(V+V_d)^{-1/2}$ değişimlerini göstermektedir. Bu şekilde Vasudev et al. [5]'in olan (C)'ye karşı $(V+V_d)^{-1/2}$ değişimi olup, (C)'ye karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişimi ise Denk. (6)'da ifade ettiğimiz ve bu çalışmada önerdiğimiz bir denkleme göre çizdiğimiz değişimi göstermektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi bu çalışmada önerilen metodun önceki metod olan Vasudev et al.'ın modeline göre daha büyük korelasyon değerlerine sahip olduğu söylenebilir. Buna göre Şekil 1'de yapılan lineer fit işlemiyle Vasudev et al.'ın [5] modeline göre hesaplanan C_0 artık kapasitans değeri $C_0=6.625$ pF olup yüksek bir değere sahip olduğu söylenebilir. Ancak aynı şekilde bu çalışmada önerilmiş olunan modele göre (C)'ye karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişimine



Şekil 1. 300 K'de Vasudev et al.,'in ve bu çalışmada modifiye edilen modele göre artık kapasitans değerleri.



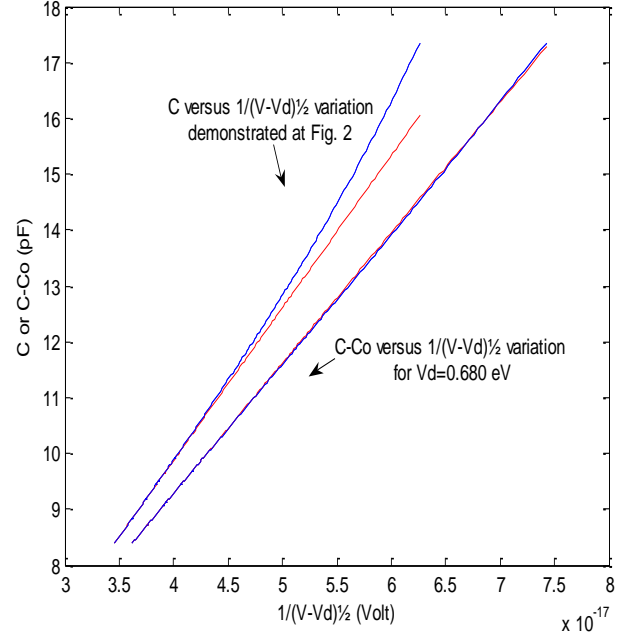
Şekil 2. 300 K'de Vasudev et al.,'in, modifiye edilen modele göre $(C-C_0)^{-2}$ değerlerinin ve ölçülen kapasitans değerlerinin V'ye karşı değişimi.

yapılan ikinci dereceden yapılan fit değişimiyle hesaplanan C_0 artık kapasitans değerinin $C_0=0.562$ pF olarak elde edilmiş olup bu değer kapasitans değerleri için oldukça mantıklı bir değere sahip olduğunu söylemek mümkündür.

Ölçülen kapasite-gerilim (C-V) ölçümlerinden elde edilen engel parametreleri olan difüzyon potansiyeli, taşıyıcı konsantrasyonu ve C-V engel yüksekliği gibi parametrelerin daha gerçek değerler olarak hesaplanması için C^{-2} -V değişimlerinin istenen gerilim aralığında lineerlik kazanması büyük önem arz etmektedir. C-V ölçümleri üzerinde seri direnç, azınlık taşıyıcılar, arayüzey halleri ve derin seviyelerin etkili olduğu bilinmektedir. Ayrıca yarıiletkenlerin yapısında mevcut olan aktif ya da inaktif olan derin seviyelerin, yüzey hallerinin ve azınlık taşıyıcılarının kontak yapıda artık kapasitans oluşumuna neden olduğu ve artık kapasitansın C-V ölçümlerini etkilediği sıklıkla rapor edilmektedir. Bu anormalliklerin bir sonucu olarak C-V ölçümleriyle elde edilebilen C^{-2} -V eğrilerinde lineersizliklere neden olmaktadır. Bu değerlerin güvenilir olması için C_0 artık kapasitans değerinin elde edilmesi, bu değer $(C-C_0)^{-2}$ -V eğrilerinde kullanılması ve sonuçta gerçek kapasitansın elde edilmesi önem arz etmektedir.

Şekil 2’de, Vasudev et al.’ın [5], modifiye edilen modele göre $(C-C_0)^{-2}$ değerlerinin ve ölçülen kapasitans değerlerinin V gerilim değerlerine karşı 300 K’deki değişimlerini göstermektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi Vasudev et al.’ın $(C-C_0)^{-2}$ değerlerine karşı ve ölçülen kapasitans değerlerinin V gerilim değerlerine karşı değişimlerinin lineerlikten oldukça uzak olduğu görülürken bu çalışmada önerdiğimiz ve modifiye ettiğimiz modele göre bu değişim tamamen lineer olduğu görülmektedir.

Şekil 2’den C_0 artık kapasitans değerlerine ilaveten V_d difüzyon potansiyeli ve Na taşıyıcı konsantrasyon değerleri 300 K için C^{-2} -V eğrilerinin lineerizasyonundan 0.956 eV ve $1.032 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Ayrıca, bu değişime ek olarak $(C-C_0)^{-2}$ -V değişiminden V_d difüzyon potansiyeli ve Na taşıyıcı konsantrasyon değerleri 0.680 eV ve $6.276 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Görüldüğü gibi, C^{-2} -V eğrilerinden hesaplanan V_d difüzyon potansiyeli değerleri ve Na taşıyıcı konsantrasyon değerlerinin $(C-C_0)^{-2}$ -V eğrilerinden hesaplanan V_d difüzyon potansiyeli ve Na taşıyıcı konsantrasyon değerlerinden daha küçük olduğu not edilebilir.



Şekil 3. C ya da $C-C_0$ ’a karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişimi ve bu değişimlere yapılan lineer fitler.

Şekil 2’de büyük V_d difüzyon potansiyeli değerleri için C’ye karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişimi lineerlikten sapacaktır. Bu sapma V_d difüzyon potansiyeli değerlerinin Schottky barrier anormallikleriyle ilişkili olup güvenilir değerlere sahip olmadığı bir göstergesidir. Hesaplamış olduğumuz C_0 artık kapasitans ve V_d difüzyon potansiyeli değerlerinin güvenilir olduğunu test edebilmemiz için $C-C_0$ ’a karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişimlerinden hesaplanan C_0 artık kapasitans değerlerinin sıfır ya da sıfıra çok yakın olması gerekir. Şekil 3, C’ye karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişimini ve $C-C_0$ ’a karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişimlerini göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi $C-C_0$ ’a karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişiminin C’ye karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişiminden daha lineer bir değişime sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca bu grafikten C_0 artık kapasitans değeri 0.0952 pF olarak hesaplanmış olup sıfıra çok yakın olduğu not edilebilir. Buda burada önerilen modelin öngörülebilirliğini ve önemini ortaya koymaktadır.

IV. SONUÇLAR

Doğrudan kapasitans-gerilim (C-V) eğrilerinden hesaplanmış olunan engel parametreleri üzerinde C_0 artık kapasitans değerleri etkilidir ve artık kapasitans etkisinden dolayı güvenilir değildirler. C_0 artık kapasitans değerleri hesaplamak için şimdiye kadar önerilmiş olunan modeller ise

güvenilir olmaktan uzaktır. Bu nedenle bu çalışmada C_0 artık kapasitans değerlerini hesaplamak için matematiksel bir model ortaya çıkarıldı ve deneysel olarak 300 K'deki bir Al/p-Si numunenin C-V eğrisi üzerinde uygulandı. C_0 artık kapasitans değerleri önceki modele göre $C_0=6.625$ pF olarak ve bu çalışmada önerilen modele göre ise $C_0=0.562$ pF olarak hesaplanmış oldu. $(C-C_0)^{-2} -V$ değişiminden V_d difüzyon potansiyeli ve Na taşıyıcı konsantrasyon değerleri 0.680 eV ve 6.276×10^{14} cm⁻³ olarak hesaplandı. Hesaplanmış olan V_d difüzyon potansiyeli değeri ile $C-C_0$ 'a karşı $(V-V_d)^{-1/2}$ değişiminin linearizasyonunun sağlanmış olduğu ve bu durumda C_0 artık kapasitans değerinin sıfıra yakın bir değer verdiği belirlendi.

KAYNAKLAR

- [1] S. M. Sze, K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, Wiley-Interscience, 2007.
- [2]. M. Gülnahar and Y. B. Gülnahar, *International Conference on Trends in Advanced Research 1*, vol. 1, pp. 79-84, 2023.
- [3]. M. Gülnahar, F. E. C. Çatır, *International Conference on Trends in Advanced Research 1*, vol. 1, pp. 42-47, 2023.
- [4]. A. A. M. Farag, I. S. Yahia, *Synthetic Metals*, vol. 161, pp. 32, 2011.
- [5]. P. K. Vasudev, B. L. Mattes, E. Pietras and R. H. Bube. *Solid State Electronics*, vol. 19, pp. 557-559, 1976.
- [6]. S. J. Fonash. *J. Appl. Phys.*, vol. 54 (4), pp. 1966-1975, 1983.