

FARKLI B⁺ İMPLANTASYON KOŞULLARI İÇİN RADFET'LERİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONUNUN TCAD BENZETİM PROGRAMI İLE İNCELENMESİ

Ayşegül KAHRAMAN*
Ercan YILMAZ**

Alınma: 01.11.2016; düzeltme: 04.05.2017; kabul: 05.06.2017

Öz: Bu çalışmada, RadFET'lerin kapı oksit tabakasına implante edilmiş B⁺ iyonlarının V_{th} üzerine etkisi, Silvaco TCAD benzetim programı ile incelenmiştir. 300 nm ve 400 nm kalınlıklarında kapı oksite sahip RadFET'ler, tüm üretim adımları TCAD'e tanıtarak tasarlanmıştır. İmplantasyon öncesi ve sonrası V_{th} değerleri, RadFET'lerin akım-gerilim (I_d-V_g) karakteristiklerinden elde edilmiştir. Artan implantasyon enerjisi, V_{th} değerlerinin düşmesine neden olmuştur. V_{th} değerinin sıfır olması, daha geniş ölçülebilir doz aralığına sahip RadFET'lerin üretilmesi için önemlidir. Ancak, implantasyon enerjisindeki sürekli artışla birlikte V_{th}, p-kanalı oluşumu nedeniyle negatif voltaj değerlerinde gözlenmemiştir. 300 nm-RadFET için en düşük V_{th} değeri, 6.5×10¹¹ iyon/cm² bor dozu ve 72 keV'de, -1.082 V olarak bulunmuştur. 400 nm-RadFET için bu değer, 2.3×10¹¹ iyon/cm² bor dozu ve 106 keV'de, -1.139 V olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: RadFET, Üretim benzetimi, B⁺ implantasyonu, Eşik gerilimi, TCAD

Investigation of Electrical Characterization of RadFETs For Different B⁺ Implantation Conditions With TCAD Simulation Program

Abstract: In this study, the effect of the B⁺ ions implanted to gate oxide layer of the RadFETs on V_{th} was investigated by Silvaco TCAD simulation program. The RadFETs with the gate oxide thicknesses of 300 nm and 400 nm were designed by introducing the all of the RadFETs production steps to TCAD. The V_{th} values were obtained from the current-voltage (I_d-V_g) characteristics of the RadFETs before and after implantation. Increasing implantation energy caused the reduction of the V_{th} values. The zero V_{th} value is important to produce the RadFET with broader measurable dose range. However, V_{th} was not observed in the negative voltages with continuous increment in the implantation energy due to the p-channel formation. For the 300 nm-RadFET, the lowest V_{th} value was found as -1.082 V for boron dose with 6.5×10¹¹ ions/cm² at 72 keV. This value for 400 nm-RadFET was obtained as -1.139 V for boron dose with 2.3×10¹¹ ions/cm² at 106 keV.

Keywords: RadFET, Production simulation, B⁺ implantation, Threshold voltage, TCAD

1. GİRİŞ

pMOS (p kanallı Metal Oksit Yarıiletken) dozimetresi olarak da adlandırılan RadFET'ler (Radyasyona Duyarlı Alan Etkili Transistör), kapı oksit tabakası, radyasyon duyarlılığının arttırılması amacıyla optimize edilmiş p kanallı MOSFET'lerdir (Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör). Bu sensörler, radyoterapi, brakiterapi gibi ünitelerde anlık doz ölçümlerinde (in-vivo dozimetresi), uzay modüllerinde ve yüksek enerji fiziği laboratuvarlarındaki cihazlarda

* Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 16059, Nilüfer, Bursa, TÜRKİYE

** Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (NÜRDAM), 14280, Bolu, TÜRKİYE

İletişim Yazarı: Ayşegül Kahraman (aysegulk@uludag.edu.tr)

oluşan radyasyon hasarının değerlendirilmesinde, askeri personel için kişisel dozimetre olarak kullanılırlar (Martínez-García ve diğ., 2015; Seon ve diğ., 2010; Mekki ve diğ., 2009; Holmes Siedle, 1989).

Hem aktif hem de pasif doz ölçümüne olanak sağlayan RadFET'lerin rakiplerine kıyasla birçok avantajları vardır: i) Bu sensörler ile radyasyon dozu, çeviriciler olmadan doğrudan elektrik sinyali alınarak, anında ve yapıda herhangi bir tahribata yol açmadan okunabilir (Martínez-García ve diğ., 2014; Roselfeld, 2007). Bu özellikleri nedeniyle RadFET'ler, tavlama mekanizması karmaşık ve kalibrasyon süreci uzun olan TLD'lere (Termoluminesans dozimetre) göre radyoterapide in-vivo dozimetresi olarak daha çok tercih edilirler. TLD'lerin hassasiyetlerinde büyük değişimler olmakla birlikte bu dozimetreler, pasif sistemler oldukları için hastanın aldığı doz ancak tedaviden sonra belirlenebilir (Chu ve diğ., 2007; Ramani ve diğ., 1997). ii) In-vivo dozimetresi olarak kullanılan bir diğer sistem diyot detektörlerdir. Aktif dozimetre olan bu aygıtların cevabı doz oranına ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. RadFET'lerin radyasyon cevabı ise 10⁸cGy/s değerine kadar doz oranından bağımsız olmakla birlikte, bu sensörler sıcaklıktan diyotlara göre daha az etkilenir (Rosenfeld, 2007; Jornet ve diğ., 2004). ii.) RadFET'ler mikroişlemcilerle uyumludurlar. iii) Yarıiletken teknolojisine dayanan bu sensörlerin boyutları oldukça küçük, maliyetleri ucuz ve güç tüketimleri düşüktür (Wang ve diğ., 2013, Pejovic ve diğ., 2012). iv) Gamma, X-ışını, elektron, alfa, beta ve nötronlara karşı duyarlıdırlar (Kahraman ve diğ., 2015; Gavelle ve diğ., 2011). Uzay araçlarındaki radyasyon modüllerinin vazgeçilmez bir parçası olan RadFET'lerin tüm bu üstün özellikleri, onların uygulama alanlarını her geçen gün arttırmaktadır (Kim ve diğ., 2006; Kimoto ve Jaksic, 2004).

Şu ana kadar literatürde RadFET'ler ile ilgili yürütülen çalışmalar: i) RadFET'lerin yerleştirildiği entegre paketin sensörün duyarlılığı üzerine etkisi (Stanković ve diğ., 2012; Wind ve diğ., 2009), ii.) RadFET'lerin kısa ve uzun süreli sönümlenme karakteristiklerinin incelenmesi (Ristić ve diğ., 2011; Ristić ve diğ., 1996), iii.) Farklı tipteki radyasyonlar için RadFET'lerin duyarlılıklarının belirlenmesi (Pejović ve diğ., 2013), iv) Üretimden kaynaklı ve ışınlama sonrası yapıda meydana gelen tuzak yoğunluklarının değişimi (Ristić ve diğ., 2011; Ristić ve diğ., 2007), v) Farklı üretim parametrelerinin sensörün elektriksel karakterizasyonu üzerine etkisi, şeklinde sıralanabilir (Jaksic ve diğ., 2002).

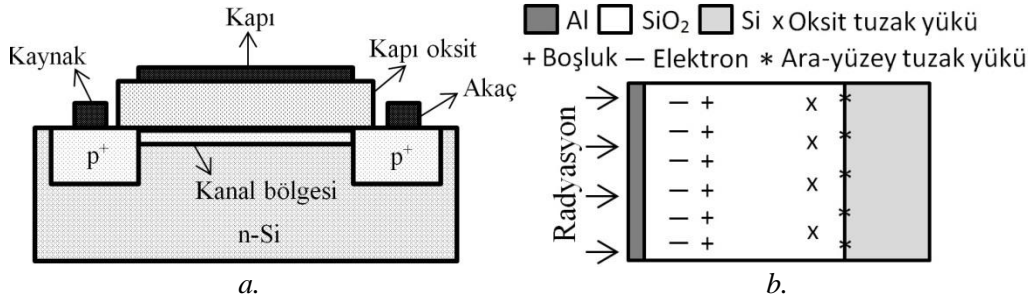
Sensörün duyarlılığını etkileyen en önemli parametre kapı oksit tabakasının kalınlığıdır. İnce kapı oksit tabakalı (~100 nm) RadFET'lerde duyarlılık istenilen düzeyde olmamakla birlikte, kalın yapılar için (~1 µm) sensörün radyasyon cevabında artan dozla birlikte lineerlikten sapma gözlenmektedir (Martínez-García ve diğ., 2015; Ristić ve diğ., 1996). Literatürde yapılan çalışmalarda 400 nm civarında kapı oksit tabakasına sahip RadFET'lerin duyarlılıklarının 100 nm'li RadFET'lerden daha iyi olduğu ve bu sensörlerin radyasyon cevabının birkaç µm oksit tabakalı RadFET'lere göre daha geniş bir doz aralığında lineer davranış gösterdiği rapor edilmiştir (Martínez-García ve diğ., 2015; Jaksic ve diğ., 2002; Ristić ve diğ., 1996). Doz okuma aralığı geniş RadFET'lerin üretilmesinde ise ışınlama öncesi eşik geriliminin (V_{th}) sıfıra çekilmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla Jaksic ve diğ. (2002) tarafından yapılan çalışmada termal oksidasyon metoduyla büyütülmüş 400 nm'lik kapı oksit tabakasına bor iyonu (B⁺) implante edilmiş ve RadFET'lerin akım-gerilim (I_d-V_g) belirtgenleri elde edilmiştir. Sonuçlar, üretilen bu yeni pMOS dozimetrelerinin duyarlılığının daha yüksek ve doz okuma aralığının daha geniş olduğunu göstermiştir.

Yerli RadFET'lerin (NürFET) üretimi ilk defa 2015 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (NÜRDAM) gerçekleştirilmiş olup sensörün duyarlılığını arttırmaya ve doz okuma aralığını genişletmeye yönelik Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmanın amacı, bor iyonu (B⁺) implantasyonu metodunu kullanarak hangi koşullarda RadFET'lerin eşik geriliminin sıfıra yakın bir değere sahip olduğunu belirlemektir. Araştırma, Silvaco TCAD benzetim programı ile yapılmış ve NÜRDAM'da implantasyon metoduyla üretilmesi planlanan RadFET'ler için optimum koşullar belirlenmiştir.

2. TEORİ VE YAPI

n-tipi silisyum (Si) alt taş üzerine üretilen RadFET’lerde, kapı oksit tabakasının her iki yanında, kaynak ve akaç elektrotları arasındaki akım geçişini sağlayan bor katkılı (p^+) bölgeler bulunmaktadır. RadFET’in iletme geçmesi için bu iki katkılanmış alan arasında bir kanal oluşması gerekir. Kapı elektroduna uygulanan gerilime (V_g) bağlı olarak yapıda meydana gelen olaylar: i) Pozitif gerilim uygulandığında Si’deki negatif yükler kanal bölgesine doğru çekilir (accumulation-toplanma modu), ii) Negatif gerilim uygulanırsa negatif yükler kanal bölgesinden aşağı doğru itilir ve kanal bölgesi yükten bağımsız hale gelir (depletion-tükenim modu), iii) Negatif gerilim arttırılırsa tüm negatif yükler itilir ve pozitif yükler kanala doğru çekilir (inversion-terslenme modu), şeklinde sıralanabilir. Pozitif yüklerin hareketi V_{gs} ’nin (kapı-kaynak gerilimi) yeterli derecede negatif olmasına bağlıdır. Bu nedenle eşik geriliminin başlangıç polaritesi negatiftir. Kaynak ve akaç arasında bir kanalın oluşabilmesi için V_{gs} ’nin V_{th} değerinden daha büyük (daha negatif) olması gerekir. Çalışmada, I_d-V_g karakteristik eğrisinin lineer bölgesinden indirilen doğrunun voltaj eksenini kestiği nokta RadFET’in eşik gerilimi olarak alınmıştır (<http://www.sdram-technology.info/threshold-voltage-measurement.html>).

RadFET’lerin çalışma prensipleri, radyasyonun duyar bölgeyle (SiO_2 /kapı oksit) etkileşmesi sonucunda yapıda meydana getireceği iyon çiftlerine dayanır. Oluşan elektron-boşluk çiftlerinden bir kısmı çok kısa bir süre içerisinde yeniden birleşir (rekombinasyon). Büyük bir kısmı ise DC gerilim altında hareket ederler. SiO_2 tabakasındaki elektronlar, pozitif yüklere kıyasla dört kat daha fazla hareketli oldukları için hızlı bir şekilde tuzaklardan kaçabilirler. SiO_2 ile Si alt taş arasındaki bölgeye doğru hareket eden pozitif yüklerin bir kısmı oksit tabakada bir kısmı da SiO_2/Si ara yüzeyinde tuzaklanırlar. Tuzaklanan bu yükler RadFET’in eşik geriliminde kaymaya neden olurlar. Uygulanan radyasyon dozuna karşı eşik geriliminde meydana gelen kayma değerleri, RadFET’lerin kalibrasyon eğrisini oluşturur. Çalışmada kullanılan RadFET’lerin şematik görünümü Şekil 1a’da, radyasyonun kapı oksit tabakasıyla etkileşmesi sonucunda meydana gelen olaylar ise Şekil 1b’de verilmiştir.



Şekil 1:

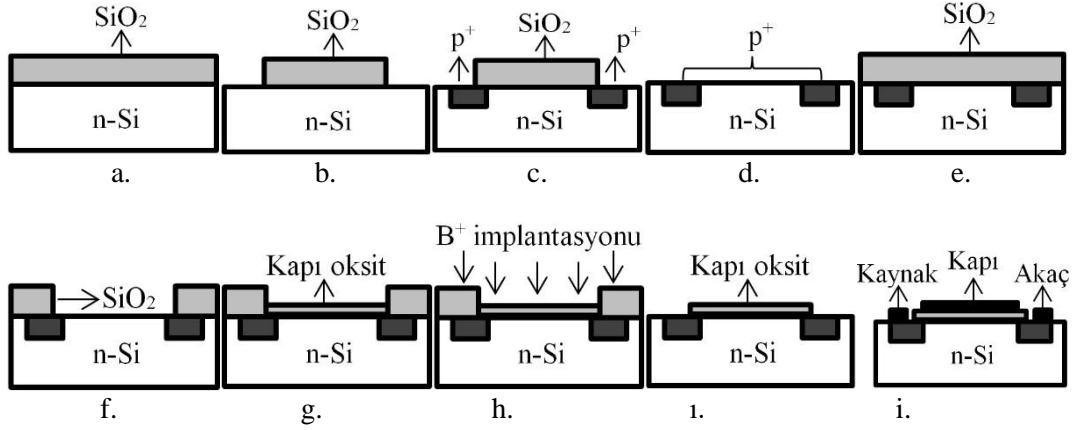
a. RadFET'in şematik görünümü b. Radyasyonla duyar bölgenin etkileşmesi sonucunda meydana gelen olaylar

3. RADFET'LERİN TCAD'DE TASARLANMASI VE İMPLANTASYON MODELİ

Silvaco TCAD benzetim kodu, ATHENA ve ATLAS alt programlarından oluşmaktadır. ATHENA’da RadFET’lerin tüm üretim aşamaları simüle edilirken, ATLAS’da yapı doğrudan tanımlanarak elektriksel karakterizasyon (I_d-V_g belirtgenleri) incelenir (Silvaco, 2008). ATHENA ile I_d-V_g belirtgeni, tüm üretim aşamaları programda işlendiği için ATLAS’a göre daha uzun zamanda elde edilir.

RadFET’lerin tüm üretim süreçleri ATHENA’ya işlenmiştir: i.) Si alt taşta 1×10^{14} atom/cm³ konsantrasyonunda fosfor (P) dağıtılmıştır. Böylece programa Si, n tipi olarak tanımlanmıştır. ii) Si üzerine 790 nm kalınlıkta SiO_2 , yaş oksidasyon süreciyle büyütülmüştür (Şekil 2a). iii) p^+ bölgelerinin oluşturulacağı alanların üst tarafındaki oksitler bor implantasyonu için

aşındırılmıştır (Şekil 2b). iv) p⁺ alanları için 110 keV enerjide 6.5x10¹¹ iyon/cm²'lik doz oranında B⁺, Si içine implante edilmiştir (Şekil 2c). v) Oksit tabakanın tamamı aşındırılmıştır (Şekil 2d). vi) Yaş oksidasyon metoduyla 900 nm'lik SiO₂ yapı üzerine büyütülmüştür (Şekil 2e). vii) Kapı oksit tabakasının oluşturulacağı alan aşındırılmıştır (Şekil 2f). viii) Kapı oksit tabakası yaş ve kuru oksidasyon metotlarıyla büyütülmüştür (Şekil 2g). ix) Yapıya, eşik geriliminin sıfıra yaklaştırılması amacıyla B⁺ iyonu imlantasyonu yapılmıştır (Şekil 2h). x) Metal kontaklar için gerekli alanlar açılmıştır (Şekil 2ı). xi) Kapı, kaynak ve akaç kontaktları oluşturulmuştur (Şekil 2i).



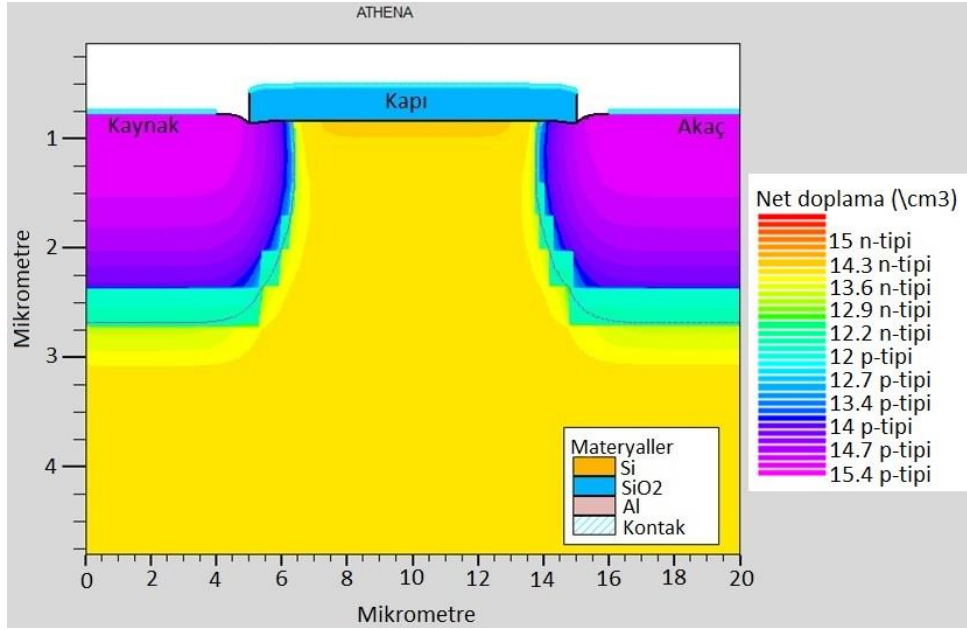
Şekil 2:

ATHENA'da RadFET'lerin üretim aşamaları

a. Si+SiO₂ yapısı **b.** Alan oksit aşındırma **c.** p⁺ bölgelerinin oluşturulması **d.** Oksit aşındırma **e.** Oksit büyütme **f.** Kapı oksit tabakası için alan oksit aşındırma **g.** Kapı oksit tabakası büyütme **h.** B⁺ iyonu imlantasyonu **ı.** Metal kontaklar için alan oksit aşındırma **i.** Metal kontakların büyütülmesi

Boyutları küçültülmüş RadFET'lerin TCAD'deki görünümü Şekil 3'te verilmiştir. Ticari amaçlı kullanılan RadFET'lerde genel olarak oksit tabaka kalınlığı 400 nm civarındadır. Araştırmada duyar bölge kalınlığı 300 nm ve 400 nm olan RadFET'ler Silvaco TCAD benzetim programında tasarlanmıştır.

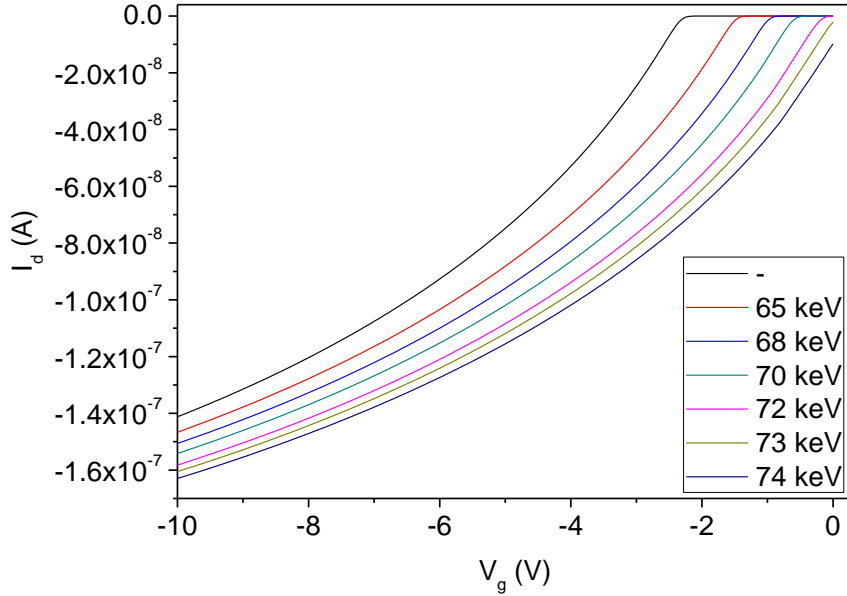
TCAD ATHENA'da kullanılan iyon imlantasyon modellerinin matematiksel temeli Linhard-Scharff-Schiotti (LSS) teorisine dayanmaktadır (Lindhard ve diğ., 1963). Bu teori, iyonların menziline, safsızlık konsantrasyonunu, dozunu vb. parametreleri dikkate alarak iyon konsantrasyonunun dağılımı ile ilgili bilgi verir. TCAD'de B⁺ iyonu konsantrasyon dağılımı için LLS teorisine dayanan üç farklı model vardır. Gauss imlantasyon modeli, genel olarak iyon dağılımı hakkında bilgi verse de gerçek konsantrasyon simetrik bir yapıya sahip olmadığı için detaylı incelemede yetersiz kalmaktadır. ATHENA'daki bir diğer model, Pearson İmlantasyon modelidir. Asimetrik iyon imlantasyon konsantrasyonu değişimi için Pearson dağılımı sıklıkça kullanılmaktadır. Tek Pearson yaklaşımı iyon konsantrasyonu dağılımı için yeterli olsa da kanal etkilerini tanımlama da yetersizdir. Kapsamlı bir benzetim için ATHENA, SVDP (SIMS Doğrulmalı İkili (Dual) Pearson) modelini sunmaktadır (Silvaco, 2008). Bu nedenle çalışmada B⁺ iyon imlantasyonu için SVDP metodu kullanılmıştır. Yapıya, 2.3×10¹¹, 3.3×10¹¹ ve 6.5×10¹¹ iyon/cm² doz değerlerinde B⁺ iyonları farklı enerjilerde implante edilmiştir.



Şekil 3:
TCAD benzetim programında boyutları küçültülmüş RadFET yapısı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

İmplant edilmiş ve B^+ dozu 6.5×10^{11} iyon/cm² olmak üzere 65-74 keV enerji aralığında implante edilmiş 300 nm kalınlığında kapı oksite sahip RadFET'lerden (300 nm-RadFET) elde edilen I_d - V_g değişimleri Şekil 4'te verilmiştir.



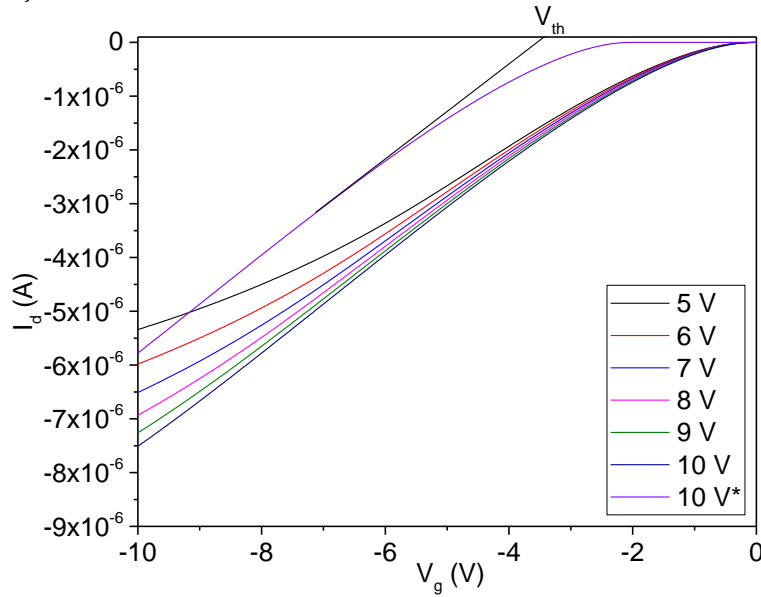
Şekil 4:
300 nm-RadFET'lerden elde edilen I_d - V_g karakteristikleri (B^+ dozu: 6.5×10^{11} iyon/cm² ve enerji aralığı: 65-74 keV)

Tablo 1'de 6.5×10^{11} iyon/cm²'lik dozda ve farklı enerjilerde B^+ implantasyonu ile üretilmiş 300 nm-RadFET'ler için akımın başladığı ilk kapı voltaj değerleri (AKD) verilmiştir.

Tablo 1. 300 nm-RadFET'lerin B⁺ iyonları ile implante edilmesi sonucunda akımın başladığı ilk kapı voltaj değerleri (6.5×10¹¹ iyon/cm² doz için)

Enerji (keV)	AKD (V)	Enerji (keV)	AKD (V)
0	-2.250	72	-0.065
65	-1.350	73	-
68	-0.803	74	-
70	-0.404		

Tablo 1 ve Şekil 4'teki sonuçlar, RadFET'in akacına gerilim uygulanmadan ($V_{dd}=0$) elde edilmiştir. Benzetim bulguları, sadece kapı gerilimiyle kanaldan çok küçük de olsa bir akım geçtiğini göstermektedir. 300 nm-RadFET radyasyon sensörünün akacına farklı voltaj uygulanmasıyla bulunan I_d - V_g grafikleri Şekil 5'te, Tablo 2'de ise bu yapıdan elde edilen V_{th} değerleri verilmiştir.

**Şekil 5:**

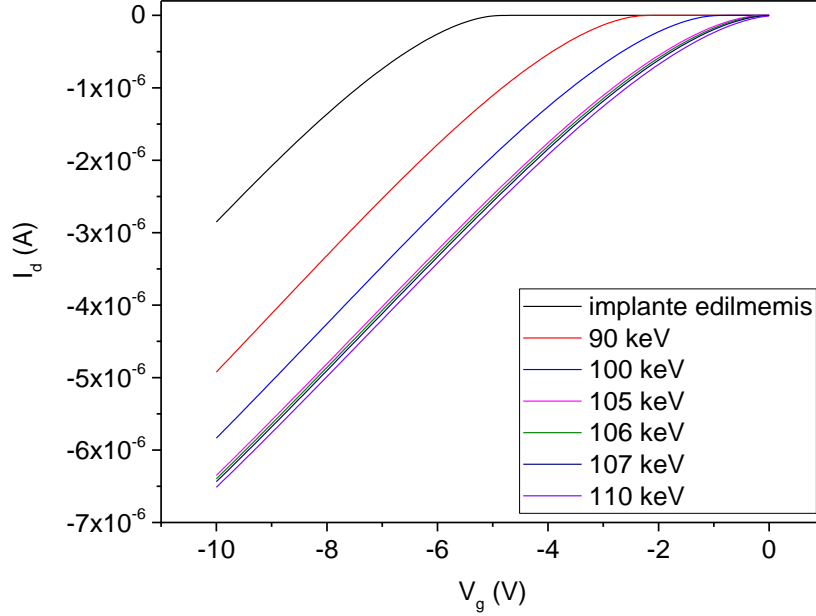
*6.5×10¹¹ iyon/cm²-72 keV B⁺ implantasyonu ile üretilmiş 300 nm-RadFET'lerin akacına farklı gerilimler uygulanması sonucunda elde edilen I_d - V_g değişimleri (*implante edilmemiş)*

Tablo 2. 6.5×10¹¹ iyon/cm²-72 keV B⁺ implantasyonu ile üretilmiş 300 nm-RadFET'lerin akacına farklı gerilimler (V_{dd}) uygulanması sonucunda elde edilen eşik gerilimi (V_{th}) değerleri

V_{dd} (V)	V_{th} (V)	V_{dd} (V)	V_{th} (V)
5	-1.198	8	-1.126
6	-1.174	9	-1.106
7	-1.150	10	-1.082

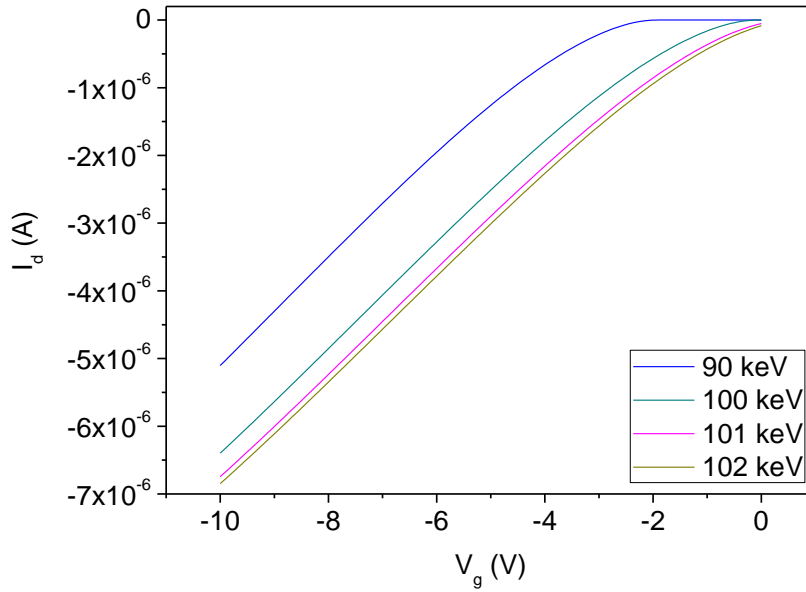
Şekil 5'te görüldüğü gibi akaç geriliminin uygulanmasıyla akım değerlerinde artış olmuştur. Diğer yandan akımın başladığı kapı voltaj değeri -0.03 V civarında seyretmiş olup bu değer hemen hemen akaca uygulanan gerilimden bağımsızdır. Tablo 2'deki sonuçlar artan V_{dd} ile V_{th} değerlerinin azaldığını göstermektedir. İmlante edilmemiş 300 nm-RadFET'lerde $V_{dd}=10$ V için 3.468 V'luk eşik gerilimi belirlenmiştir. Bu sonuç, B⁺ implantasyonu ile eşik geriliminin 2.386 V azaltıldığını gösterir.

2.3×10^{11} , 3.3×10^{11} ve 6.5×10^{11} iyon/cm² B⁺ dozları ile implante edilmiş RadFET'lerden elde edilen I_d-V_g grafikleri, Şekil 6, 7 ve 8'de verilmiştir. Tablo 3'te ise bu yapılar için AKD ve V_{th} değerleri görülmektedir.



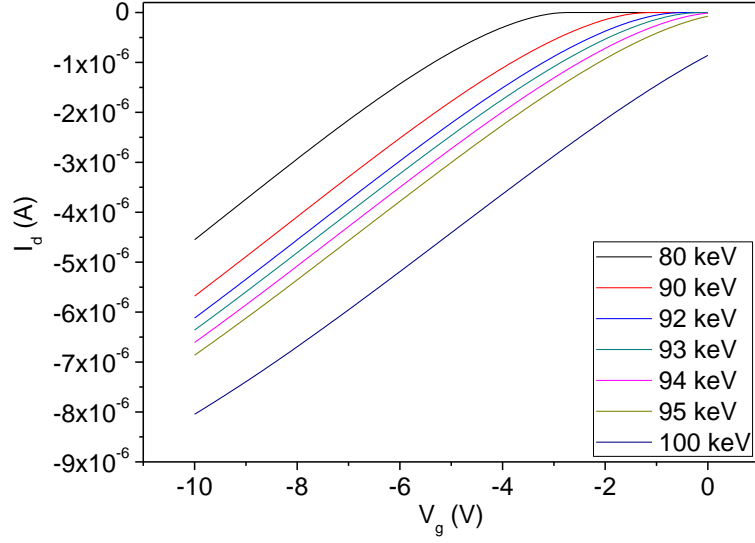
Şekil 6:

2.3×10^{11} iyon/cm² 'lik doz için 90-110 keV enerji aralığında B⁺ implantasyonu ile üretilmiş 400 nm-RadFET'lerin I_d-V_g değişimleri (V_{dd}=10V)



Şekil 7:

3.3×10^{11} iyon/cm² 'lik doz için 90-102 keV enerji aralığında B⁺ implantasyonu ile üretilmiş 400 nm-RadFET'lerin I_d-V_g değişimleri (V_{dd}=10V)



Şekil 8:

6.5×10^{11} iyon/cm²'lik doz için 80-100 keV enerji aralığında B⁺ implantasyonu ile üretilmiş 400 nm-RadFET'lerin I_d - V_g değişimleri ($V_{dd}=10V$)

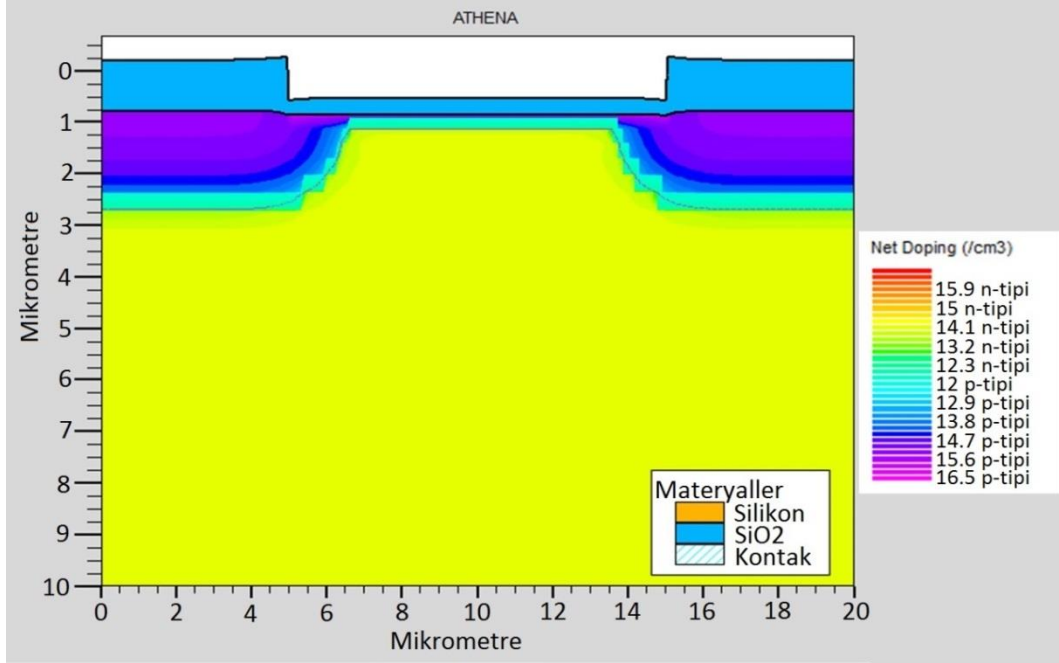
Tablo 3. Farklı B⁺ implantasyon koşullarında üretilmiş 400 nm-RadFET'lerin I_d - V_g değişimleri kullanılarak hesaplanmış AKD ve V_{th} değerleri

B ⁺ (iyon/cm ²)	Enerji (keV)	AKD (V)	V_{th} (V)
İmplant edilmemiş	-	-4.990	-5.733
2.3×10^{11}	90	-2.275	-3.290
2.3×10^{11}	100	-0.972	-1.930
2.3×10^{11}	105	-0.171	-1.218
2.3×10^{11}	106	-0.121	-1.139
2.3×10^{11}	107	-	-
2.3×10^{11}	110	-	-
3.3×10^{11}	90	-2.031	-2.962
3.3×10^{11}	100	-0.166	-1.423
3.3×10^{11}	101	-	-
3.3×10^{11}	102	-	-
6.5×10^{11}	80	-2.788	-3.864
6.5×10^{11}	90	-1.139	-2.598
6.5×10^{11}	92	-0.575	-1.705
6.5×10^{11}	93	-0.196	-1.500
6.5×10^{11}	94	-	-
6.5×10^{11}	95	-	-
6.5×10^{11}	100	-	-

Şekil 4, 6,7 ve 8'den görüldüğü gibi implantasyon enerjisi arttıkça başlangıç eşik gerilimi negatif değerlerde görülmektedir. Bunun nedeni, negatif V_g değerine ihtiyaç duyulmadan B⁺ iyonlarıyla akış ve kaynak arasında kanalın oluşturulmasıdır. Bu, RadFET'ler için istenilen bir durum değildir. Artan enerjiyle birlikte B⁺ iyonlarının giriciliği arttığından dolayı çoğu, oksit tabakayı geçip kanal bölgesine yerleşmektedir. Bu nedenle üretimle birlikte kapı voltajı uygulanmadan kanal bölgesi p-tipi Si gibi davranacak ve kapı oksit tabakasının her iki

tarafındaki p^+ katkılanmış bölgelerle bu kanal birleşecektir. Böyle bir yapının TCAD'deki görünümü Şekil 9'da verilmiştir.

Çalışmada implante edilmemiş ve 2.3×10^{11} , 3.3×10^{11} , 6.5×10^{11} iyon/cm² B⁺ dozlarında implante edilmiş 400 nm-RadFET'ler için en düşük V_{th} değerleri sırasıyla, -5.733 V, -1.139 V (106 keV), -1.423 V (100 keV) ve -1.500 V (93 keV) olarak elde edilmiştir. Tablo 3'teki veriler incelendiğinde düşük dozlu ve yüksek enerjili B⁺ implantasyonunun eşik gerilimini sıfıra daha çok yaklaştırdığı görülmektedir.



Şekil 9:

6.5×10^{11} iyon/cm² -73 keV B⁺ implantasyonu için TCAD'de görünen yapı (300 nm-RadFET üretim aşaması)

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, RadFET radyasyon sensörlerinin doz okuma aralığını genişletmek (ışınlama öncesi eşik gerilimini sıfıra yaklaştırmak) için B⁺ iyonu implantasyonu metodu kullanılmıştır. Başlangıçta 300 nm-RadFET'lere B⁺ iyonları (6.5×10^{11} iyon/cm²) 65-74 keV enerji aralığında implante edilmiş ve bu transistörlerin I_d-V_g belirtgenleri elde edilmiştir. Akımın ilk gözlenmeye başladığı kapı voltajı değerlerinin artan enerji ile birlikte azaldığı belirlenmiştir. Ancak akaca herhangi bir gerilim uygulanmadığı için elde edilen akım değerleri oldukça küçüktür. I_d 'yi arttırmak için akaca 5-10 V aralığındaki değerlerde gerilim verilmiştir. AKD değerleri V_{dd} 'den hemen hemen bağımsız iken V_{th} 'lar artan akac gerilimi ile birlikte azalmıştır. 6.5×10^{11} iyon/cm²-72 keV B⁺ implantasyonu ile üretilmiş 300 nm-RadFET'ler için en düşük V_{th} , 10 V'luk V_{dd} 'de -1.082 V olarak bulunmuştur. Bu değer, implante edilmemiş 300 nm-RadFET'lerle kıyaslandığında eşik geriliminin 2.386 V azaldığı görülmektedir. 400 nm-RadFET'lere 2.3×10^{11} iyon/cm² (90-110 keV), 3.3×10^{11} iyon/cm² (90-102 keV) ve 6.5×10^{11} iyon/cm² (80-100 keV) dozlarında B⁺ iyonları implante edilmiş ve bu transistörlerin I_d-V_g belirtgenlerinden yararlanılarak V_{th} değerleri belirlenmiştir. En düşük V_{th} değeri, 2.3×10^{11} iyon/cm² ve 106 keV B⁺ implantasyonunda -1.139 V olarak gözlenmiştir. İmplantate edilmemiş RadFET'e göre eşik gerilimi 4.594 V kadar azaltılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 1002-Hızlı Destek Programı tarafından "RadFET'lerin Elektriksel Karakterizasyonu ve Radyasyon Cevabının Simülasyon Programlarıyla İncelenmesi" başlıklı proje ile (Proje No: 114F260) ve Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı (Proje No: 2012K120360) tarafından desteklenmiştir. Araştırma, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) 2218-Yurt içi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında yapılmıştır. Katkı sağlayan tüm kurumlara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Cho, S.J., Kim, W.T., Ki, Y.G., Kwon, S.I., Lee, S.H., Huh, H.D., Cho, K.H., Kwon, B.H. ve Kim, D.W. (2007) In Vivo Dosimetry with MOSFET Detector during Radiotherapy, *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006*, Springer (IFMBE Proceedings), COEX Seoul, 14, 1987-1989.
2. Gavelle, M., Sarabayrouse, G., Scheid, E., Siskos, E., Fragopoulou, M. ve Zamani, M. (2011) MOSFET with a boron-loaded gate as a low-energy neutron dosimeter, *Radiation Physics and Chemistry*, 80, 1437-1440. doi:10.1016/j.radphyschem.2011.08.001
3. Holmes-Siedle, A. (1989) The use of RadFETs in radiation dose measurement: Report on three lots prepared for the US army: Final Technical Report, REM-FM-89-2, 1-38.
4. http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Silvaco/athena_users1.pdf, Erişim Tarihi: 01.10.2016, Konu: *ATHENA User's Manual*.
5. <http://www.sdram-technology.info/threshold-voltage-measurement.html>, Erişim Tarihi: 05.05.2017, Konu: *Threshold voltage for n-FET and p-FET*.
6. Jaksic, A., Ristic, G., Pejovic, M., Mohammadzadeh, A. ve Lane, W. (2002) Characterisation of radiation response of 400 nm implanted gate oxide RADFETs, *Proc. 23 rd International Conference on Microelectronics (MIEL 2002)*, IEEE, Nis, 2, 727-730. doi: 10.1109/MIEL.2002.1003360
7. Jornet, N., Carrasco, P., Jurado, D., Ruiz, A., Eudaldo, T. ve Ribas, M. (2004) Comparison study of MOSFET detectors and diodes for entrance in vivo dosimetry in 18 MV X-ray beams, *Medical Physics*, 31, 2534-2542. doi: 10.1118/1.1785452
8. Kahraman, A., Yılmaz, E., Kaya, S. ve Aktag, A. (2015) Effects of packaging materials on the sensitivity of RadFET with HfO₂ gate dielectric for electron and photon sources, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 170, 832-844. doi: 10.1080/10420150.2015.1118689
9. Kim, S-J., Min, K-W. ve Ko, A. (2006) Use of a MOSFET for radiation monitoring in space and comparison with NASA trapped particle model, *Journal of the Korean Physical Society*, 48(4), 865-869.
10. Kimoto, Y. ve Jaksic, A. (2004) RADFET utilization for spacecraft dosimetry, *Proc. 24 th International Conference on Microelectronics (MIEL 2004)*, IEEE, Nis, 2, 657-659.
11. Lindhard, J., Scharff, M. ve Schiott, H.E. (1963) Range concepts and heavy ion ranges, *Matematisk-fysiske Meddelelser*, 33, 1-42.
12. Martínez-García, M.S., Simancas, F., Palma, A.J., Lallena, A.M., Banqueri, J. ve Carvajal, M.A. (2014) General purpose MOSFETs for the dosimetry of electron beams used in intra-operative radiotherapy, *Sensors and Actuators A: Physical*, 210, 175-181. doi: 10.1016/j.sna.2014.02.019

13. Martínez-García, M.S., Torres del Río, J., Palma, A.J., Lallena, A.M. ve Jaksic, A. (2015) Comparative study of MOSFET response to photon and electron beams in reference conditions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 225, 95-102. doi: 10.1016/j.sna.2015.02.006
14. Mekki, J., Laurent, D., Glaser, M., Guatelli, S., Moll, M., Pia, M.G. ve Ravotti, F. (2009) Packaging effects on RadFET sensors for high energy physics experiments, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 56, 2061-2069. doi: 10.1109/TNS.2009.2014376
15. Pejovic, M.M., Pejovic, M.M. ve Jaksic, A. (2012) Contribution of fixed oxide traps to sensitivity of pMOS dosimeters during gamma ray irradiation and annealing at room and elevated temperature, *Sensors and Actuators A: Physical*, 174, 85 – 90. doi: :10.1016/j.sna.2011.12.011
16. Pejović, M., Ciraj-Bjelac, O., Kovačević, M., Rajović, Z. ve Ilić, G. (2013) Sensitivity of p-channel MOSFET to X-and Gamma-Ray Irradiation, *International Journal of Photoenergy*, 2013, 158403-1-6. doi: 10.1155/2013/158403
17. Ramani, R., Russell, O'Breien, S.P. (1997) Clinical dosimetry using mosfets, *International Journal of Radiation Oncology. Biology. Physics*, 37, 959–964. doi: 10.1016/S0360-3016(96)00600-1
18. Ristić, G., Golubović, S. ve Pejović, M. (1996) Sensitivity and fading of pMOS dosimeters with thick gate oxide, *Sensors and Actuators*, 51, 153-158. doi: 10.1016/0924-4247(95)01211-7
19. Ristić, G.S., Pejović, M.M. ve Jakšić, A. (2007) Physico-chemical processes in metal-oxide-semiconductor transistors with thick gate oxide during high electric field stress, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353, 170-179. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.09.020
20. Ristić, G.S., Vasović, N.D., Kovačević, M. ve Jakšić, A. (2011) The sensitivity of 100 nm RADFETs with zero gate bias up to dose of 230 Gy(Si), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 269, 2703-2708. doi: 10.1016/j.nimb.2011.08.015
21. Rosenfeld, A. (2007) Electronic dosimetry in radiation therapy, *Radiation Measurements*, 41, S134-S153. doi: 10.1016/j.radmeas.2007.01.005
22. Seon, J., Kim, S-J., Sung, B-I., Marri, S.A. ve Lee, S-H. (2010) A small space radiation monitor capable of measuring multiple I_{SD} - V_{GS} values of MOSFET, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 47, 340-344. doi: 10.1080/18811248.2010.9711963
23. Stanković, S.J., Ilić, R.D., Živanović, M., Janković, K.S. ve Lončar, B. (2012) Monte Carlo analysis of the influence of different packaging on MOSFET energy response to X-rays and gamma radiation, *Acta Phys. Pol. A*, 122, 655-658. doi: 10.12693/APhysPolA.122.655
24. Wang, S., Liu, P. ve Zhang, J. (2013) Simulation of threshold voltage adjustment by B^+ implantation for pMOS-RADFET application, *8th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, IEEE, Suzhou, 262-265.
25. Wind, M., Beck, P. ve Jaksic, A. (2009) Investigation of the energy response of RadFET for high energy photons, electrons, protons, and neutrons, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 56, 3387-3392. doi: 10.1109/TNS.2009.2033060

