

FOTODİYODUN ANAHTARLAMA SÜRELERİNİN DARBELİ YÜKSEK IŞIK ŞİDDETLERİ İÇİN İNCELENMESİ

Erdem ÖZÜTÜRK

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Görükle/16059/Bursa

Geliş Tarihi : 22.05.2003

ÖZET

Uygulamada genellikle fotodiyodun üzerine düşen ışık darbeleri şekilde değişmektedir. Bu durumda fotodiyot ile oluşturulmuş dedektör devresinden alınan ve ışık şiddetiyle doğru orantılı olan akım ya da gerilimin değişimi de darbeleri olmaktadır. Işık darbelerinin genliğinin yüksek değerlerde olması durumunda fotodiyodun eşdeğer devresindeki bazı elemanların değerleri çarpan ışığın şiddetine bağlı olarak önemli değerlerde değişmektedir ve bu değişimler doğrusal olmamaktadır. Bu nedenle burada yapılan incelemede nonlineer fotodiyot modeli kullanılmıştır. Fotoiletken modunda çalışıldığında hız daha yüksek olduğundan yapılan incelemede fotoiletken devresi ele alınmaktadır. Bu çalışmada yüksek ışık değerleri için anahtarlama sürelerinin değişimi SPICE programı kullanılarak incelenmiş ve ışık darbelerinin genliğinin artmasına bağlı olarak anahtarlama sürelerindeki değişim gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Fotodiyot, Anahtarlama süreleri, Darbeleri yüksek ışık şiddeti

AN INVESTIGATION ON PHOTODIODE SWITCHING TIMES FOR PULSED HIGH RADIANT POWERS

ABSTRACT

In many applications the light impinging on photodiode surface is pulsed. The change in parameter values in the equivalent circuit of photodiode is important if the amplitude of light pulses are large. In this situation, the change of parameter values with the amplitude of light pulse is nonlinear. Because of this, the nonlinear model of photodiode has been used in this search. By the reasons of photoconductive operation mode is a fast operation, the photoconductive circuit has been examined. In this study, according to the nonlinear behavior of photodiode at pulsed high radiant powers the changes of switching times have been investigated by using SPICE program and the changing of switching times with increasing radiant power has been showed.

Key Words : Photodiode, Switching times, Pulsed high radiant power

1. GİRİŞ

Bir çok optoelektronik sistemde, sistemin duyarlılığının daha fazla olabilmesi için ışık kaynağının gücünün artırılmasının yanında fotodedektör devresinin ışık şiddetine karşılık verdiği elektriksel büyüklüğün de olabildiği kadar fazla olması istenir. Fotodiyotlu bir dedektör

devresinde, ışığın şiddeti arttıkça fotodiyottan alınan elektriksel güç de artmaktadır. Fotodiyodun fotoiletken modunda çalışacak şekilde bağlanmasıyla oluşturulmuş dedektör devresinde, çarpan ışığın şiddetiyle doğru orantılı olan akım veya gerilim şeklindeki elektriksel büyüklüğün değişimi de büyük değerlerde olmaktadır. Birçok uygulamada algılanacak olan ışığın değişimi darbe şeklindedir. Bu nedenle, fotodiyot çıkışında yüksek

genlikli ışık darbelerinin oluşturduğu büyük genlikli gerilim ve akım değişimlerdeki anahtarlama sürelerinin ne şekil ve mertebede değişeceğinin bilinmesi önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, fotodiyodun iletme geçme, kesime gitme, gecikme gibi anahtarlama özelliklerinin ışık darbelerinin yüksek genlikli değerlerinde değişiminin ne şekilde olduğu incelenmektedir. Fotodiyot da diyot gibi bir pn eklemi (junction) olduğundan yarıiletken diyodun elektriksel davranışı hakkında bilinenler fotodiyot için de geçerli olacaktır. İdeal ölçme şartları sağlanabildiği için inceleme bilgisayarda SPICE programı kullanılarak yapılmaktadır. Burada SPICE programı ile yapılan incelemenin daha iyi anlaşılabilmesi için ilk olarak SPICE diyot modelinin kısaca açıklanmasına gerek duyulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

Yüksek ışık şiddetlerinde fotodiyottan akan akım darbesinin genliği büyük değerde olduğundan, fotodiyodun elektriksel davranışını karakterize etmek için kullanılacak model nonlineer bir model olacaktır. Burada yapılan nümerik incelemede fotodiyodun elektriksel modeli olarak SPICE diyot modeli kullanılmıştır. SPICE programıyla analiz yapabilmek için kullanılan fotodiyodun elektriksel davranışını belirleyen birtakım model parametrelerinin ölçme yoluyla bulunması gerekebilecektir. Aşağıda bu parametrelerin bazılarının ölçme yoluyla nasıl bulunabileceği ve kullanılan bu diyot modeli hakkında bazı kaynaklardan (Tuinenga, 1988; Kuntman, 1992; 1994; Kuntman et al., 1996; Hodges and Jackson, 1998; Leblebici, 2001) alınan bilgiler kısaca özetlenmektedir.

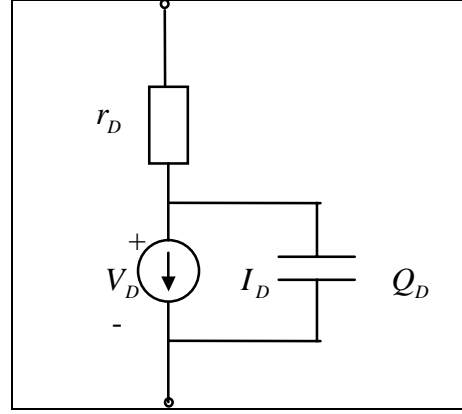
2. 1. SPICE Diyot Modeli

SPICE diyot modeli Şekil 1’de görülmektedir. Bu modelde omik gövde dirençleri r_D lineer direnci ile temsil edilmektedir. Diyodun doğru akım karakteristikleri lineer olmayan I_D akım kaynağı tarafından belirlenir. I_D akım kaynağının akımı Eşitlik (1)’de verilmiştir :

$$I_D = I_S \cdot [\exp(V_D / n \cdot V_T) - 1] \quad (1)$$

Modele ilişkin I_S , r_D ve n parametreleri, diyodun ileri yönde kutuplama karakteristiklerinden hareketle belirlenebilir. I_S doyma akımı, elde edilen doğrunun $V_D=0$ noktasına uzatılması ile bulunabilir. I_S doyma akımının deneysel olarak bulunabilmesi için, ideal

çalışma bölgesinde (orta akımlar bölgesi) çeşitli I_D - V_D değerlerinin ölçü yoluyla saptanması gerekir. n emisyon katsayısı, ideal bölgede diyot karakteristiğinin eğiminden yararlanılarak bulunabilir. Çoğu durumda emisyon katsayısı 1 olmaktadır.



Şekil 1. SPICE diyot modeli

Yüksek kutuplama seviyelerinde omik dirençlerin etkisi nedeniyle ideal değişime göre sapmalar ortaya çıkar. Bunun yanısıra, $1/(2V_T)$ ile orantılı bir değişimle karşılaşılır. SPICE diyot modelinde, yüksek seviyeli enjeksiyon durumu temsil edilmemiştir. Bu iki olay, sadece, r_D lineer direncinin etkisi ile modellenmektedir. r_D gövde direncinin değeri, belirli bir akım değerinde diyot geriliminin ideal üstel karakteristikten ne kadar saptığı belirlenerek bulunabilir. Pratikte, r_D 'nin değeri I_D akımının çeşitli değerlerinde belirlenir. Bunun nedeni, r_D değerlerinin diyot akımına bağımlılık göstermesidir. Bu değerlerin ortalaması alınarak r_D saptanır. Fiziksel diyot yapısı üzerindeki gerilim düşümü V_D ile gösterilirse Eşitlik (2) elde edilir :

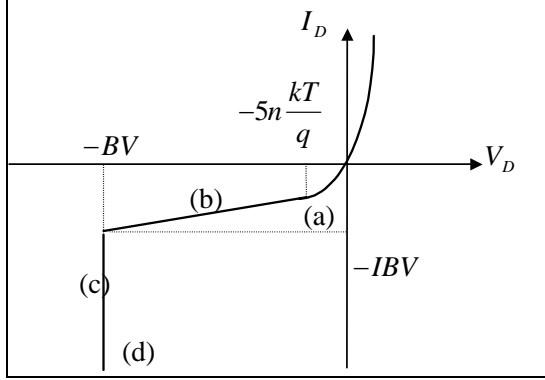
$$V_D^{\circ} = r_D \cdot I_D + V_D \quad (2)$$

Tıkama yönünde büyük gerilimle kutuplanma halinde ortaya çıkan bel verme olayı, SPICE diyot modelinde ters yön karakteristiği dört bölgeye ayrılarak temsil edilmektedir:

$$I_D = \begin{cases} I_S [\exp(V_D / n \cdot V_T) - 1] + V_D \cdot GMIN & -5n \cdot V_T \leq V_D \leq 0 \\ -I_S + V_D \cdot GMIN & -BV < V_D < -5n \cdot V_T \\ -IBV & V_D = -BV \\ -I_S \left[\exp(-(BV + V_D) / V_T) - 1 + \frac{BV}{V_T} \right] & V_D < -BV \end{cases} \quad (3)$$

Buna ilişkin karakteristik Şekil 2’de verilmiştir. Şekilden fark edilebileceği gibi ; a, b, c ve d bölgeleri farklı analitik bağıntularla verilmişlerdir. V_D diyot geriliminin bu bölgedeki değerleri için

ıraksama olabilir ve yakınsama problemleriyle karşılaşılabilir. Ters yön için kullanılan IBV ve BV parametrelerinin değerleri, bel verme noktasının karakterize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2. Diyodun tıkama yönü karakteristiği

Eşdeğer devredeki Q_D yükü, diyottaki yük birikimi olaylarını temsil etmektedir. SPICE modelinde bu büyüklük Eşitlik (4) ile verilmektedir :

$$Q_D = \begin{cases} \tau_t \cdot I_D + C_{j0} \int_0^{V_D} \left(1 - \frac{V}{\phi_0}\right)^{-m} dV & V_D \leq FC \times \phi_0 \\ \tau_t \cdot I_D + C_{j0} F_1 + \frac{C_{j0}}{F_2} \int_{FC \times \phi_0}^{V_D} \left(F_3 + \frac{m \cdot V}{\phi_0}\right) dV & V_D > FC \times \phi_0 \end{cases} \quad (4)$$

Bu bağıntılar kapasite-gerilim ilişkisi şeklinde de yazılabilir, Eşitlik (5):

$$C_D = \frac{dQ_D}{dV_D} = \begin{cases} \tau_t \frac{dI_D}{dV_D} + C_{j0} \left[1 - \frac{V_D}{\phi_0}\right]^{-m} & V_D \leq FC \times \phi_0 \\ \tau_t \frac{dI_D}{dV_D} + \frac{C_{j0}}{F_2} \left(F_3 + \frac{m \cdot V_D}{\phi_0}\right) & V_D > FC \times \phi_0 \end{cases} \quad (5)$$

Bağıntılardaki τ_t büyüklüğü geçiş süresi olarak isimlendirilir ve difüzyon kapasitesini modelleyen bir parametredir. Q_D yük elemanı ile SPICE’de iki ayrı yük birikimi olayı modellenmektedir. Jonksiyonun fakirleşmiş bölgesindeki yük birikimi C_{j0} , ϕ_0 ve m parametreleri ile temsil edilmektedir. Difüzyon kapasitesi ise τ_t geçiş süresi ile belirlenmektedir. Eşitlik (4) ve (5)’de yer alan F_1 , F_2 ve F_3 büyüklükleri SPICE sabitleridir ve Eşitlik (6-8) ile tanımlanmaktadır :

$$F_1 = \frac{\phi_0}{1-m} \left[1 - (1-FC)^{1-m}\right] \quad (6)$$

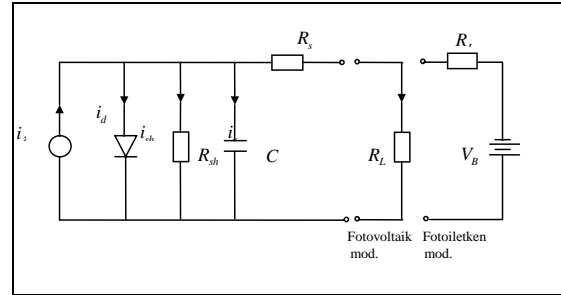
$$F_2 = (1-FC)^{1+m} \quad (7)$$

$$F_3 = 1 - FC \cdot (1+m) \quad (8)$$

FC büyüklüğü, jonksiyonun ileri yönde kutuplanması, yani $V_D \geq FC \times \phi_0$ olması durumunda kapasitenin nasıl hesaplanacağını belirleyen bir büyüklüktür. Programda “default value” olarak $FC=0.5$ alınmıştır ve bu noktadan itibaren kapasite-gerilim bağıntısı lineer bir değişime dönüşmektedir.

2. 2. SPICE Programıyla Bir Fotodiyodun Anahtarlama Sürelerinin İncelenmesi

Fotodiyot, yavaş değişimlerde, bir ideal diyodu besleyen bir foto akımı kaynağıyla temsil edilebilir. Şekil 3’te fotodiyodun eşdeğer devresi (Wilson and Hawkes, 2000) görülmektedir. Bu eşdeğer devrede i_L fotodiyoda çarpan ışığın şiddetiyle doğru orantılı olan foto akımını göstermektedir. Foto akımını geçiş bölgesi içinde ve bu bölgenin yakın civarında ışık enerjisi etkisi ile doğan elektronlar ve delikler oluşturmaktadır. Eşdeğer devrede bir paralel direnç R_{sh} , hızlı değişimlerde etkili olan iç kapasiteyi belirten bir C elemanı ve bir de gövde ve kontak dirençleri etkisini gösteren R_s direnci bulunmaktadır. Fotoiletken mod’da çalışılması durumunda C kapasitesi ters kutuplanmış olan fotodiyodun jonksiyon kapasitesini göstermektedir. Bu kapasitenin değeri tıkama gerilimine bağlı olarak değişir ve tıkama gerilimi arttıkça azalır. C kapasitesinin diyot gerilimi V_D ’ye ne şekilde bağlı olduğu Eşitlik (5)’te görülmektedir. Eşdeğer devredeki paralel direnç olan R_{sh} ’nın değeri 100 Mohm mertebesindedir. R_s ise ohm’lar değerindedir.



Şekil 3. Fotodiyodun eşdeğer devresi ve fotoiletken ve fotovoltajik çalışma durumlarında fotodiyot uçlarına bağlanacak olan devre modeli (Fotovoltajik modda çalışılacaksa fotodiyot uçlarına R_L direnci bağlanmaktadır)

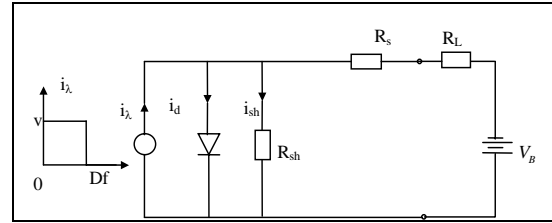
Fotoiletken modunda çalışılacaksa fotodiyot uçlarına R_L direncine seri olarak fotodiyodu tıkamada kutuplayacak şekilde bir de gerilim kaynağı bağlanmaktadır (Hickman, 1995; Bhattacharya, 1997, Wilson and Hawkes, 2000).

Fotodiyot fotoiletken ya da fotovoltajik çalışma olmak üzere iki farklı modda çalışacak şekilde kutuplanabilir. Eğer ışık şiddetine karşılık gelen büyüklük ile ışık şiddeti arasında doğrusal bir

değişim ve yüksek hız gerekiyorsa fotoiletken modunda, eğer düşük gürültü ve yüksek duyarlılık gerekiyorsa fotovoltajik mod'da çalışmalıdır.

SPICE programıyla fotodiyoda çarpan ışığın darbe şeklinde olması durumunda anahtarlama sürelerinde ışık darbesinin genliğine (şiddetine) bağlı olarak ne gibi değişikliklerin ortaya çıktığını incelemek amacıyla Şekil 4'de gösterilen devre kullanılmıştır. Devrenin girişindeki i_x akım darbesi, fotodiyoda çarpan ışık darbesinin genliğiyle orantılı olan foto akımını göstermektedir. SPICE programında i_x foto akımına karşılık tanımlanan kaynak I_{g1} akım kaynağıdır. Bu akım kaynağına ilişkin Df ve v değerleri sırasıyla akım darbesinin darbe süresini ve darbe genliğini belirlemektedir. $Df = 500$ ns olarak seçilmiştir ve v genliğine değişik değerler verilerek bunlara karşılık anahtarlama sürelerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. I_{g1} akım kaynağı ideal bir akım kaynağıdır ve bu kaynağın yükselme süresi, gecikme, düşme süresi ve düşme gecikmesi süresi sıfıra eşit yapılabilmektedir. Bu ideal şartlar ancak bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Deneysel olarak anahtarlama sürelerinin değişimi incelenmek istediğinde, fotodiyotta bir akım darbesi üretecek olan ışık darbesinin sıfırdan farklı anahtarlama süreleri olacaktır. Dolayısıyla fotodiyottan kaynaklanan anahtarlama süreleri deneysel olarak bulunmak istendiğinde, çarpan ışık darbesindeki ve ölçme devresinde ideal olmayan diğer devre elemanlarından kaynaklanan gecikmelerin etkisinin giderilmesi gerekecektir. Şekil 4'de görülen diyot, Şekil 3'de görülmekte olan

ideal diyot ve bunun iç kapasitesini gösteren C elemanları yerine bunların her ikisini de içeren bir diyodu temsil etmektedir. Söz konusu diyot SPICE programında modellenirken Şekil 1'de görülen SPICE diyot modelindeki gövde ve kontak dirençlerini karakterize eden küçük değerdeki seri direncin değeri sıfır seçilmiştir. Çünkü I_{g1} akım kaynağının uygulanması gereken uçlar Şekil 1'de görülen SPICE diyot modelindeki seri direncin altında yer alan ve paralel durumda bulunan bağımlı akım kaynağı ve kondansatörün uçlarıdır. Gövde ve kontak dirençlerinin etkisi devreye bir R_s direnci Şekil 4'deki gibi bağlanarak gösterilmiştir. Şekil 4'de görülmeyen C kapasitesi diyot içinde yer almaktadır ve diyot uçlarındaki gerilime bağlı kapasitenin değeri SPICE tarafından her diyot gerilimi için otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu şekilde yapılmayıp, bu kapasitenin diyot dışında ayrı bir eleman olarak düşünülmesi durumunda bu gerilime bağlı kapasitenin tanımlanması güçlükleriyle karşılaşılacaktır. Aşağıda açıklanan devreyi tanımlayan SPICE programı Tablo 1'de belirtilmektedir:



Şekil 4. SPICE ile oluşturulan ve anahtarlama sürelerinin bulunmasında kullanılan ölçme devresi

Tablo 1. Fotodiyodun Anahtarlama Sürelerinin İncelenmesinde Kullanılan Devreyi Tanımlayan SPICE Programı

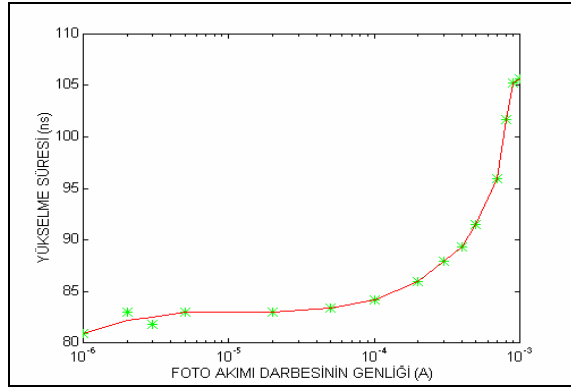
D 1	an: 1	ca: 3	Mo=1N1		
MODEL	1N1 D	(IS=1.0e-14 N=2 RS=0 +CJ0=15.0e-12 TT=1.0e-10 VJ=1.0 M=0.5 EG=1.143)			
I g1	-out : 3	+out:1	v=0.001m	Ex=Pulse	+Fr=1 +Df=500n
R 1	p1 : 1	p2:2	v=1		
R 2	p1 : 1	p2:3	v=1E8		
R 3	p1 : 2	p2=0	v=10k		
B Battery	+out : 3	-out:0	v=15		

Diyot modelini oluşturan parametrelerden IS doyma akımını (I_s), N emisyon katsayısını (n), RS gövde direncini (r_D), CJ0 sıfır kutuplama jonksiyon kapasitesini (C_{j0}), TT geçiş süresini (τ_t), VJ potansiyel seddini (ϕ_0), M gradyan faktörünü (m), EG diyodun yapıldığı malzemenin band boşluğu enerjisi değerini göstermektedir. R1 direnci, gövde ve kontak dirençlerine karşılık gelen R_s direnci yerine, R2 paralel direnci R_{sh} yerine, R3 yük direnci R_L yerine kullanılmıştır. B gerilim kaynağı fotodiyodu tıkamada kutuplayan V_B gerilim kaynağına karşılık gelmektedir. Bu parametrelere

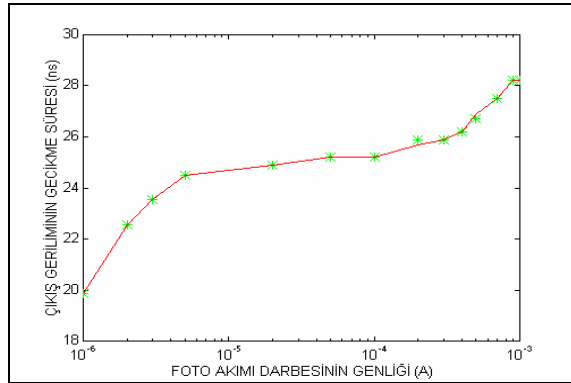
atanan değerler örnek bir diyot için belirlenmiş olan tipik değerlerdir.

Yukarıda belirtilen değerlere göre, akım kaynağının değişik genlikleri için R_L direnci uçlarındaki çıkış geriliminin anahtarlama süreleri, SPICE programıyla çizdirilmiş olan grafikler üzerinden elde edilmiş bulunmaktadır. Bu değerlere göre MATLAB programıyla çizilmiş olan değişimler Şekil 5, 6, 7, 8'de görülmektedir. Yükselme süresi, çıkış geriliminin maksimum değerinin % 10 ile % 90 katı kadar gerilim değerlerini aldığı sürelerin farkı bulunarak, gecikme süresi, çıkış geriliminin

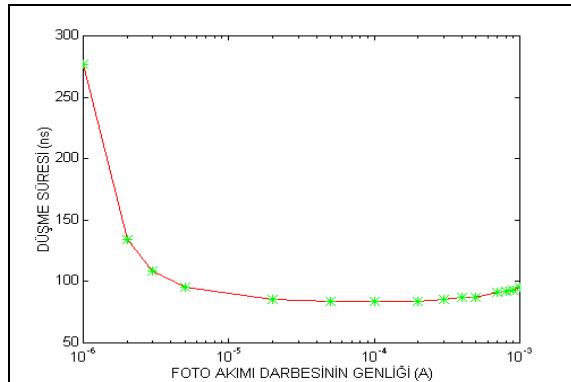
maksimum değerinin yarısı kadar olan gerilim değerini aldığı süre bulunarak elde edilmiştir. Düşme süresi, çıkış geriliminin maksimum değerinin % 90 ile % 10 katı kadar gerilim değerlerini aldığı anların farkı alınarak hesaplanmıştır. Düşme gecikmesi de çıkış işaretinin maksimum değerinin yarısını aldığı süreden I_{g1} 'in 500 ns'lik darbe süresi çıkarılarak bulunmuştur.



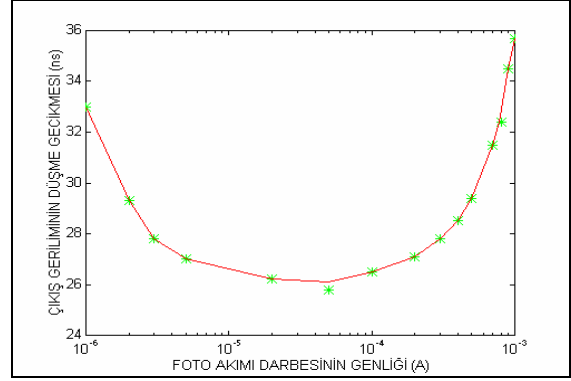
Şekil 5. Yükselme süresinin fotoakım darbesi genliği ile değişimi



Şekil 6. Gecikme süresinin fotoakım darbesi genliği ile değişimi



Şekil 7. Düşme süresinin fotoakım darbesi genliği ile değişimi



Şekil 8. Düşme gecikmesinin fotoakım darbesi genliği ile değişimi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan nümerik incelemelerden, bir fotodiyodun yüksek genlikli ışık darbeleriyle sürülmesi durumunda, ışık darbesinin genliği arttıkça anahtarlama sürelerinden yükselme süresinin diğer anahtarlama sürelerine göre önemli miktarda arttığı görülmektedir. Düşme süresi yüksek ışık değerlerinde fazla değişmemektedir. Gecikme süresi ile düşme gecikmesi ise diğer iki anahtarlama süresine nazaran daha düşük miktarda değişmektedir.

Yüksek ışık şiddetlerinde anahtarlama sürelerinin artmasının bir nedeni şöyle açıklanabilir : Bilindiği gibi fotodiyodu tıkamada kutuplayan gerilimin değeri azaldıkça fotodiyodun jonksiyon kapasitesinin değeri artmaktadır. Şekil 4'e bakıldığında foto akımı darbesinin genliği arttıkça fotodiyodu tıkamada kutuplayan gerilimin azaldığı görülmektedir. Bu nedenle yüksek ışık şiddetlerinde jonksiyon kapasitesinin değeri ve dolayısıyla anahtarlama süreleri artmaktadır.

Işık verici ile fotodiyodun yakın olması durumunda, vericinin verdiği ışık ortamda fazla zayıflamadan fotodiyoda ulaşacağından yüksek ışık şiddetleri ortaya çıkacaktır. Böyle bir durumla genellikle optik bağlaçlarda karşılaşmaktadır. Optik bağlaçta ışık verici olarak kullanılan eleman bir LED ise, bu LED'in yüksek ışık şiddetleri verecek şekilde yüksek genlikte akım darbeleriyle sürülmesi durumunda, LED'in anahtarlama süreleri de akım darbelerinin genliğine göre değişiklik gösterecektir (Bradbury, 1991; Özütürk, 2000). Bu nedenle, LED ve fotodiyottan meydana gelen böyle bir sistemde anahtarlama sürelerinin az olması isteniyorsa optimum çözüm için LED'i süren akımın genliği uygun bir değerde seçilmelidir. Bu şekilde optimum

bir çözüm bulabilmek için birtakım ölçmeler yapılması gerekebilir ve SPICE programıyla analiz yöntemi kullanılabilir. SPICE programıyla analiz yapabilmek için kullanılan fotodiyodun elektriksel davranışını belirleyen birtakım model parametrelerinin ölçme yoluyla bulunması gerekebilecektir. Bu parametrelerin bazılarının ölçme yoluyla nasıl bulunabileceği üçüncü bölümde anlatılmaktadır.

Ortamda bulunan , fon gürültüsünü meydana getiren ve çoğunlukla dedekte edilecek darbeli ışığa nazaran çok daha yavaş değişmekte olan çevre ışığı akım akıtarak fotodiyodun çalışma noktasını değiştirir. Bu durumda fotodiyot üzerindeki tıkama gerilimi değişeceğinden jonksiyon kapasitesinin değeri de değişir. Buna bağlı olarak da anahtarlama süreleri değişecektir. Fon gürültüsünü genellikle yapay ışık kaynakları olan aydınlatma cihazları meydana getirmektedir. Bunların verdiği ışığın frekansı 100 Hz olmaktadır ve bu frekanstaki değişim hızı, darbeli ışık kaynağının verdiği ışığın değişim hızına nazaran oldukça yavaştır.

Darbeli ışık iletimini içeren uygulamalarda, algılanacak olan ışığın darbe süresinin belli bir değerden daha büyük olması gerekmektedir. Işık darbesine karşılık üretilecek akım veya gerilimin darbe şeklinde olabilmesi için, ışık darbesinin darbe süresinin fotodiyodun gecikme süresi ve yükselme süresinden daha büyük olması gerekir. Aynı şekilde, fotodiyottan alınan elektriksel değişimin darbeli olabilmesi için, ışık değişiminin boşluk süresinin fotodedektör devresinin düşme süresi ve düşme gecikmesinden daha büyük olması gerekir. Bazı kaynaklarda ışık darbesinin darbe süresinin fotodedektör devresinin zaman sabitinin (Şekil 4' deki devrede yaklaşık olarak $R_L \times C$ değerinde) üç-dört katı , bazı kaynaklarda ise on katı (Watson, 1988) seçilmesinin uygun olacağı belirtilmektedir. Burada elde edilen anahtarlama sürelerinin değişik ışık şiddetlerine (ve değişik fon gürültüsü şiddetlerine) göre değişimi gözönünde bulundurulduğunda, ışık darbesinin minimum darbe süresinin ve minimum boşluk süresinin ne değerde olması gerektiği hakkında bir fikir elde edilebilmektedir.

Bazı uygulamalarda fotodedektör çıkışının yükseltilmesi gerekmektedir (Özütürk ve Karlık, 1998). Bu durumda, fotodedektör devresinin iç kapasitesine yükselticinin giriş kapasitesi paralel geleceğinden eşdeğer kapasitenin değeri artacaktır.

Bu nedenle anahtarlama süreleri belirlenirken devredeki tüm eşdeğer kapasite göz önünde bulundurulmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- Bhattacharya, P. 1997. Semiconductor Optoelectronic Devices, 614s. Second Edition. Prentice-Hall, USA.,358-368.
- Bradbury, D. 1991. Shedding Light on Opto-Electronics. Electronics World+Wireless World, November 1991. 911-915.
- Hickman, I. 1995. Reflections on Opto-electronics. Electronics World+Wireless World, November 1995.970-974.
- Hodges, D. A. and Jackson, H.G. 1988. Analysis and Design of Digital Integrated Circuits., 463s. Second Edition. McGraw-Hill, U.S.A.,113-155.
- Kuntman, H. H. 1992. Analog Tümdevre Tasarımı, 350s., Sistem Yayıncılık, İstanbul. 289-298.
- Kutman, H. H. 1994. Endüstriyel Elektronik, 284s. Birinci Basım. Sistem Yayıncılık, İstanbul. 231-263.
- Kuntman, H. H., Toker, A. ve Özcan, S. 1996. Sayısal Elektronik Devreleri., 342s. Sistem Yayıncılık, İstanbul. 13-20.
- Leblebici, D. 2001. Elektronik Elemanları. 189s. Seç Yayın Dağıtım, İstanbul. 39-82.
- Özütürk, E. ve Karlık, S. E. 1998. "Kızılötesi Işınlarla Açık Optik Ortamda Bilgisayarlar Arası Veri İletimi" Bursa 5. Bilgisayar-Haberleşme Sempozyumu, 18-22. Kasım 1998. Bursa, 104-106.
- Özütürk, E. 2000. LED'lerin Aşırı Darbe Akımında Çalışmasının Teorik ve Pratik Araştırması, 163s. Doktora Tezi, U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa. 20-36.
- Tuinenga, P. W. 1988. SPICE, A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSpice, 193s. Prentice-Hall, USA.
- Watson, J. 1988. Optoelectronics., 153 s. Van Nostrand Reinhold (U.K) Co. Ltd., U. K. 55 –78.
- Wilson, J. and Hawkes, J. F. B. 2000. Optoelektronik, 518 s. II. Baskı, Değişim Yayınları, Adapazarı, 311-325.