

# Optik İletişim Sistemlerinde Standart CMOS Fotodiyotların Uygulaması Application of Standard CMOS Photodiodes in Optical Communication Systems

Berk ÇAMLI,  
Arda Deniz YALÇINKAYA  
ve Ali Emre PUSANE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Boğaziçi Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
berk.camli@boun.edu.tr,  
arda.yacinkaya@boun.edu.tr,  
ali.pusane@boun.edu.tr

Rıfat KISACIK,  
Muhittin MAÇ  
ve Murat UYSAL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Özyeğin Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
kisacik.rifat@gmail.com,  
mehmetmuhittinmac@gmail.com,  
murat.uyosal@ozyegin.edu.tr

Tunçer BAYKAŞ

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Medipol Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
tbaykas@medipol.edu.tr

**Özetçe** —Bu bildiri standart CMOS üretim süreçleri ile gerçekleştirilmiş, mikroelektronik sistemlere düşük maliyetle tümleştirebilecek fotodiyot yapılarının optik haberleşme sistemlerine uygulanabilirliği incelenmiştir. Silikon alttaş üzerine UMC 180 nm standart CMOS üretim ile gerçekleştirilmiş  $1.05 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$  alan kaplayan bir fotodiyot, farklı görünür dalga boylarında Power LED'lerin kaynak olarak kullanıldığı bir düzenekte optik alıcı olarak denenmiştir. CMOS fotodiyotun başarımı referans olarak kullanılan bir Thorlabs PDA10A-EC fotodiyotunki ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde, referans fotodiyotun iletim bant genişliğinin 0.87 - 1.68 MHz aralığında olduğu ve CMOS fotodiyotun 0.70 - 1.37 MHz gibi karşılaştırılabilir değerlerde bantlara erişebildiği görülmüştür. 200 kHz frekansta bir kare dalga işaret, CMOS fotodiyot kullanan bir optik iletişim sisteminde şekilde kayda değer bir bozulma olmadan aktarılabilir.

**Anahtar Kelimeler**—optik iletişim, kablosuz iletişim, görünür ışık, fotonik, CMOS fotodiyot.

**Abstract**—In this work, applicability to the optical communication systems of photodiodes realized with standard CMOS fabrication processes, which can be integrated to microelectronic systems at low costs. A photodiode fabricated with UMC 180 nm standard CMOS process on a silicon substrate within a  $1.05 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$  area is experimented with as an optical receiver in a setup where LEDs of different visible wavelengths are used as sources. Performance of the CMOS photodiode was compared to that of a Thorlabs PDA10A-EC photodiode used as a reference. In the experiments, it was observed that the communication bandwidth of the reference photodiode is in the 0.87 - 1.68 MHz range and that the CMOS photodiode can achieve comparable bandwidths in the range of 0.70 - 1.37 MHz. A square wave of 200 kHz frequency can be carried via an optical communication system using the CMOS photodiode without suffering from significant distortions.

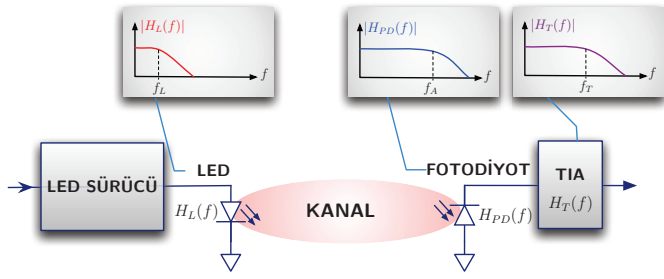
**Keywords**—optical communication, wireless communication, visible light, photonics, CMOS photodiode.

## I. GİRİŞ

Günümüzde geleneksel radyo frekans iletişim alanlarında hızla artmakta olan veri hızı talebi, teknolojinin mümkün kıldığı bant genişliği sınırlarına yaklaşmaktadır. Bant genişliğindeki artış talepteki büyüme ile orantılı değildir; altyapının genişletilmesi ile maliyeti giderek artırmaktadır. Bu nedenle, optik iletişim sistemleri gibi destekleyici seçeneklerin incelenmesine gerek duyulmuştur [1]. Optik iletişim sistemleri, bilgi aktarımının optik kaynaklar ve alıcılar aracılığı ile yapıldığı sistemlerdir. İletişim, elektriksel işareti optik işarete çeviren bir verici ile optik işareti elektriksel işarete geri çeviren bir alıcı arasında bir bağlaşım kurulması yolu ile gerçekleştirilir. Genel hatlarıyla bir kablosuz optik iletişim sisteminin elemanları Şekil 1'de sunulmuştur.

Optik iletişimin WLAN, PowerLAN veya mobil ağların yerine geçmesi şu aşamada olası görünmemektedir; ancak belli uygulama alanlarında ek bir yüksek hızlı iletişim katmanı olarak var olan radyo frekans iletişim sistemlerini desteklemesi mümkündür [2]. Kızıl ötesi ışığın radyo frekans bandına yakın ve fiziksel özellikleri itibarıyla benzer olması, mor ötesi ışığın ise sağlık için tehlike oluşturma potansiyeli sebebiyle ilgi görülebilir ışık bandına kaymış durumdadır.

Görülebilir ışığın belli iletişim alanlarında kullanılmasının çeşitli avantajları vardır. Herşeyden önce tayfın bu bandı boştu ve iletişimin buraya kayabilmesi veri trafiğinin hafiflemesini sağlayacaktır. Ayrıca, iletişimde kullanılacak optik alıcı ve vericiler kullanımda olan ve maliyeti düşük ürünlerdir [1]. Optik işaretler ve yaygınlıkla kullanılan radyo frekans işaretleri arasında girişim olmayacağı gibi iç mekanlarda optik iletişim kullanımı odalar arasında iletişim yalıtımı sağlanmasını da mümkün kılar. Bu durum özellikle yüksek güvenlik gerektiren durumlarda önem kazanabilir. İç mekanlar genel olarak aydınlanma donanımlarına sahip olduğundan sistemin iç mekanlara tümleştirelmesinin maliyeti göreceli olarak düşüktür. Sistem aynı zamanda radyo frekans yayınına izin verilmeyen ortam-



Şekil 1: Tek yönlü bir kablosuz optik iletişim sisteminin ana elemanları.

larda da kullanılmaya uygundur. Öte yandan optik sistemler ışık kaynağı bulunduran çeşitli dış mekan uygulamalarına da rahatlıkla dahil edilebilirler. Olası uygulama alanları arasında yol ve trafik ışıkları aracılığı ile iletişim, iç veya dış mekanda yön bulma, hava taşıtları içinde iletişim, otomobiller arası iletişim, reklamlık ve öğretim uygulamaları örnek gösterilebilir. Ek olarak optik iletişimin kısa mesafe su altı haberleşmede de radyo frekans iletişim olanaklarına göre avantaj taşıdığı belirtilmiştir [3], [4]. Bu iletişim ağı içerisinde yer alan cihazlar kullanım alanlarına göre farklı boyutlarda olabilir ve yerine göre tümleşik mikrosistemler barındırıyor olabilirler.

Bu bildiride, standart CMOS üretim süreçleri ile gerçekleştirilen CMOS fotodiyotların optik iletişim sistemlerine uygulanabilirliği üzerine bir inceleme yapılmıştır. Bildiri şu biçimde düzenlenmiştir: Birinci bölümde optik iletişim sistemleri ve uygulama alanları hakkında genel bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümde optik iletişim sistemlerinde kullanılmaya uygun LED ve fotodiyotlardan söz edilmiş ve fotodiyot cihazların silikon alttaş üzerine standart CMOS üretim süreçleri ile nasıl gerçekleştirilebileceği açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, üretilmiş bir CMOS fotodiyotun optik iletişim başarımının optik iletişimde kullanılabilir ticari bir ürünle karşılaştırıldığı deney sonuçları sunulmuş ve dördüncü bölümde sonuçlar verilmiştir.

## II. DONANIM

Optik iletişimin gerçekleştirilmesi farklı ışık alıcı ve vericileri ile sağlanabilir. Düşük veri hızları için geleneksel ampül veya LCD gibi kaynaklar kullanılabilir; ancak gerek yüksek hızda veri iletimi, gerek alan gereksinimleri, gerekse de tümleşik sistemlere dahil edilebilirlik açısından LED ve fotodiyot gibi yarı iletken cihazların kullanımı tercih sebebi olacaktır [2]. Bu tip cihazlar temel olarak bir PN kavşağından oluşurlar. Optoelektrik elemanlar olarak kullanılabilmesi yarı iletken malzemelerde gelen foton enerjisinin değerlik bandında bulunan elektronları uyarıp serbest taşıyıcılar haline getirebilmesi veya bunun tersi ile mümkündür. Alıcı veya verici olarak çalışmaları ise kavşağın kutuplanma yönüyle ve kullanılan yarıiletken malzemenin türüyle ilgilidir.

### A. LED

Doğru yönde kutuplanmış bir kavşağa gelen elektron ve deliklerin fakirleşme bölgesinde birleşmesi sonucunda açığa çıkan enerjinin ışık olarak dışarı verilmesi ile kavşak bir LED olarak işlev görür. Görünür ışık bandında optik iletişimin dikkat çekmesindeki itici güçlerden biri LED ışık kaynaklarının günümüzde farklı tüketici uygulamalarında yaygınlıkla

kullanılması olmuştur. LED kaynakları tüketici uygulamalarında öne çıkaran ve optik iletişime uygulanmasında çekici kılan özelliklerin başında yüksek parlaklık, düşük güç tüketimi, uzun ömür ve yüksek hız gelmektedir. LED'lerin erişebildiği frekanslarda kiplenmiş optik işaret insan gözü tarafından algılanamadığından, görünür ışık bandında aydınlatılan bir iç mekanda aynı LED kaynaklarla iletişim de sağlanması önünde bir engel yoktur [5]. Bu nedenle aydınlatmada yaygın olarak kullanılan beyaz LED'ler ile çalışılması anlamlı olacaktır.

LED ile beyaz renk elde edilmesi kırmızı, yeşil ve mavi renkli üç farklı LED'in aynı hücrede kullanılması ile mümkün olabileceği gibi mavi bir LED ve sarı fosfor katmanı kullanımı yoluyla üretilen fosforşıl beyaz LED'ler de mevcuttur. Fosforşıl beyaz LED, basit yapısı dolayısıyla daha az karmaşık bir sürücü devre ile kullanılabilir; ancak fosforşıl malzemenin yavaş cevap süresi nedeniyle daha düşük bir iletim bandına sahip olması söz konusudur. Bununla birlikte alıcı ucunda fosforşıl bileşeni baskılamak amacıyla mavi filtre kullanımı ile iletim bant genişliğinin artırılabilirdiği gösterilmiştir. Fosforşıl malzeme kullanmayan üç renkli LED sistemleri daha geniş bantlarda kiplenebilmektedir. Üç farklı sürücü kullanılması ile bu LED dalgaboyu bölmeli çoğullama ile çoklu erişim sağlanması kolaylaşmaktadır [2].

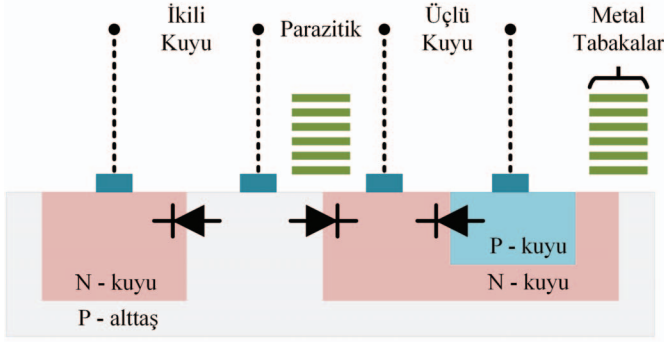
### B. Fotodiyot

Yukarıda açıklanan benzer bir biçimde fotonlara maruz kalan bir PN kavşağın aldığı enerji etkisiyle fazladan elektron delik çiftlerinin oluşması söz konusudur. Fakirleşme bölgesi etrafındaki fazladan elektron ve delikler bölgede var olan gerilimden doalyı sırasıyla N ve P bölgelerine doğru ayrılarak ters kutuplanma yönünde bir akım oluştururlar. Akımın büyüklüğü alınan foton enerjisine doğrudan bağlı olup bu mekanizma optik bir alıcı olarak fotodiyotların gerçekleştirilmesinde kullanılır.

Günümüzde fotodiyot üretiminde LED'lerde de söz konusu olduğu üzere genellikle III-V grubu bileşiklerinden oluşan yarı iletkenler kullanılmaktadır. Bunlara GaAs, InGaAs, InP, GaN örnek gösterilebilir. Standart mikoelektronik sistem üretimlerinde yaygın olan silikon yerine bu malzemelerin kullanılmasının nedeni bu malzemelerin ısı/elektriksel enerji çevrimini ısı olarak enerji kaybetmeden gerçekleştirebilmeleridir. Öte yandan bu durum genel olarak optoelektronik mikrosistemlerde elektronik elemanlar ile optik elemanların farklı kırmıklarda üretilip hibrit bir mikromodül olarak tümleştirilmelerini veya yüksek maliyetli karmaşık üretim süreçlerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır.

Fotodiyot yapısının doğrudan elektronik elemanları barındıran silikon kırmık üzerinde üretilmesi, ısı enerji kaybı açısından tercih edilmese de düşük maliyet ve karmaşıklıkta elektronik sistemlerin gerçekleştirilmesi açısından çekicidir. Silikon kullanımı, fotodiyotun standart CMOS üretim süreçleri ile üretilen elektronik devre elemanları ile doğrudan aynı kırmık üzerinde bulunabilmesi nedeniyle avantajlıdır. Kanal boyutundaki küçülmenin düşük güç tüketen CMOS elektronik teknolojisinin hızını InP teknolojisi seviyelerine yaklaştırması ile bu yaklaşım daha da geçerlilik kazanmıştır [6]. Bu uygulama CMOS imge algılayıcılarında ve literatürde optik güç ile etkinleştirilen elektronik sistemlerde gösterilmiştir [7].

Standart bir CMOS üretim sürecinde optik alıcı fotodiyotun gerçekleştirilmesi, sürece dahil P ve N kuyularının oluşturduğu



Şekil 2: Standard CMOS üretim sürecinde ikili kuyu, üçlü kuyu fotodiyotların gerçekleştirilmesi ve parazitik fotodiyot.

kavşakların diyot olarak kullanılmasıyla Şekil 2’de gösterildiği gibi mümkündür. Burada görüldüğü gibi ikili kuyu kullanılması halinde PN malzemelerden biri P tip alttaş olmak durumundadır. CMOS sistemlerde alttaşın genelde en düşük gerilimle kutuplanması fotodiyot anodunun da bu en düşük gerilime bağlanmasını gerektirir ki bu fotodiyotun kutuplanması ve mikroelektronik sistemlere tümleştirilmesi açısından sınırlayıcıdır. Bunun için üçlü kuyu sistemindeki serbest fotodiyotun kullanılması daha uygun olacaktır. Bu seçenekte, P - alttaş ve N - kuyu kavşağında oluşan ters yöndeki parazit fotodiyot, kısa devre veya ters kutuplama ile etkisiz kılınabilir. Ek olarak parazitik fotodiyotu oluşturan yan duvar kavşakları üzerine CMOS üretim sürecine dahil metal katmanlar sıralanmasıyla bu fotodiyot kısmen ışıktan yalıtılabilir.

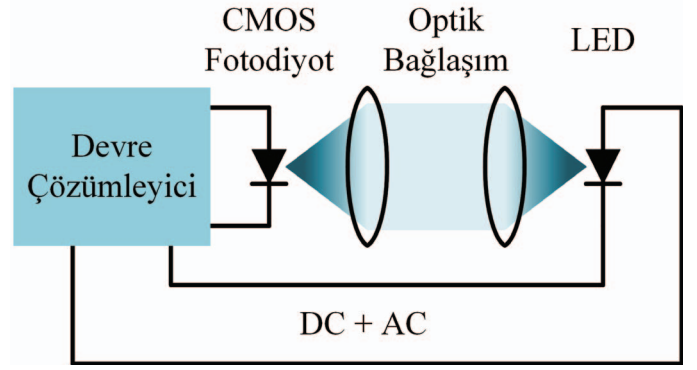
### III. DENEYSEL GÖZLEMLER

Optik alıcı olarak kullanılan fotodiyotlar 180 nm standart UMC üretim süreci ile 1.05 mm × 1.00 mm ayak izi boyutuna sahip olacak biçimde üretilmiştir. Her bir fotodiyot, yüzey boyunca düzenli olarak dizilmiş paralel bağlı üçlü kuyu birimlerinden oluşmuştur. Birim sayısının çoklu tutulması sonucunda kuyu yapılarının yan duvarlarından elde edilen kavşak alanlarının, toplam kavşak alanını artırması hedeflenmiştir. Hesaplanan toplam kavşak alanı 1.21 mm<sup>2</sup> kadardır. Parazitik fotodiyot yukarıda açıklandığı biçimde yan kavşaklar üzerine metal katmanlar çekilmesi ile kısmen ışıktan yalıtılmış olup ana fotodiyotun üzeri üretim sürecinde herhangi bir kukla metalle kaplanmayarak açık bırakılmıştır.

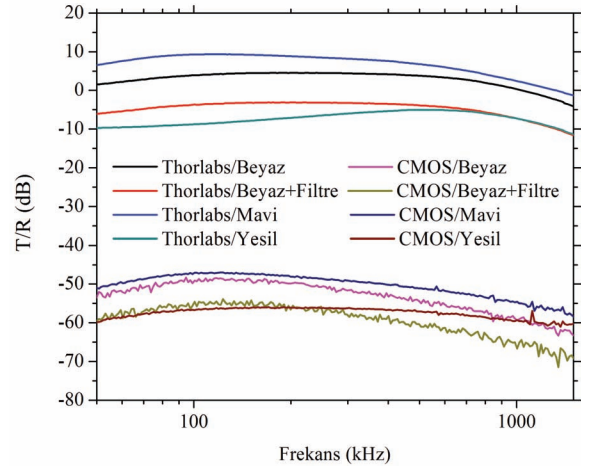
CMOS fotodiyotun başarımlarını karşılaştırmasında, fotonik uygulamalar için üretilmiş bir adet Thorlabs PDA10A-EC fotodiyot kullanılmıştır. Ürün InGaAs yarı iletken üzerinde PIN kavşak kullanılarak 0.8 mm<sup>2</sup> alanda üretilmiş olup değiştirilebilir kazançlı bir kuvvetlendirici barındırmaktadır.

Bu optik alıcılar, kullanılan LED’ler ile bir optik düzeneğe sabitlenmiş ve ThorLabs mercekler kullanılarak bağlandırılmıştır. LED’lerin kiplenmesi ve alıcıdan gelen işaretin okunması HP4195 tayf devre çözümleyici ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3’te verilmiştir.

İlk aşamada Thorlabs ve CMOS fotodiyotların beyaz, mavi ve yeşil LED kaynaklar aracılığıyla iletilen genlik kipli optik işaretlerin algılamaları karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan beyaz LED fosforişil tipte olup mavi filtre kullanılarak yukarıda açıklandığı üzere bant genişliğinin artırılabilirliği



Şekil 3: Deney düzeneği şeması.



Şekil 4: Farklı LED kaynaklar kullanılarak yapılan iletişime Thorlabs ve CMOS fotodiyotun cevapları.

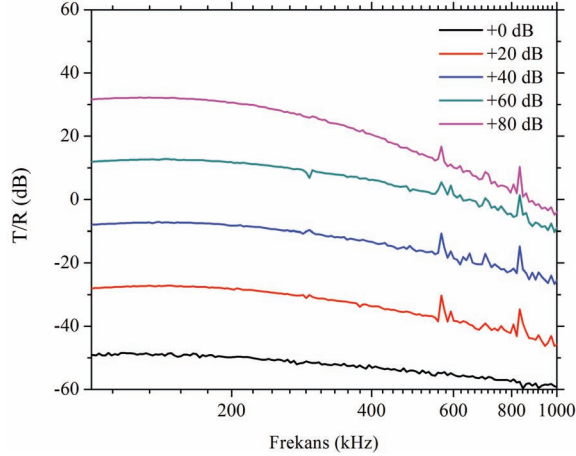
denenmiştir. Deneylerde LED kaynaklar sabit bir DC gerilim ile kutuplanmış ve bu DC gerilim üzerine farklı frekanslarda 0 dBm genlikli bir AC işaret eklenerek iletişim gerçekleştirilmiştir. Eklenen işaretin frekansı taranarak işaretin iletim başarımları ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 4’te gösterilmiştir. Sonuçlarda yüksek dalga boylu kaynakların daha geniş bant genişliklerinde iletme izin verdiği gözlenmiştir. Thorlabs fotodiyotlar ürüne tümleşik kuvvetlendirici sayesinde daha yüksek iletim başarımlarını sergileyebilmektedir. Farklı durumlar için ölçümlerden elde edilen iletim bant genişlikleri Tablo I’de verilmiştir.

Sonuçlara göre, CMOS fotodiyot optik iletişimi daha düşük olmakla birlikte kabul edilebilir bir bant aralığında gerçekleştirilebilmektedir. İki tip fotodiyot arasındaki kayıp en çok fosforişil beyaz LED kullanımında gerçekleşmektedir. Fosforişil beyaz LED’e ek olarak mavi filtre kullanılması bant genişliğini Thorlabs için % 2, CMOS fotodiyot için ise % 12 oranda arttırmıştır. İletişim bant aralığının daha yüksek dalga boylu bir ışık kaynağı olan yeşil LED için daha geniş olabildiği gözlemlenmiştir.

Bir optik iletişim sistemindeki alıcının standart bir CMOS üretim süreci ile üretilmesi fotodiyotun kuvvetlendirici bir elemanla tümleşik bir biçimde tasarlanıp üretilmesini mümkün kılar. Bu durumda farklı kazançlar ile kuvvetlendirilmiş CMOS fotodiyot başarımlarının izlenmesi anlamlı olacaktır. Kaynak ola-

TABLE I: FARKLI LED KAYNAKLAR KULLANILARAK YAPILAN İLETİŞİME THORLABS VE CMOS FOTODİYOTLAR İÇİN ULAŞILABİLİR İLETİM BANT GENİŞLİKLERİ.

LED Kaynak	Thorlabs Fotodiyot	CMOS Fotodiyot	Kayıp
Beyaz	1.208 MHz	0.702 MHz	% 42
Beyaz + Mavi Filtre	1.228 MHz	0.795 MHz	% 35
Mavi	0.872 MHz	0.807 MHz	% 7
Yeşil	1.675 MHz	1.368 MHz	% 18



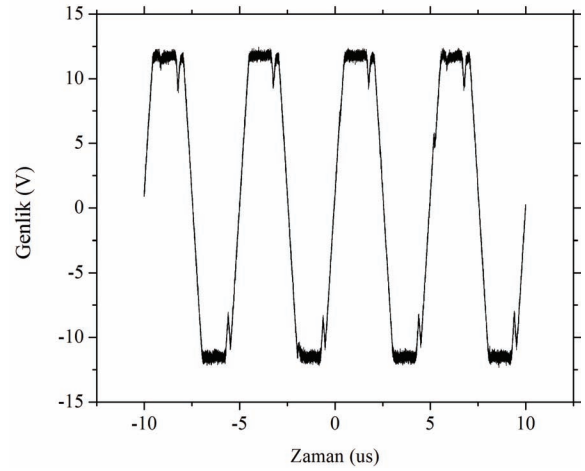
Şekil 5: Farklı genlikte giriş işaretleri kullanılmasıyla CMOS fotodiyotun iletim başarımına etkisi.

rak beyaz LED kullanılan bir düzende fotodiyotun çıkışına bir Femto DLPCA200 akım kuvvetlendirici eklenerek iletim başarımındaki değişim incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere CMOS kırmık üzerine tümleştirilecek 60 - 80 dB kazançlı bir kuvvetlendirici ile CMOS fotodiyot iletim başarımının Thorlabs için mümkün olan seviyelere çekilebilmesi mümkün olabilecektir.

Fotodiyotun çalışmasının zaman uzayında da gösterilmesi amacıyla yukarıda söz edilen düzenek değiştirilmiştir. Bu durumda LED Tektronix AFG3101 işaret üretici ile sürülme iken fotodiyot cevabı Femto kuvvetlendirici ile yükseltildikten sonra LeCroy 6100A osiloskop ile izlenmiştir. LED 0 - 2.5 V genlik aralıklı 200 kHz değerinde bir karde dalga ile sürülerek anahtarlığında ve fotodiyot cevabı 70 dB kazançlı kuvvetlendirici ile yükseltildiğinde elde edilen dalga biçimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Burada yüksek frekansta bir işaret kullanılmasına rağmen yükseltilmiş sonuç takip edilebilmektedir. Dalga biçiminde yükselme ve düşme zamanlarında meydana gelen bozulma kuvvetlendiricinin yükselme hız sınırının aşılmasından kaynaklanmaktadır.

#### IV. SONUÇLAR

Optik iletişim sistemleri, görülebilir ışık bandında uygulamaları halinde radyo frekans iletişim ağına destek olabilecek çeşitli ve ilgi çekici uygulama alanlarına sahiptir. Optik iletişimin yapılmasında mikrosistemlere kolayca tümleştirilebilecek yüksek hızlı yarı iletken cihazların kullanılması avantajlı olacaktır. Günümüzde optik alıcı cihazlar, yaygın olarak fotonik uygulamalar için özellikle geliştirilmiş yarı iletken teknolojilerini kullanırlar; ancak bu teknolojiler ile üretim ve bunların



Şekil 6: 200 kHz frekansta 0 - 2.5 V genlikle LED'e verilen kare dalgaya karşılık 70 dB kazançlı kuvvetlendirici ile yükseltilmiş CMOS fotodiyot cevabı.

standart CMOS elektronik sistemlere tümleştirilmesi maliyet ve karmaşıklığı artırmaktadır. Bu yaklaşıma bir seçenek, alıcı fotodiyotların standart CMOS üretim süreçlerine dahil PN kavşakları ile gerçekleştirilmesidir.

Çalışmada aktarıldığı biçimde 180 nm UMC üretim süreci ile gerçekleştirilmiş bir CMOS fotodiyotun optik iletişim başarımı, fotonik uygulamalar için geliştirilmiş bir Thorlabs PDA10A-EC fotodiyotunki ile karşılaştırılmıştır. CMOS fotodiyotun çalışabildiği iletişim bandının Thorlabs fotodiyotunki ile karşılaştırılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Aradaki fark CMOS fotodiyotun mikroelektronik sistemlere kolayca tümleştirilebilirliğini karşılayabilecek niteliktedir. Deneyler ayrıca alıcıbaşarımının, kırmık üzerine dahil edilebilecek bir kuvvetlendirici yapısı ile uygun seviyelere çekilebileceğini göstermiştir. Bu biçimde kullanılan bir fotodiyot, 200 kHz frekansta bir işareti sezebilmektedir.

#### BİLGİLENDİRME

Bu çalışma Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] H. Elgala ve diğ., "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *IEEE Commun. Mag.*, cilt 49, no. 9, ss. 56-62, 2011.
- [2] L. Grobe ve diğ., "High-speed visible light communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, cilt 51, no. 12, ss. 60-66, 2013.
- [3] I. Takai ve diğ., "LED and CMOS image sensor based optical wireless communication system for automotive applications," *IEEE Photon. J.*, cilt 5, no. 5, ss. 6801 418-6801 418, 2013.
- [4] F. Khan ve diğ., "Applications, limitations, and improvements in visible light communication systems," in *2015 ICCVE*, 2015, ss. 259-262.
- [5] H. Elgala ve diğ., "OFDM visible light wireless communication based on white LEDs," in *VTC 2007-Spring*, 2007, ss. 2185-2189.
- [6] B. Radi ve diğ., "Comparative study of optoelectronics receiver front-end implementation in InP, SiGe, and CMOS," in *2016 IPC*, 2016, ss. 222-223.
- [7] B. Camli ve diğ., "Photodiodes for monolithic CMOS circuit applications," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, cilt 20, no. 6, ss. 336-343, 2014.