



LED IŞIĞININ ALGILANABİLME UZAKLIĞINI ARTTIRMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Erdem ÖZÜTÜRK*

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059, BURSA

ÖZET

LED'in verdiği ışığın şiddeti uzaklık arttıkça azalmaktadır. LED ışığını daha uzaklara iletebilmek için LED'in ışık şiddetinin artırılmasının yanında fotodedektörün duyarlılığının da artırılması gerekmektedir. Işık şiddetini artırmak için LED darbeleri yüksek akımla sürülmelidir. Fotodedektör bir fotodiyotlu devreden oluşturulmuşsa duyarlılık ve ışığın darbe süresine bağlı olarak fotodedektör devresinin şekli ve eleman değerleri uygun seçilmelidir. Bu çalışmada aralarındaki ışık iletim mesafesini arttırmak için LED'in darbeleri akımda etkili olan karakteristikleri ile fotodiyotlu devrenin sahip olması gereken özellikler incelenmektedir. Bunlardan bazıları olan spektral uyum ve LED'in yüksek akım değerlerinde ışın diyagramlarında ortaya çıkan değişiklikler gibi etkenler genel amaçlı bir LED ve bir fotodiyot ele alınarak gösterilmektedir. Mercekler, yansıtıcılar ve ışık kılavuzu gibi optik elemanlar kullanılarak ışığın iletim mesafesi daha da artırılabilir. Burada bir mercek sistemi kullanılarak aralarındaki mesafenin doğrudan iletme nazaran ne kadar artırılabilir yine genel amaçlı bir LED ve bir fotodiyot için hesaplanmaktadır. Bu hesaplama yapılırken LED'in ışık şiddetine karşılık değişik uzaklıklar için fotodedektörden ölçülen gerilimlerden yararlanarak elde edilen fotodedektör geriliminin uzaklıkla değişim ifadesi kullanılmaktadır. Bu şekilde çapı çok büyük olmayan mercekler kullanılarak LED ışığının ne kadar uzağa ulaştırılabildiği gösterilmektedir.

Anahtar kelimeler : LED, Fotodiyot, Işık şiddeti, Uzaklık, Optik elemanlar.

THE INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES OF INCREASING THE LED'S LIGHT DETECTABLE DISTANCE

ABSTRACT

The LED's radiant power decreases with distance. Transmission of LED's light as far as possible depends on both increasing LED's radiant power and photodetector sensitivity. For increasing of LED's radiant power LED must be driven with pulsed high currents. For transferring maximum light between LED and photodetector the photodetector circuit and the values of its electronic components must be chosen suitable according to pulse duration of the light and the necessary sensitivity. In this study to increasing transmission distance of LED's light between LED and photodetector some of characteristics of them which affects at pulsed high currents have been investigated. Using some optical components like lenses, reflectors and light guides the transmission distance of light can be additionally increasing. In this study, using a lens system the calculation of how much the distance can be increased compared to direct transmission is made. In this calculation the relation which describe variations photodetector voltage with distance is used. This relation has been derived from some of measured photodiode voltages which respects to LED's radiant power at different distances. In this way, the transmission distance of LED's light has been calculated.

Keywords : LED, Photodiode, Radiant power, Distance, Optical components.

*E-posta: ozuturk@uludag.edu.tr

1. GİRİŞ

Birçok optoelektronik uygulamada LED ışığının mümkün olduğu kadar uzak mesafelere iletilmesi istenir [1,2]. Ayrıca iletim mesafesinin fazla olmasının yanında optoelektronik sistemin duyarlılığının maksimum olması için fotodedektöre ulaşan ışık şiddetinin olabildiğince fazla olması gerekmektedir. Bu nedenle bir LED'in verdiği ışığın bir fotodedektör tarafından dedekte edilebilecek şekilde ne kadar uzağa iletilebildiğinin incelenmesi önem taşımaktadır. Işığı dedekte edecek olan fotodedektör devresinde bir fotodiyot yada çoğaltmalı fototüp (photo multiplier) gibi optoelektronik elemanlar kullanılabilir. LED ışığını daha uzağa iletmek için fotodedektör devresinde fotodiyot yerine ışığa daha duyarlı olan bir çoğaltmalı fototüpün kullanılması düşünülebilir. Fakat çoğaltmalı fototüp fotodiyoda nazaran daha ağır ve pahalı bir eleman olması nedeniyle çok düşük ışık şiddetlerinin dedekte edilmesinin gerekli olduğu uygulamalar dışında pek kullanılmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yapılan incelemelerde LED ışığını dedekte etmek üzere sistemde bir fotodiyodun bulunduğu durum göz önüne alınmıştır.

LED ışığını daha uzağa iletmek için LED'in ışık şiddetini ve fotodedektör devresinin duyarlılığını arttırmak gerekmektedir. Bu amaçla bu çalışmada yapılan incelemeler ortaya konulurken fotodedektör devresinin özelliklerinin ne olması gerektiği kısaca belirtilmektedir. LED'in ışık şiddetini arttırmak darbeli çalışmada LED'i yüksek genlikli ve kısa süreli akım darbeleriyle sürmekle mümkün olmaktadır. Bu nedenle burada LED'in darbeli yüksek akımlarla sürülmesi durumunda kısa darbe sürelerindeki ışık darbelerini dedekte etmek için kullanılacak fotodiyotlu fotodedektör devresinin ne gibi özelliklere sahip olması gerektiği incelenmektedir ve bir grafikte darbe süresine göre fotodedektör devresinin biçiminin ve eleman değerlerinin ne olması gerektiği ortaya konulmaktadır.

Fotodedektör devresinin incelenen diğer bir özelliği fotodedektörün, darbeli akımın değişim hızına göre daha yavaş değişmekte olan ve fon gürültüsünü oluşturan ortamdaki diğer ışık değişimlerini ışık darbesine oranla ne kadar zayıflatabildiğidir. Bu incelemede fotodedektör devresinin yavaş değişimleri süzmesinden kaynaklanan darbe üstü eğilmesinin ne mertebede olduğu belirtilmekte ve ayrıca LED'in yüksek akımlarda ısınmasından dolayı ışık darbesinde oluşan darbe üstü eğilmesi bir grafikte gösterilmektedir.

LED'in ışık şiddetini arttırmanın yanında LED'in değişik doğrultularda yaptığı ışımanın içerdiği ışığın mümkün olduğu kadar fazlasının fotodedektör üzerine yönlendirilmesi de büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla mercek, yansıtıcılar ve ışık kılavuzları kullanılmaktadır. Bu çalışmada genel amaçlı olarak kullanılan bir LED'in bir doğrultu boyunca verdiği ışığın şiddetinin uzaklıkla değişim ifadesi elde edildikten sonra bu ifadeden yararlanarak bir mercek sisteminin kullanılmasıyla iletim mesafesinin ne kadar arttırılabileceği incelenmektedir.

2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1 Fotodedektörün Özellikleri

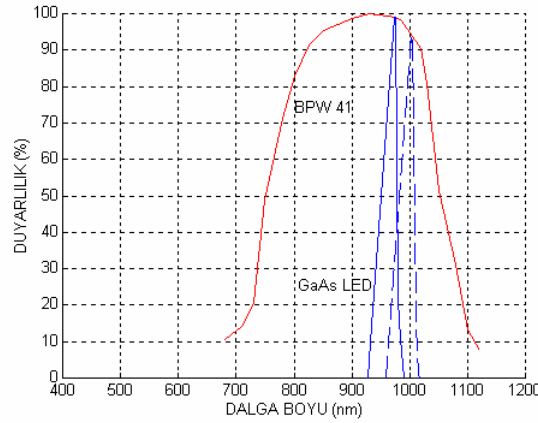
LED'in verdiği ışığın mümkün olduğunca fazlasını dedekte etmek için kullanılacak olan fotodedektörün bazı özellikler taşıması gereklidir [3,4]. Bunlar aşağıda belirtilmektedir :

Spektral Uyum : Seçilecek olan fotodedektör ile ışığı ölçülecek olan LED arasında iyi bir spektral uyum olması gerekir. Bunun için LED ışığının dalga boyu ile dedektörün tepe cevabının olduğu dalga boyunu mümkün olduğu kadar yakın eşleştirmek gerekmektedir. Bu özellikte düşük ışık seviyelerinin dedekte edilmesinde optimum performansa ulaşmak için önem taşımaktadır. Ayrıca LED den daha fazla ışık elde etmek için LED yüksek akımla sürülürken LED'in ısınmasından dolayı LED ışığında sıcaklıkla oluşacak olan spektral öteleme de dikkate alınmalıdır. Sözkonusu spektral öteleme nedeniyle LED'in spektral karakteristiğinin değişmesi durumunda da fotodedektörle olan spektral uyum fazla bozulmamalıdır. Şekil 1'de genel amaçlı bir GaAs (kızılötesi) LED'in spektral karakteristiği ile bu LED'in ışığını dedekte etmek için kullanılan BPW 41 fotodiyodunun spektral karakteristiği birlikte görülmektedir [5]. Şekilde LED ile fotodiyodun spektral karakteristiklerinin tepe değerinin yaklaşık aynı dalga boyunda olduğu görülmektedir. Aynı şekilde kesikli çizgi ile çizilmiş bulunan karakteristik GaAs LED'in ısınmasından dolayı yaklaşık 30 nm sağa doğru ötelenmiş bulunan spektral değişimini göstermektedir. GaAs LED'lerin spektral karakteristiğinde 30 nm'lik sağa doğru öteleme meydana gelebilmesi için jonksiyon sıcaklığının yaklaşık 100°C artması gerekmektedir. Şekil 1'de LED'in ötelenmiş spektral karakteristiğinin tepe değerinde fotodiyodiyodun bu dalga boyuna karşılık düşen spektral cevabından dolayı yaklaşık %5'lik bir zayıflatma olduğu görülmektedir.

Kuantum Verimi : Bir foton dedektörünün kuantum verimi fotodedektörün ışığa duyarlı yüzeyine çarpan her bir foton için ne kadar elektron üretildiğinin bir ölçüsüdür. Kuantum verimi :

$$\eta = \%(n_e / n_p) \times 100 \quad (1)$$

olarak tanımlanır. Burada n_e foton enerjisiyle üretilen serbest elektron sayısı , n_p ise çarpan foton sayısıdır. Pratik olarak tipik değerler %5 - %30 aralığındadır. Düşük ışık şiddetlerinin algılanması söz konusu olduğunda fotodedektörün kuantum veriminin mümkün olduğu kadar yüksek olması gerekmektedir.



Şekil 1. Bir kızılötesi LED ile kızılötesi ışığı dedekte etmek için kullanılan BPW 41 fotodiyodunun spektral karakteristikleri. Kesikli çizgi ile gösterilmiş bulunan değişim ısınmadan dolayı LED'in ötelenmiş olan spektral karakteristiğini göstermektedir.

Duyarlılık : Belirli bir ışık şiddetine karşılık fotodedektörden elde edilen elektriksel işaretin büyüklüğü arasındaki oran duyarlılık (S) olarak tanımlanır.

$$S = i_d / P_o \quad (2)$$

ya da

$$S = v_d / P_o \quad (3)$$

dır. Yukarıdaki ifadelerde i_d dedektörün çıkış akımı, v_d dedektörün çıkış gerilimi ve P_o çarpan ışığın şiddetidir. Duyarlılık ile kuantum verimi arasında aşağıdaki bağıntı bulunmaktadır [4]:

$$S = \eta \lambda q / hc \quad (mA / W) \quad (4)$$

Burada η kuantum verimi , λ dalga boyu, q elektron yükü, h Planck sabiti, c ışık hızıdır.

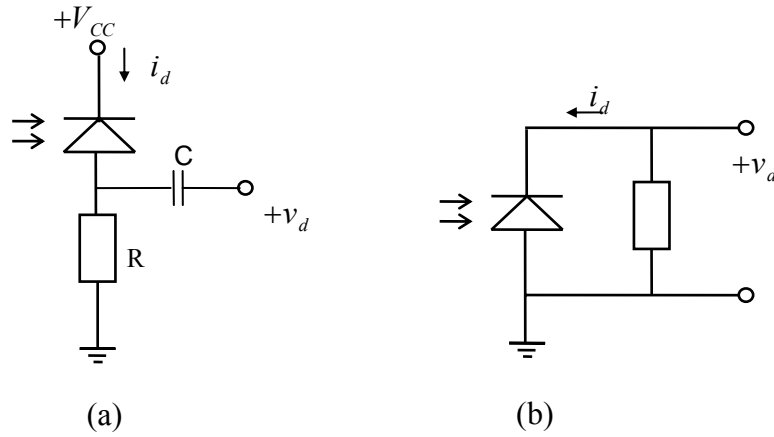
Bir fotodiyottan alınan işaret akımı fotodiyodun etkin alanıyla (ışığa duyarlı kırmık alanıyla) doğru orantılıdır. Ancak fotodiyodun jonksiyon alanı arttıkça iç kapasitenin değeri arttığı için fotodiyodun çalışma hızı düşmektedir.

Fotodedektörün duyarlılığı fotodedektörün devre şekline bağlı olmaktadır. Şekil 2'de fotodiyotla oluşturulmuş fotodedektör devreleri görülmektedir. Şekil 2(a)'da fotodiyot fotoiletken modunda (b)'de ise fotovoltajik modunda çalışacak şekilde bağlanmıştır. Doğrusallık ve yüksek çalışma hızı gerekiyorsa fotoiletken modunda, düşük gürültü ve yüksek duyarlılık gerekiyorsa fotovoltajik modunda çalışılmalıdır. Şekil 2 (b)'deki devrede direncin değeri

fotodiyodun dinamik direncine (değeri $500k\Omega$ - $100M\Omega$ arasında) göre büyük seçildiğinde çıkış gerilimi çarpan ışık şiddetiyle logaritmik olarak değişmekte ve duyarlılık yüksek olmaktadır.

Eşdeğer Gürültü Gücü : Tipine bakılmaksızın tüm fotodedektörler tamamıyla karanlıkta bulunsalar bile küçük fakat ölçülebilir bir çıkış işareti üretirler. Bir gürültüye karşılık gelen bu işaret dedekte edilebilecek en küçük ışık şiddetini belirler. Dedektör tarafından hissedilebilmesi için çarpan ışığın sözkonusu gürültü işaretinden daha büyük bir çıkış üretmesi gerekir. Çoğaltmalı fototüp ve yarıiletken elemanlarda gürültü işareti ısıll yolla üretilir ve bu nedenle oluşan gürültü akımı karanlık akımı olarak adlandırılır. Bir fotodiyot fotoiletken modda çalışacak şekilde kullanılırken tıkamada kutuplandığından I_0 ısıl doyma akımı önemli bir gürültüye neden olmaktadır ve R direnci arttıkça ısıl doyma akımının bu direnç üzerinde oluşturduğu gürültü geriliminin değeri de artmaktadır.

Dedektörün dedekte edebileceği minimum gücü belirlemek için eşdeğer gürültü gücü (NEP) olarak bilinen birim kullanılmaktadır. NEP, gürültü işareti tarafından üretilen işaretin büyüklüğüne eşit bir çıkış işareti üreten ışık şiddeti olarak tanımlanır. Böylece NEP, dedekte edilebilecek minimum ışık şiddetinin bir ölçüsünü vermektedir.



Şekil 2. Fotodiyodun (a) fotoiletken modunda, (b) fotovolttaik modunda çalışacak şekilde bağlanması.

Cevap Hızı : Cevap süresi dedektörün üzerine çarpan ışığın değişimine karşı ne kadar sürede cevap verdiğinin bir ölçüsüdür. Cevap süreleri referans işareti olan bir kare dalga giriş işaretine göre ölçülür ve genellikle hem yükselme hem de düşme süreleri belirtilir. Dedekte edilecek olan en kısa süreli darbenin onda biri ya da daha kısa değerde yükselme süresine sahip bir dedektör kullanmak geçerli bir kuraldır [4].

Fotodiyotlu bir fotodedektörün daha yüksek hızlarda çalışabilmesi için fotodiyot, fotoiletken modda bağlanmalıdır. Şekil 2(a)'daki fotodiyodun anodu ile toprak arasında görülen eşdeğer direncin değeri arttırılırsa, ilaveten kazanç için buraya bir kuvvetlendirici bağlıysa bu kuvvetlendiricinin girişine gelen ve fotodiyoda çarpan ışık şiddetiyle orantılı olan gerilim de arttırılmış olur. Ancak bu direncin artması, girişteki fotodiyotlu devrenin kutup frekansını ve dolayısıyla hızını düşürür. Vericideki LED'in gönderdiği ışığın darbe şeklinde olması durumunda alıcı devresi yeteri kadar hızlı değilse darbe süresinin arttırılması gerekecektir.

Fotoiletken modunda çalışan fotodedektördeki fotodiyot katoduna bağlı besleme gerilimi ile tıkama yönünde kutuplanmıştır. Bilindiği gibi tıkama yönündeki gerilim arttıkça fotodiyodun jonksiyon kapasitesinin değeri azalacaktır. Tıkama yönündeki gerilim 15V olarak seçildiği takdirde örnek bir fotodiyodun jonksiyon kapasitesi yaklaşık $C_j=10pF$ kadar olmaktadır. Fotodiyodun anodunda görülen eşdeğer direncin R_p olması durumunda bunun üzerinde daha büyük gerilim oluşabilmesi için direncin büyük bir değerinde örneğin 100 kohm değerinde seçilmesi durumunda girişte R_p ve C_j 'nin paralelinden meydana gelen yüksek frekans hücresinin zaman sabiti $1\mu s$ olur. Bu durumda bu devreden gelen yükselme süresi $t_r=2.2R_pC_j=2.2\mu s$ 'dir ve devrenin kutup frekansı $f_{ii}=0.35/t_r=159$ kHz'dir. Bu örnek pratik değerlere göre fotodiyodun anodundaki işaretin dikdörtgen darbesi şeklinde olabilmesi için

fotodiyoda çarpan ışık darbesinin darbe süresinin $2.2\mu s$ 'den daha büyük olması gerekir. R_p direncinin değeri arttıkça ışık darbesinin darbe süresi de artırılmalıdır. Şekil 3'de fotodiyodun anodundan görülen eşdeğer direnç R_p 'ye göre fotodiyoda çarpan ışık darbesinin sahip olması gereken darbe süresinin değişimi görülmektedir. Burada darbe süresi yükselme süresinin on katı olarak seçilmiştir ve jonksiyon kapasitesinin değerinin sabit kaldığı kabul edilmiştir. C_j 'nin sabit kabul edilmesiyle R_p 'nin ya da çarpan ışığın şiddetinin artmasıyla fotodiyot üzerinde düşen tıkama geriliminin azalması nedeniyle jonksiyon kapasitesinin değerinde oluşan artmanın etkisi ihmal edilmiştir [6]. Burada fotodiyodun bulunduğu ortamdaki diğer ışık kaynakları tarafından üretilen fon gürültüsünün fotodiyot üzerindeki gerilimi değiştirmesi nedeniyle fotodiyodun çalışma noktasının ortamdaki ışık kaynaklarının ışığının değişmesinden dolayı değiştiğini de ayrıca belirtmek gerekmektedir.

Fon Gürültüsünün Etkisi : Fotodedektörün bulunduğu ortamdaki dedekte edilecek ışık haricindeki diğer ışık kaynakları tarafından üretilen ışık fon gürültüsü olarak adlandırılır. Şekil 2 (a)'daki fotodiyodun anoduna bağlı C bağlama kondansatörü ve R direnci ile fotodedektörden sonra gelen devrenin (örneğin bir kuvvetlendiricinin) giriş direnci tarafından belirlenen alçak frekanslardaki kutup frekansının değeri, ortamda bulunan diğer ışık kaynaklarının oluşturduğu fon gürültüsünü süzölebilecek bir değerde olmalıdır. Güneşten gelen kızılötesi ışınların değişim hızı çok yavaştır. Fotodiyot üzerinde fon gürültüsünü oluşturabilecek yapay ışık kaynakları çoğunlukla aydınlatma cihazlarıdır. Örneğin verdiği ışığın en büyük ışık şiddeti kızılötesi bölgede olan tungsten flamanlı lambanın yaydığı kızılötesi ışınların frekansı 100 Hz'dir. C bağlama kondansatörü ile bunun iki yanında görülen dirençler bir yüksek geçiren süzgeç meydana getirmektedir. Örneğin C 'nin iki yanından 47 kohm değerinde iki direnç görülmüş olsun. Girişteki bu yüksek geçiren süzgecin kutup frekansı $f_a=1/[2\pi C(47k+47k)]$ değerindedir. Bu kutup frekansının altındaki frekanslarda frekans eğrisi 20dB/dekad'lık bir eğimle azalmaktadır. 100Hz'lik fon gürültüsünün hızlı değişimli ışık darbesine nazaran örneğin 100 kat daha zayıflatılması isteniyorsa f_a kutup frekansının değeri 100 Hz'in 100 katı seçilmelidir. Bu kutup frekansı 10 kHz seçilirse darbe işareti zayıflamadan süzgeçten geçerken 100 Hz'lik fon gürültüsünün genliği 0.01 ile çarpılarak 100 kat zayıflayacaktır. Fon gürültüsünün daha fazla süzülmesi isteniyorsa daha yüksek mertebeden süzgeçler kullanılabilir. Yukarıdaki süzgeç için $f_a =10$ kHz seçildiğine göre burada kullanılacak kondansatörün değeri;

$$C = \frac{1}{2\pi(2 \times 47 \times 10^3) \times 10 \times 10^3} = 0.17nF$$

olarak bulunur. Yukarıdaki bilinen basit hesaplarla elde değerlere göre darbe işaretindeki girişten gelen darbe üstü eğilmesi örneğin $4\mu s$ 'lik darbe için yaklaşık ;

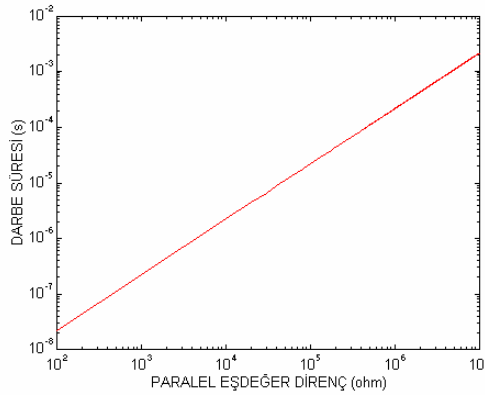
$$\partial = \frac{t_d}{RC} = \frac{4 \times 10^{-6}}{(2 \times 47 \times 10^3) \times 0.17 \times 10^{-9}} = \%25 \quad (5)$$

olmaktadır. Darbe üstü eğilmesinin daha az olması isteniyorsa f_a kutup frekansının değeri azaltılmalıdır. Bu ise fon gürültüsü gibi yavaş değişimlerin daha az süzülmesi demektir. Bu sorunu çözümenin en iyi yollarından biri vericideki LED'in ışık şiddetini arttırmak yani bunun için LED'i çok yüksek akım değerleriyle sürmektir. Ancak özellikle LED yüksek genlikli akım darbeleriyle sürüldüğünde fotodedektör devresindeki bağlama kondansatöründen dolayı oluşan eğilmenin dışında başka bir nedenden dolayı bir eğilme daha ortaya çıkmaktadır. Bu ikinci eğilmenin sebebi LED'in jonksiyon sıcaklığı arttıkça ışık şiddetinde ısınmadan dolayı ortaya çıkan azalmadır. Yüksek akım değerlerinde jonksiyon sıcaklığının artması nedeniyle darbe süresi kısa da olsa ışık şiddeti darbe süresi boyunca sabit kalmamaktadır. Şekil 4'de farklı akım darbeleri için elde edilen ışık darbelerinin darbe üstü değişimleri görülmektedir. Burada akım arttıkça darbe süresi sonunda oluşan düşme miktarının arttığı görülmektedir. Akım azaldıkça akımın belli bir sınır değerinde darbe süresi boyunca oluşan eğilme farkedilmez bir değere düşmektedir. Söz konusu olan LED (TLHRS 101 (TFK (ITT)) ile ilgili ışık darbesindeki eğilmenin darbe süresi olan $18\mu s$ boyunca farkedilmez olduğu akım darbesinin genliği 4.4A olarak belirlenmiştir. Işık darbesi sonundaki ışık değerinin (düşen kenar) önemli olduğu uygulamalarda ışık darbesinin darbe üstü eğilmesinin az olması için mümkünse darbe süresinin azaltılması gerekmektedir. Bu aynı zamanda fotodedektördeki bağlama kondansatöründen meydana gelen eğilmenin az olması için de gereklidir.

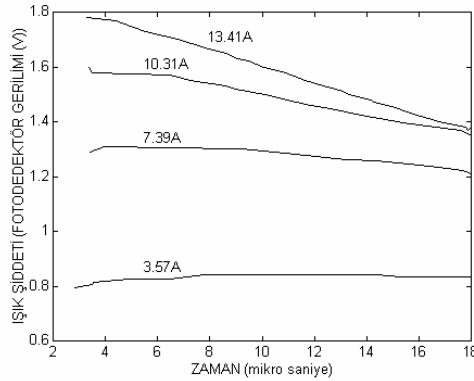
2.2 LED'in Darbeli Yüksek Akımla Sürülmesi

LED'in ışık şiddeti içinden akan akımın değeri arttıkça artmaktadır. Dolayısıyla LED'den daha fazla ışık elde etmek için LED'den akan akımın artırılması gerekmektedir [7,8]. LED'den akan akımın değeri arttıkça LED ısınmakta ve belli bir akım değerinden sonra LED fazla ısınıp yanabilmektedir. Bu nedenle LED'den daha fazla akım akıtmak ancak darbeli çalışmada ve uygun (darbe süresi) / (boşluk süresi) oranlarında mümkün olmaktadır [9].

Darbeli çalışmada LED'in ısıl eylemsizliğinin etkili olduğu, yani LED sıcaklığının darbeli akımın genliğinin oluşturduğu ısıl güce karşı gelen sıcaklığa yükselmeden akımın kesildiği darbe sürelerinde ve LED'in akım darbesi süresince edindiği ısının tamamını çevreye verebildiği boşluk sürelerinde LED'den nominal doğru akımının çok üzerinde genliğe sahip akım darbeleri akıtılabilmektedir. Doğru akımda en büyük ışık şiddeti LED'in dayanabileceği doğru akım değerine bağlıdır. Kızılötesi LED'ler için doğru akımın tipik değeri 5-400 mA'ler mertebesindedir. Darbeli çalışmada ışık şiddeti ile akım arasındaki değişimi görmek için genel amaçlı olarak kullanılan bir LED'den (LD 271 (Siemens)) değişik darbe süresine ve değişik genliklere sahip akım darbeleri akıtılarak bunlara karşılık elde edilen ışık şiddeti darbeleri alıcı devresi girişindeki fotodetektör devresiyle incelenmiştir ve ilgili ışık darbesi sonundaki ışık şiddetinin akım darbesinin genliğiyle olan değişimleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Ölçmeler esnasında akım darbelerinin boşluk süresi çok uzun seçilmiştir ve bunların tek darbe (tekrarlanmayan) şeklinde kabul edilebilmeleri mümkündür. Burada görüldüğü gibi akım darbelerinin genliği arttıkça ışık şiddeti artmaktadır ve darbe süresi arttıkça özellikle belli bir akım değerinden sonra ışık şiddetindeki artma hızı azalmaktadır.



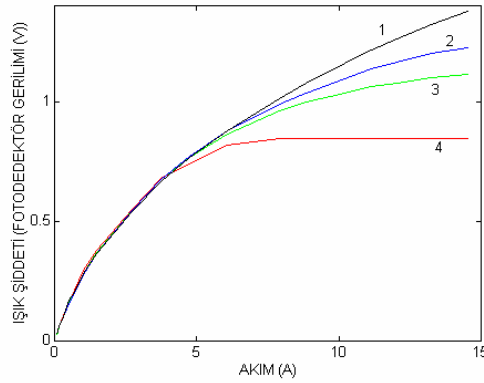
Şekil 3. Fotodiyodun anodundan görülen eşdeğer dirence göre fotodiyoda çarpan ışığın sahip olması gereken darbe süresinin değişimi.



Şekil 4. Farklı akımlar için ışık darbelerinin darbe üstü değişimleri.

2.3 Yüksek Akım Değerlerinde LED'in Işıma Diyagramı

Burada yüksek akım değerlerinde LED'lerin ışıma diyagramlarında belirginleşen ve düşük ışık şiddetlerinin ölçülmesi gerektiğinde önem kazanan değişiklikler incelenecektir. Bu amaçla LED'den akıtılan değişik akım değerleri için ışıma diyagramları çizilmiştir. Kullanılan fotoalıcı fotoiletken modunda çalışacak şekilde kutuplanmış fotodiyotlu bir devredir. Işıma diyagramları çizilirken fotoalıcı ve LED'in konumları sabit tutulmuştur ve uygun sıklıkta açılar için fotodiyot devresinden ışık şiddetine karşılık düşen gerilimler ölçülmüştür. Bu şekilde LED'den değişik akımlar akıtılarak yüksek akım değerlerinde ışıma diyagramında akıma bağlı bir değişiklik olup olmadığı incelenmiştir.



1. eğrinin darbe süresi $3.5 \mu s$, 2. eğrinin darbe süresi $6.5 \mu s$
 3. eğrinin darbe süresi $9 \mu s$, 4. eğrinin darbe süresi $18 \mu s$

Şekil 5. Değişik darbe süreleri için LED'in akım-ışık şiddeti değişimleri.

Şekil 6'da değişik akım değerleri için elde edilmiş ışıma diyagramları gösterilmiş bulunmaktadır. Kullanılan LED'in kimliği TNI 53 F (SUN) şeklindedir.

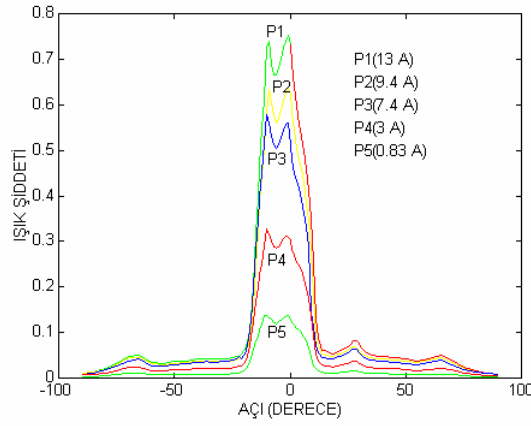
Değişik LED'ler için yapılan incelemelerde LED'den akan akımın değeri artırıldığında ışıma diyagramlarında her açı için aynı oranda bir ışık şiddeti artışının sözkonusu olduğu görülmüştür. Yani akım değiştiğinde ışıma diyagramındaki seçicilikte bir değişiklik olmamaktadır. Ancak akım artırıldığında ışık şiddetinin büyük değerler aldığı açılar arasında ışıma diyagramında küçük akımlarda bulunabilen farklılıklar da artmaktadır. Küçük akım değerlerinde ışıma diyagramındaki kazancın büyük olduğu açılarda farkedilemeyecek ölçüde bir çukurlaşma varsa bu çukurlaşmalar büyük akım değerlerinde daha belirgin olmaktadır. Büyük akımlarda belirginleşen ışıma diyagramındaki bu dalgalanmalar LED'in optik yapısından kaynaklanmaktadır. Şekil 7'de yüksek akımlarda ortaya çıkan değişim tekrar çizilmiştir. Değişik LED'lerle yapılmış olan incelemelerde farklı LED'ler için h_1 ve h_2 değerlerinin değiştiği görülmüştür.

Yüksek akımlarda ışıma diyagramlarında ortaya çıkan bu değişiklik LED ışığının yüksek değerli olmasının istendiği uygulamalarda önemli olmaktadır. Fotoalıcıda düşük ışık şiddetlerinin dedekte edilmesi sözkonusu olduğunda fotodedyektöre mümkün olduğu kadar fazla ışık şiddeti ulaştırabilmek için LED maksimum ışık şiddetinin oluştuğu doğrultuda yerleştirilmelidir.

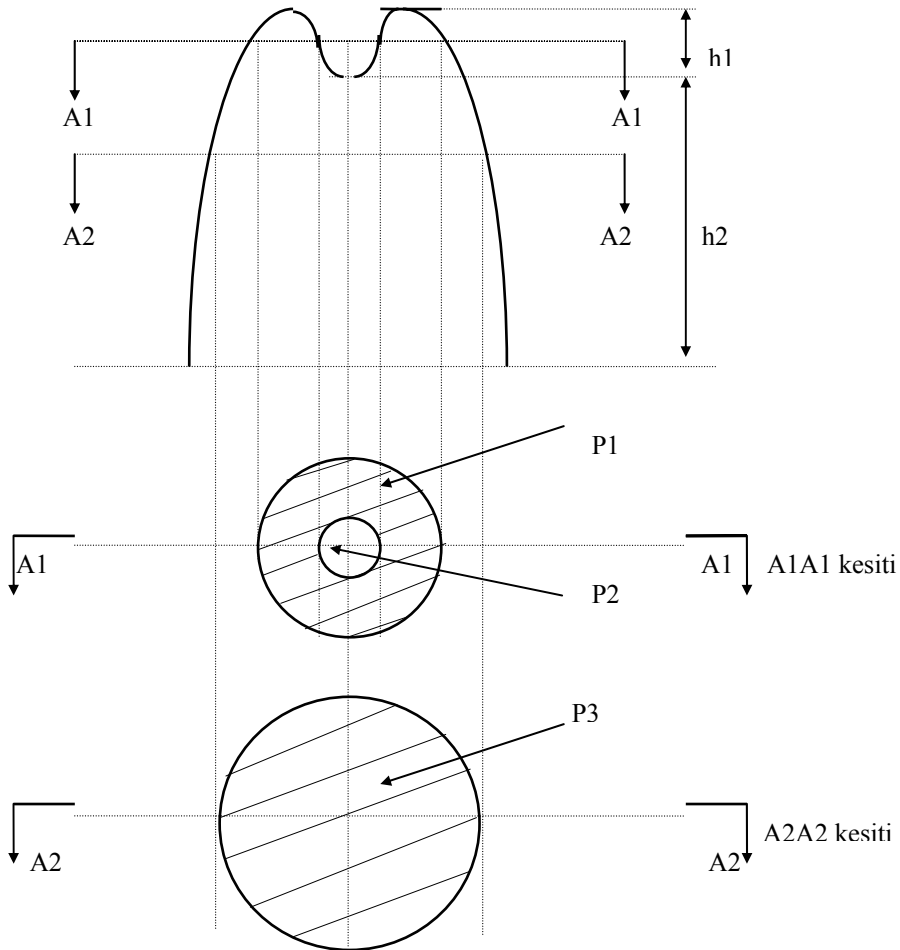
2.4 LED'in Işık Şiddetinin Uzaklıkla Değişimi

LED'in ışık şiddetinin uzaklıkla değişimi ve ışık şiddetinin LED akımıyla değişimi bilindiğinde herhangi bir uzaklıkta ışık şiddetinin akıma bağlı ifadesi de elde edilebilir. Bu ifadeden yararlanarak LED'den akan akımın değeri bilindiğinde herhangi bir uzaklıkta ışık şiddetinin ne olacağı belirlenebilir. Aşağıda LED'in ışık şiddetinin serbest uzayda uzaklıkla olan değişimi belirlenecektir.

LED'in bir doğrultu boyunca ışık şiddetinin uzaklıkla değişimini ölçmek için fotoiletken modunda çalışan fotodiyotlu bir fotodedektör devresi oluşturulmuştur. Fotodiyoda seri gelen R direncinin değeri 33 kohm seçilmiştir.



Şekil 6. Değişik akımlar için ışıma diyagramları. Şekilde verilen ışıma diyagramları elde edilirken LED'den akan akımların darbe süreleri $9\mu s$ seçilmiştir.



Şekil 7. LED'in darbeleri yüksek akımlarda ışıma diyagramı tepesinde belirginleşen çift tepeli değişim.

Bilindiği gibi seri direncin değeri arttıkça R üzerinde okunacak gerilimin de değeri artacaktır. Böylece LED'den daha uzak mesafelerdeki düşük ışık şiddetlerinin R üzerinde oluşturacakları gerilimlerin daha düşük hatayla ölçülebilmesi sağlanmıştır. Besleme gerilimi 15V alınmıştır. LED (TNI 53 (SUN)) bir noktaya lehimlenmiş ve ölçme esnasında konumu sabit tutulmuştur. Fotodedektör devresi ise düz bir düzlemde (bir pencere perdesi rayı üzerinde) aynı doğrultuda hareket ettirilerek değişik uzaklıklarda R üzerinde oluşan gerilim darbelerinin genlikleri ölçülmüştür. Kullanılan ölçme düzeneği Şekil 8'de görülmektedir. LED'den akan akımın genliği ve süresi sabit tutulmuştur. LED akımının değeri, LED'e seri $R_0=0.984$ ohm'luk direncin iki ucundaki gerilimler ölçülerek ve bu

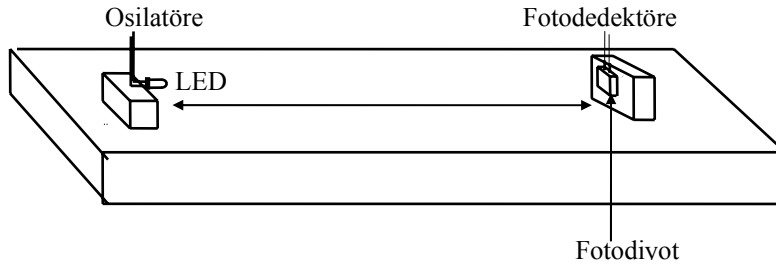
gerilimlerin farkının direnç değerine bölünmesiyle bulunmuştur. Akım darbesinin genliği $I=13.51$ A'dir. Fotodedektörün R direnci üzerindeki gerilim darbelerinin genlikleri her defasında $9\mu s$ 'lık darbe süresinin sonunda okunmuştur. Akım darbesinin boşluk süresi 6.760 ms'dir. Bu boşluk süresi LED'in soğuması açısından sonsuz uzunlukta kabul edilebilecek bir süredir.

Değişik uzaklıklarda ölçülmüş ve LED'in ışık şiddetine karşılık gelen gerilim değerlerinden yararlanarak ışık şiddetinin uzaklıkla değişiminin teorik ifadesi elde edilebilir. İfadeyi elde etmek için uygun bir tek değer bilinmesi yeterli olmaktadır. Örneğin LED'den 35 cm uzaklıkta fotodiyot devresiyle ölçülen gerilim $0.973V$ değeri kullanılırsa ;

$$0.973 = \frac{F_0}{(0.35)^2} \quad (6)$$

ifadesinden F_0 orantı katsayısı 0.1192 olarak bulunur. Böylece ışık şiddetinin (P) (fotodedektör gerilimi), uzaklıkla (L) değişim ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır ;

$$P(L) = F_0 \frac{1}{(L)^2} = 0.1192 \frac{1}{(L)^2} \quad (7)$$

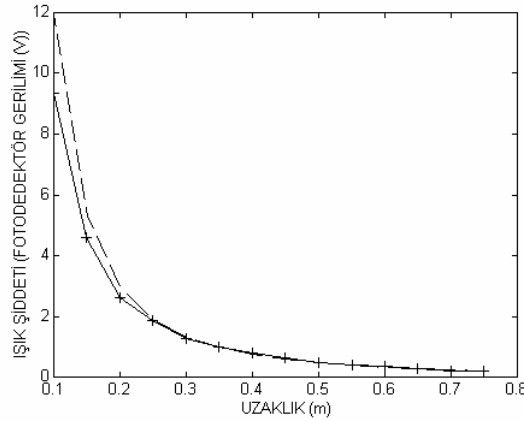


Şekil 8. Işık şiddetinin uzaklıkla değişimini ölçen deney düzeneği.

Şekil 9'daki grafikte ölçülen değerlerle çizilmiş eğri ile (7) teorik ifadesine göre çizdirilen eğri birlikte görülmektedir. Ölçülen değerlere göre çizilen eğri sürekli çizgiyle, teorik eğri ise kesikli çizgiyle gösterilmiştir.

Burada LED'in ışık şiddetinin uzaklığın karesiyle orantılı olarak azaldığı görülmektedir. F_0 orantı katsayısı bulunurken kullanılan ölçme değerinin fotodiyodun doymaya girdiği mesafeden daha uzakta elde edilmiş bir değer olması gerekir. Işık şiddetinin uzaklıkla değişiminin teorik ifadesinin bilinmesi, herhangi bir uzaklıkta (örneğin 1 km uzaklıkta) ışık şiddetinin ne olacağını hesap yoluyla bulunmasını sağlar.

Bir optoelektronik sistemde bir ışık kaynağı tarafından üretilen ışık enerjisinin alıcı uçtaki bir dedektöre aktarılması iki şekilde mümkün olmaktadır. Birinci yol kaynakla alıcı uç arasında mercekle, ışık kılavuzu gibi herhangi bir optik eleman kullanılmadan yapılan doğrudan aktarımdır. İkinci yol olan dolaylı aktarımda mercekle yada ışık kılavuzu gibi optik elemanlar kullanılır. Her iki durumda da gözönünde bulundurulacak temel kriter alıcı ile verici arasında mümkün olan en fazla ışığın aktarılmasıdır.



Şekil 9. Bir LED'in bir doğrultu boyunca değişik uzaklıklar için bir fotodetektör devresiyle ışık şiddetine karşılık ölçülen gerilimin uzaklıkla değişimi.

Mercek, yansıtıcı, ışık kılavuzu (fiber) gibi optik elemanlar kullanılarak LED'in verdiği ışığın daha fazlasının fotodetektöre ulaştırılması sağlanabilir. Bu şekilde optik elemanların kullanıldığı düzeneklerden bazıları Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10(a)'da alıcı uçtaki fotodiyodun önünde tek bir merceğin kullanıldığı durum görülmektedir. Merceğin doğru olarak yerleştirilmesi durumunda mercek yüzeyine çarpan LED ışığı fotodiyot üzerine odaklanır. Genel amaçlar için kullanılan mercekler üzerine çarpan ışığın %5'i ile %10 kadarlık oranlardaki bir kısmını soğurur, yani merceğin optik geçirgenliği % 100 değildir. Merceğin geçirgenliğinin % 100 olduğu varsayılarak ve diğer bazı geometrik kabullerle Şekil 10(a)'daki optik düzenlemeyle merceğin kullanılmadığı doğrudan ışık iletimine nazaran yaklaşık olarak merceğin yüzey alanının fotodiyodun ışığa duyarlı olan etkin yarıiletken alanına oranı kadar bir ışık şiddeti artışı elde edilebilir. Şekil 10(b)'de ise iki adet mercek kullanılmaktadır. Merceklerin uygun olarak hizalanması durumunda LED'in önüne yerleştirilen uygun bir mercek ile LED'in verdiği ışığın tamamı toplanarak alıcı uçtaki ikinci merceğe iletilmekte ve alıcı uçtaki mercek ile gelen LED ışığının tamamı fotodiyoda odaklanmaktadır. Bu şekilde iki mercek kullanılması nedeniyle merceklerin geçirgenlikleri çarpımları oranında bir ışığın aktarılması sözkonusu olmakla beraber alıcı uçta ışık şiddetinde büyük ölçüde artış sağlanmaktadır. Şekil 10(c)'de ise iki adet yansıtıcının kullanıldığı durum görülmektedir. Bu şekildeki bir düzende LED'in verdiği ışığın tamamı fotodiyoda ulaştırılmaktadır. Burada kullanılan yansıtıcılara optik anten adı da verilmektedir. Bu yöntemde de yansıtıcıların yansıtma faktörlerinin % 100 olmaması nedeniyle yansıtıcı optik elemanlar üzerinde az bir miktar ışık zayıflatması oluşmaktadır.

Şekil 11'de LED'den L kadar uzaklıkta, merkezleri optik eksen üzerinde olan ve eksene dik şekilde yerleştirilmiş bulunan iki dairesel yüzey görülmektedir. R yarıçaplı daire LED tarafından 2θ 'lık açı içerisinde gönderilen tüm ışığın aydınlatıldığı yüzeydir. r yarıçaplı daire ise fotodiyodun ışığa duyarlı dairesel etkin yüzeyidir. Aslında çok küçük olan fotodiyot yüzeyi burada abartılı olarak büyük çizilmiş bulunmaktadır. Her iki dairesel yüzey üzerindeki aydınlatma şiddeti merkezden uzaklaştıkça LED'e olan uzaklığın artması nedeniyle bir azalma gösterse de küçük açılar ve büyük uzaklıklar için yüzeyler üzerindeki aydınlatmanın her noktada aynı olduğu kabul edilebilir. Yukarıdaki kabuller ile LED'in verdiği tüm ışığın şiddetinin (P_{LED}) fotodiyoda çarpan ışık şiddetine (P_{FD}) oranı :

$$\frac{P_{LED}}{P_{FD}} = \frac{\pi R^2}{\pi r^2} = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad (8)$$

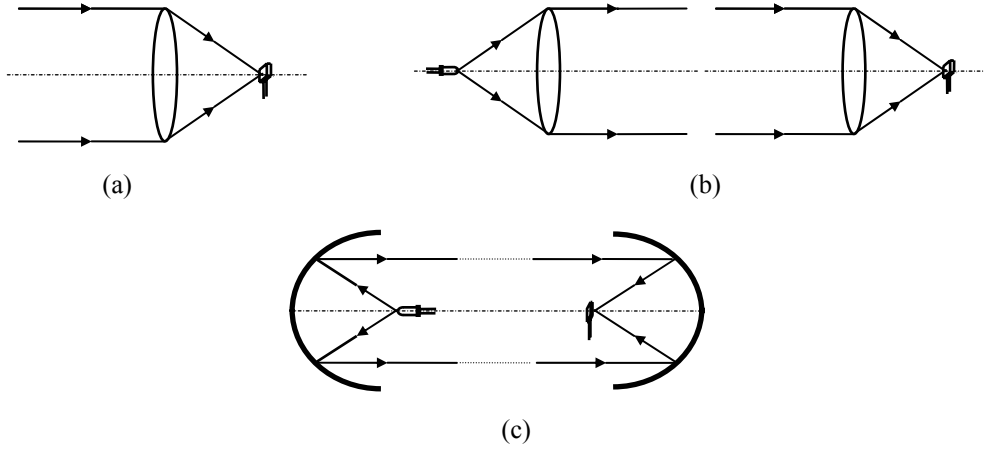
olarak yazılabilir. Küçük θ açıları için $\sin(\theta)=\tan(\theta)=R/L$ 'den $R=L\sin(\theta)$ yazılabildiğinden ve $\sin(\theta')=r/L$ kabul edilebildiğinden

$$\left(\frac{R}{r}\right)^2 = \left(\frac{L \sin(\theta)}{r}\right)^2 = \left(\frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta')}\right)^2 = \left(\frac{NA_{LED}}{NA_{FD}}\right)^2 \quad (9)$$

ifadesi yazılabilmektedir. Bu ifadedeki son terim LED'in ve fotodiyodun sayısal açıklıkları (NA: Numerical Aperture) ile ilgilidir. Fotodiyotlar jonksiyon alanlarına göre belirttiklerinden son ifadede fotodiyodun alanı S_{FD} olmak üzere $r = \sqrt{S_{FD} / \pi}$ olduğu yazılarak

$$\frac{P_{LED}}{P_{FD}} = \left(\frac{L(NA_{LED})}{\sqrt{S_{FD} / \pi}} \right)^2 \quad (10)$$

ifadesi elde edilir. Elde edilen son ifade sayısal açıklığı belli olan bir LED'in ışık şiddetinin ne orandaki bir kısmının jonksiyon alanı belli olan ve LED'den L kadar uzaklıkta bulunan bir fotodiyoda aktarılabilirliğini göstermektedir. Doğrudan ışık iletiminde son elde edilen ifadeyle belirli olan bir oranda LED ile fotodiyot arasında bir güç aktarımı söz konusudur. Şekil 10(b)'deki gibi LED'in önüne sayısal açıklığı LED'in sayısal açıklığına eşit bir mercek ve fotodiyodun önüne de gelen tüm ışığı fotodiyoda odaklayacak bir mercek uygun şekilde yerleştirildiğinde doğrudan iletme nazaran son ifadedeki güç oranları kadar bir ışık şiddeti büyültmesi elde edilmiş olur (merceklerin geçirgenliklerinin %100 olduğu kabul edilmektedir).



Şekil 10. Bir LED'in verdiği ışığın daha fazlasının fotodiyoda ulaştırılmasını sağlayan optik düzeneklerden bazıları.

Aşağıda bir mercek sistemiyle ışığın doğrudan iletimine nazaran iletim mesafesinin ne kadar arttırılabildiği bir örnekle gösterilecektir. Bu örnekte ışık şiddetinin uzaklıkla değişim ifadesi ve ışıma diyagramları daha önce elde edilmiş olan TNI 53 F (SUN) kimlikli LED'e ilişkin bilgiler kullanılacaktır.

Doğrudan iletim durumunda sözkonusu LED ve fotodedyör için

$$P_{FD}(L) = F_0 \frac{1}{(L)^2} = 0.1192 \frac{1}{(L)^2} \quad (11)$$

olduğundan;

$$L = \sqrt{\frac{F_0}{P_{FD}(L)}} \quad (12)$$

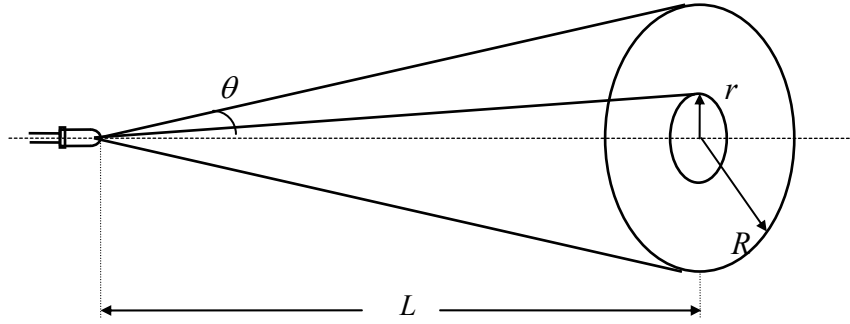
olur.

İlgili LED'in Şekil 6'da verilen ışıma diyagramlarına bakıldığında yaklaşık 30 derecelik bir açı içerisinde yüksek ışık şiddetinin sözkonusu olduğu görülür. Burada, sözkonusu açı içerisinde LED ışığının maksimum değerinde sabit

kaldığı kabul edilmektedir. Buna göre $NA_{LED}=\sin(15)\cong 0.26$ 'dır. LED'den 35 cm uzaklıkta fotodiyot devresiyle ölçülen gerilim 0.973V değeri kullanılırsa söz konusu LED için optik büyültme

$$K_o = \frac{P_{LED}}{P_{FD}} = \left(\frac{L(NA_{LED})}{\sqrt{S_{FD}/\pi}} \right)^2 = \left(\frac{0.35 \times 0.26}{\sqrt{(7.5 \times 10^{-6})/3.14}} \right)^2 = 3467 \quad (13)$$

olur. Yukarıdaki hesap yapılırken BPW41 fotodiyodunun alanı olarak 7,5mm² değeri kullanılmıştır.



Şekil 11. LED'den L uzaklığında bulunan bir fotodiyodun dedekte edebildiği ışık şiddetinin LED'in verdiği tüm ışık şiddetine bağlı olarak yaklaşık olarak bulunabilmesi için kullanılan geometrik gösterim.

$$P_{LED} = \left(\frac{L(NA_{LED})}{\sqrt{S_{FD}/\pi}} \right)^2 P_{FD} = \left(\frac{NA_{LED}}{\sqrt{S_{FD}/\pi}} \right)^2 L^2 P_{FD} = \left(\frac{NA_{LED}}{\sqrt{S_{FD}/\pi}} \right)^2 F_o \quad (14)$$

$$P_{LED} = \left(\frac{0.26}{\sqrt{(7.5 \times 10^{-6})/3.14}} \right)^2 0.1192 = 28301.87 \times 0.1192 = 3373.6 \text{ V}$$

Son olarak hesaplanan gerilim değerine bakıldığında 15V dolayında besleme gerilimi ile fotoiletken modunda çalışacak şekilde tıkamada kutuplanan fotodiyodun LED'den epey uzak mesafeler için bile doymada olacağı görülmektedir.

Yukarıdaki ifadelerden LED ile fotodiyot arasındaki mesafe

$$L = \sqrt{\frac{(P_{LED}/P_{FD}) \times (S_{FD}/\pi)}{(NA_{LED})^2}} \quad (15)$$

şeklinde elde edilir. Burada, ilgilenilen mesafelerde ışığın iletildiği ortamın özelliklerinin uzaklıkla değişmediği kabul edilmektedir. Fotodedektörün dedekte edebildiği minimum gerilim yukarıda bahsedilen gürültü işaretlerine ve fotodedektör devresini takiben kullanılacak kuvvetlendiricinin kazancına bağlıdır. Yukarıdaki fotodedektör devresinin $P_{FD}=1\text{mV}$ 'luk bir gerilimi dedekte edebildiğinin kabul edilmesi durumunda aradaki mesafe

$$L = \sqrt{\frac{(3373.6/(1 \times 10^{-3})) \times (7.5 \times 10^{-6} / 3.14)}{(0.26)^2}} \cong 10.9 \text{ m}$$

olmaktadır.

Yukarıda uygun optik düzenlerle birlikte verimi daha yüksek olan LED'ler ve duyarlılığı daha yüksek olan fotodedektör devreleri kullanılarak LED ışığını serbest uzayda daha uzak mesafelere iletmek mümkündür. Örneğin fotodedektör devresinin $P_{FD}=0.1\mu V$ 'luk genlikli darbeyi dedekte edebilmesi durumunda iletim mesafesi 1.092 km'ye çıkmaktadır. Fotodedektör devresinin duyarlılığını ve LED'in ışık şiddetini arttırmanın yöntemleri yukarıda anlatılmış bulunmaktadır. Bu şekildeki uzak mesafe ışık iletimini içeren tipik bir uygulamaya örnek olarak bir şehir ortamında yakın binalar arasındaki ses veya düşük hızlı veri iletimi gösterilebilir. Bu sistemin bir kusuru yağmur veya kar gibi olumsuz atmosfer şartlarının işarette büyük bozulmaya sebep olması ve hatta sistemi tamamen işlemez hale getirmesidir. Şartlar uygun olsa bile işaret atmosferdeki soğurma ve saçılma etkenleriyle zayıflayacaktır. Soğurma, gerçek yoğunluğu sıcaklık, basınç, coğrafik konum, yükseklik ve hava şartları gibi birçok değişkene bağlı olan su buharı, karbondioksit ve ozon gibi moleküler bileşiklerin varlığından doğmaktadır. Kuvvetli soğurma 0.94 μm , 1.13 μm , 1.38 μm , 1.90 μm , 2.7 μm , 4.3 μm ve 6.0 μm civarındaki dalga boylarında meydana gelmektedir [10]. Bu nedenle, özellikle uzak iletişim mesafeleri söz konusu olduğunda, LED ışığının ve buna bağlı olarak fotodedektörün tepe cevabının oluştuğu dalga boyunun ortamdaki soğurmanın az olduğu dalga boylarında seçilmesi gereklidir.

Serbest uzay iletişimine göre daha pahalı bir sistem olan fiber optik iletişim sisteminde serbest uzayda oluşan kayıplar sözkonusu değildir. Fiber optik ile ışık iletiminde oluşan zayıflatma 1dBkm^{-1} 'den daha azdır ve ayrıca fiber optik iletişim sisteminde yüksek bilgi taşıma kapasitesine ulaşılması mümkündür.

3. SONUÇ

Bu çalışmada incelenen konulardan biri LED ışığının olabildiğince uzak mesafelere ulaştırılması için LED ışığını dedekte edecek olan fotodedektör devresinin ne gibi özelliklere sahip olması gerektiğidir. Bir optoelektronik sistemde fotodedektör devresinde ışığı algılamak üzere seçilebilecek en ucuz ve kullanılması en kolay eleman fotodiyot olduğu için burada özellikle fotodiyot ve fotodiyot kullanılarak oluşturulmuş fotodedektör devreleri incelenmiştir. Bir fotodiyot ile minimum ışık şiddetleri algılanabilmesi için, fotodiyodun spektral duyarlılığı LED'in verdiği ışığın dalga boyunda mümkün olduğu kadar fazla olmalıdır. Burada LED ve fotodiyotla oluşturulan optoelektronik sistemin duyarlılığının maksimum olabilmesi için gerekli olan spektral uyumun nasıl sağlanabileceği, genel amaçlı bir kızılötesi LED ve kızılötesi ışığı dedekte etmek için kullanılan BPW 41 fotodiyodunun spektral özellikleri birlikte ele alınarak gösterilmiştir. Ayrıca bir fotodiyodun fotoiletken modunda bağlanmasıyla oluşturulabilen fotodiyotlu fotodedektör devresinde yer alan direncin değerinin duyarlılık ve hız özellikleri açısından hangi darbe süresinde ne değerde olması gerektiği incelenmiştir. Darbeli çalışmada 100 μs 'den daha büyük darbe sürelerinde LED akımını ve dolayısıyla LED ışığını arttırmak mümkün olmadığından bu darbe süresinden daha büyük sürelerde duyarlılığın daha fazla olması nedeniyle fotovoltajik modda çalışma olanakları değerlendirilmelidir. Şekil 3'deki grafiğe bakıldığında 100 μs 'den sonra paralel direncin değerinin fotovoltajik modda çalışmak için uygun olan değere, yani fotodiyodun dinamik direnci değerine ulaştığı görülmektedir.

Küçük darbe sürelerinde LED'den yüksek genlikli akım darbeleri akıtılarak LED'in verdiği ışığın şiddeti artırılabilir. Bu nedenle burada LED'in ışık şiddetinin darbeli akımda nasıl artırılabilceği bir grafikte belirtilmiş ve LED'in yüksek genlikli akım darbelerinde ısınmasından dolayı ışık şiddetinde darbe süresi boyunca meydana gelen azalma incelenmiş ve bu nedenle oluşan darbe üstü eğilmesi gösterilmiştir. Ayrıca LED'in darbeli yüksek akımlarda ışımaya diyagramları ele alınarak darbeli yüksek akımlarda LED'in ışımaya diyagramında belirginleşen dalgali tepe değişimleri gösterilmiş ve bu değişimlerden dolayı özellikle ışık şiddetinin çok azaldığı uzak mesafelerde LED ile fotodiyodun ışımının maksimum olduğu doğrultuda hizalanması gerektiğinin önem taşıdığı ortaya konulmuştur.

Ayrıca LED'in ışık şiddetini arttırmak için yüksek akım darbeleriyle sürülmesi yanında optik elemanlar kullanılarak iletim mesafesinin arttırılması için çalışılmıştır. Bu amaçla genel amaçlı bir kızılötesi LED'in bir akım darbesine karşılık verdiği ışık şiddetinin serbest uzayda uzaklıkla değişim ifadesi elde edildikten sonra kullanılan fotodiyot ve

aynı LED'in çizilen ışına diyagramından yararlanarak bir mercek sistemiyle doğrudan iletme nazaran elde edilen optik büyültme hesaplanmış ve bu şekilde LED ışığının ne kadar uzağa iletilebildiği gösterilmiştir. Burada yapılan hesaplamalarda doğrudan ışık şiddeti değil fotodektörden ışık şiddetine karşılık ölçülen gerilim değerleri kullanılmıştır. Bu yolun tercih edilmesinin nedenlerinden biri de kısa süreli ışık darbelerinin ışık şiddetinin ölçülmesinin zor olmasıdır.

KAYNAKLAR

1. Özütürk, E., Karlık, S. E., Kızılötesi Işınlara Açık Optik Ortamda Bilgisayarlar Arası Veri İletimi, Bursa 5. Bilgisayar-Haberleşme Sempozyumu, Bursa, 104-106, 1998
2. Özütürk, E., Kızılötesi Optik MODEM, Uludağ Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt 8, Sayı 1, 11-15, 2003
3. Bhattacharya, P., Semiconductor Optoelectronic Devices, s.614. Second Edition. Prentice-Hall, USA, 1997
4. Watson, J., Optoelectronics, s.153, Van Nostrand Reinhold, U. K., 1988
5. Özütürk, E., LED'lerin Aşırı Darbe Akımında Çalışmasının Teorik ve Pratik Araştırması, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2000
6. Özütürk, E., Fotodiyodun Anahtarlama Sürelerinin Darbeli Yüksek Işık Şiddetleri İçin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 10, Sayı 2, 221-226, 2004
7. Hickman, I., Reflections on Opto-electronics, Electronics World + Wireless World, 970-974, 1995
8. Bradbury, D., Shedding Light on Opto-electronics, Electronics World + Wireless World, 911-915, 1991
9. Özütürk, E., Darbeli Akımlarda LED Akımının Ne Oranda Arttırılabileceğini Veren Bazı Bağlıntıların Çok Yüksek Akımlarda Karşılaştırılması, Uludağ Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt 8, Sayı 1, 17-23, 2003
10. Wilson, J., Hawkes, J. F.B., Optoelektronik, s.518, 2. Baskı, Değişim Yayınları, Adapazarı, 2000