

T. C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

84885

**KISA MESAFE OPTOELEKTRONİK BİLGİ İLETİŞİM  
SİSTEMİNİN TASARIMI**

**İSMAİL TEKİN**

TC. MİLLÎ  
DOKÜMAN  
KURULU  
TARAFINDAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

84885

**BURSA - 1999**

**T.C.**  
**ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KISA MESAFE OPTOELEKTRONİK BİLGİ İLETİŞİM**  
**SİSTEMİNİN TASARIMI**

**İSMAİL TEKİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 31.08.1999 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Eldar MUSAYEV

Prof. Dr. Ali OKTAY



Doç. Dr. Muhiddin AFRAYİLOV

( Danışman )

## ÖZET

Kısa mesafe haberleşmede optoelektronik sistemler sıkça kullanılmaktadır. Özellikle binalar arası data ve ses iletişimde, bilgisayarlar arası bağlantıda ve fabrikalarda sensör işaretinin ana bilgi merkezine ulaştırılmasında optoelektronik sistemler sıkça kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında kısa mesafe optoelektronik bilgi iletişim sistemi tasarlanmıştır. Gerekli analizler ve hesaplamalar yapılmıştır. Denemler sonucunda elde edilen veriler tablo halinde verilmiştir.



**ABSTRACT**

Optoelectronic systems are rarely used in short distance communication, especially to send and receive the datas and the speech signals between the buildings, to connect the computers and to collect the sensor signals to central control panel at factories. In this thesis, short distance optoelectronic communication system is designed. Necessary analysis and calculations are made. Given tables show the results held at the end of some tests.



**İÇİNDEKİLER**

<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER</b>	<b>3</b>
2.1. Işık yayan diyotlar ( LED'ler )	3
2.1.1. Yarıiletken p – n jonksiyonunun temel yapısı	3
2.1.2. Bir yarıiletken jonksiyondan ışının yayılması	6
2.1.3. LED'lerin elektriksel ve optik karakteristikleri	8
2.2. Lazerler	12
2.2.1. Lazerin çalışma prensibi	12
2.2.2. Lazer çeşitleri	15
2.2.3. Yarıiletken lazer diyod	19
2.3. Fotoalıcıların gruplanması ve karakteristikleri	29
2.3.1. Fotoalıcıların karakteristikleri	29
2.3.2. Fotoalıcılarda gürültü	31
2.3.3. Dış etkili optoelektronik dedektörler	33
2.3.3.1. Vakum fotodiyotlar	34
2.3.3.2. Fotoçoğullayıcı ve mikrokanal	34
2.3.3.3. Mikrokanal	35
2.3.4. İç etkili optoelektronik dedektörler	36
2.3.4.1. Fotodirençler	36
2.3.4.2. Jonksiyonlu fotodiyot	41
2.3.4.3. Fototranzistörler	51
2.4. Sıcaklık Sensörleri	58
2.4.1. Optoelektronik osilatörün sıcaklık sensörü olarak kullanılması	58
2.4.2. PT100'ler	62
2.4.3. Termokuplörler	63
<b>3. SİSTEMİN OPTİK ŞEMASININ GELİŞTİRİLMESİ</b>	<b>65</b>
3.1. Verici ile alıcı arasındaki mesafenin incelenmesi	65
3.1.1. Verici ile alıcı arasındaki mesafenin belirlenmesi	65
3.1.2. Verici ile alıcı arasındaki mesafeyi artırma yolları	69

<b>4. SİSTEMİN TASARIMI</b>	<b>71</b>
4.1. Çeviricinin seçilmesi	71
4.2. Işın verici devresinin tasarlanması	73
4.2.1. LED'in seçilmesi	73
4.2.2. Işın verici devresinin analizi	74
4.3. Fotoalıcı devresinin tasarımı	77
<b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>	<b>80</b>
Kaynaklar	81
Ek1	82
Ek2	88
Teşekkür	89
Özgeçmiş	90



## SİMGELER DİZİNİ

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>
$\lambda$	Işının dalga boyu
$\Delta E$	Enerji engeli
$V_e$	Eşik gerilimi
$V_b$	Bel verme gerilimi
$d_c$	Çalışma çevrimi
$i_t$	Akımın tepe değeri
$i_D$	LED akımı
$t_d$	Darbe süresi
$t_b$	Boşluk süresi
$R_D$	LED'in dinamik direnci
$c$	Işık hızı
$n$	Optik yuvanın kırılma indisi
$RE$	Fotoalıcının duyarlılığı
$\phi_1$	Işının şiddeti
$NEP$	Fotoalıcının algılayabileceği minimum ışık şiddeti
$D$	Fotoalıcının algılabileceği yeteneği
$D^*$	Normalize edilmiş algılayabilme
$A_D$	Fotoalıcının ışığa duyarlı yüzeyinin alanı
$\eta_\lambda$	$\lambda$ dalga boyundaki quanta etkinliği
$k$	Boltzman sabiti
$T$	Sıcaklık
$G$	Fotodirencin kazancı
$\beta$	Akım kazancı
$g$	FET'in transkonduktansı
$K_{LED}$	LED'in akımı ışına dönüştürme katsayısı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sayfa No</u>	<u>Şekil No</u>	<u>Şekil ismi</u>
4	2.1	Germanyum atomu için orbitallerin elektronlarla doldurulması
5	2.2	Saf, n tipi ve p tipi yarıiletkenler
6	2.3	p – n jonksiyonunun enerji seviyesi
7	2.4	p – n jonksiyonunda rekombinasyon
8	2.5	Bazı ışın vericilerin spektrum diyagramları
9	2.6	LED'in bazı karakteristikleri
9	2.7	LED'e uygulanan darbeli akım
10	2.8	Işık şiddetinin akım ile değişimi
11	2.9	Bazı LED'lerin spektrum karakteristikleri
12	2.10	Elektronik geçişler
13	2.11	Klasik geribesleme osilatörü
13	2.12	İki seviyeli sistemdeki geçişler
14	2.13	Çok seviyeli sistemdeki geçişler
15	2.14	Lazerde geribesleme ve frekans belirlenmesi
15	2.15	Lazerlerin çalışma modları
19	2.16	Kenar yayımlı LED'lerde ışının oluşması
20	2.17	Lazer diyodun yapısı
20	2.18	Lazer diyot ışınının oluşması
20	2.19	Lazer diyodun akım – gerilim karakteristikleri
21	2.20	Lazer ışının sıcaklıktan etkilenmesi
22	2.21	LED'in spektrum karakteristiği
22	2.22	Rezanatör içinde ışının oluşması
23	2.23	Lazerin çok modlu spektrumu
24	2.24	Çeşitli lazer yapıları
25	2.25	Quantum lazerler
28	2.26	Çıkışına monitör yerleştirilmiş lazerin yapısı
29	2.27	Geniş ve dar spektrumlu fotoalıcıların spektrumları
31	2.28	Zaman sabiti, yükselme ve düşme sürelerinin belirlenmesi
34	2.29	Vakum fotodiyodun yapısı



35	2.30	Mikrokanal
37	2.31	Bazı fotodirençlerin spektrum karakteristikleri
37	2.32	Fotodirencin direnç – ışık şiddeti karakteristiği
38	2.33	Fotodirencin bağlantı şekilleri
39	2.34	Fotodirencin geometrisi ve yapısı
39	2.35	Fotodirencin yükselme ve düşme süreleri
40	2.36	Fotodirencin sıcaklık karakteristiği
40	2.37	Fotodirençlerdeki hafıza etkisi
41	2.38	p – n jonksiyonundaki enerji seviyeleri ve fakirleşmiş bölge
42	2.39	Fotodiyodun eşdeğer devresi
43	2.40	Fotodiyot karakteristikleri
46	2.41	Fotodiyodun işlemsel kuvvetlendiricinin girişine uygulanması
47	2.42	Fotodiyodun FET girişli opampın girişine uygulanması
47	2.43	Planar difüzyon fotodiyodun yapısı
48	2.44	Schottky fotodiyodun yapısı
49	2.45	Çığ fotodiyoddaki kazanç ve ters gerilim ilişkisi
49	2.46	Çığ fotodiyodun yapısı
50	2.47	Sıcaklık ile şönt direncin ve karanlık akımın değişmesi
50	2.48	Fotodiyodun akım – gerilim karakteristikleri
51	2.49	Fototranzistör
52	2.50	Fototranzistörün yapısı
53	2.51	$\beta$ 'nın kollektör akımı ile değişimi
54	2.52	Fototranzistörde sıcaklığın karanlık akıma etkisi
54	2.53	Yük direnci ile çalışma frekansının değişmesi
55	2.54	Yüksek frekanslarda çalışmak için tranzistör devresi
55	2.55	Silikon fototranzistörün cevap eğrisi
56	2.56	Fotodarlington
56	1.57	FotoFET
59	2.58	Optoelektronik osilatörün çalışmasını ifade eden zaman diyagramı
60	2.59	LED – fotodirenç çiftinin kılıf içerisine yerleştirilmesi
60	2.60	Denemelerde kullanılan devre

61	2.61	$t_d / t_b$ oranının sıcaklık ile değişimi
63	2.62	Termokuplör ile sıcaklığı ölçülmesi
64	3.1	Optoelektronik sistemlerin genel blok şeması
65	3.2	Yansımali optoelektronik sistem
66	3.3	Optik olarak yansıma olayı
66	3.4	Verici ışınının yayılması
68	3.5	Verici ile alıcının direkt yerleştirilmesi
69	3.6	Verici ile alıcı arasına optik kanalın yerleştirilmesi
69	3.7	Verici bölgesine merceğin yerleştirilmesi
69	3.8	Verici bölgesine reflektörün yerleştirilmesi
69	3.9	Vericinin aşırı akım modunda çalıştırılması
71	4.1	Sistemin blok şeması
72	4.2	LM566 entegresi ile analog – frekans çevirici
72	4.3	LM 566 entegresinin 4.bacağında elede edilen işaret
73	4.4	LED spektrumunun belirlenmesi
74	4.5	LED'e uygulanan darbeli akım
76	4.6	Verici devresinin ışın veren kısmı
78	4.7	Verici devresi
77	4.8	Sistemde kullanılan fotoalıcı devresi

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<u>Çizelge No</u>	<u>Çizelge İsmi</u>
2.1	Lazerlerin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması
2.2	Çok kullanılan yarıiletken lazerlerin bazı özellikleri
2.3	LED'lerin, çok modlu lazerlerin ve tek modlu lazerlerin karşılaştırılması
2.4	Denemelerde kullanılan fotodirencin katalog bilgileri
2.5	Denemelerde elde edilen sonuçlar
4.1	LM566 entegresi ile yapılan deneyin sonuçları



## 1. GİRİŞ

Optoelektronik sistemlerin kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Optoelektronik sistemlerin kullanım alanlarından biri kısa mesafe haberleşme sistemleridir. Bunun nedenlerinde biri radio frekans bandının dolmuş olması ve radio frekanslarının elektronik sistemlerde parazit oluşturmasıdır. Ayrıca optoelektronik sistemler taşınabilir olduğundan kullanımı kolaydır. Band genişliği teorik olarak sonsuzdur. Çevresindeki diğer elektronik sistemelerden etkilenmezler ve onları etkilemezler.

Bir oda içerisindeki bilgisayarların birbirlerine bağlanmaları optik yapılabilir. Böylece kablolardan kurtulunmuş olur. Kullanılan optik ışının dalga boyu çok küçük olduğundan girişim söz konusu değildir. Dolayısıyla optoelektronik sistemler bu gibi durumlarda oldukça avantajlıdır.

Optoelektronik sistemler data iletişimde kullanılabilirdiği gibi analog işaretlerin iletişimde de kullanılabilir. Özellikle bir fabrikadaki sensör bilgilerinin ana bilgi merkezine iletilmesinde kullanılabilir. Böylece kablolardan ve kablo dirençlerinin oluşturacağı hatalardan kurtulunmuş olur. Aynı şekilde iki bina arasındaki data ve ses iletiminde de optoelektronik sistemler kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında da bir analog işaret ( örneğin sıcaklık sensörünün çıkış işareti ) bir noktadan başka bir noktaya ulaştıran optoelektronik sistemin geliştirilmesi ve tasarlanması araştırılmıştır.. Burada iki nokta arasındaki mesafe vericinin ışın şiddetine ve sistemde kullanılan optik elemanlara ( mercekler, reflektörler, ...) bağlıdır. Tez çalışması sırasında ışın verici olarak LED kullanılmış ve herhangi bir optik eleman kullanılmamıştır. Dolayısıyla iletişim mesafesi maksimum 100m civarında belirlenmiştir.

Tez çalışması sırasında ilk olarak sistemde kullanılacak elemanların özellikleri araştırılmıştır. Birinci bölümde ışın vericilerin çeşitleri, özellikler, karakteristikleri ve parametreleri incelenmiştir ve gerekli ışın verici seçilmiştir. Optoelektronik sistemlerin ikinci önemli elemanları fotoalıcılardır. Fotoalıcıların çeşitleri, özellikleri, karakteristikleri ve parametreleri incelenmiştir ve tasarlanan sisteme uygun fotoalıcı seçilmiştir. Ayrıca sistemde analog işaret kaynağı olarak sıcaklık sensörü kullanıldığından sıcaklık sensörleri incelenmiştir. Çok çeşitli sıcaklık sensörler vardır.

Bunlardan PT100'ün, termokuplörün ve optoelektronik osilatörün ayıması incelenmiştir. Optoelektronik osilatörün ısı sensörü olarak kullanılması ayrıntılı incelenmiş ve kullanım şartları geliştirilmiştir.

İkinci bölümde kısa optoelektronik haberleşme sisteminin geliştirilmesi verilmiştir. Haberleşme sisteminin iletişim mesafesinin belirlenmesi incelenmiştir. Ayrıca bu mesafenin artırılması için nelerin yapılabileceği araştırılmıştır ve analizde kullanılan denklemler elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde ise sistemin tasarımı verilmiştir. İlk olarak analog işareti frekansa çevirecek uygun devre seçilmiş ve gerekli denemeler yapılmıştır. Daha sonra ışın verici devresinin akımı belirlenmiştir. Verici devresi tasarlandıktan sonra fotoalıcı devresi tasarlanmıştır. Işın verici ve fotoalıcı devrelerin analizi yapılmıştır.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER

Optoelektronik sistemlerde ışın verici olarak LED'ler ve lazerler kullanılmaktadır. LED'ler ışın verici olarak kullanılan ilk elemanlardır. LED'lerin ışın spektrumu kvazimonokromatiktir ( monokromatiğe benzer ). Ayrıca LED'lerin ışın diyagramları geniştir. Lazer ışını ise monokromatiktir ( tek dalga boyuna sahip ışın ). Lazerlerin ışın diyagramları oldukça dardır. Lazerler çok çeşitli şekilde yapılabilmektedirler. Yarıiletken lazerler kullanımı kolay olduğundan geniş olarak kullanılırlar.

### 2.1. Işık yayan diyotlar (LED'ler)

Bu bölümde LED'ler incelenecektir. Önce bir p - n jonksiyonundan ışının yayılması incelenecektir. Daha sonra da sırasıyla LED'lerin yapısı ve çalışma prensipleri incelenecektir.

#### 2.1.1. Yarıiletken p -n jonksiyonunun temel yapısı

Si, Ge, Ga gibi yarıiletkenler hidrojenen daha karmaşık yapıya sahiptirler. Yarıiletken atomlarda, elektronlar K,L,M ve N harfleri ile gösterilen orbitaller şeklinde organize edilmişlerdir. Herbir orbital sabit sayıda elektrona sahiptir: K orbitali 2, L orbitali 8, M orbitali 18 ve N orbitali 32 elektrona sahiptir. Örneğin Germanyum 28 elektrona sahiptir. Germanyum için orbitallerin elektronlarla doldurulması Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi N orbitalinde 4 elektron vardır.

Son orbital ( N orbitali ) valans bandı olarak adlandırılır. Bu orbitaldeki elektronlar da valans elektronları olarak adlandırılır. Valans elektronları, yarıiletkenin diğer elementlerle olan kimyasal reaksiyonlarını ve yarıiletkenin elektriksel özelliklerini belirlerler. Yarıiletkene dışarıdan bir enerji uygulanırsa valans elektronları yasak enerji duvarını atlayarak iletim bandına geçebilirler. İletkenlik bandındaki elektronlar serbesttirler, bir atomdan başka bir atoma geçebilirler ve böylece elektrik taşıyıcısı olurlar ( Uiga 1995. Singh 1996 ).

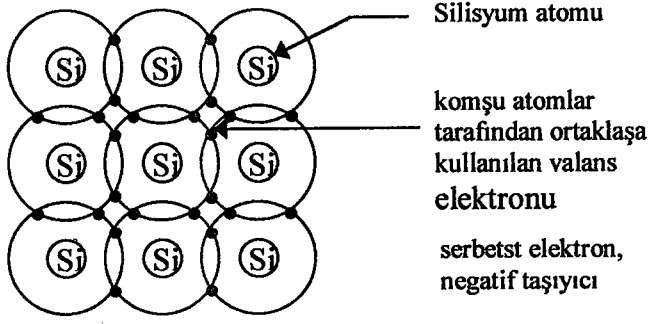


Şekil 2.1 Germanyum atomu için orbitallerin elektronlarla doldurulması.

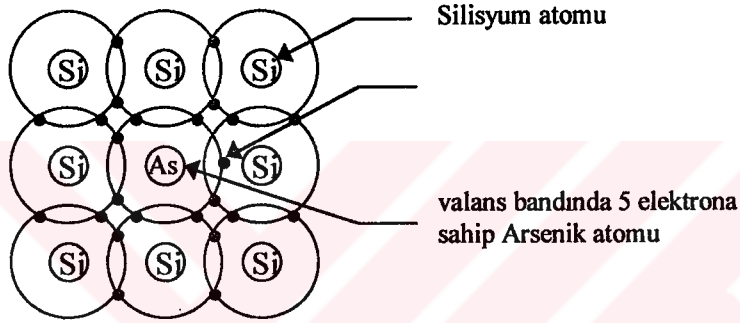
Bir elementin elektriksel özellikleri, taşıyıcıların yeteneğine ve iletim bandındaki elektronların sayısına bağlıdır. İletkenler,  $\text{cm}^3$  başına  $10^{23}$  civarında taşıyıcıya sahiptirler. İyi bir yalıtkan ise  $\text{cm}^3$  başına 10 civarında taşıyıcıya sahiptir. Yarıiletkenler ise  $\text{cm}^3$  başına  $10^8$  ile  $10^{14}$  arasında taşıyıcıya sahiptirler. Aynı zamanda yasak enerji duvarları arasında da fark vardır. İletkenlerde bu duvar teorik olarak yoktur, yalıtkanlarda ise çok büyüktür. Yarıiletkenlerde ise ikisinin ortasındadır.

Bir yarıiletkenin iletkenliği iki yolla artırılabilir: Birincisi, yarıiletkene ısı enerjisi vererek iletim bandındaki elektronların sayısını arttırmaktır. Bu yöntem bütün yarıiletkenlerde kullanılabilir, fakat fazla kullanılmaz. Çünkü bu yöntemde çevre şartları iletkenliği çok etkiler. İkinci yöntem ise, katkılama yapmak suretiyle serbest taşıyıcıların sayısını arttırmaktır. Yarıiletkene fazla taşıyıcı veya az taşıyıcı yarıiletken katkılamak suretiyle yapı içinde pozitif veya negatif iyonlar oluşur. Bu metotta katkı yoğunluğu ile yarıiletkenin iletkenliği kontrol edilebilir.

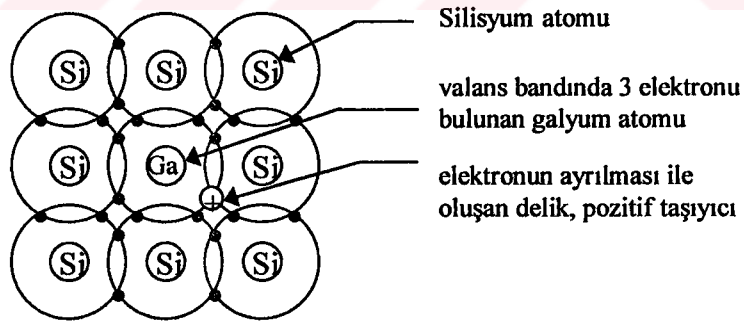
Şekil 2.2a'da görüldüğü gibi valans elektronlarının tümü komşu atomlar tarafından tutulur ve iletim bandında serbest elektron kalmaz. Bu tip malzemelerin iletkenliği düşüktür. Şekil 2.2b'de 5 protona ve 5 elektrona sahip Arsenik atomları ile katkılanmış Si atomları gösterilmiştir. Silisyumun valans bandında 4 elektron olduğundan arseniğin 5. elektronu boşta kalır ve elektrik taşır. Burada taşıyıcı elektrondur ve bu tip yarıiletkenlere n tipi yarıiletken adı verilir. Şekil 2.2c'de 3 protona ve 3 elektrona sahip Galyum atomları ile katkılanmış Si atomları gösterilmiştir.



a) Saf silisyumun atomik yapısı.



b) n tipi yarıiletken.

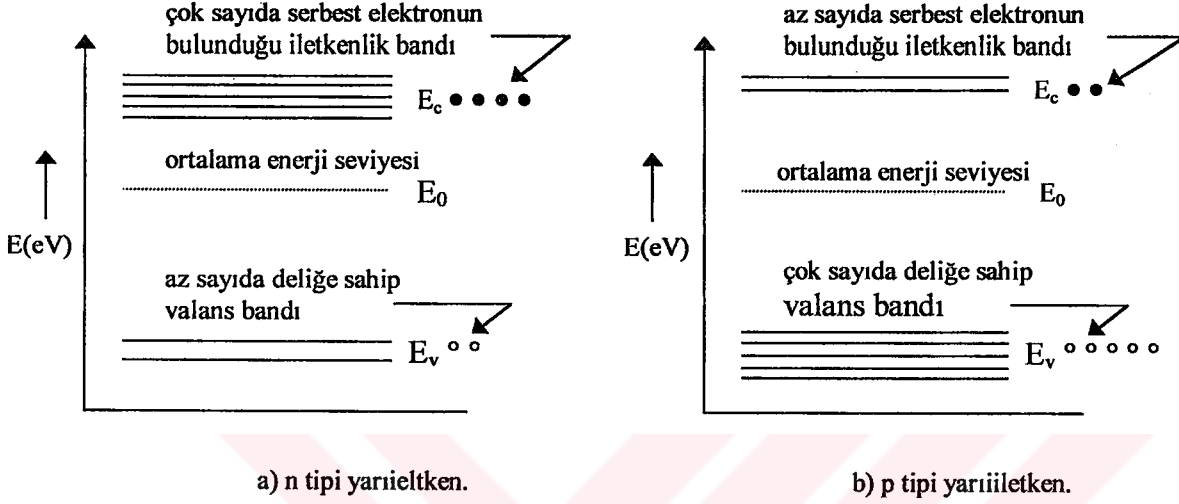


c) p tipi yarıiletken.

Şekil 2.2 saf, n tipi ve p tipi yarıiletkenler.



n tipi ve p tipi yarıiletkenlerin enerji seviyeleri Şekil 2.3'de açıklanmıştır. Şekil 2.3a'da n tipi yarıiletkenlerin enerji seviyeleri gösterilmiştir. İletkenlik bandı elektronlarla doludur. Elektronlar yüksek enerji seviyesine sahiptirler ve n tipi yarıiletkenlerin ortalama enerji seviyeleri, saf yarıiletkenlerin ortalama enerji seviyelerinden daha yüksektir.



Şekil 2.3 p - n jonksiyonunun enerji seviyesi.

p tipi yarıiletkenlerde ise iletkenlik bandında çok az sayıda elektron vardır. Dolayısıyla ortalama enerji seviyesi saf yarıiletkenlerden daha düşüktür. p tipi yarıiletkenler, serbest olan ve dolayısıyla akım taşıyan çok sayıda deliğe sahiptirler. p tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları deliklerdir, elektronlar ise azınlık taşıyıcılarıdır. n tipi yarıiletkenlerde ise çoğunluk taşıyıcıları elektronlardır, delikler azınlık taşıyıcılarıdır. Çoğunluk taşıyıcılarının ve azınlık taşıyıcılarının hareketi birbirine zıt yöndedir. Çoğunluk taşıyıcıları baskın akım taşıyıcılarıdır ( Uiga 1995 ).

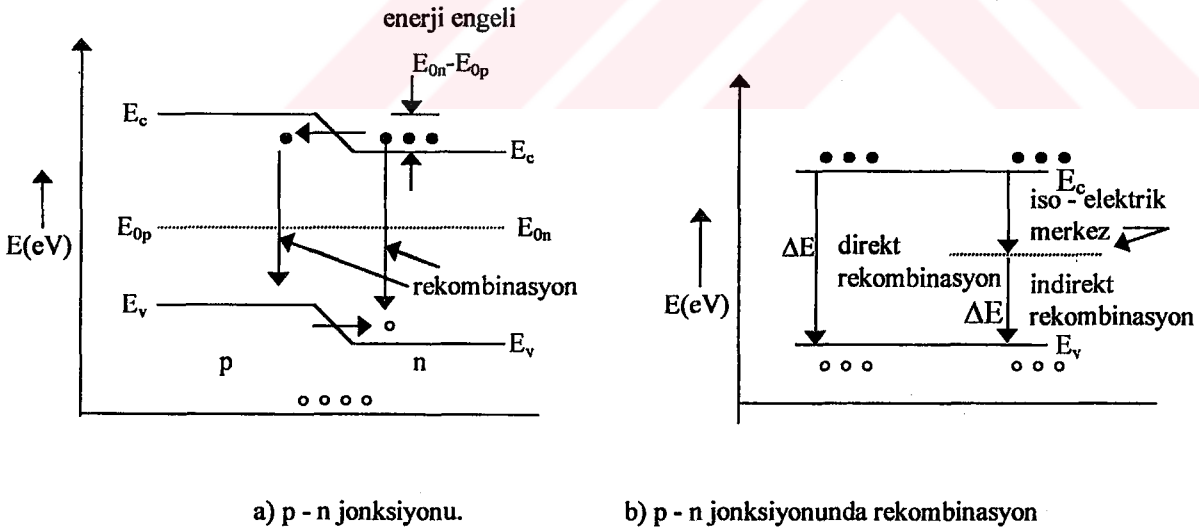
### 2.1.2. Bir yarıiletken jonksiyondan ışının yayılması

Optoelektronikte en önemli ışın kaynağı, p - n jonksiyonu olarak adlandırılan yarıiletken jonksiyondur. Bir p - n jonksiyonunda, bir p tipi yarıiletken ile bir n tipi yarıiletken yan yana yerleştirilir.

p - n jonksiyonunda serbest taşıyıcılar ( elektronlar ve delikler ) bir taraftan diğer tarafa difüzyonla geçerler. Bu geçiş sırasında birbiri ile karşılaşan elektronlar ve delikler birbirlerini yok ederler ve böylece her iki bölgede taşıyıcılar bakımından zayıflamış bölge oluşur. Böylece iki bölge arasında bir potansiyel engeli oluşur.

Jonksiyona tıkama yönünde bir ters gerilim uygulandığında bu ters gerilim potansiyel engeline eklenir. Dolayısıyla fakirleşmiş bölge artar ve jonksiyondan teorik olarak akım akmaz. Jonksiyona iletim yönünde bir gerilim uygulandığında ise potansiyel engeli azalır ve fakirleşmiş bölge küçülür. İletkenlik bandındaki elektronların enerjisi valans bandındaki deliklerin enerji seviyesinden daha yüksek olduğundan ışıma şeklinde bir miktar enerji yayılır.

Yayılan radyasyonun dalga boyu birkaç faktöre bağlıdır. Birincisi, yarıiletken malzemeye bağlı olan p ve n bölgeleri arasındaki potansiyel engelidir. İkincisi ise rekombinasyon modudur. Rekombinasyon direkt veya indirekt olabilir. Direkt rekombinasyonda elektronlar iletkenlik bandından valans bandına direkt geçerler. İndirekt rekombinasyonda ise elektronlar önce nötr iso - elektrik merkeze geçerler, oradan da valans bandına geçerler ( Şekil 2.4). Rekombinasyon modu yarıiletken malzemenin cinsine ve saflığına bağlıdır.

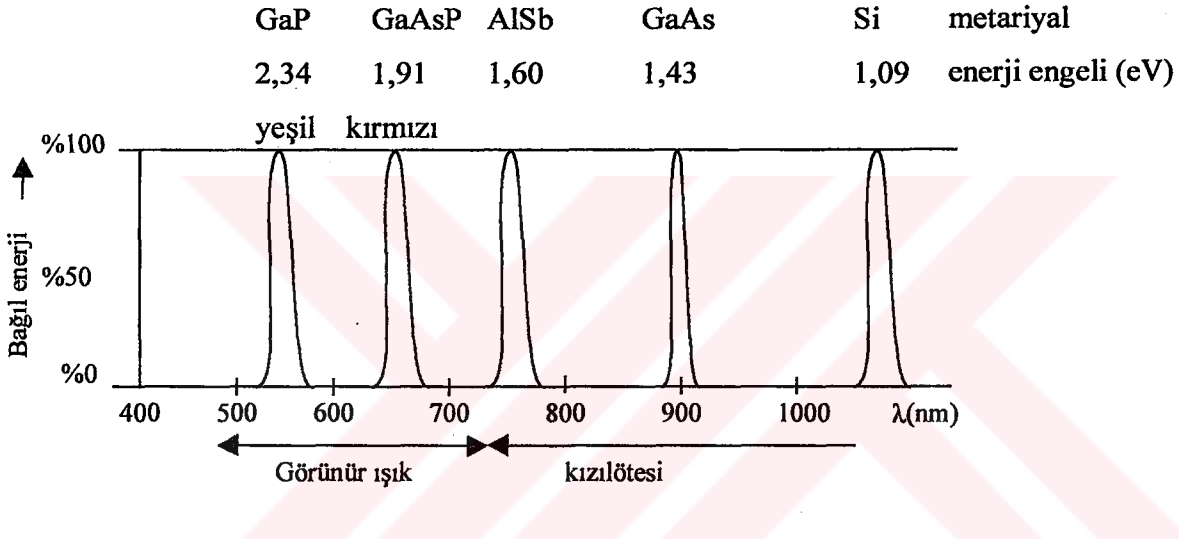


Şekil 2.4 p - n jonksiyonunda rekombinasyon.

Yayılan radyasyonun dalga boyu enerji engeline bağlıdır. Bu bağımlılık,

$$\lambda(nm) = \frac{1240}{\Delta E(eV)}$$

şeklinde. En çok kullanılan malzemeler olan Silisyum ve Germanyumun enerji engeli oldukça düşüktür ( 1,09eV ve 0,66eV ) ve dolayısıyla dalga boyları 1140nm ve 1880nm arasındadır. Daha düşük enerji engeline sahip yarıiletkenler Ga, As, P, In ve Sb'dir. Bu yarıiletkenler kısa dalga boylarında ışın yayarlar. Şekil 2.5'de bazı yarıiletkenlerin spektrumları gösterilmiştir.

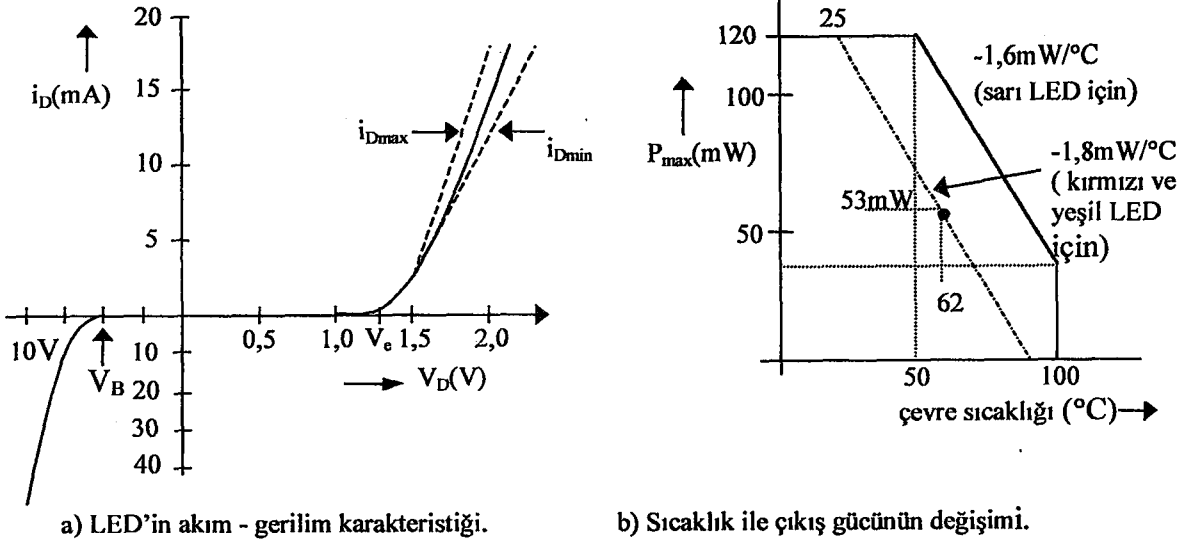


Şekil 2.5 Bazı ışın vericilerin spektrum diyagramları.

### 2.1.3. LED'lerin Elektriksel ve Optik Karakteristikleri

LED bir yarıiletken diyotdur. Dolayısıyla LED'in karakteristikleri normal bir p - n diyodun karakteristiklerine benzer. Şekil 2.6a'da LED'in akım - gerilim karakteristiği gösterilmiştir.

LED'in eşik gerilimi (  $V_e$  ) yarıiletken malzemeye bağlı olup 1,2V ile 2V arasındadır. LED'in dinamik direnci birkaç ohm'dan on ohm'lara kadardır. Bel verme gerilimi (  $V_B$  ) ise 5V civarındadır. Şekil 2.6b'de sıcaklık ile çıkış gücünün değişimi gösterilmiştir ( Uiga 1995 ).



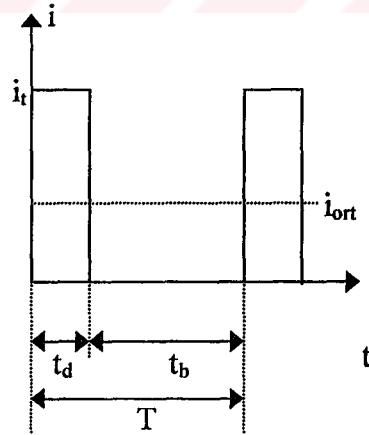
Şekil 2.6 LED'in bazı karakteristikleri.

LED'ler genelde darbeli modda çalıştırıldığından önemli bir parametre tepe akımı ( $i_{mp}$ ) dır. Şekil 2.7'de darbenin şekli gösterilmiştir. Darbeli çalışma için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$d_c = \frac{t_{on}}{T}$$

Burada,

$d_c$ ; çalışma çevrimi,  $t_{on}$ ; darbe süresi, (s),  $T$ ; darbe periyodu (s)dir.



Şekil 2.7 LED'e uygulanan darbeli akım.

Ortalama akım ise,

$$i_{ort} = i_t \cdot d_c$$

dır. Burada,  $i_p$ ; tepe akımıdır. LED'den yayılan güç ise,

$$P_D = i_D \cdot V_D$$

dır. Burada,  $i_D$ ; LED akımı,  $V_D$ ; LED gerilimidir.

$$P_D = i_{out} [V_{D0} + R_D (i_t - i_{D0})]$$

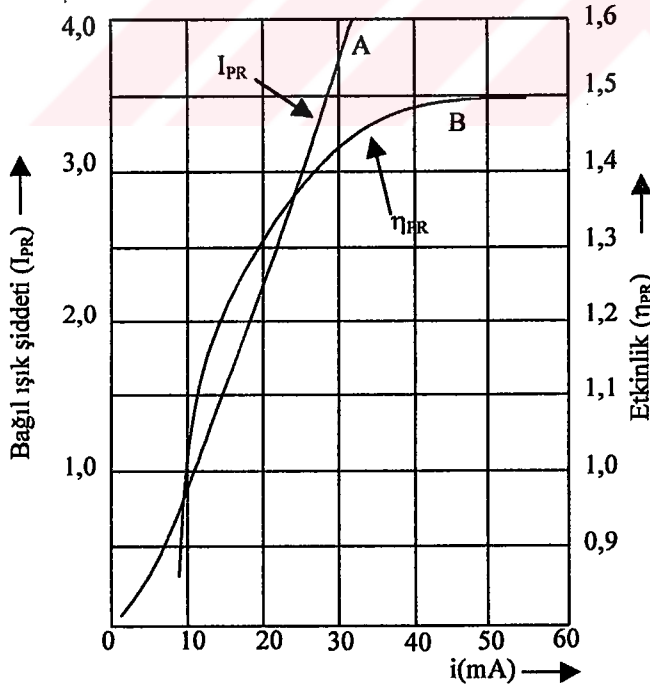
LED'in dinamik direnci,

$$R_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta i_D}$$

dır (MUSAYEV 1996).

Işık şiddeti LED'in en önemli optik parametresidir. Işık şiddeti, LED akımının nonlineer fonksiyonudur. Bağlı ışık şiddeti akımın artması ile artar. Nonlineerlik iki şekilde ifade edilebilir. Birincisi Şekil 2.8'de gösterilen  $I_{PR} = f(I_D)$  eğrisi (A eğrisi) dir.

İkincisi ise  $\eta_{PR} = \frac{I_{PR}}{I_{PR0}}$  ile belirlenen bağlı etkidir (B eğrisi).

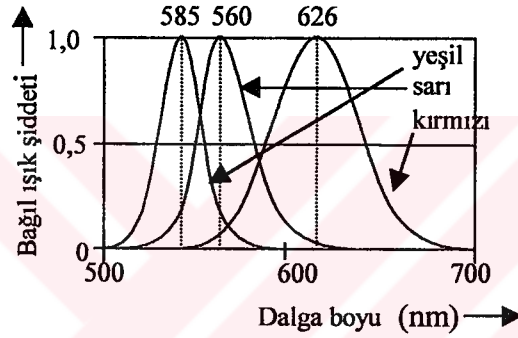


Şekil 2.8 Işık şiddetinin akım ile değişimi.

LED'in diğ er bir karakteristiğ i ise sıcaklık ile aydınlatma ş iddetinin değ işmini gösteren eğridir.  $I_{PR}$ 'nin sıcaklık katsayısı  $-1\%/^{\circ}\text{C}$  civarındadır. Yani sıcaklıktaki  $25^{\circ}\text{C}$ 'lik bir artış ışık ş iddetinde  $25\%$ 'lik bir azalmaya sebep olur. Bu, LED'in yapısından kaynaklanmaktadır.

LED'in diğ er önemli bir parametresi cevap zamanıdır. Bu süre sarı ve kırmızı LED için  $90\text{ns}$ , yeş il LED için  $500\text{ns}$ 'dir. Bu kısa cevap zamanı LED'leri haberleş me linklerinde ışık kaynağ ı olarak kullanılma imkanı vermiştir.

LED'in önemli karakteristiklerinden biri ışım a diyagramıdır. Ş ekil 2.9'da bazı LED çeş itlerinin spektrum karakteristiğ i gösterilmiştir. Bu diyagramlardan da grldğ u gibi LED'lerin spektrum karakteristiğ i oldukça geniştir.

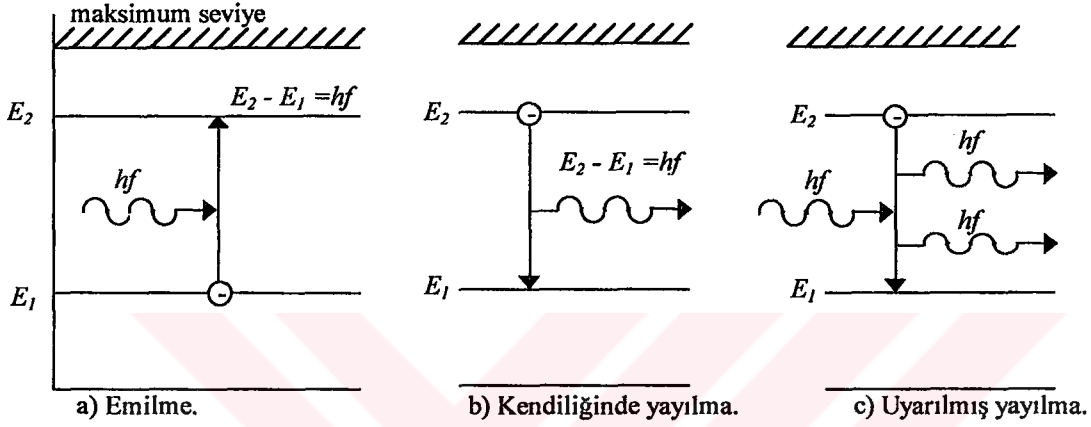


Ş ekil 2.9 Bazı LED'lerin spektrum karakteristiğ i.

## 2.2. Lazerler

### 2.2.1. Lazerin çalışma prensibi

Lazerin çalışmasının temelinde elektronik geçişler vardır. Bu geçişler üç gruba ayrılabilir: emilme, kendiliğinden yayılma ( spontaneous emission ) ve uyarılmış yayılma ( stimulated emission ). Bu üç olay Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



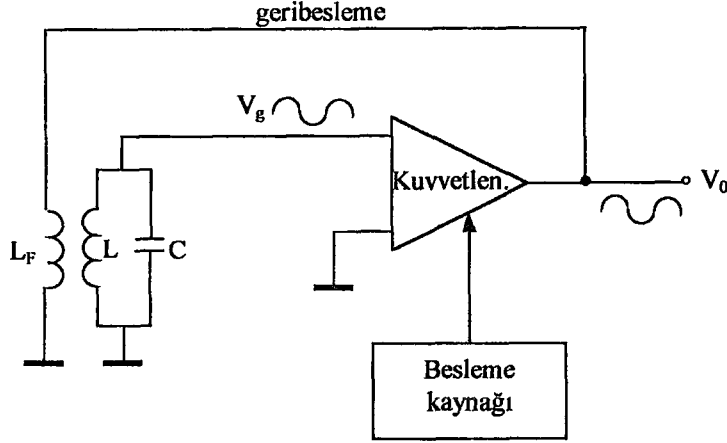
Şekil 2.10 Elektronik geçişler.

Şekil 2.10a'da emilme olayı gösterilmiştir. Burada, elektron dışardan aldığı enerji ile ( örneğin ışık enerjisi ile ) üst enerji seviyesine çıkar.

Şekil 2.10b'de kendiliğinden yayılma olayı gösterilmiştir. Burada elektron üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçer ve bu geçiş sırasında bir foton yayılır. Yayılan fotonun enerjisi iki seviye arasındaki enerji farkına eşittir. Buradaki yayılma rastgele bir yayılmadır.

Şekil 2.10c'de ise uyarılmış yayılma gösterilmiştir. Kendiliğinden yayılmadaki gibi burada da elektron üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçer ve iki seviye arasındaki enerji farkı kadar enerjiye sahip foton yayar. Fakat burada yayılma, rastgele değildir, dışarıdan bir etki vardır. Buradaki yayılma dış uyarılma ile uyumludur. Yani aynı frekanslı, aynı fazlı ve aynı doğrultuludur. Dolayısıyla bir kuvvetlendirme söz konusudur. Bu olay lazerin temelini teşkil eder.

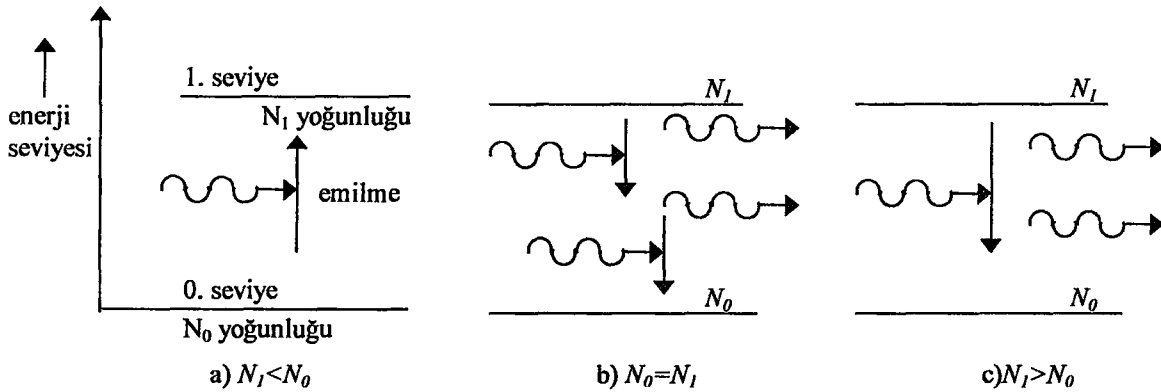
Genel olarak lazerin çalışması geribeslemeli bir osilatörün çalışmasına benzetilebilir. Klasik bir geribesleme osilatörü Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Klasik geribesleme osilatörü.

Osilatörün en önemli bileşeni giriş işaretini kuvvetlendirerek çıkışa veren kuvvetlendiricidir. İşaretin frekansı LC devresi ile belirlenir. Çıkıştan girişe bir geribesleme verilerek işaret kuvvetlendirilir. Lazerde kuvvetlendirme işlemi uyarılmış yayılma ile yapılır.

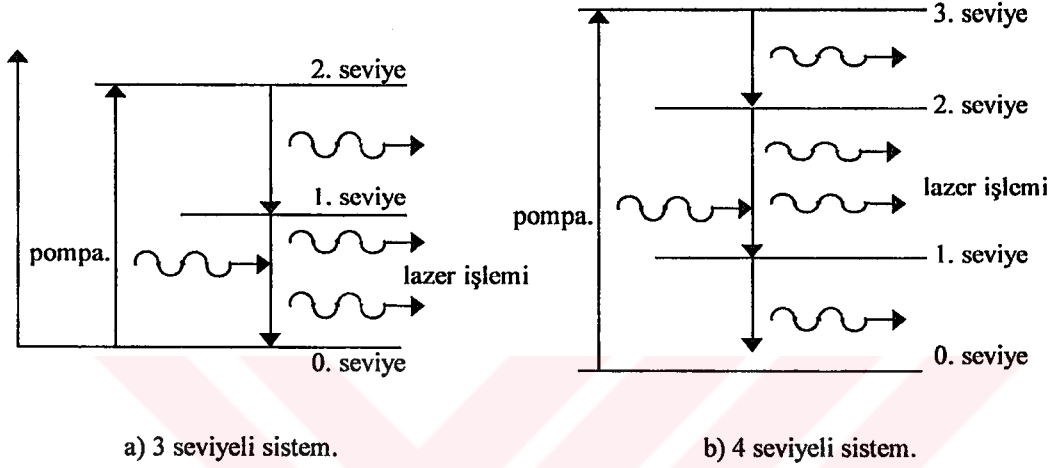
Şekil 2.12’de iki seviye arasındaki geçişler gösterilmiştir. Burada, geçişlerde elektron yoğunluğu etkilidir. 0. seviyedeki elektron yoğunluğu ( $N_0$ ), 1. seviyedeki elektron yoğunluğundan ( $N_1$ ) büyükse  $N_0 > N_1$ , emilme olayı gerçekleşir.  $N_0 < N_1$  (ters popülasyon) olduğunda ise uyarılmış yayılma gerçekleşir ve radyasyon kuvvetlendirilir.  $N_0 = N_1$  (iki seviye doyumda) olduğunda ise emilme ve uyarılmış yayılma olayları birbirini kompanse ederler. İki seviyeli bir sistemde ters popülasyon ve kuvvetlendirme gerçekleşmez. Buna karşılık üç ve daha fazla seviyeli sistemlerde ise bu işlem mümkündür.



Şekil 2.12 İki seviyeli sistemdeki geçişler.



Şekil 2.13'de 3 seviyeli sistem gösterilmiştir. 3 seviyeli sistemde Şekil 2.13a'da, dışarıdan uyarılma ile elektronlar 2. seviyeye çıkarlar. 2. seviyedeki elektronların yaşam süreleri çok küçüktür. Dolayısıyla elektronlar 1. seviyeye geri dönerler. Bu seviyedeki elektronların yaşam süreleri daha uzundur ve elektronlar bu seviyede toplanırlar. Böylece bu seviyede aşırı elektron yoğunluğu olur. Ters polarizasyondan dolayı 1. ve 0. seviyeler arasında lazer işlemi gerçekleşir.

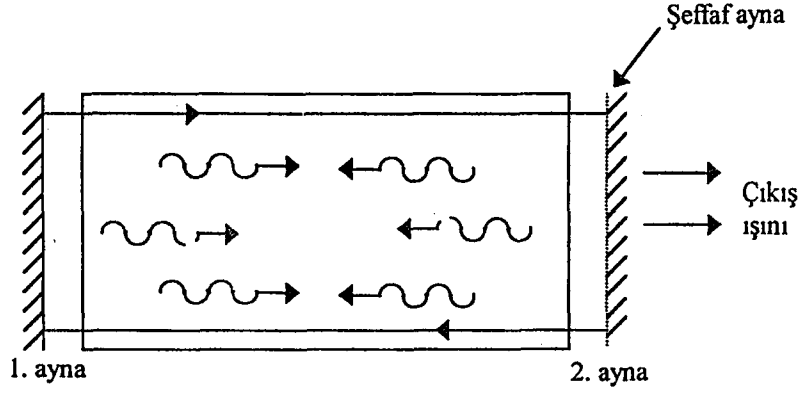


Şekil 2.13 Çok seviyeli sistemdeki geçişler.

Lazer işlemi Şekil 2.13b'de gösterilen 4 seviyeli sistemde de gerçekleştirilebilir. Bu sistemde aşırı yoğunluk işlemi 2. ve 1. seviyeler arasında gerçekleşir. Bu iki seviye arasındaki elektronların yaşam süreleri kısadır. Lazer işleminin sürekli olması için 4 seviyeli sisteme ihtiyaç vardır. Üç seviyeli sistem sadece darbeli modda çalışır.

Klasik osilatörde osilasyon işlemi için güç kaynağına ihtiyaç vardı. Lazerde gerekli enerji üst enerji seviyesine çıkan elektronlardan sağlanır. Bu işlem pompalama olarak adlandırılır.

Klasik osilatör, bir geribeslemeye ve bir de frekans belirleyici devreye ihtiyaç duyar. Lazerde bu iki eleman yerine aynalar kullanılır ( Şekil 2.14 ). Burada aynalar ışını güçlendirir.



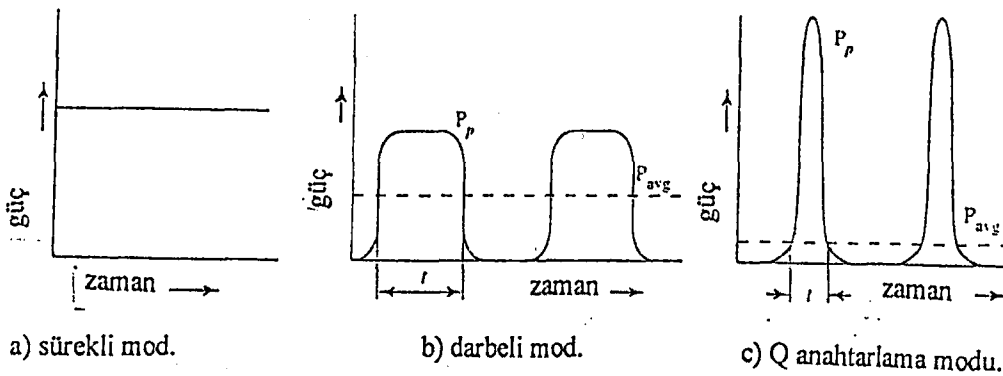
Şekil 2.14 lazerde geribesleme ve frekans belirlenmesi.

Aynalar, ışının tekrar aktif bölgeye dönmesinin sağlamakla birlikte yanında tek dalga boyunda osilasyon yapan bir rezonans elemanı veya dalga klavuzu olarak çalışır. Bu da lazer spektrumunun monokromatik olmasını sağlar ( Uiga 1995 ).

### 2.2.2. Lazer çeşitleri

Günümüzde çok çeşitli lazerler üretilmektedir. Lazerler aktif bölgelerine göre, pompalama modlarına göre, çıkış güçlerine göre ve dalga boylarına göre gruplara ayrılabilirler. Biz burada sadece çalışma prensibi ve karakteristiklerine göre gruplara ayıracağız.

Lazer, Şekil 2.15’de gösterildiği gibi üç modda çalışabilir: sürekli çıkış modu, darbeli mod, anahtar modu.



Şekil 2.15 Lazerlerin çalışma modları.

Sürekli modda sürekli bir çıkış elde edilir. Darbeli modda, lazer darbe ile pompalanır. Pompalama metoduna göre tekrarlama frekansı Hz mertebesinde kHz mertebelerine kadar olabilir.

Q anahtarlama modu, kısa süreli ( ps ( pikosaniye ) veya ns ( nanosaniye ) mertebelerinde ) darbelerde, kW veya MW mertebelerinde güçler elde edilir. Q anahtarlama düşük  $Q^*$  faktörüne sahip rezonans oyukları kullanılarak yapılabilir. Bir optik oyğun Q faktörünü kontrol etmenin birkaç yolu vardır. En basiti geribesleme aynaları kullanmaktır. Ayna yüzeyleri paralel olduğunda oyuk küçük bir aralıkta osilasyon yapar. Oyuk içinde Kerr veya Faraday hücreleri veya akustik optik modülatörler kullanılarak yüksek tekrarlama hızlarına çıkılabilir.

Çizelge 2.1'de çok kullanılan lazerlerin karakteristik özellikleri gösterilmiştir.

Yakut lazerler ve YAG ( İtiryum Aliminyum Garnet ) lazerler en çok kullanılan katı hal lazerleridir. Yakut lazerler, yakut kristalinden (  $Al_2O_3:Cr^{3+}$  ) yapılırlar. Yakut kristali, lazer yapımında kullanılan ilk malzeme olmakla birlikte halen geniş kullanım alanına sahiptir. Yakut lazer üç seviyeli bir lazerdir. Dolayısıyla sadece darbe modunda çalışır. Darbe süresi 10ns ile 10ms arasındadır.

YAG lazerler, en popüler katı hal lazeridir. Aktiv bölgesi  $Y_3Al_5O_{12}$  (İtiryum Aliminyum Garnet, YAG ) kristalinden oluşmuştur. 4 seviyeli bir lazerdir. Normalde 1064nm dalga boyunda ışın yaymakla birlikte 946nm ve 1320nm dalga boylarında da ışın yayabilirler. Lazer, bir lamba ile veya yüksek yoğunluklu Xe veya Kr lamba ile optik olarak pompalanır. 500W güç verir. Sürekli modda, darbeli modda ve Q anahtarlama modunda alışabilir. Katı hal lazerleri genel olarak araştırmalarda ve haberleşmede kullanılırlar ( Hawkes ve Latimer 1995 ).

Çizelge 2.1

aktif bölge	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Cr <sup>+3</sup> Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	He - Ne	Ar, Kr, Ar - Kr	CO <sub>2</sub>	Ar, Kr, Xe	yarıletken
doldurma metodu	lamba	HV deşarj	HV deşarj	HV deşarj	flaş lamba lazer	akım
çalışma modu	yakut:Darbeli YAG:P,CW,Q	Sürekli	Sürekli	Sürekli, Darbeli	Darbeli	Sürekli, Darbeli
dalga boyu (nm)	yakut: 694 YAG:946-1320	633,1150 3390	350 - 800	9600, 11000	190 - 350	670 - 1550
ışın kesitinin çapı (mm)(DIA)	yakut: 1,5 - 25 YAG: 8 - 20	0,5 - 2	0,6 - 2	1 - 50	6 x 32 20 x 32	0,003 - 0,007
ışının açısı (rad)	yakut: 0,2 - 20 YAG: 0,3 - 20	0,5 - 1,7	0,4 - 2	0,5 - 10	2 - 6	0,2 - 0,5 (oval)
çıkış gücü (W)	YAG: 10 <sup>-3</sup> - 500	0,1mW -50mW	0,5 -20	0,1 - 15000	1 - 100	0,01 - 5

Kaynak: Uiga 1995.

Gaz lazerleri geniş kullanım alanına sahiptirler. Çeşitli gaz lazerleri vardır. En popüler olanı He - Ne lazeridir. He - Ne lazeri basit yapıya sahiptir, dolayısıyla ucuzdur. Bu lazer, düşük basınç altında cam tüp içine He - Ne gazlarının karışımının doludurulması ile elde edilir. Pompalama işlemi yüksek gerilimli iki elektrot ile yapılır. Tüpün yan yüzeyleri ayna görevi görür ve geribeslemeyi sağlar. Yayılan ışın 633nm, 1150nm ve 3900nm dalga boylarında olabilir. 633nm'de 50mW ışın yayar. Dalga boyu arttıkça ışının şiddeti düşer. He - Ne lazerler sürekli modda çalışırlar. He - Ne lazerleri ucuzdur, kullanımı kolaydır ve güvenilirliği yüksektir. Bundan dolayı geniş kullanım alanlarına sahiptirler

He ve Ne gazlarının yanında diğer asal gazlar, Ar, Xe ve Kr de gaz lazerlerinde kullanılabilirler. Bu gazlar daha ziyade iyon gaz lazerlerinde kullanılırlar. Bu lazerlerde yüksek enerjili çarpışmalar ile iyonlaşma gerçekleşir. Bu lazerlerde sürekli moddaki çıkış gücü, He - Ne lazerlere göre daha büyüktür. Kullanılan gaza göre yayılan ışının dalga boyu değişir.

argon: 351 - 528nm, çıkış gücü, 2mW - 20W,

kripton: 350 - 800nm, çıkış gücü, 5mW - 6W,

argon - kripton: 450 - 670nm, çıkış gücü, 0,5W - 6W.

Bu lazerler genellikle görünür ışık bölgesinde çok dalgalı bir çıkış verirler. Bundan dolayı çok renkli ışık spotlarında, displaylerde sıkça kullanılırlar.

En güçlü lazer grubu, moleküler gaz lazerleri, CO<sub>2</sub> lazerleridir. Bu lazerlerde aktif bölge düşük basınçta CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve He ile doldurulur. İki elektrot ile gaz devir dayın edilir.

CO<sub>2</sub> lazerleri, kızılötesi bölgesinde 9000nm ile 11000nm dalga boylarında ( tipik olarak 9600nm ve 10600nm dalga boylarında ) ışın yayarlar. CO<sub>2</sub> lazerlerde pompalama işlemi çok etkilidir ve çıkış gücü 3W ile 15kW arasındadır. CO<sub>2</sub> lazeri sürekli modda ve darbeli modda çalışabilir. Bu lazerler, metaller ile çalışmada ( kesme ve kaynak işlemlerinde ), amaliyatlarda, lazer radarda ve diğer birçok uygulamada kullanılırlar.

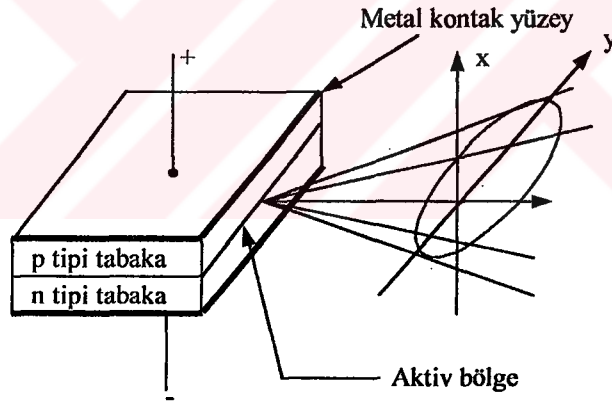
Yukarıda anlatılan lazerlerin ortak özellikleri hepsinin tek dalga boyunda ışın yaymasıdır. Sıvı lazerler geniş spektruma sahip olan lazer grubudur. Bu lazerlerde aktif bölge etil alkol, metil alkol veya su ile doldurulur. Seçilen sıvıya göre yayılan ışının dalga boyu 300nm ile 1000nm arasındadır.

Eximer lazerler, 190nm'den 350nm'ye ( ultraviole bölgesi ) kadar olan dalga boylarında ışın yayarlar. Aktiv bölgeleri, asal gazlar ( Ar, Kr, Xe ) ile halojen atomları, flüorid ve klorür karışımları ile doldurulmuştur. Darbeli modda darbe süresi çok kısadır ( 80ns ) ve tekrarlama hızı, 10kHz'dir. Işın şiddeti 100W'ın üzerindedir. Bu da kısa darbe süresinin bir sonucudur. Bu lazerler, araştırmalarda, fotokimya uygulamalarında ve ilaç sayiinde kullanılırlar (Hawkes ve Latimer 1995. Uiga 1995).

### 2.2.3. Yarıiletken Lazer Diyod

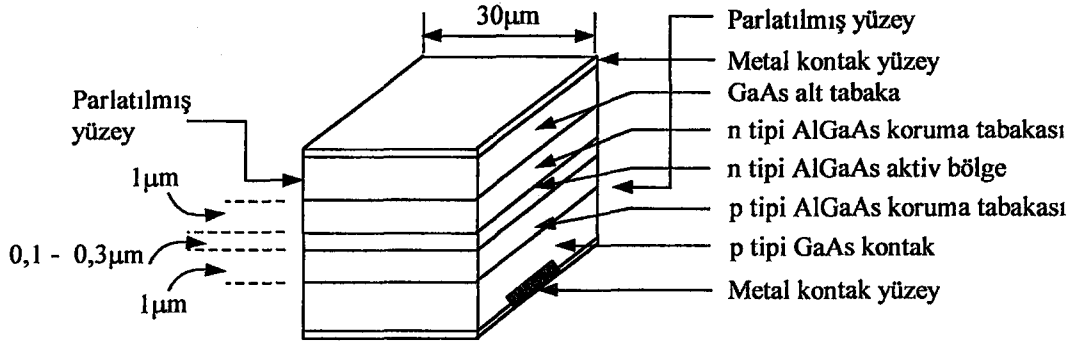
Lazer, temel prensip olarak LED'e benzer. LED'den farklı olarak lazerde, geribesleme ve uyarılmış yayılmayı sağlayan aktif bölge vardır. Ayrıca lazerin spektrum genişliği çok dardır. Lazer ışını monokromatiktir ( tek dalga boyuna sahiptir ).

Lazer işlemini anlamak için kenar yayımlı LED'i incelemeliyiz. Şekil 2.16'da kenar yayımlı LED'in yapısı gösterilmiştir. Kenar yayımlı LED'de aktif bölge iki tabaka arasındadır. Yayılma bu bölgeden olur.



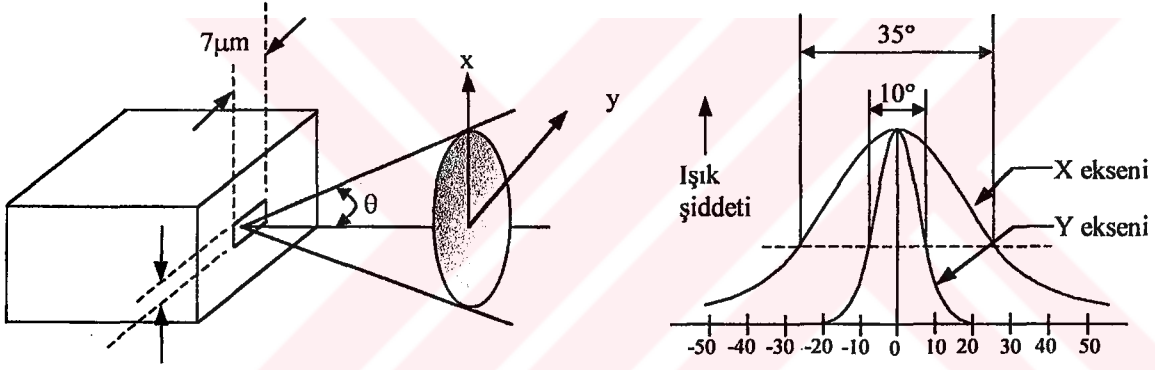
Şekil 2.16 Kenar yayımlı LED'lerde ışının oluşmasını ifade eden diyagram.

Yayımla yüzeyleri parlatılarak ve böylece yayılan ışınların tekrar aktif bölgeye dönmesi sağlanarak bir geribesleme oluşturulabilir. Bununla birlikte böyle bir yapının kalite faktörü düşüktür. Çünkü diyodun n ve p tipi bölgelerindeki emilme oldukça yüksektir. Şekil 2.17'de gösterildiği gibi n ve p tipi bölgelere yeni tabakalar eklenerek emilme azaltılabilir. Yeni eklenen tabakaların kırılma indisi farklıdır. Bu, ışınların tekrar aktif bölgeye dönmesini sağlar.

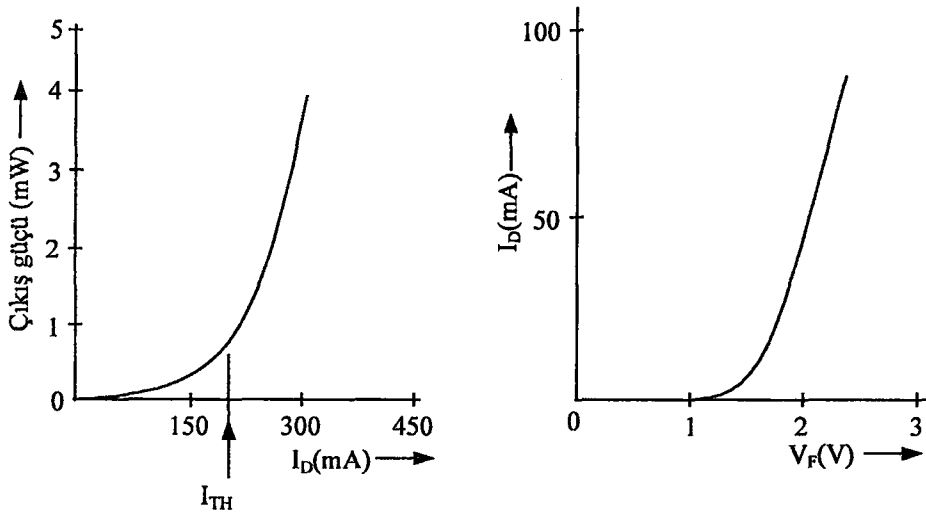


Şekil 2.17 Lazer diyodun yapısı.

Yapı, yayılma yüzeylerinin parlatılması ile tamamlanır. Lazer diyod, kenar yayılma LED'e benzer. Temel fark, yayılma açısının dar olmasıdır. Şekil 2.18'de lazer diyod ışınının yayılması gösterilmiştir.



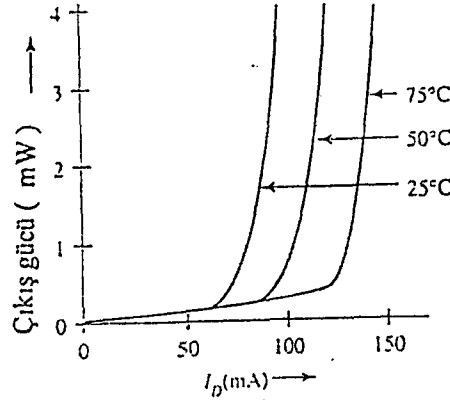
Şekil 2.18 Lazer diyodun ışınının yayılması.



Şekil 2.19 Lazer diyodun akım gerilim karakteristikleri.

Lazer diyod için akım - gerilim ve akım - güç karakteristikleri Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Normal bir diyoddaki gibi lazer diyoda da bir eşik akımı vardır.

Lazer diyodun olumsuz özelliklerinden biri yüksek sıcaklık katsayısına sahip olmasıdır. Eşik akımı, sıcaklık bir °C arttığında %1,5 artar. Bu durum Şekil 2.20'de gösterilmiştir (Uiga 1995 ).



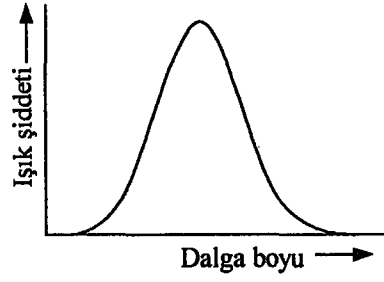
Şekil 2.20 Lazer ışının sıcaklıktan etkilenmesi.

LED'ler ile lazerler arasındaki en büyük fark spektrumları arasındaki farktır. Bir yarıiletken p - n jonksiyonundaki yayılma, elektronların üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçmesinden kaynaklanır. Yayılan ışının dalga boyu bu enerji seviyeleri arasındaki farka eşittir.

$$\lambda = \frac{1240}{\Delta E(eV)} (nm)$$

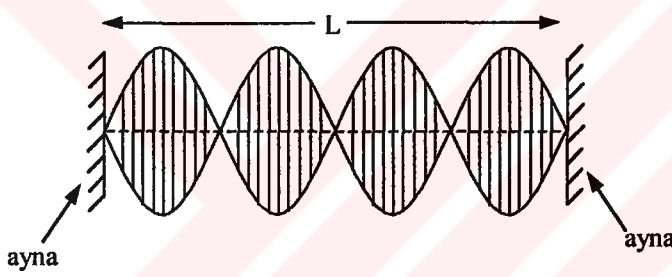
Enerji seviyeleri arasındaki fark sabit olduğuna göre LED'in monokromatik ışığa sahip olması gerekir. Fakat gerçekte Şekil 2.21'de görüldüğü gibi LED spektrumu önemli bir band genişliğine sahiptir. Spektrumun bu şekilde olması Doppler etkisinden kaynaklanmaktadır. Aktiv bölgedeki atomların rastgele hareketleri Doppler etkisini arttırmata ve dolayısıyla enerji gapı tarafından belirlenen merkez frekans etrafında harmoniklerin çıkmasına neden olmaktadır. Bu spektrumdan optik yuva, rezonansa gelebileceği frekansı seçer.





Şekil 2.21 LED'in spektrum karakteristiği.

Optik yuvada kenarlara yerleştirilen aynalardan ışınlar yansır. Aynalardan yansıyan ışınlar ortamdaki ışınlarla girişim yapar. Eğer yansıyan ışın, ortamdaki ışın ile aynı fazda ise yansıyan ışın ortamdaki ışını güçlendirirken zıt fazda ise ışını zayıflatır ( Şekil 2.22 ).



Şekil 2.22 Rezanatör içinde ışının oluşması.

Rezonans frekansında kayıplar minimumdur. Diğer frekanslar zamanla zayıflar. Rezonans frekansında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$L = \frac{m\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L}{m}$$

$\lambda$ ; rezonans frekansındaki dalga boyu ( m ),

$L$ ; optik yuvanın boyu ( m ),

$m$ ; tam sayı.

Şekil 2.21'deki LED spektrumundan görüldüğü gibi spektrum geniştir. Buradan hareketle benzer spektrumun lazer için de geçerli olacağını söyleyebiliriz ( Şekil 2.23 ).

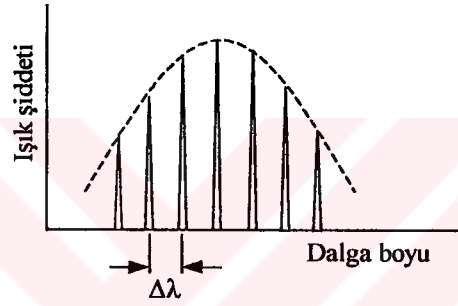
Bu tip lazerler çok modlu lazerler olarak adlandırılır. Genelde lazerlerin spektrumu çok modludur. Düşük akımlarda bütün lazerler bu modda çalışırlar. Akım arttıkça orta modlar güçlenir, yan modlar ise orta moda göre etkisini kaybeder. Yuva içindeki dalga hızı,

$$v = \frac{c}{n}$$

şeklindedir. Burada,

$c$ ; ışık hızı (m/s ),

$n$ ; yuvanın kırılma indisidir.



Şekil 2.23 Lazerin çok modlu spektrumu.

Bu eşitlik kullanılarak, yuva içindeki dalga boyu, rezonans frekansına çevrilebilir.

$$f = \frac{m \cdot c}{2 \cdot n \cdot L}$$

İki komşu frekans arasındaki mesafe,

$$\Delta f = \frac{c}{2 \cdot n \cdot L}$$

olur. Buradan iki komşu spektrum arasındaki dalga boyu,

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 \frac{\Delta f}{c}$$

olur ( Uiga ).

Yukarıda anlatılan lazer çok modlu lazerdir. Tek modlu lazer üretmek de mümkündür. Tek modlu lazerler elde etmek için lazerin ışın yayan bölgesi yan modları bastıran özel filtreler ile kaplanır. Tek modlu lazerler oldukça pahalıdır ve daha çok uzun mesafe fiber optik haberleşmede kullanılırlar.

Lazer diyodlar genel olarak düşük güçlü ışın vericilerdir. Tipik çıkış güçleri yüz mW'lar mertebesindedir.

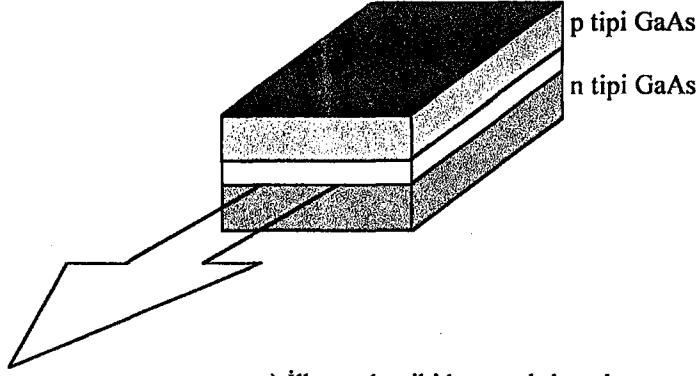
Lazerlerin en çok kullanıldıkları alan fiber optik haberleşmedir. Çünkü lazer diyodun cevap hızı oldukça yüksektir ve lazer diyotların modülasyonu elektriksel olarak gerçekleştirilebilir.

Lazer yapımında kullanılan yarıiletken malzemelerin seçimi çok önemlidir. Birçok yarıiletken malzeme normalde ışık yaymazlar. İlk yapılan ticari lazerler GaAs'den yapılmışlardır. 1980'li yıllarda kırmızı ışık yayan lazerler üretilmiş ve displaylerde ve barkod okuyucularda kullanılmışlardır. Kırmızı ışık yayan bu lazerler İndiyum Galyum Fosfid'den ( InGaP ) yapılmışlardır ( Hecht 1992).

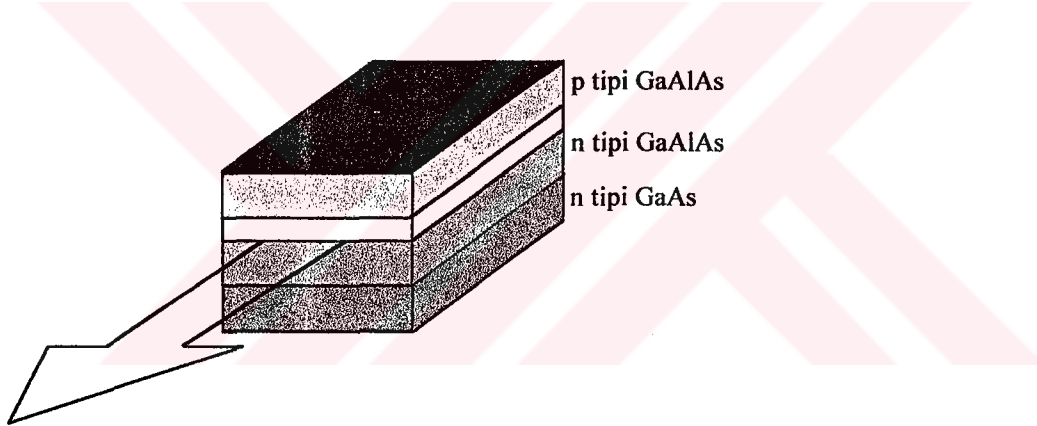
p bölgesinde deliklerin elektronlar ile birleşimi ( rekombinasyonu ) sonucunda bir enerji oluşmaktadır. Silikon ve Germanyum gibi bir çok yarıiletkende bu enerjinin hemen hemen tamamı ısı şeklindedir. Galyum Arsenid ve İndiyum Fosfid gibi karışım yarıiletkenlerde açığa çıkan bu enerjinin bir kısmı ışık şeklindedir. Bu ışık, LED'lerin ve lazerlerin temel ışığıdır.

Farklı katkılanmış iki tabakalı Galyum Arsenidden yapılan ilk lazerlerde açığa çıkan enerjinin büyük kısmı ısı şeklindeydi ve soğotucular kullanmak gerekiyordu. Şekil 2.24a'da ilk yapılan lazerlerin yapısı gösterilmiştir. Bu lazer p ve n tipi Galyum Arsenidden yapılmıştır. Lazerin ışık çıkmayan yüzeyleri tam yansıtma yapacak şekilde, ışık çıkan yüzeyi ise yarı yansıtma yapacak şekilde tasarlanmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda n tipi Galyum Arsenidin içine alimünyum ilave edilmekle yapının daha iyi çalışacağı gösterilmiştir. Yapı bu şekli ile sandvici andırmaktadır. Bu yapı şekil 2.24b'de gösterilmiştir. Aynı prensiple yapıdaki katman sayısı arttırılarak daha ince ışık elde edilebilmiştir. 1980'lerde bu teknoloji ile binlerce saat çalışabilen ucuz ticari lazerler üretilmiştir. Bu yapıdaki tabaka kalınlığı 0,1µm ile 1µm arasındadır. Bu noktadan sonra

araştırmacılar yapı küçültme yollarını araştırdılar. Kuantum mekaniğinin kuralları elektronları ve delikleri belirli enerji seviyelerine kadar izin verir. Tabaka çok çok ince yapılamaz. Yapılırsa elektronların enerjilerine bağlı olarak metariyalin özellikleri değişir ( hecht 1992 ).



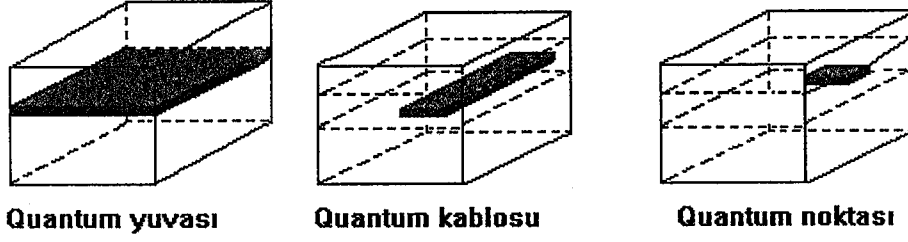
a) İlk yapılan iki katmanlı lazerin yapısı.



b) Üç katmanlı lazerin yapısı.

Şekil 2.24 Çeşitli lazer yapıları.

Lazer yapımında önemli bir olay quantum yuvalarıdır ( Şekil 2.25a ). Quantum yuvaları elektronları ve delikleri daha dar bir alana sıkıştırdığından daha etkili lazer yapılabilir. Quantum yuvalarında ince bir tabakada, sadece tek boyutta elektronlar sıkıştırılır. Bir adım sonrası ise ince bir tabakanın dar bir şerisinde elektronları iki boyutta sıkıştıran quantum kablolarıdır ( Şekil 2.25b ). Bu yapı lazerin performansını artırır. Eşik gerilimini ve ısı şeklinde açığa çıkan kaçak enerjiyi azaltır. Araştırmacılar daha sonra sıkıştırma işlemini üç boyutta gerçekleştirdiler ( uzunluk, genişlik ve yükseklik ). Bunlara quantum noktaları adı verilir (Zory 1993).



Şekil 2.25 Quantum lazerler.

Yapı sıkıştıkça eşik gerilimi akıma göre düşer. Quantum yuva lazerler için eşik akımı 1mA civarındadır. Quantum kablo lazerler için ise eşik akımı  $1\mu A$ , quantum nokta lazerlerde ise 1nA'e kadar düşer. Eşik akımları düşmekle birlikte çıkış güçleri de düşer. Lazer dizisindeki quantum yuva elemanların her biri 2mW çıkış verirken quantum kablo elemanların her biri ise  $\mu W$  mertebesinde çıkış verir.

İlk quantum kablo lazerler 1990 yılında yapıldı. Şu ana kadar yapılan quantum kablo lazerlerde en düşük eşik akımı 0,6mA'dir. Burada ana problem ince tabaka yapmaktır. Son teknoloji kullanılarak birkaç nm kalınlığında tabakalar yapılabilmektedir. Henüz quantum nokta lazerler yapılamamıştır.

$1\mu m$  inceliğindeki tabakalar için atomik boşluk %0,1 civarında olmalıdır. Galyum Arseniddeki galyumların yarısı aliminyum ile değiştirilerek atomik boşluk azaltılabilir. Bu şekilde yapılan ilk lazerler kızılötesi bölgesine yakın  $0,75-0,90\mu m$  dalga boyunda ışık yayarlar. Daha sonra uzun dalga boylarında ışık yayan lazerler yapmak için İndiyum, Galyum, Arsenid ve Fosfid karışımı kullanıldı. Bu şekilde yapılan lazerler, fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanılan kızılötesi bölgesine düşen  $1,3 - 1,55\mu m$  dalga boylarında ışık yayar ( Hecht 1992 ).

Daha sonra araştırmacılar  $0,67\mu m$  dalga boyunda kırmızı ışık yayan indiyum Galyum Fosfid lazerleri geliştirdiler. Bir adım daha atarak galyumların bir miktarını aliminyum ile değiştirerek daha kısa dalga boyunda ışık yayan lazerler yaptılar. Bununla birlikte bu lazerlerin çıkış güçleri düşüktü (özellikle küçük dalga boylarında).

Çok sayıda tranzistörün bir entegrede yerleştirilmesi gibi çok sayıda lazer de bir paket içine yerleştirilebilir. Bu şekilde elde edilen lazer dizileri önemli özelliklere

sahiptirler. Optik haberleşme sisteminin performansının iyileştirilmesinde önemli rol oynarlar. Dizideki her bir lazer ayrı ayrı iletme ve kesime sokulabilir ve her bir lazer farklı dalga boylarında çalıştırılabilir. Lazer dizileri, yüksek hızlarda bilgisayar bordu ile chipler arasındaki haberleşmede, fiber optik kablo ile veya boşluk ile haberleşmeye izin verirler. Ayrıca diziler optik bilgisayarlarda kullanılabilirler. Bir dizideki lazerler saniyede 5 milyar defa iletme sokulabilmektedir. Daha güçlü lazer yapmak için dizideki lazerler aynı dalga boyunda çalıştırılır. Böylece vericinin gücü artırılır ve iletişim mesafesi artırılmış olur.

Çıkış gücünü arttırmak için lazer dizileri geliştirilmiştir. Bellcore laboratuvarında 940nm ve 983nm dalga boylarında ışık yayan 140 adet lazerden oluşmuş bir lazer dizisi üretildi. McDonnell Douglas Electronic System'da oda sıcaklığında 665nm ve 670nm dalga boyunda 475mW çıkış gücü veren lazer yapıldı. Spectra Diyod laboratuvarında ise 680nm'de 1 W çıkış veren lazer yapıldı.

Çizelge 2.2'de çok kullanılan yarıiletken lazerlerin bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.2

Aktiv bölge	dalga boyu (nm)	ışın genişliği (nm)	çıkış gücü (mW)
InGaAlP	670	0,001 - 4	2 -4
GaAlAs	750 - 850	0,001 - 15	5 - 5000
InGaAsP	1300 - 1550	0,1 - 80	0,01 - 100

Kaynak: Uiga 1995.

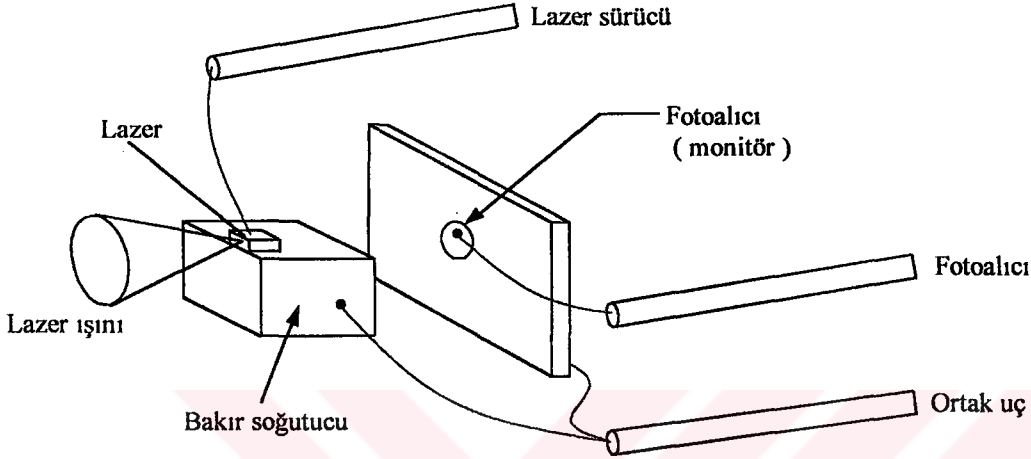
Çizelge 2.3'de de LED'ler, çok modlu lazerler ve tek modlu lazerler karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.3

özellik	LED	çok modlu lazer diyot	tek modlu lazer diyot
band genişliği (nm)	20 - 100	1 - 5	<0,2
Yükselme süresi (ns)	2 - 250	0,1 - 1	0,1 - 1
Modülasyon hızı (GHz)	<0,3	<2	2
Sıcaklık hissediciliği	düşük	yüksek	yüksek
Çalışma ömrü (saat)	100000	10000 - 100000	10000 - 100000
fiyat	düşük	yüksek	çok yüksek

Kaynak: Uiga 1995.

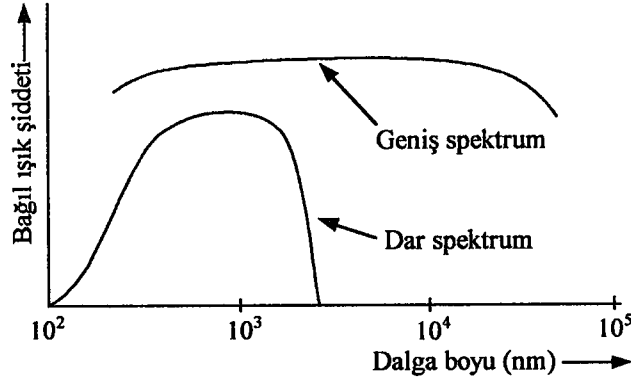
Normal lazer yapılarında lazer chipi simetrikdir ve her iki kenardan da ışın yayar. Bazı lazer yapılarında arka kenardan yayılan ışınlar bir fotoalıcı üzerine düşürülür. Böylece lazerin çıkışı ile orantılı olan bir referans işaret elde edilir. Bu yöntem lazer ışını kararlı duruma getirmede kullanılabilir. Şekil 2.26'da çıkışa monitör yerleştirilmiş lazerin yapısı gösterilmiştir ( Hawkes ve Latimer 1995).



Şekil 2.26 Çıkışına mönitör yerleştirilmiş lazerin yapısı.

### 2.3. Fotoalcıların Gruplanması ve Karakteristikleri

Fotoalcılar geniş spektrumlu ve dar spektrumlu olmak üzere iki gruba ayrılabilirler ( Şekil 2.27 ).



Şekil 2.27 Geniş ve dar spektrumlu fotoalcıların spektrumları.

#### 2.3.1. Fotoalcıların karakteristikleri

Fotoalcıların karakteristiklerini tanımlamak için çok sayıda parametreye ihtiyaç vardır.

**Duyarlılık ( RE ):** Fotoalcı bir ışına maruz kaldığında çıkışında bir gerilim veya akım elde edilir. Giriş ile çıkış arasındaki oran duyarlılık ( RE ) olarak tanımlanır.

$$RE = \frac{V_0}{\phi_1} \quad \text{veya} \quad RE = \frac{I_0}{\phi_1}$$

$RE$ ; duyarlılık (  $V/W$ ,  $V/lm$ ,  $A/W$  veya  $A/lm$  ),

$V_0$ ; fotoalcı çıkışında elde edilen voltaj (  $V$  ),

$I_0$ ; fotoalcı çıkışında elde edilen akım (  $A$  ),

$\phi_1$ ; uygulanan ışının miktarı.

**Fotoalcının algılayabileceği minimum ışık şiddeti ( NEP ):** Her fotoalcının algılayabileceği bir minimum ışık şiddeti vardır ve aşağıdaki gibi tanımlanır.



$$NEP = \frac{I_N}{RE}$$

Burada,

$RE$ ; duyarlılık (  $A/W$  ),

$I_N$ ; fotoalıcının gürültü akımı (  $A$  ).

$NEP$ , fotoalıcı seçiminde önemli bir parametredir. Formüldeki  $I_N$  ve  $RE$  dış şartlara bağlıdır. Gürültü, band genişliğinin artması ile artar.  $RE$  fotoalıcı bölgesinin artması ile azalır.

$NEP$ 'in tersi, algılayabilme olarak tanımlanır.

$$D = \frac{1}{NEP} = \frac{RE}{I_N}$$

$NEP$  gibi  $D$  de gürültü band genişliğine ve fotoalıcı alanına bağlıdır. Bu parametreleri ortadan kaldırmak için normalize edilmiş  $D$  kullanılır ve  $D^*$  ile gösterilir.  $D^*$ ,  $1\text{cm}^2$  fotoalıcı alanı ve  $1\text{kHz}$ 'lik gürültü band genişliği için normalize edilmiş algılayabilmedir.

$$D^* = D\sqrt{A_D\Delta f} = \frac{\sqrt{A_D\Delta f}}{NEP}$$

Burada,

$A_D$ ; fotoalıcı alanı (  $\text{cm}^2$  ),

$\Delta f$ ; gürültü band genişliği (  $\text{Hz}$  ).

**Quantum etkinliği:** Quantum etkinliği, üretici firma için bir fotoalıcının en önemli etkinlik faktörü olmakla birlikte kullanıcı için o kadar önemli değildir. Quantum etkinliği, serbest kalan elektronların quanta olayı sayısına oranıdır. İdeal fotoalıcıda quanta başına bir elektron serbest kalır. Yani quanta etkinliği 1'dir. Quanta etkinliği aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\eta_\lambda = \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot RE_\eta}{\lambda}$$

Burada,

$\eta_\lambda$ ;  $\lambda$  dalga boyundaki quanta etkinliği,

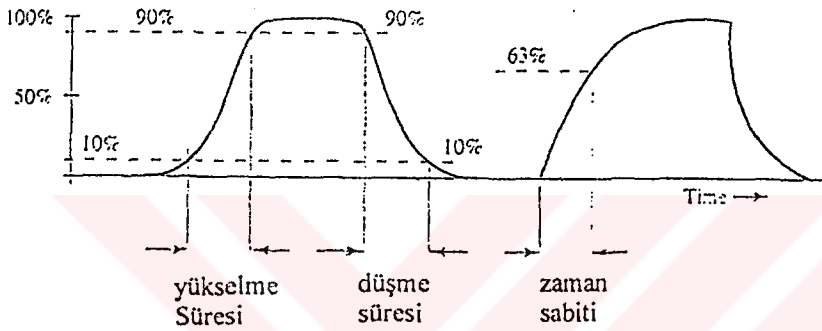
$RE_\eta$ ;  $\lambda$  dalga boyundaki duyarlılık ( A/W ),

$\lambda$ ; ışının dalga boyu ( nm ).

**Cevap hızı:** Haberleşmede kullanılan fotoalıcılara için önemli bir parametredir. İki şekilde ifade edilebilir: i) zaman sabiti, ii) yükselme ve düşme süresi.

Zaman sabiti işaretin maksimum değerinin %63'ne karşılık geldiği değerdir.

Yükselme ve düşme süreleri ise işaretin %90 ile %10 ve %10 ile %90 arasındaki zamandır. Şekil 2.28'de zaman sabitinin, yükselme süresinin ve düşme süresinin belirlenmesi gösterilmiştir ( Uiga 1995 ).



Şekil 2.28 Zaman sabiti, yükselme ve düşme sürelerinin belirlenmesi.

### 2.3.2. Fotoalıcının gürültüsü

Taşıyıcıların akması tam anlamıyla kararlı değildir ve sürekli küçük salınımlar yaparlar. Bu rastgele hareketler yapı içinde gürültü oluşturur.

Gürültü fotoalıcı tasarımında en önemli faktördür. Düşük seviyeli sinyaller ile ve gürültünün ortaya çıkması imkansız hale getirilerek gürültü maskelenebilir. Haberleşme sistemlerinde gürültü, ortamdaki ışık kaynaklarından, fotoalıcıdan ve sistemdeki elektronik devrelerden kaynaklanır.

**Johnson, Nyquist veya ısı gürültü:** Bu tip gürültü, çeşidine bakmaksızın bütün dirençlerde oluşur. Gürültü voltajı veya gerilimi, direnç değerine, sıcaklığa ve sistemin band genişliğine bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_{Jrms} = \sqrt{4kRT\Delta f}$$

$$I_{Jrms} = \sqrt{4kT\Delta f/R}$$

Burada,

$V_{Jrms}$ ; R direncindeki RMS gürültü voltajı (  $V_{rms}$  ),

$I_{Jrms}$ ; R direncindeki RMS gürültü akımı (  $A_{rms}$  ),

R; yük direnci (  $\Omega$  ),

k; Boltzman sabiti,  $k=1,38.10^{-23}$  (  $J/K$  ),

T; sıcaklık (  $K$  ),

$\Delta f$ ; sistemin band genişliğidir.

**Shot gürültü:** Yapıdaki serbest elektronlar tarafından oluşturulur. Fotoalıcının ortalama akımına ve sistemin band genişliğine bağlıdır. Aşağıdaki formül ile belirlenebilir.

$$I_{Srms} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_{ort} \cdot \Delta f}$$

**Oluşma - yok olma gürültüsü:** Fotodirençlerde rekombinasyon oranının değişmesinden kaynaklanır. Aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$I_{GRrms} = 2 \cdot e \cdot G \sqrt{\eta \cdot E \cdot A \cdot \Delta f}$$

G; fotoiletkenin kazancı ( aktif elektronlarının sayısının, oluşturulan fotoelektronların sayısına oranıdır ),

$\eta$ ; quantum etkinliği,

E; fotoalıcıya düşen ışık şiddeti (  $W/cm^2$  ),

A; fotoalıcı alanı (  $cm^2$  ).

Bu gürültü tipi, kızılötesi bölgesinde çalışan fotodirençler için oldukça önemli bir gürültüdür.

**Flicker veya 1/f gürültüsü:** Bütün yarıiletkenlerde bu gürültü çeşidi vardır. Bu gürültüyü ifade eden tam bir eşitlik yoktur. Fakat yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$I_{Frms} = k \sqrt{I_{dc}^a \frac{\Delta f}{f^b}}$$

Burada,

$I_{frms}$ ; Flicker gürültü akımı ( $A_{rms}$ ),

$I_{dc}$ ; iletkendeki dc akım ( $A$ ),

$\Delta f$ ; sistemin band genişliği ( Hz ),

$f$ ; çalışma frekansı ( Hz ).

$k, a, b$ ; sabit katsayılardır.

$a$  2 civarında ise  $b$  yaklaşık 1'dir.  $k$  yarıiletken malzemenin yapısına bağlıdır. Bu eşitlik bu gürültüyü tam ifade eden bir eşitlik olmamasına rağmen gürültünün önemli bir özelliğini ortaya çıkarır. Gürültü akımı, frekans ile ters orantılıdır. Bu gürültü özellikle 100Hz'in üzerinde etkilidir ve başlangıç akımına ( eşik akımı ) ihtiyaç duyan tüm yarıiletkenlerde vardır ( Uiga 1995 ).

Başka gürültü kaynakları da vardır. Örnek olarak titreşimden kaynaklanan mikrofonik gürültü, fotoalıcıdan sonraki kuvvetlendiricinin gürültüsü verilebilir.

Toplam gürültü, tüm gürültü bileşenlerinin *RMS* olarak toplamına eşittir.

$$I_{Neq} = \sqrt{I_{Jrms}^2 + I_{Srms}^2 + I_{GRrms}^2 + I_{Frms}^2}$$

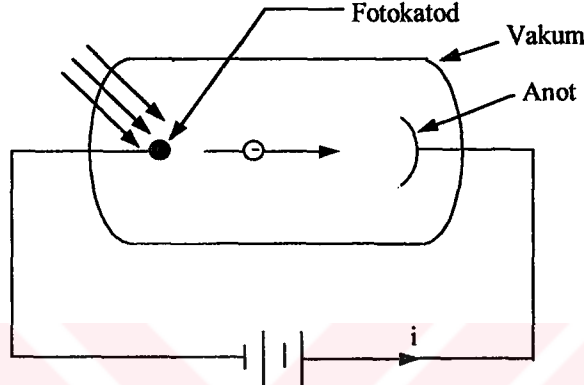
### 2.3.3. Dış etkili optoelektronik dedektörler

Fotoelektrik dedektörler üzerlerine foton düştüğünde serbest elektron sayısı artan elemanlardır. Fotoelektrik dedektörler iki gruba ayrılır: iç etkili ve dış etkili dedektörler.

Dış etkili fotodedektörlerde elektronlar katoddan çıkarlar ve daha pozitif olan anotta toplanırlar. Vakum fotodiyotları, ışık çoğullayıcı tüpler ve mikrokanal çoğullayıcılar tipik örnekleridir.

İç etkili fotodedektörler, yarıiletkenlerden yapılırlar. Fotonlar, serbest elektronların sayısını arttırlar. Fotodirençler, fotodiyotlar, fototranzistörler, fotoFET'ler, fototriyaklar ve fotoSCR'ler tipik örnekleridir.

**2.3.3.1. Vakum fotodiyotları:** Vakum fotodiyotları en eski elektronik dedektörlerdir. Şekil 2.29'da gösterildiği gibi vakum içinde bir anot ve bir katotdan oluşur.



Şekil 2.29 Vakum fotodiyodunun yapısı.

Vakum fotodiyotlarının çalışması oldukça basittir. Katot üzerine ışık düştüğünde elektronlar serbest kalırlar. Serbest kalan bu elektronlar daha pozitif olan anoda doğru ilerlerler. Serbest kalan elektronların sayısı fotodiyoda düşen ışık şiddeti ile orantılıdır. Böylece diyotdan akan akım ışık ile orantılı olarak artar. Diyodun spektral cevabı katot metaline bağlıdır.

Vakum fotodiyotları gazla doldurulabilir. Gaz olarak genellikle argon kullanılır. Bu durumda akım yaklaşık 10 kat artar.

Vakum fotodiyotları yaklaşık 100V'luk anot gerilimine ihtiyaç duyarlar. Bu da elektronik devreler için uygun değildir.

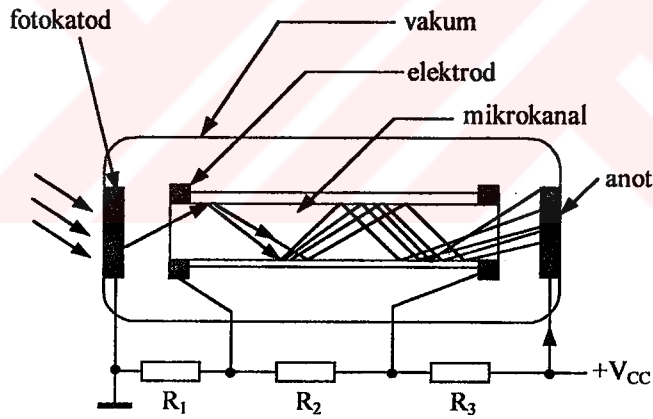
**2.3.3.2. Fotoçoğullayıcı ve mikrokanal:** Fotoçoğullayıcı, kuvvetlendirici içeren vakum fotodiyodudur. Kuvvetlendirici dynode adı verilen çok sayıda anotdan oluşur. Katotdan yayılan elektronlar birinci dynoda doğru  $eV_A$  enerjisi ile hızlandırılır. Bir sonraki dynoda çarpan elektronlar burada yeni serbest elektronlar oluştururlar ve bu şekilde işlem devam eder.

Elektronların çoğullanması ( elektron kazancı, A ) dynodelar arasındaki potansiyel farkına ve dynodun yapıldığı malzemeye bağlıdır. Fotoçoğullayıcının toplam kazancı G, ise herbir dynoddaki kazanca ve dynod sayısına bağlıdır.

$$G = A^n$$

Fotoçoğullayıcı, kazanca sahip olduğundan hissediciliği çok yüksektir. Yükselme süresi yaklaşık 2ns'dir. Katotdan anoda geçiş süresi 30ns'dir.

**2.3.3.3. Mikrokanal:** Mikrokanal, fotoçoğullayıcıya benzer. Kuvvetlendirme işlemi tüp tarafından yapılır. Şekil 2.30'da yapısı gösterilmiştir. Tüpün iç kısmı kurşun, alkali metal, silikon oksit karışımı ile kaplanır. Bu kaplama, elektronun duvara her çarpışında kazancın iki olmasını sağlar. Yapıda elektronları hızlandıran, kV'lar mertebesinde gerilimi olan anot ve katod elektrotları vardır. Tüpün sonunda elektronlar anot tarafından veya fosfor ekran tarafından toplanır.



Şekil 2.30 Mikrokanal.

Tüpün boyu birkaç  $\text{cm}^2$  ve yarıçapı 10mm'dir. Kanal,  $10^8$ 'lik bir kazanca sahip olabilir. Fotoçoğullayıcı kadar iyi bir performansa sahip değildir. Fakat daha basit yapıya sahiptir ve manyetik ortamlarda çalışabilir.

### 2.3.4. İç Etkili Fotoelektrik Dedektörler

İç etkili fotoelektrik dedektörler yarıiletken elemanlardır. Ucuz, kullanımı kolay, küçük yapılı ve çok yönlü olduklarından optoelektronikte çok geniş kullanılırlar. İç etkili dedektörler, fotodirençler ve jonksiyonlu elemanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Fotodirençler, ışık etkisi ile direnci değişen elemanlardır. Jonksiyonlu elemanlar ise bir veya birkaç p - n jonksiyonundan oluşurlar ve elemanın kontrolü ışık tarafından yapılır.

#### 2.3.4.1. Fotodirençler

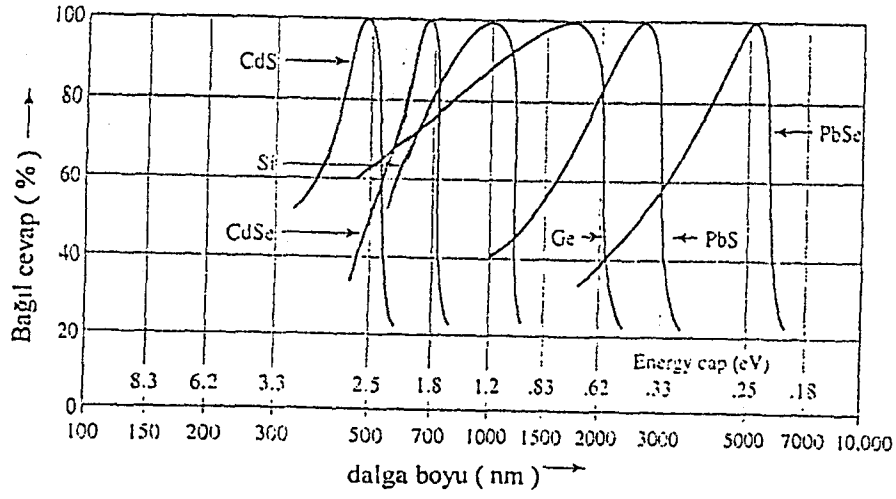
Fotodirençlerde, fotodirenç üzerine ışık düştüğünde serbest elektron sayısı artar. Dolayısıyla yarıiletkenin iletkenliği de artar. Fotodirençlerin quantum mekanizması fotodiyodun quantum mekanizması ile aynıdır. Emilen fotonun enerjisi elektronu enerji duvarından atlatıp iletkenlik bandına geçirecek seviyede ise elektron serbest kalır ve yük taşır. Valans bandından bir elektronun ayrılması ile delik oluşur ve o da yük taşır. Yapıya bir elektrik alan uygulandığında serbest kalan bu elektron ve delik farklı yönde hareket eder.

Fotodirençin spektral cevabı, fotodirençin yapısında kullanılan yarıiletkenin enerji gapına bağlıdır. Fotonun enerjisi radyasyon frekansı ile doğru orantılı ( dalga boyu ile ters orantılı ) olduğundan bir yarıiletken için emilmenin maksimum olduğu dalga boyu enerji gapından hesaplanabilir.

$$\lambda_{\max} (nm) = \frac{1240}{\Delta E (eV)}$$

En önemli fotodirençler, germanyum ve silikon ile katkılanmış yarıiletkenlerden yapılırlar. Bu katkılanmış yarıiletkenlerin enerji gapları 0,04eV'dan düşük ve maksimum dalga boyları da 30μ'den küçüktür. Düşük enerji gapından dolayı ısı akım etkilidir.

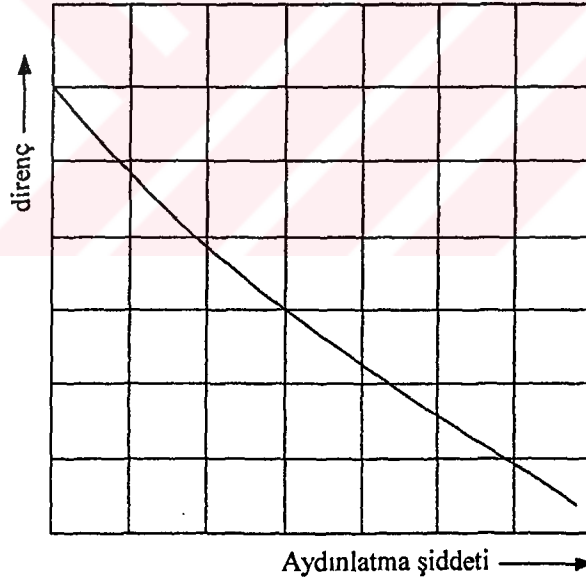
Şekil 2.31'de çeşitli maddelerden yapılmış fotodirençlerin spektrum karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.31 Bazı fotodirençlerin spektrum karakteristikleri.

Fotodirençlerin algıyabilirliği ( $D^*$ )  $10^8$  ile  $10^9$  arasındadır. Katılanmış fotodirençlerde ise  $10^{11}$  dir.

Işık şiddeti artıkça fotodirençlerin iletkenliği artar, direnci düşer. Şekil 2.32'de fotodirençin direnç - ışık şiddeti karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 2.32 Fotodirençin direnç - ışık şiddeti karakteristiği.

Direnç ile ışık şiddeti arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.



$$E_a = E_b \left( \frac{R_a}{R_b} \right)^{-1, \alpha}$$

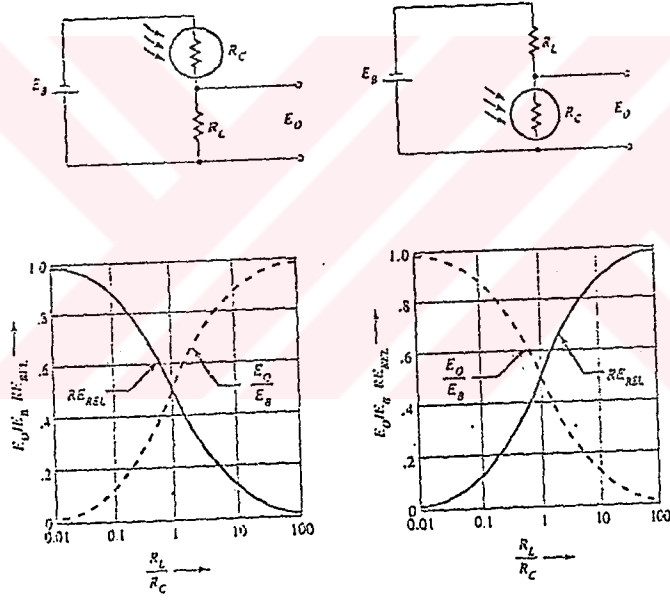
Burada,

$R_a$ ;  $E_a$  ışık şiddetindeki direnç (  $\Omega$  ),

$R_b$ ;  $E_b$  ışık şiddetindeki direnç (  $\Omega$  ),

$\alpha$ ; direnç - ışık şiddeti eğrisinin eğimidir.

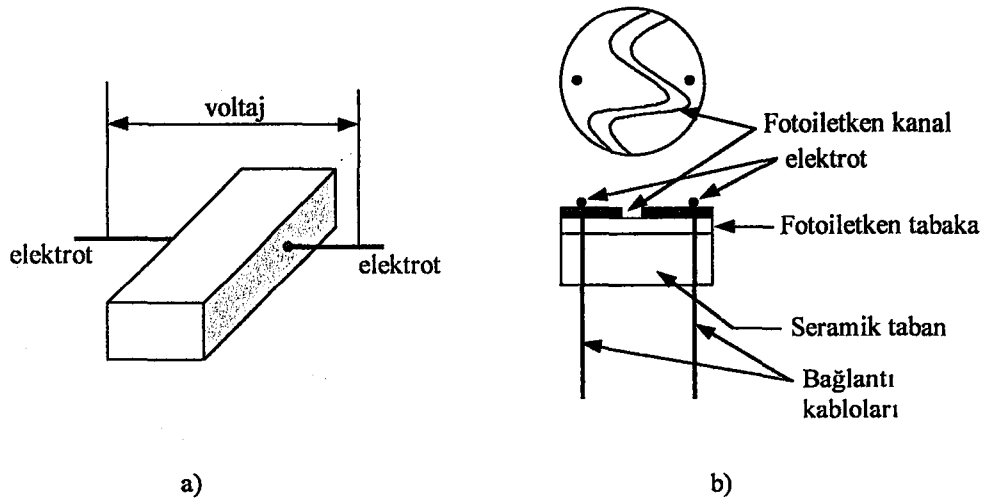
Fotodirencin direnç değeri ve cevap yeteneği, fotodirencin yapımında kullanılan malzemeye ve yapım teknolojisine bağlıdır. Şekil 2.33a'da ve b'de gösterildiği gibi fotodirenç bir güç kaynağına ve bir yük direncine ihtiyaç duyar.



Şekil 2.33 Fotodirencin bağlantı şekilleri.

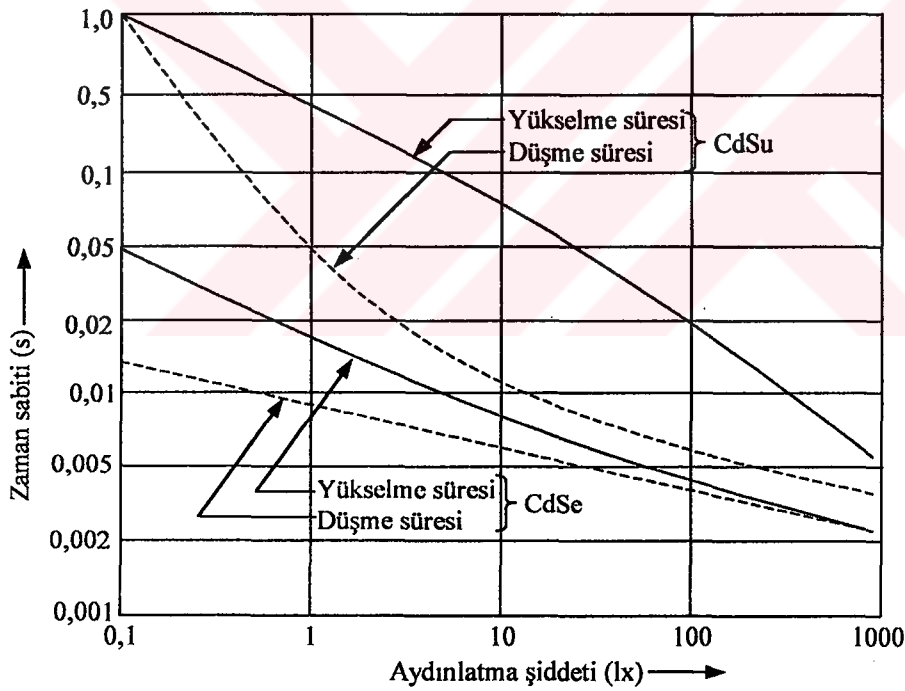
Şekil 2.33a ve b'deki devrelerde fotodirencin direnç değişimi  $R_L$  yük direncine göre çok küçüktür. Şekil 2.33c ve d'de bu durum gösterilmiştir. Yük direncinin artması ile devrenin çıkış voltajı artar, fakat fotodirencin cevap yeteneği azalır.

Şekil 2.34a'da fotodirencin geometrisi, b'de ise yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.34 Fotodirencin geometrisi ve yapısı.

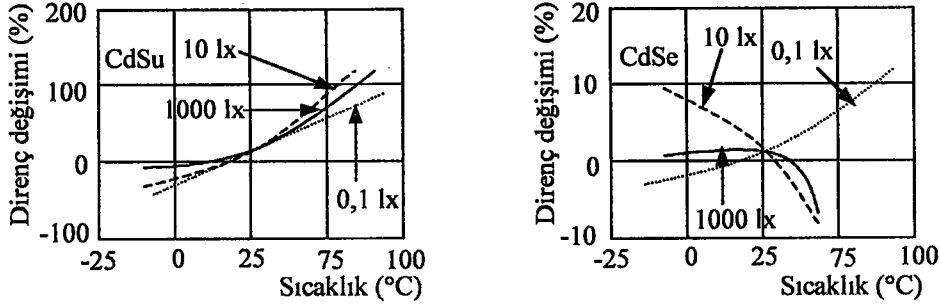
Yükselme ve düşme süreleri, yarıiletken malzemeye bağlı olmakla birlikte ışık şiddetine oldukça bağlıdır. Bu durum Şekil 2.35’de gösterilmiştir ( Uiga 1995 ).



Şekil 2.35 Fotodirencin yükselme ve düşme süreleri.

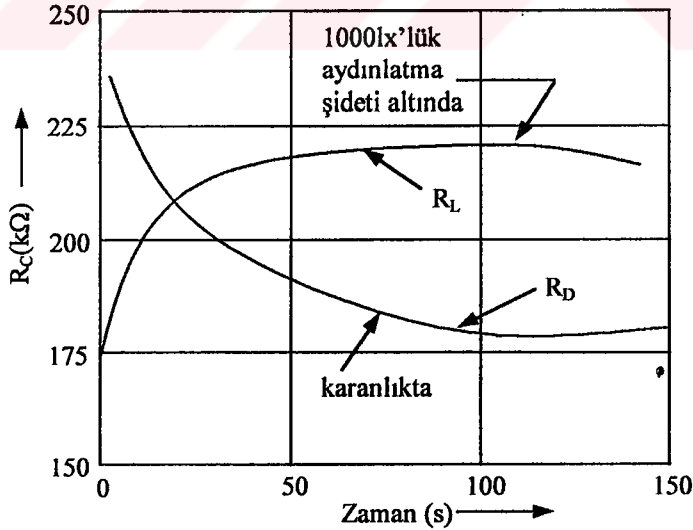
Bu şekilden de görüldüğü gibi yükselme ve düşme süreleri oldukça uzundur. Dolayısıyla fotodirençler yüksek hızlı haberleşme sistemleri için uygun değildir.

Şekil 2.36'da gösterildiği gibi fotodirençlerin sıcaklık katsayıları kararlı değildir ve oldukça yüksektir. Sıcaklık karakteristiği üzerinde fotodirençin yapıldığı yarıiletken malzeme, üretim teknolojisi ve ışık seviyesi oldukça etkilidir. Dolayısıyla fotodirençler için sıcaklık katsayısı belirlemek oldukça zordur.



Şekil 2.36 Fotodirençin sıcaklık karakteristiği.

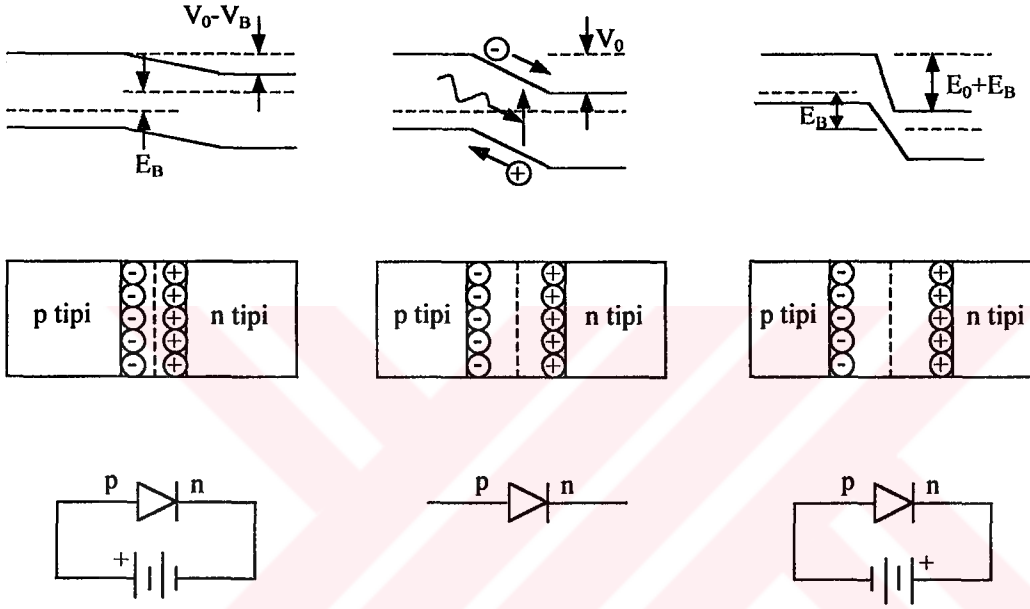
Fotodirençlerde hafıza etkisi adı verilen bir etki söz konusudur. Bu etki diğer fotoalıcılarda yoktur. Verilen bir ışık şiddeti için fotodirenç bir önceki duruma bağlı olarak birkaç direnç değeri alabilir. Bu durum Şekil 2.37'de gösterilmiştir. Eğriden de görüldüğü gibi direnç değerinin kararlı hale gelmesi uzun bir zaman almaktadır.



Şekil 2.37 Fotodirençlerdeki hafıza etkisi.

### 2.3.4.2. Jonksiyonlu Fotodiyot

Jonksiyonlu fotodiyotlar LED'ler gibi p ve n jonksiyonlarından oluşurlar. Fotodiyotdaki jonksiyonun fonksiyonu, LED jonksiyonunun fonksiyonunun tam tersidir. LED'de, LED'den akan akım fotonları oluşturur. Fotodiyotda ise fotonun emilmesi ile serbest taşıyıcılar oluşur ve bunun sonucu olarak da bir akım akar. Fotodiyodun çalışma ilkesi Şekil 2.38'de gösterilmiştir.



Şekil 2.38 p - n jonksiyonundaki enerji seviyeleri ve fakirleşmiş bölge.

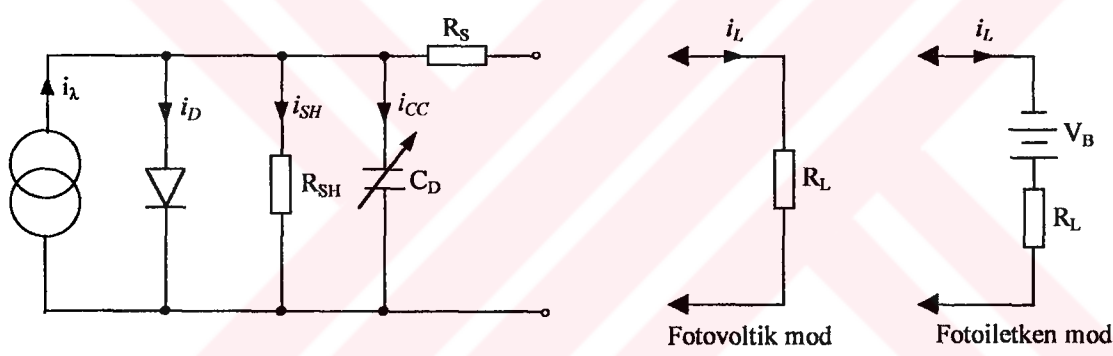
Bir n tipi yarıiletkeninde serbest taşıyıcılar elektronlardır. Elektron sayısı fazla olduğundan ortalama enerji seviyesi p tipi yarıiletkenden daha fazladır. p ve n jonksiyonları birleştirdiğinde her iki jonksiyondaki enerji seviyeleri eşitlenmeye çalışılır. Şekil 1.38'de enerji seviyeleri arasındaki fark  $V_0$  ile gösterilmiştir.

p - n jonksiyonunda n tipi bölgede elektronlar, p tipi bölgede ise delikler fazladır. Elektronlar ve delikler hareketli olduğundan jonksiyonun birleşme yüzeyinde birbirlerine doğru hareket ederek birleşirler ve birbirlerini nötrlerler. Böylece iki jonksiyonun birleşme bölgesinde taşıyıcılar epeyce zayıflar ve bu bölge taşıyıcılar bakımından fakirleşmiş bölge olarak adlandırılır. Fakirleşmiş bölgede zıt polariteli iyonlaşmış atomlar kalır. Bu iyonlaşmış atomlar, serbest taşıyıcıların bir bölgeden diğer bir bölgeye geçişini

engellerler, bir “bariyer voltajı ( $V_0$ )” oluştururlar. Bariyer voltajı yarıiletken malzemeye bağlıdır. Silikon için bariyer voltajı  $V_0=0,7V$ 'tur. Böylece jonksiyon bir kapasite gibi davranır ( Wood 1994 ).

Şekil 2.38a'da gösterildiği gibi jonksiyona doğru polariteli bir gerilim uygulandığında taşıyıcılar bakımından zayıflamış olan bölge azalır ve jonksiyonun kapasitesi artar. Uygulanan gerilim, bariyer voltajı değerine ulaştığında taşıyıcılar bakımından zayıflamış olan bölge ortadan kalkar ve jonksiyon iletme geçer.

Jonksiyona ters polariteli bir gerilim uygulandığında taşıyıcılar bakımından zayıflamış olan bölge genişler ve jonksiyonun kapasitesi azalır. Jonksiyon yine yalıtkan konumunda kalır. Bununla birlikte ters polariteli gerilimde de yine bir miktar akım akar. bu akım, ortam ısısının ya da diğer ışık kaynaklarının oluşturduğu serbest taşıyıcıların akımıdır. Fotodiyodun çalışmasını tam anlamak için Şekil 2.39'daki eşdeğer devreyi incelemeliyiz.



Şekil 2.39 Fotodiyodun eşdeğer devresi.

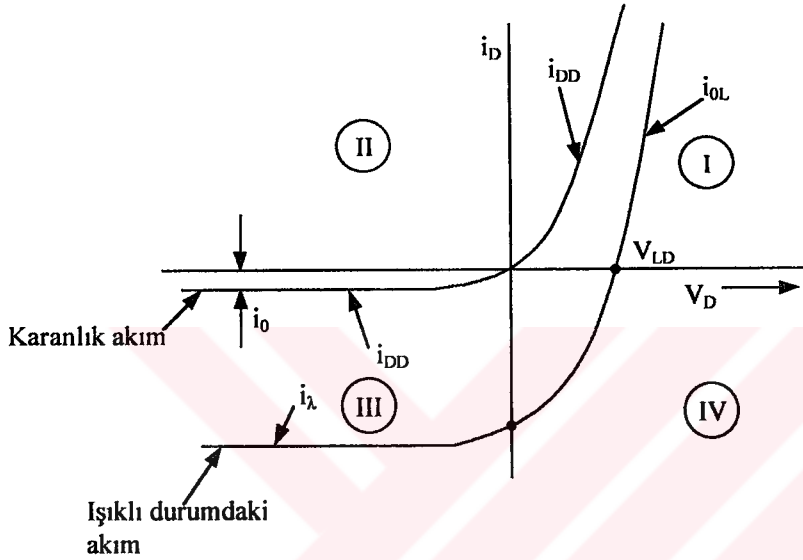
Eşdeğer devre, ideal bir akım kaynağından ( $i_\lambda$ ), paralel bağlı bir direncden ( $R_{SH}$ ), bir kapasiteden ( $C_D$ ) ve bunlara seri bir dirençten ( $R_S$ ) oluşur. Buradaki  $R_{SH}$  direnci taşıyıcılar bakımından zayıflamış olan bölgenin direncidir.  $C_D$  kapasitesi de jonksiyon kapasitesidir.  $R_S$  direnci ise p ve n tipi bölgelerin dirençlerinin toplamıdır. Fotoalıcı üzerine düşen radyasyonun oluşturduğu akım  $i_\lambda$  ile gösterilmiştir. Silikon diyot için bu parametrelerin tipik değerleri aşağıdaki gibidir:

$R_{SH}$ ; sıcaklığa bağlı olarak  $10^7$  ile  $10^{12} \Omega$  arasındadır.

$C_D$ ; ters polariteli gerilime bağlı olarak  $10\mu F$ 'lar mertebesindedir.

$R_S$ ; birkaç  $\Omega$ 'dur.

Karanlık ve ışıklı durum için fotodiyot karakteristikleri Şekil 2.40'da gösterilmiştir. Karakteristik dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede fotodiyoda doğru polaritede gerilim uygulanmıştır. Bu bölge fotodiyot uygulamaları için uygun değildir. İkinci bölgede fotodiyodun cevabı yoktur. Üçüncü bölge, ters polariteli gerilimin uygulandığı bölgedir. Işın dedekte etmek için uygun olan bölgedir. Dördüncü bölge fotovoltik bölgedir.



Şekil 2.40 Fotodiyot karakteristikleri.

Eşdeğer devreye Kirchof Akım Teoremi uygulanırsa,

$$i_\lambda = i_D + i_{SH} + i_L$$

yazılabilir. Burada,

$i_\lambda$ ;  $\lambda$  dalga boyundaki ışının oluşturduğu akım,

$i_D$ ; ideal diyotdan akan akım,

$i_{SH}$ ;  $R_{SH}$  şönt direncinden akan akım,

$i_L$ ; yükten akan akım,

dır. Karanlık durumda fotodiyotdan akan akım,

$$i_{DD} = i_0 \cdot e^{\frac{V_D}{k.T}} - 1$$

şeklindedir. Burada,

$i_{DD}$ ; karanlık durumda fotodiyotdan akan akım,

$i_0$ ; diyodun karanlık akımı,

$V_D$ ; diyot voltajı,

$e=1,6.10^{-19}$  C,

$k=1,38.10^{-23}$  j/K

$T$ ;sıcaklık (K)

dir.

Karanlık akım yarıiletken malzemeye, jonksiyonun geometrisine ve sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklıktaki 25°C'lik bir artış karanlık akımda 10 katlık bir artışa neden olur. Karanlık akım diyodun hissediciliğini sınırlar. 25°C için karanlık akım fotodiyot kataloglarında verilir.

Fotodiyota  $\lambda$  dalga boylu ışık düştüğünde  $I_\lambda$  akımı oluşur.

$$i_\lambda = \frac{\eta \cdot I \cdot A \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c} = 8,04 \cdot 10^5 \cdot \eta \cdot I \cdot A \cdot \lambda$$

Burada,

$\eta$ ; kuantum etkinliği (elektronlar/protonlar),

$I$ ;aydınlatma şiddeti (W/cm<sup>2</sup>),

$A$ ; diyot yüzeyi (cm<sup>2</sup>),

dir.

Fotoakım aydınlatma şiddetinin lineer bir fonksiyonudur. Bu özellik fotodiyodu ters polariteli gerilim uygulandığında veya fotoiletken modda iyi bir ölçüm elemanı yapar. Böylece ışık akımı,

$$i_{DC} = i_0 \left[ e^{\frac{V_D}{k \cdot T}} - 1 \right] - i_\lambda$$

şeklini alır. Açık devre durumunda ( $R_L \gg R_{SH}$ ) fotodiyot açık devre voltajı oluşturur.

$$V_{LO} = \frac{k.T}{e} \ln[(i_{\lambda} + i_0)i_{\lambda}]$$

Normalde  $i_{\lambda} \gg i_0$  olduğundan,

$$V_{LO} = \frac{k.T}{e} \ln\left(\frac{i_{\lambda}}{i_0}\right) = 0,862.10^{-4} . T . \ln\left(\frac{i_{\lambda}}{i_0}\right)$$

olur. Sabit sıcaklıkta fotodiyodun açık devre voltajı, ışık şiddetinin bir logaritmik fonksiyonudur.

Dördüncü bölgede fotodiyod yüke bir güç verir.

Jonksiyonlu fotodiyotlar iki grupta toplanabilirler: Fotovoltik hücreler ve düşük güçlü diyotlar. Bu grup fotodiyotlar çok çeşitlidir. Ençok kullanılanlar planar, PIN, çığ ve schottky diyotlarıdır.

Fotovoltiğin amacı ışık şiddetini elektriksel işarete en etkili şekilde çevirmektir. Çevirme işleminin etkinliği fotodiyodun karakteristiğine bağlıdır. Tek tabakalı fotodiyodun karakteristiği oldukça geniştir. Daha etkin fotodiyot yapmak için tabaka sayısı artırılır.

Tek tabakalı fotodiyodun etkinliği %12 iken üç tabakalı fotodiyodun etkinliği %18 ile %20 arasındadır.

Bir fotodiyotdan maksimum güç elde etmek için yük direncinin fotodiyot karakteristiğine uygunluğu çok önemlidir.

Pratikte istenen çıkışı elde etmek için çok sayıda fotodiyod seri ve paralel bağlanabilir. Seri ve paralel kollardaki fotodiyotların sayısı aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$n_p = \frac{i_D}{i_L}, \quad n_s = \frac{V_D}{V_L}$$

$V_D$ ; istenen voltaj değeri (V),

$i_D$ ; istenen akım değeri (A),

$V_L$ ; bir fotodiyodun voltajı (V),

$i_L$ ; bir fotodiyodun akımı (A).

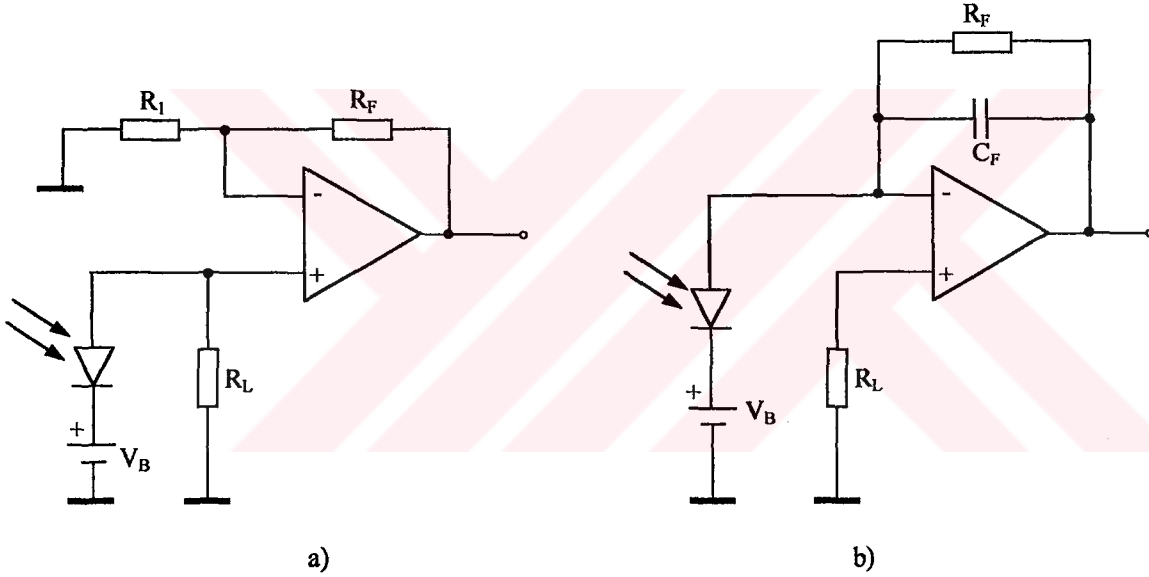


İşaret fotodiyotlar, ölçüm ve haberleşme sistemlerinde düzgün ve kararlı çalışacak şekilde tasarlanmış jonksiyon diyotlarıdır. Onların dizaynın önemi geniş lineer aralığa sahip olmaları, hızlı cevap ve yüksek sıcaklık kararlılığına sahip olmalarıdır ( Uiga 1995 ).

İşaret fotodiyotları lineer işlemler için üçüncü bölgede kullanılırlar. Logaritmik cevap istendiğinde dördüncü bölgeye düşen açık devre modunda çalıştırılmalıdır (Şekil 2.40).

Ters gerilim kataloglarda verilen maksimum kırılma geriliminin ( $V_{max}$ ) altında olmak şartı ile herhangi bir değere ayarlanabilir. Ters gerilimin artması karanlık akımı ve lineer aralığı artırır, cevap hızını ve jonksiyon kapasitesi azaltır.

Fotodiyotlar genelde bir opampla birlikte kullanılırlar. En çok kullanılan iki devre Şekil 2.41'de gösterilmiştir.

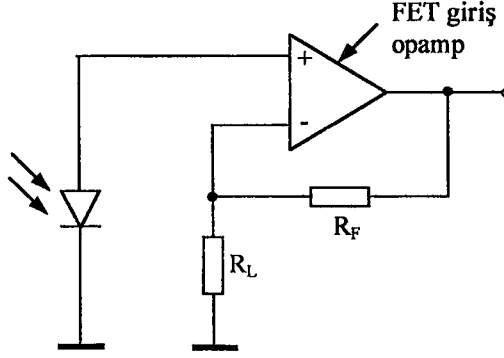


Şekil 2.41 Fotodiyodun işlemsel kuvvetlendiricinin girişine uygulanması.

Şekil 2.41b'deki devrede  $R_f$  bir geribesleme direncidir.

Fotodiyodun eşdeğer devresi sadece direncten oluşmadığından (dirençe paralel jonksiyon kapasitesi var) kuvvetlendiricinin frekans cevabında ani sıçramalar ( peekler ) oluşabilir veya yüksek frekanslarda kuvvetlendirici osilasyon yapabilir. Bunu önlemek için  $R_f$  direncine paralel bir  $C_f$  kapasitesi bağlanabilir. Yüksek hızlı haberleşme linklerinde olduğu gibi hızlı cevap istendiğinde düşük  $C_D$  kapasitesli ve düşük yük dirençli diyotlar seçilmelidir.

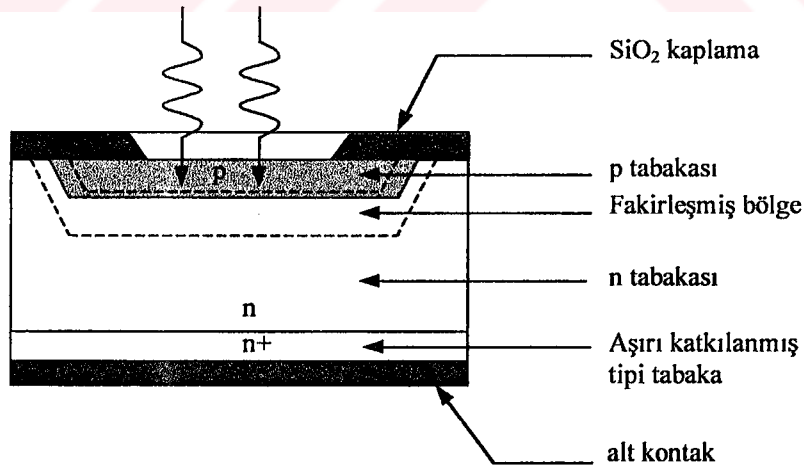
Fotodiyodun logaritmik cevabına ihtiyaç duyulursa fotodiyod açık devre durumunda öngerilimsiz çalıştırılır. Fotodiyodun şönt direnci çok yüksek olduğundan ( $10^8 \Omega$ 'lar mertebesinde) opamp çok yüksek giriş direncine sahip olmuş olur. Bu etki FET girişli opamp veya teflon terminal kullanılarak aşılabilir (Şekil 2.42).



Şekil 2.42 Fotodiyodun FET girişli opampın girişine uygulanması.

Jonksiyon fotodiyodların spektral cevabı ve karakteristikleri diyodun ve kullanılan yarıiletken malzemenin dizaynı ile belirlenir. Aşağıda en çok kullanılan fotodiyod çeşitleri açıklanmıştır.

Planar difüzyon fotodiyodu en genel jonksiyon fotodiyodudur. Şekil 2.43'de yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.43 Planar difüzyon diyodun yapısı.

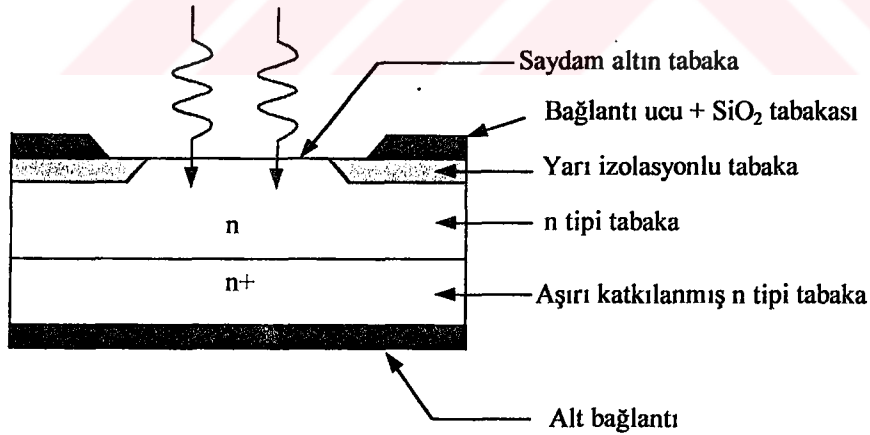
Diyodun üst kısmında, fazla katkılanmış p tipi bölge ve onun altında az katkılanmış n tipi bölge yer alır. İki katkı yüzeyi arasında fakirleşmiş bölge yer alır. Katkı

yoğunluğunun farklılığından dolayı fakirleşmiş bölge n tipi bölgede, p tipi bölgeye göre daha derindir. Diyodun alt kısmında  $n^+$  tipli madde bulunur ve diyodun metale bağlantısı sağlanır. Üst kontakt  $\text{SiO}_2$  ile kaplanmıştır ( Wood 1995 ).

Diyoda düşen fotonların diyod içinde ilerlemesi ışının dalga boyuna bağlıdır. Düşük dalga boyları (ultraviole ışınlar) yüzeyde emilir ve yapı içinde ilerleyemezler. Uzun dalga boylu ışınlar (kızılötesi ışınlar) ise yapı içinde derinlere kadar inebilirler. Böylece geniş cevaplı fotodiyod, ince bir p tabakasına ve kalın bir zayıflamış bölgeye sahip olmalıdır (Hickman 1995 ).

Diyodun cevap hızı, zayıflama bölgesinin kalınlığı ve ters polarize gerilim tarafından belirlenen diyod kapasitesi ile kontrol edilir. Zayıflamış bölgenin kalınlığı n tipi bölgenin katkı yoğunluğu ile kontrol edilir. Düşük katkı yoğunluğu zayıflamış bölgenin kalınlığını artırır ve diyod kapasitesini düşürür. Bu teknik PIN fotodiyodlarında kullanılır. PIN fotodiyodlarının p ve n tipi bölgeleri arasında düşük katkı ve yüksek dirençli n tipi metariyel ilave edilir. PIN fotodiyodu ince zayıflamış bölgeye sahiptir. Dolayısıyla cevabı hızlıdır ( Liu ve Chou 1995 ).

Schottky fotodiyonun yapısı Şekil 2.44'de gösterilmiştir. İnce altın saydam tabaka (10nm'den az) n tipi yarıiletkenin (genellikle GaAs veya GaP) üzerindedir. Burada zayıflamış bölge çok incedir.

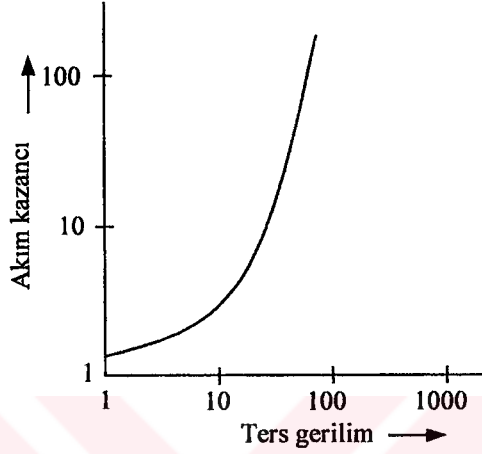


Şekil 2.44 Schottky fotodiyodun yapısı.

Çiğ fotodiyodu iç kazanç mekanizması olan bir jonksiyon fotodiyodudur. Çiğ fotodiyodu ters gerilimde çalışır. Fotonlar tarafından oluşturulan elektronlar iletkenlik bandına geçerler. Yüksek elektrik alandan dolayı elektronların diğer atomlara çarpması

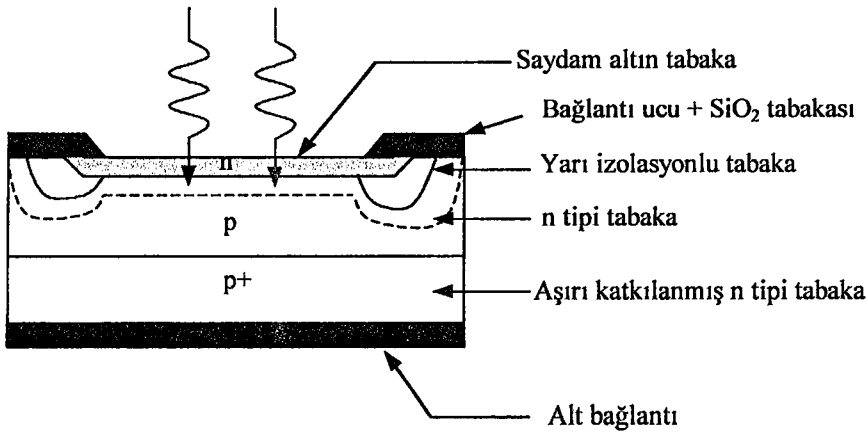
ile çok sayıda elektron ve delik çifti oluşur. Böylece bir kuvvetlenme meydana gelir. Elektronların atomlara çarpması rastgele olduğundan shot gürültü oluşur ama gerekli sinyal/gürültü oranı sağlanırsa güvenli çalışma sağlanır ( Uiga 1995 ).

Akım kazancı, ters gerilime ve jonksiyonun geometrisine bağlıdır. Tipik bir ilişki Şekil 2.45’de gösterilmiştir.



Şekil 2.45 Çığ fotodiyotdaki kazanç ters gerilim ilişkisi.

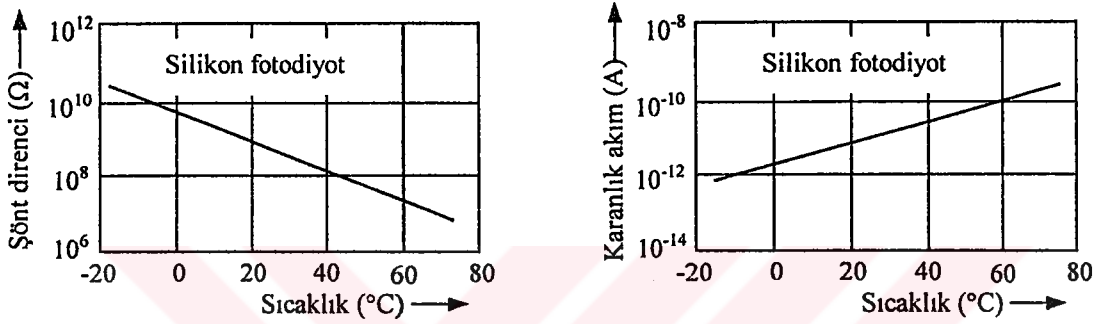
Eğriden de görüldüğü gibi kazanç, uygulanan ters gerilime çok bağlıdır ve kararlı bir çalışma için ters gerilimin de kararlı olması gerekir. Maksimum kazanç ısı ile oluşan taşıyıcılar tarafından sınırlanır. Şekil 2.46’da çığ fotodiyodun yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.46 Çığ fotodiyodun yapısı.

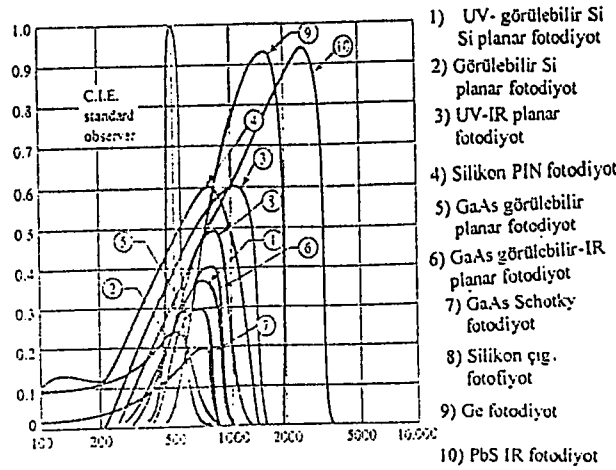
Çığ fotodiyodları yüksek hızlı haberleşme ve fiber - optik uygulamalarda sıkça kullanılırlar. Çığ diyodun içinde oluşan iç kazanç bu uygulamalar için bu elemanı uygun eleman kılmıştır.

Fotodiyodlar ve jonksiyon diyodlar kararlı elemanlardır. Sıcaklık katsayıları dalga boyu ile değişmekle birlikte tepe dalga boyunda sıcaklık katsayıları çok düşüktür (%0,1°C'den küçük). Bu da fotodiyodu meterolojo uygulamalarında uygun eleman yapmıştır. Sıcaklık ile fotodiyodun karanlık akımı ve şönt direnci değişir. Şekil 2.47'de karanlık akımın ve şönt direncin sıcaklık ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.47 Sıcaklık ile şönt direncin ve karanlık akımın değişmesi.

Fotodiyodlar ultraviole bölgesinden kızılötesi bölgesine kadar geniş bir aralıkta kullanılabilirler. Fotodiyodun çalışma bölgesi, temel olarak fotodiyodun yapıldığı malzemeye bağlı olmakla birlikte aynı zamanda jonksiyonun dizaynına ve pencere malzemesine de bağlıdır. Şekil 2.48'de fotodiyodlara ait çeşitli karakteristikler gösterilmiştir.



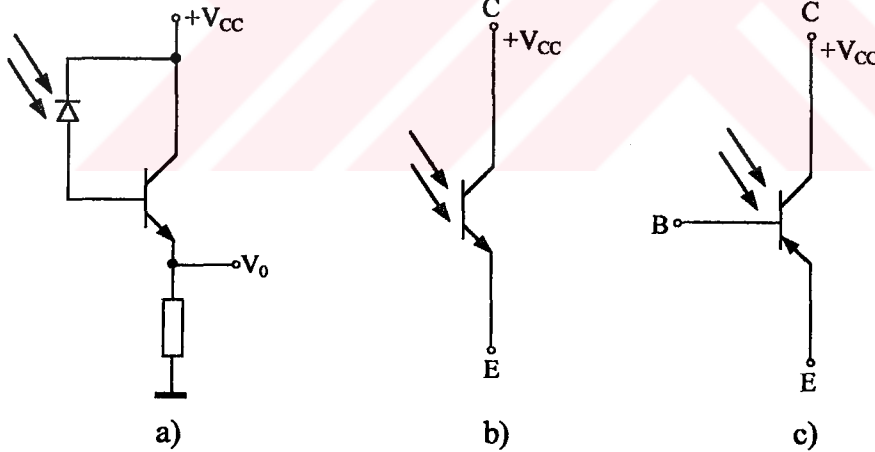
Şekil 2.48 Bazı fotodiyotların spektrumları.

Düşük sinyal seviyelerinde fotodiyod kullanırken gürültü çok önemli bir konuma gelir. Jonksiyon diyodlarda iki önemli gürültü vardır: shot gürültü ve ısı gürültü. Shot gürültü yüksek sinyal seviyelerinde, ısı gürültü ise düşük sinyal seviyelerinde etkilidir.

### 2.3.4.3. Fototranzistörler

Fototranzistörler algılamanın yanında kuvvetlendirme de yapan fotoalıcılardır. Birden fazla p-n jonksiyonuna sahiptirler. Daha önce anlatılan fotodiyodlarla fototranzistörler karşılaştırıldığında, hissedicilik, yükselme süresi ve lineerlik bakımından fototranzistörlerin fotodiyodlar ile rekabet edemeyecek seviyede olduğu görülür. Fototranzistörlerin avantajı kazanç mekanizmasına sahip olmaları ve böylece yüksek cevap hızına sahip olmalarıdır. Ayrıca ucuzdurlar ve anahtar ve kontrol elemanı olarak kullanılabilirler.

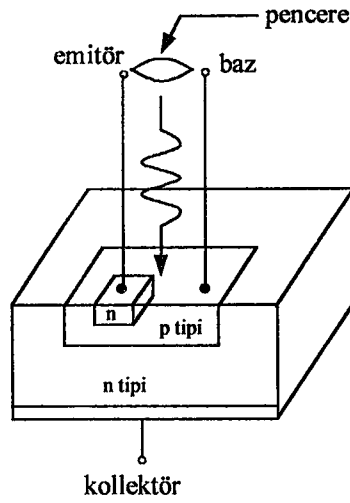
Şekil 2.49a'da gösterildiği gibi bir fototranzistör, arkasına bir tranzistör bağlanmış bir fotodiyoddur.



Şekil 2.49 Fototranzistör.

Tranzistör de p-n jonksiyonundan oluşmuş (baz-emetör jonksiyonu) bir fotodiyod gibi düşünülebilir ve dıştaki diyod kaldırılabilir. Böylece bir fototranzistör, baz-emetör jonksiyonu bir fotojonksiyon olan bir tranzistördür. Dolayısıyla Şekil 2.49b'de gösterildiği gibi fototranzistör iki bacaklı bir eleman olarak yapılabilir veya Şekil 2.49c'de gösterildiği gibi baz bölgesi de olabilir ( Uiga 1995 ).

Şekil 2.50'de fototranzistörün yapısı gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi fototranzistörün yapısı normal bir tranzistörün yapısına benzemektedir. Sadece baz-emetör bölgesi bir mercek yerleştirilerek ışığa açık hale gerilmiştir.



Şekil 2.50 Fototranzistörün yapısı.

Fototranzistör normal bir tranzistör gibi hareket eder. Sadece baz akımı fotojonksiyon tarafından oluşturulan fotoakımdır. Bir tranzistördeki akım ilişkisi,

$$i_C = \beta i_B = \alpha i_E$$

şeklindedir. Burada,

$i_C$ ; kollektör akımı (A),

$i_B$ ; baz akımı (A),

$i_E$ ; emetör akımı (A),

$\beta$ ; akım kazanç faktörü,

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \text{ dir.}$$

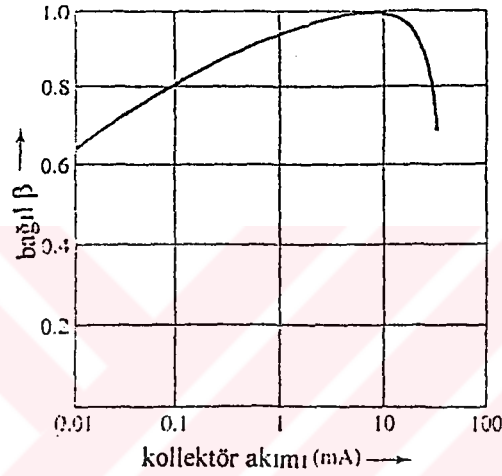
Fototranzistörde baz akımı fotojonksiyondan oluşan fotoakımdır. Yukarıdaki eşitlikten,

$$i_B = \frac{\eta \cdot I \cdot A \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

yazılabilir. Dolayısıyla kollektör akımı,

$$i_c = \frac{\beta \cdot \eta \cdot I \cdot A \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

olur. Görüldüğü gib kollektör akımı,  $\beta$  sabit olduğu sürece ışık şiddeti ile lineerdir. Şekil 2.51'de gösterildiği gibi  $\beta$  kollektör akımına bağlıdır. Görüldüğü gibi fototranzistörün lineer olduğu aralık bir fotodiyodun veya bir fotodirecin lineer olduğu aralıktan daha küçüktür.



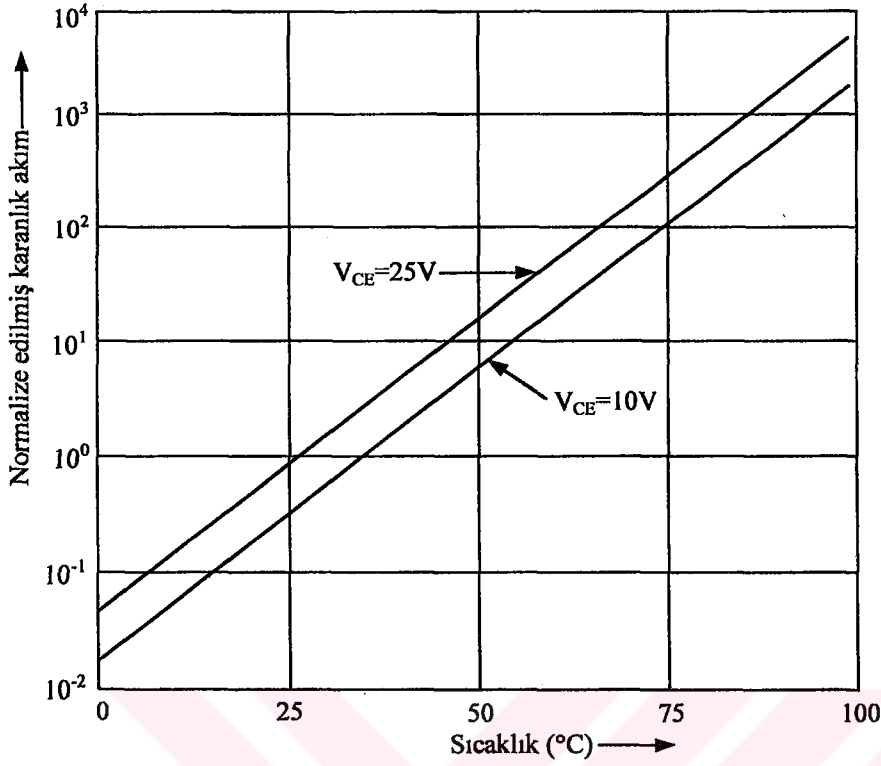
Şekil 2.51  $\beta$ 'nin kollektör akımı ile değişimi.

Fototranzistör karakteristikleri normal bir tranzistörün karakteristiğine benzemekle birlikte baz akımı parametresi yerine ışık şiddeti alır.

Fototranzistörün cevap hızının toleransı oldukça yüksektir (-%50'den +%100'e kadar). Fototranzistörün cevap hızı ışık seviyesine ve sıcaklığa bağlıdır. Cevap hızının sıcaklık katsayısı %0,7/°C civarındadır. Görüldüğü gibi fototranzistörlü devre tasarımında parametrelerin değişim aralığının geniş olmasını dikkat etmek gerekir.

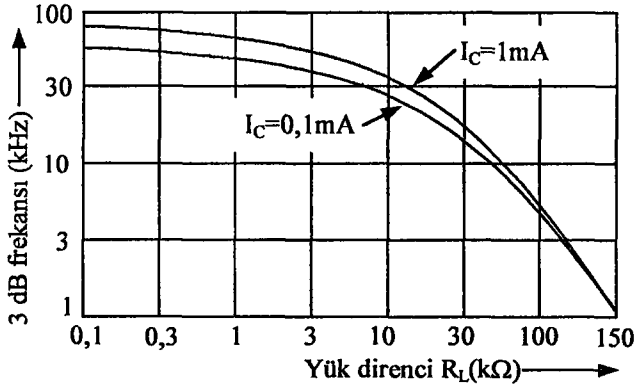
Fotodiyodda olduğu gibi fototranzistörde de karanlık akım, hissediciliği sınırlayan ana faktördür. Karanlık akım, çalışma koşullarının ve çevre sıcaklığının bir fonksiyonudur (Şekil 2.52). Çevre sıcaklığı 20°C yükseldiğinde karanlık akım 10 kat artar. Aynı zamanda karanlık akım kollektör emetör voltajının bir fonksiyonudur ( Uiga 1995 ).





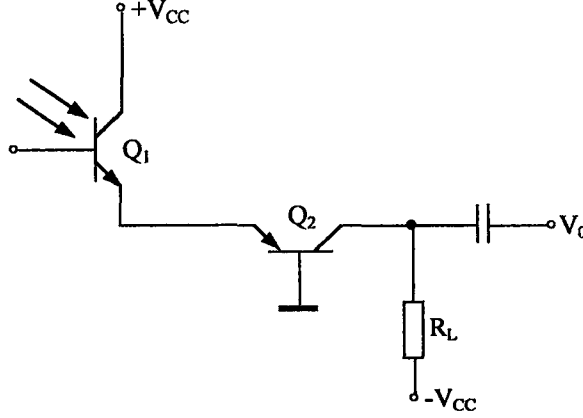
Şekil 2.52 Fototranzistörde sıcaklığın karanlık akıma etkisi.

Bir fotodiyoda yükselme zamanı hızlıdır. Bir fototranzistörde ise yükselme zamanı baz-emetör ve baz-kollektör kapasitelerinden ve tranzistör jonksiyonunun zayıflamış bölgesindeki taşıyıcıların yaşam sürelerinden dolayı oldukça kötüdür. Tipik yükselme süresi birkaç  $\mu\text{m}$  mertebesindedir. Jonksiyon kapasitesinden dolayı düşme ve yükselme zamanları, aynı zamanda yük direncine de bağlıdır. Yük direnci arttığında yükselme zamanı yavaşlar (Şekil 2.53).



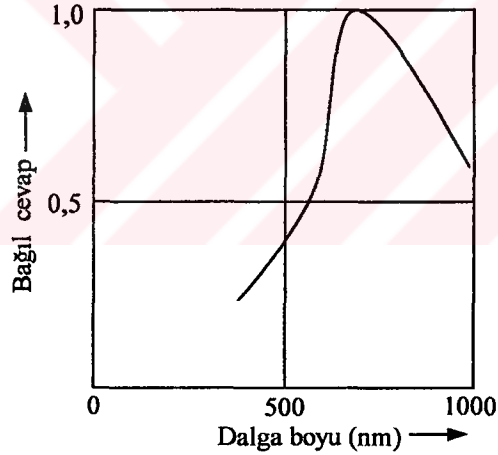
Şekil 2.53 Yük direnci ile çalışma frekansının değişimi.

Tranzistörün kazancı yük direnci ile orantılı olduğundan hızlı cevap ve yüksek kazanç birbiri ile çelişkilidir. Bu problem, Şekil 2.54'de gösterildiği gibi bazı topraklanmış bir tranzistör kullanılarak giderilebilir.



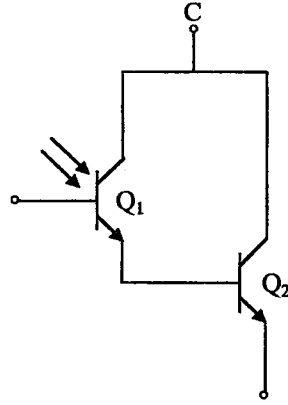
Şekil 2.54 Yüksek frekanslarda çalışmak için tranzistör devresi.

Şekil 2.55'de bir silikon tranzistörün spektral cevabı gösterilmiştir.



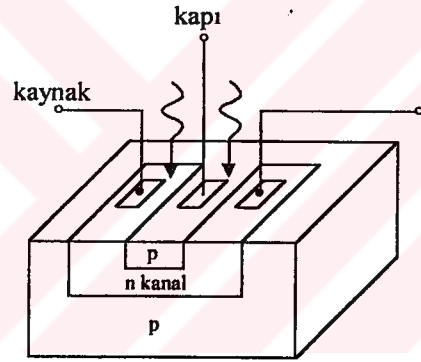
Şekil 2.55 Silikon fototranzistörün cevap eğrisi.

Fototranzistörler Şekil 2.56'da gösterildiği gibi fotodarlington şeklinde tasarlanabilirler. Fotodarlingtonlar fototranzistörlerle karşılaştırıldığında, fotodarlingtonlarda cevap hızının ve lineerliğin azaldığı görülür.



Şekil 2.56 Fotodarlington.

Bipolar tranzistörlerin yanında alan etkili fototranzistörler (fotoFET) de kullanılabilirler. FotoFET'lerde kapı bölgesi açık hale getirilmiştir (Şekil 2.57). FET çıkışı voltaj şeklinde olan bir elemandır.



Şekil 2.57 FotoFET.

$$\Delta V_0 = \Delta V_{GS} \cdot g \cdot R_D$$

Burada,

$\Delta V_0$ ; çıkış voltaj değişimi (V),

$\Delta V_{GS}$ ; kapı-kaynak gerilim değişimi (V),

$g$ ; FET'in transkondüktansı (A/V),

$R_D$ ; kapı direnci ( $\Omega$ ).

dır.

$$\Delta V_{GS} = R_G \cdot i_{ph}$$

dır. Burada,

$i_{ph}$ ; kapı jonksiyonu foto akımı (A),

$R_G$ ; kapı direnci ( $\Omega$ ),

dır.

Yukarıdaki eşitlikden görüldüğü gibi kapı voltajı ve dolayısıyla cevap hızı kapı direnci ile kontrol edilebilir. Yüksek kapı direnci hissediciliği artırır, fakat aynı zamanda jonksiyon kapasitesinden dolayı cevap hızını da artırır.

FotoFET, fototranzistör ile karşılaştırıldığında fotoFET'in bazı avantajları vardır. Kapı direnci artırılarak kazanç yüksek değerlere çıkabilir. Gürültü performansı ve frekans cevabı oldukça iyidir. Kapıya bir kablo bağlanarak sıcaklık kompanzasyonu yapılabilir. FotoFET'in dezavantajları ise sınırlanmış lineer aralık ve yüksek kazanç için kapı direnci arttırıldığında cevap hızının düşmesidir.



## 2.4. Sıcaklık Sensörleri

Tez çalışmamda bir analog işareti bir noktadan başka bir noktaya optik olarak ilettim. Analog işaret olarak bir sıcaklık sensörünün çıkış işaretini alabiliriz.

Sıcaklık sensörleri çok çeşitlidir. Örnek olarak sıcaklığı frekansa veya darbe şeklinde elektriksel işarete çeviren elektronik devreler, PT100'ler ve termokuplörler verilebilir.

### 2.4.1. Optoelektronik osilatörün sıcaklığa duyarlı eleman olarak kullanılması

Optoelektronik osilatörün yapısında LED – fotodirenç çifti kullanılmaktadır ve bu elemanlar osilatörün frekansını veya darbe / boşluk (  $t_d / t_b$  ) oranını belirlemektedir. Fotodirençin sıcaklığa duyarlılığı çok yüksek olduğundan osilatörün de sıcaklığa duyarlılığı çok yüksektir. Dolayısıyla optoelektronik osilatör sıcaklık – frekans çevirici olarak kullanılabilir. Optoelektronik osilatörün sıcaklık sensörü olarak kullanılabilmesi için osilatörün çalışma prensibi ve devredeki elemanlar hakkında bilgiye ihtiyaç vardır.

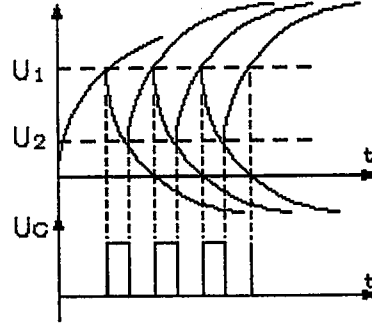
Optoelektronik osilatörlerin frekans belirleyici devresinde LED - fotoalıcı çifti kullanılmaktadır. Optik işaretin yükselme ve düşme süreleri eksponansiyel denklemler ile gösterilebilir.

$$U_1(t) = U_0 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_D}{\tau_y}\right) \right] \quad U_2(t) = U_0 \cdot \left[ \exp\left(-\frac{t_B}{\tau_d}\right) \right]$$

Burada,  $U_1(t)$ ; sinyalin yükselmesi,  $U_2(t)$ ; sinyalin düşüşü,  $t_D$ ; darbe süresi,  $t_B$ ; boşluk süresi,  $\tau_y, \tau_d$ ; yükselme ve düşme zaman sabitleri,  $U_0$ ; sinyalin maksimum değeridir.

Optoelektronik osilatörün frekansı  $f = \frac{1}{t_D + t_B}$  dır. Şekil 2.58'de gösterildiği gibi

$U_1(t) = U_1$  ve  $U_2(t) = U_2$  alınarak optoelektronik osilatörün çıkışında elde edilen kare darbelerin süresi  $t_D$  ve boşluk süresi  $t_B$  bulunabilir:



Şekil 2.58 Optoelektronik osilatörün çalışmasını ifade eden zaman diyagramları.

$$t_D = \tau_y \cdot \ln \left[ \frac{U_0}{U_0 - U_1} \right] \quad t_B = \tau_d \cdot \ln \left[ \frac{U_0}{U_2} \right]$$

Böylece osilatörün frekansı,

$$f = \frac{1}{t_D + t_B} = \frac{1}{\ln \left[ \frac{(C \cdot K_{LED} \cdot I_{LED})^{\tau_y + \tau_d}}{(C \cdot K_{LED} \cdot I_{LED} - U_1)^{\tau_y} \cdot U_2^{\tau_d}} \right]}$$

olur.

Optoelektronik osilatörün bir devre örneği ve devrenin çeşitli noktalarında elde edilen sinyallerin şekilleri Şekil 2.59'de gösterilmiştir. Fotodirenç olarak NSL19-M51 tipi fotodirenç kullanılmıştır. Bu fotodirençin katalog değerleri çizelge 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4

Duyarlılığın maksimum olduğu dalga boyu	550nm
10Lux'luk ışık şiddetindeki direnç değeri	20...100kΩ
100Lux'luk ışık şiddetindeki direnç değeri	5 kΩ
karanlık direnci	20M Ω
maksimum besleme gerilimi	100V
fotodirenç üzerinde harcanan maksimum güç	50mW
yükselme zaman sabiti ( $\tau_y$ )	45ms
düşme zaman sabiti ( $\tau_d$ )	55ms
çalışabileceği sıcaklık aralığı	-60°C...75°C

LED olarak yeşil veya sarı ışık veren LED kullanılabilir. Deneyde L-517EGW tipi LED kullanılmıştır. Bu LED 10mA'lık akımda 3,6mcd'lik ışın şiddetine sahiptir. LED'in eşik gerilimi 1,8V'tur.

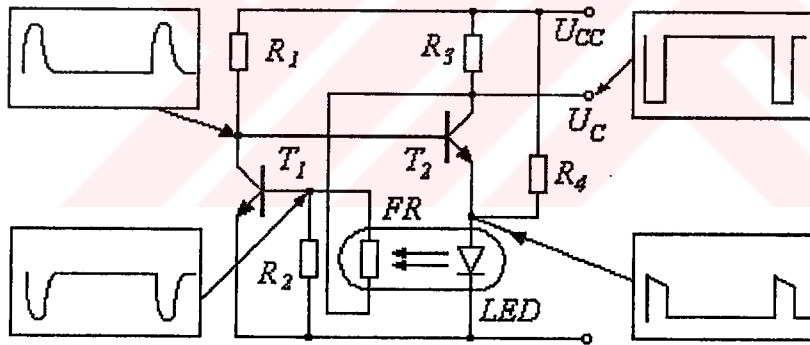
Devrede iki adet BC239 tipi silisyum tranzistör kullanılmıştır.

Denemeler yapılması için Şekil 2.60'da gösterilen optoelektronik osilatör devresi kurulmuştur. Dış ışığın etkisini engellemek için LED - fotodirenç çifti Şekil 2.59'da gösterildiği gibi siyah bir boru içine yerleştirilmiştir.



Şekil 2.59 LED - fotodirenç çiftinin kılıf içerisine yerleştirilmesi.

Osilatör devresinde kullanılan direnç değerleri şunlardır:  $R_1=1k\Omega$ ,  $R_2=22k\Omega$ ,  $R_3=1k\Omega$ ,  $R_4=22k\Omega$ . Bu değerler için ve besleme gerilimi  $V_{CC}=12V$  olmak üzere devrenin önemli noktalarında elde edilen işaretler Şekil 2.60'da gösterilmiştir.



Şekil 2.60 Denemelerde kullanılan devre.

Kare dalga üreten osilatörlerde çıkış sinyalinin frekans parametresi yerine darbe boşluk oranını kullanmak daha iyidir. Çünkü bazı durumlarda darbe - boşluk oranı önemli ölçüde değişse de frekans sabit kalabilmektedir. Bundan dolayı denemelerde sıcaklığın frekans üzerindeki etkisi yerine darbe / boşluk oranı üzerindeki etkisi araştırılmıştır ( Musayev ve Tekin 1999 ).

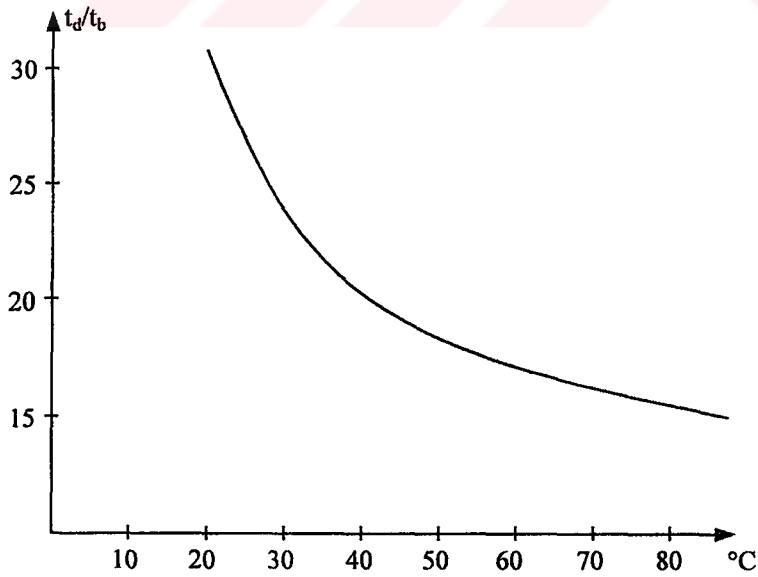
Şekil 2.59'da gösterilen, içinde LED - fotodiyod çiftinin bulunduğu kılıf sıcaklığı ölçülecek sıvının içine yerleştirildi. Sıvının sıcaklığı artırıldı. Sıvının sıcaklığı bir

termometre ile ve osilatör işaretinin darbe ve boşluk süreleri osiloskop yardımı ile ölçüldü. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5

Sıcaklık (°C)	$t_d/t_b$
25	28
30	26
35	24
40	23
45	22
50	20
55	19
60	18
65	17
70	16

Bu çizelgeden yararlanarak  $f(\theta^{\circ}\text{C})=t_d/t_b$  grafiği çizilmiştir. Elde edilen Şekil 2.61'de gösterilmiştir.



Şekil 2.61 Sıcaklık ile darbe / boşluk oranının değişimi.



Optoelektronik osilatörde fotodirencin iki durumu söz konusudur: birincisi karanlık durum, ikincisi ışıklı durumdur. Karanlık durumda fotodirencin direnci yüzlerce  $k\Omega$ 'dur. Işıklandırılmış durumda ise onlarca  $\Omega$ 'dur. Dolayısıyla fotodirencin karanlık durumu sıcaklığa daha duyarlıdır. Fotodirencin karanlık durumu boşluk süresini etkilemektedir ( Fotodirenç karanlık durumda iken T1 tranzistörü kesimde, T2 tranzistörü ise iletimdedir. T2 iletimde iken darbenin boşluk süresi söz konusudur. Çıkış işareti T2 tranzistörünün kollektöründen alınmaktadır.). Boşluk süresinin değişmesi darbe süresinin değişmesine neden olmaktadır.

Şekil 2.61'de verilen grafikte sıcaklık ile  $t_d / t_b$  oranının değişiminin lineer olmadığı görülmektedir. Bu da sistemde bazı sorunlar oluşturur. Grafiğin lineer olmamasının nedeni tamamen fotodirencin özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

#### 2.4.2. PT100'ler

Platinden yapılmış sıcaklık sensörleri pozitif sıcaklık katsayısına sahiptirler. Ticari bir standart olan PT100, en çok kullanılan platin direnci sıcaklık sensörüdür. PT100,  $0^\circ\text{C}$ 'de  $100\Omega$ 'luk dirence sahiptir. Sıcaklık  $1^\circ\text{C}$  arttığında direnç değeri  $0,385\Omega$  artar. Böylece herhangi bir andaki sıcaklık değeri,

$$R(t) = 100 + 0,385.t$$

formülü ile bulunabilir. Burada  $t$ ,  $^\circ\text{C}$  cinsinden sıcaklıktır.

PT100,  $-50^\circ\text{C}$  ile  $500^\circ\text{C}$  arasında çalışabilir. Yukarıda verdiğimiz formül  $-50^\circ\text{C}$  ile  $200^\circ\text{C}$  arasında geçerlidir. Bu aralıkta hata  $1^\circ\text{C}$ 'nin altındadır.  $200^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise hata  $30^\circ\text{C}$  civarındadır. Dolayısıyla platinden yapılmış sıcaklık sensörleri yüksek sıcaklıklarda uygun değildir. Yüksek sıcaklıklarda termokuplörler kullanılır.

PT100'lerdeki en büyük sorun direnç değerinin çok küçük olmasıdır. Bu düşük direnç kablo ile bağlantıda önemli sorunlara yol açar. Kablo  $1\Omega$ 'luk dirence sahipse bu  $3^\circ\text{C}$ 'lik bir hataya sebep olur. Uzun kablolar  $1\Omega$ 'luk dirence rahatlıkla sahip olabilir. PT100 devreye bağlanırken kablo boyunun sensöre etkisi olmayacak seviyede olmasına

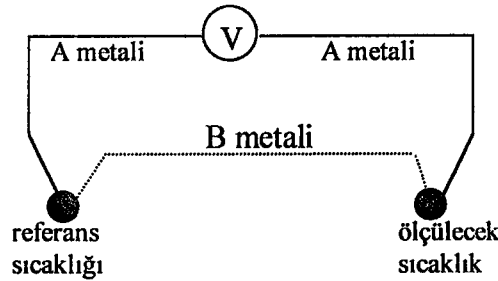
dikkat edilmelidir. Uygulamalarda PT100, bir köprü devresine yerleştirilir ve köprünün çıkışı bir kuvvetlendiriciye verilir ( Lines 1998 ).

### 2.4.3. Termokuplörler

Termokuplörler, değeri sıcaklık ile değişen direkt çıkış voltajı veren sıcaklık sensörleridir. Yüksek sıcaklıklarda en uygun sıcaklık sensörleri termokuplörlerdir. Termokuplörler,  $-250^{\circ}\text{C}$  ile  $1300^{\circ}\text{C}$  arasında çalışabilirler. Termokuplörlerin diğer avantajları sağlamlık ve küçük boyutlu olmalarıdır. Termokuplörlerin kablo boyları  $50\mu\text{m}$ 'den küçüktür. Küçük yapılarından dolayı cevap hızları birkaç milisaniyedir.

Termokuplörler, farklı metallere yapılmış iki kablonun birer uçlarının birleştirilmesi ile elde edilirler. Farklı metallere elektron yoğunlukları da farklıdır. İki farklı metal bir noktada lehimlendiklerinde elektron yoğunluğu fazla olan metalden elektron yoğunluğu az olan metale doğru bir elektron akışı olur. Elektron veren metal pozitif yüke, elektron alan metal de negatif yüke sahip olur ve metallere arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bu potansiyel farkı elektron geçişini engeller ve dengeye ulaşılır. Denge noktası sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık arttığında elektron geçişi artar ve dengeye daha büyük bir potansiyel farkında ulaşılır.

Aşağıdaki şekilde termokuplör kullanılarak sıcaklığın ölçülmesi gösterilmiştir. Termokuplörde iki yüzey vardır: biri referans sıcaklığında, diğeri ise sıcaklığı ölçülmek istenen yüzeye bağlıdır. Voltmetreden okunan değer, iki jonksiyon sıcaklığı arasındaki fark ile orantılıdır.



Şekil 2.62 Termokuplör ile sıcaklığın ölçülmesi.

Endüstride kullanılan çok çeşitli termokuplör vardır. Yapıldığı malzemeye göre E, J, K, R, S ve T tipinde termokuplörler vardır. Uygulamaya göre en uygun termokuplör seçilmelidir.

Tez çalışmasında, yüksek sıcaklıklara çıkılmayacağından sıcaklık sensörü olarak PT100 kullanılmıştır ( Lines 1998 ).



### 3. SİSTEMİN OPTİK ŞEMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde sistemin optik şemasının geliştirilmesi incelenecektir. İlk olarak verici ile alıcı arasındaki iletişim mesafesinin belirlenmesi anlatılacaktır.

#### 3.1. Verici ile alıcı arasındaki mesafenin incelenmesi

##### 3.1.1. Verici ile alıcı arasındaki mesafenin belirlenmesi

Işın vericinin ışını bir noktadan ikinci bir noktaya ulaşması sırasında verici ile alıcı arasındaki elemanların ve ortamın etkisi altındadır. Bu elemanlar ve ortam vericinin ışını kayıplar meydana getirirler. Bu kayıplar vericinin tipine, verici ile alıcı arasındaki optik elemanların yapısına ve mesafeye bağlıdır.

Bir optoelektronik sistemin blok şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Optoelektronik sistemlerin genel blok şeması.

Fotoalıcının girişine ulaşan ışık şiddeti,

$$F_{FA}(t) = F_0 \cdot K_{VOS} \cdot K_{ort}^2 \cdot K_{FAOS}$$

olur. Burada,

$F_0$ ; vericiden çıkan ışın şiddeti,

$K_{LOS}$ ; verici bölgesinde bulunan optik sistemin ışın geçirme katsayısı,

$K_{ortam}$ ; ortamın ışın geçirme katsayısı,

$K_{FAOS}$ ; fotoalıcı bölgesinde bulunan optik sistemin ışın geçirme katsayısıdır.

Sistemin hatasız çalışması için fotoalıcının ışığa duyarlı yüzeyine ulaşan ışın şiddeti aşağıdaki şarta uygun şekilde seçilmelidir.

$$F_{FA} \geq q \cdot F_{FAS.D.I}$$

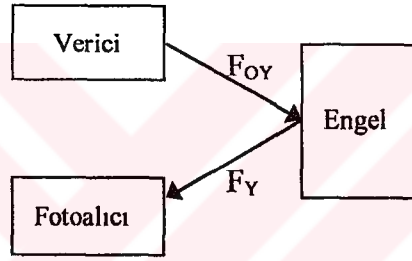
Burada,

$q$  ; sinyal/gürültü oranı,

$F_{FAS.D.I}$  ; fotoalıcının algılayabileceği minimum ışın şiddetidir.

Formül (2)'de  $K_{LOS}$  ve  $K_{FAOS}$  değerleri ışın verici ile fotoalıcı arasındaki mesafe hesaplamasında fazla etkili değildir. Vericiden fotoalıcıya ulaşan ışının şiddeti, vericiden çıkan ışın şiddetinden, ışının çapında ışın miktarının yayılmasından ve yansımalarından etkilenir. Hesaplamalar yapmak için ışın çapında ışın şiddetinin yayılmasını homojen kabul edelim ve iki durum için ulaşım mesafesini belirleyelim.

1. İlk olarak Şekil 3.2'de gösterildiği gibi ortamda bir yansıtıcı olduğu durum için hesaplamaları yapalım.



Şekil 3.2 Yansımalı optoelektronik sistem.

Ortamı bir difüzyon yansıtıcı yüzey gibi kabul edersek ortamın ışın yansıtma katsayısı,

$$\tau_{ort} = \tau_{yan} = \frac{F_{0y}}{F_0} = \left( \frac{S_{yy}}{S_{ip}} \right) \cdot \rho_y \cos \beta$$

Burada,

$F_{0y}$  ; yansıtıcı yüzeyin üzerine vericiden ulaşan ışın şiddeti,

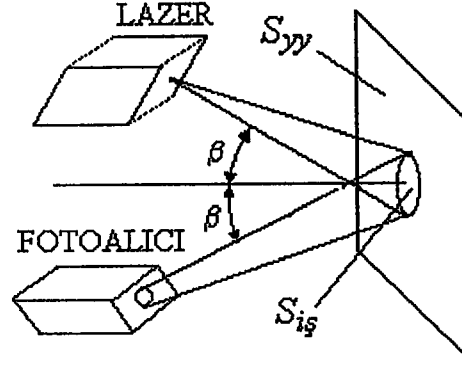
$\rho_y$  ; yansıtıcı ortamın difüzyon katsayısı,

$S_{yy}$  ; yansıtıcı yüzeyin alanı,

$S_{ip}$  ; verici ışınının yansıtıcı yüzey üzerinde oluşturduğu lekenin alanı,

$\beta$  ; düşen ışınlar ve yansıyan ışınlar ile optik eksen arasındaki açıdır.

Optik olarak yansımaya olayı Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Optik olarak yansımaya olayı.

Bunları da hesaba katarak fotoalıcının ışına duyarlı yüzeyine düşen ışın şiddeti belirlenebilir:

$$F_{FA,yan} = \frac{F_{oy}}{\pi \cdot S_p} S_{FAG.A} \frac{S_{yy}}{L_y^2} \cos^2 \beta \tau_{ortam} \rho_y$$

Burada,

$S_{FAG.A}$ ; fotoalıcının ışığa duyarlı yüzeyinin alanıdır. Burada,

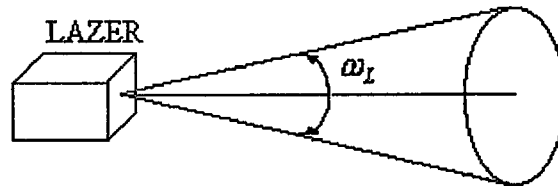
$$F_{oy} = F_0 \cdot K_{LOS} \cdot K_{ortam}$$

$$F_{FA,yan} = F_{FA} \cdot K_{FA}$$

olduğundan eşitlik aşağıdaki duruma gelir.

$$F_{FA} = \frac{F_0 \cdot S_{yy} \cdot S_{FAG.A}}{\pi \cdot \omega_L \cdot K_{ortam}^2 \cdot \tau_{FA} \cdot \cos^2 \beta \rho_y}$$

Burada  $\omega_L$  verici ışınının radyal açıdır. Bu durum Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Verici ışının yayılması.

$F_{FA} \geq q \cdot F_{FAS.D.I}$  şartını dikkate alarak ışının ulaşım mesafesi belirlenebilir:

$$L_y = \sqrt[4]{\frac{F_0 \cdot S_{yy} \cdot S_{FAG.A} \cdot K_{LOS} \cdot K_{trans}^2 \cdot \rho_y \cdot \cos^2 \beta}{q \cdot F_{FA} \cdot \pi \cdot \omega_L}}$$

Sistemde bir yarıiletken lazer kullanılmışsa ve lazerin akımı darbe şeklinde oluşturulmuş ise ulaşım mesafesi,

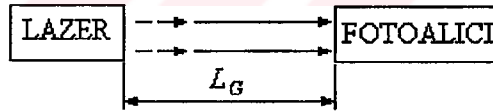
$$L_{y,D} = \sqrt[4]{\frac{K_L \cdot I_N \cdot \sqrt{\frac{T_D}{t_D}} \cdot S_{yy} \cdot S_{FAG.A} \cdot K_{LOS} \cdot K_{trans}^2 \cdot \tau_{FA} \cdot \cos^2 \beta}{q \cdot F_{FA} \cdot \pi \cdot \omega_L}}$$

olarak bulunur. Burada,

$I_N$ ; lazerin nominal akımı,

$K_L$ ; lazerin akımı ışına çevirme katsayısıdır.

2. İkinci olarak verici ve fotoalıcı Şekil 3.5’de gösterildiği gibi karşılıklı yerleştirildiği durumu inceleyelim. Vericinin ışınının homojen olduğu kabul edilirse ve verici ile fotoalıcı arasındaki mesafe büyük olursa ulaşım mesafesi aşağıdaki gibi olur.



Şekil 3.5 Verici ile alıcının direkt yerleştirilmesi.

$$L_G = \sqrt[4]{\left[ \frac{F_0 \cdot S_{FAG.A} \cdot K_{LOS} \cdot K_{trans} \cdot K_{FA}}{q \cdot F_{FA} \cdot \omega_L} \right] \cos \beta}$$

olur. Vericinin akımı darbe şeklinde ise ve yukarıda olduğu gibi  $K_{LOS} = K_{FA} = 1$  alırsak yukarıdaki formül daha da basitleşir.

$$L_{GD} = \sqrt{\frac{K_L \cdot I_N \cdot \sqrt{\frac{T_D}{t_D}} \cdot S_{FAG.A} \cdot K_{ortam}}{q \cdot F_{FA} \cdot \omega_L}} \cos \beta$$

olur ( Musayev, Adışen ve Tekin 1998 ).

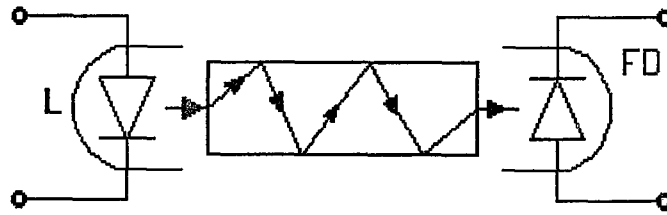
### 3.1.2. Verici ile alıcı arasındaki mesafeyi artırma yolları

Açık optik kanallı optoelektronik sistemlerde ışın verici ve fotoalıcı arasındaki mesafeyi uzatmak için birkaç metot kullanılabilir. Bunlardan başlıcaları,

1. Optik kanalda bir optik bağlantı kullanmak.
2. Mercekler kullanmak.
3. Reflektörler kullanmak.
4. Işın vericinin akımını artırmak suretiyle ışığın şiddetini arttırmak.

şeklinde verilebilir.

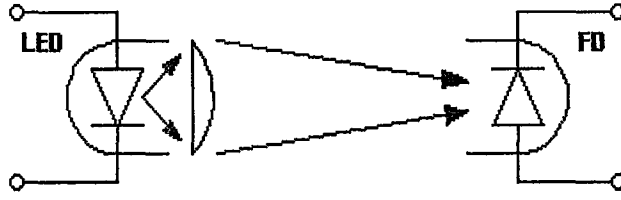
Aşağıda bu metotların optik şemaları gösterilmiştir. Bu optik şemaları inceleyelim. Şekil 3.6'de verilen optik şemada verici ile fotoalıcının arasına bir optik bağlantı yerleştirilmiştir. Bu optik bağlantı prizma, yamuk veya tel şeklinde olabilir. Bu optik bağlantının yansıma özelliği dış etki ile kontrol edilebilir.



Şekil 3.6 Verici ile fotoalıcı arasına optik kanalın yerleştirilmesi.

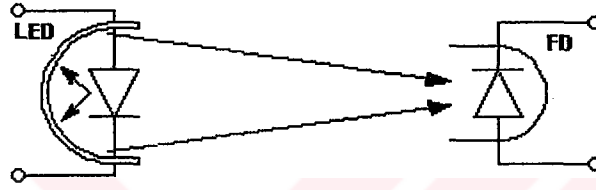
Şekil 3.7'de verilen optik şemada verici bölgesinde lazer merceğinin odağında olacak şekilde bir mercekle yerleştirilmiştir. Bu optik şemada fotoalıcı ile lazer aynı doğrultuda olmalıdır.





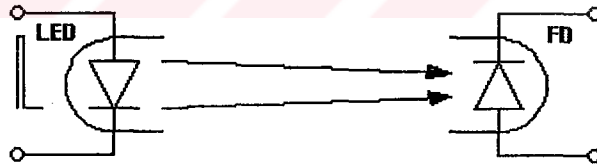
Şekil 3.7 Verici bölgesine mercek yerleştirilmesi.

Şekil 3.8'de verilen optik şemada lazer ışığını daha fazla toplamak için lazer bir reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Duruma göre reflektörün geometrik şekli değişebilir (yarıküre, parabolik, vb.).



Şekil 3.8 Verici bölgesine reflektör yerleştirilmesi.

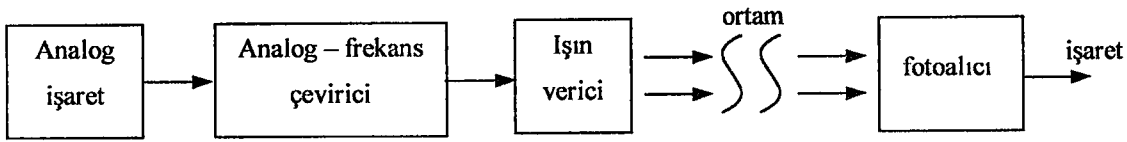
Dördüncü optik (Şekil 3.9) şema bir vericiden ve bir alıcıdan oluşturulur. Burada optik sinyalin seviyesini arttırmak için aşırı akım rejimi kullanılabilir ( Musayev, Özütürk ve Tekin 1998 ).



Şekil 3.9 Vericinin aşırı akım modunda çalıştırılması.

#### 4. KISA MESAFE OPTOELEKTRONİK BİLGİ İLETİŞİM SİSTEMİNİN TASARIMI

Kısa mesafe optoelektronik bilgi iletişim sisteminin blok şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şemadan da görüldüğü gibi bir analog işaret (örneğin herhangi bir sensörün işareti) analog – frekans çevirici ile darbeye çevrilmektedir. Daha sonra bu darbeler ışın verici devresine uygulanmaktadır. Işın verici (burada ışın verici olarak LED kullanılmıştır) elektriksel işareti optik işarete çevirmektedir. Işın vericinin ışını ortamdaki ortamdan geçerek fotoalıcıya ulaşmakta ve tekrar elektriksel işarete çevrilmektedir.



Şekil 4.1 Sistemin blok şeması.

##### 4.1. Çeviricinin seçilmesi

Analog işareti frekansa çevirmek için LM566 entegresi kullanıldı. Bu entegre girişine uygulanan işareti kare dalgaya ve üçgen dalgaya dönüştürmektedir. Girişteki analog işaretin genliği değiştikçe çıkıştaki işaretin frekansı değişmektedir.

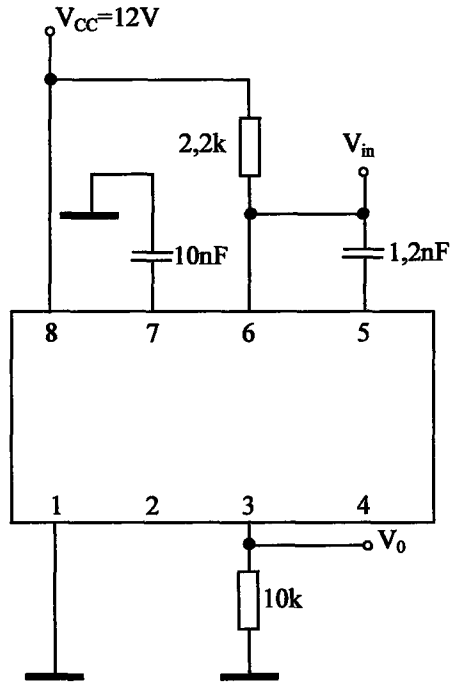
LM566 entegresi ile gerçekleştirilen analog – frekans çevirici devresi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Entegrenin 4.bacağı kare dalga çıkışı, 3.bacağı üçgen dalga çıkışıdır. Çıkış işaretinin frekansı aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$F_0 = \frac{2(V_{CC} - V_s)}{R_T C_1 V_{CC}}$$

$$R_T = P_1 + P_2$$

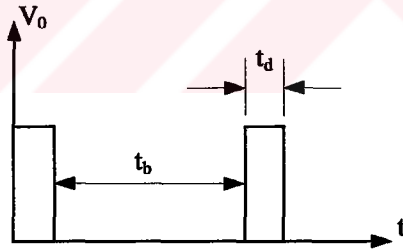
$$20K > R_T > 2K$$

$$V_{CC} > V_s > \frac{3}{4} V_{CC}$$



Şekil 4.2 LM566 entegresi ile analog – frekans çevirici.

Bu devre ile yapılan denemelerin bazı sonuçları çizelge 4.1’de verilmiştir. Çıkışta elde edilen işaretin şekli Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 LM566 entegrinin 4. acağında elde edilen işaret.

Çizelge 4.1

Giriş işareti ( $V_{in}$ )	Çıkış işaretinin darbe süresi, $t_d$ ( $\mu s$ )	Çıkış işaretinin boşluk süresi, $t_b$ ( $\mu s$ )
5,50V	56	12
5,55V	26	12
5,80V	18	12
6,00V	16	14

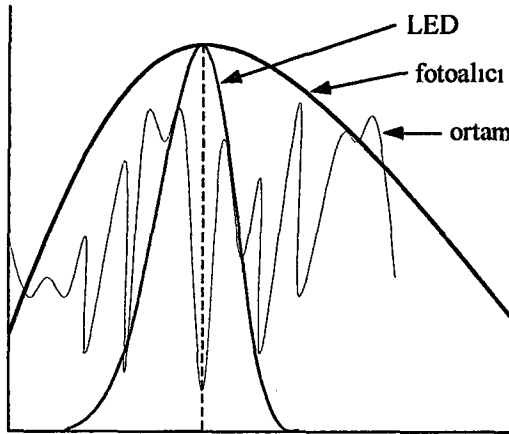
## 4.2. Işın Vericinin Tasarlanması

Işın verici devresi tasarlanırken öncelikle sisteme uygun LED seçilmelidir. LED seçiminde dikkate alınması gereken kriterler vardır. Sisteme uygun LED seçildikten sonra LED akımı belirlenmelidir. Daha sonra da iletişim mesafesi belirlenmelidir.

### 4.2.1. LED'in seçilmesi

Işın verici devresi tasarlanırken dikkate alınması gereken önemli noktalardan biri LED'in seçimi ve LED akımının belirlenmesidir.

LED seçiminde önemli bir parametre LED'in spektrumudur. LED spektrumu belirlenirken ortamın spektrum karakteristiği dikkate alınmalıdır. Ortamın spektrumuna bakarak zayıflamanın en az olduğu dalga boyu belirlenmeli ve bu dalga boyunda ışın yayan LED seçilmelidir. Ayrıca LED'in spektrumu ile fotoalıcının spektrumları birbirine uygun olmalıdır. Bu durumları ifade eden spektrum diyagramları Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Ayrıca ortamdaki görünür ışık kaynaklarının ( güneş, ortamdaki lambalar,... ) etkisini engellemek için spektrumun kızılötesi bölgesi kullanılır. Ultraviyole bölgesinde de ortamdaki görünür ışık kaynaklarının etkisi söz konusu değildir, fakat ultraviyole ışınlar canlı vücudu için zararlıdır. Dolayısıyla kızılötesi bölgesinde çalışmak en uygundur ( Musayevi Adışen ve Tan 1996).

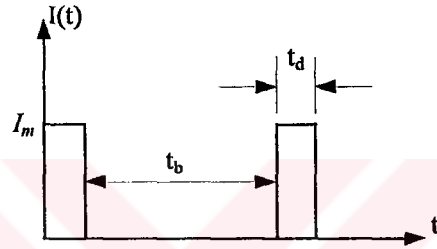


Şekil 4.4 LED spektrumunun belirlenmesi.

LED spektrumu belirlendikten sonra kataloglardan seçilen LED'in diğer karakteristikleri ve parametreleri alınmalıdır. Tasarımda en çok kullanılan iki karakteristik akım – gerilim karakteristiği ve ışıma diyagramıdır. LED'in önemli parametreleri ise LED'in nominal akımı, ışık şiddeti, eşik gerilimidir. Bu çalışmada kullanılan LED'in önemli karakteristikleri ve parametreleri ek1'de verilmiştir.

#### 4.2.2. Işın verici devresinin analizi

Devre tasarımında yapılacak diğer bir işlem darbeli akımın ve ışık şiddetinin belirlenmesidir. LED'e uygulanan darbeli akımın şekli Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 LED'e uygulanan darbeli akım.

LED'den akan akımın ortalama değeri darbe süresi / periyot oranı ile belirlenir.

$$I_{ort} = I_m \frac{t_d}{T}$$

Burada,  $I_m$ , darbeli akımın maksimum değeri,  $T$  darbenin periyodudur. Ortalama akımın değerini LED'in nominal akımına eşit kabul edersek ( $I_{ort}=I_N$ ) LED üzerinden akan akımın maksimum değeri,

$$I_m = I_N \frac{T}{t_d}$$

şeklinde olur. LED'in ışın şiddeti ise,

$$P(t) = K.I(t) = K.I_N \frac{T}{t_d}$$

olur. Burada  $K$ , LED'in akımı ışına dönüştürme katsayısıdır.

Devrede kullanılan LED 100mA'de 6mW şiddetinde ışık yaymaktadır. Böylece bu LED'in akımı ışına çevirme katsayısı,

$$K = \frac{6mW}{100mA} = 0,06W / A$$

olur.

Hesaplanması gereken diğer bir parametre iletişim mesafesidir. Fotoalıcıya ulaşan ışın şiddeti,

$$P_{FA} = \frac{P_{LED}}{L^2} = \frac{K \cdot I_N \cdot t_d / T}{L^2}$$

formülü ile hesaplanır.

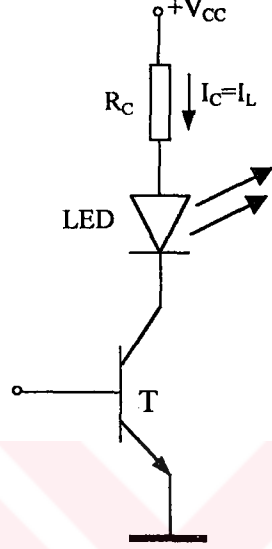
İletişim mesafesi ise,

$$L = \sqrt{\frac{P_{LED}}{P_{FA_{min}}}}$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $P_{FA_{min}}$ , fotoalıcının algılayabileceği minimum ışık şiddetidir. Bu değer fotoalıcının katalog bilgilerinden alınabilir. Devrede kullanılan fotoalıcının algılayabileceği minimum ışık şiddeti,  $P_{FA_{min}} = 0,01mW$ 'dir ( Musayev ve Tekin 1999 ).

Sonuç olarak sistemin iletişim mesafesi belli ise, fotoalıcının algılayabileceği minimum ışık şiddeti belli olduğundan yukarıdaki formülden LED'den yayılan ışının şiddeti belirnebilir. Buradan da LED'i besleyecek darbeleri akımın darde süresi, boşluk süresi ve tepe değeri belirlenir. Ortam kayıplarının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu dalga boyunda çalışıldığından yukarıdaki hesaplamalarda ortamın etkisi dikkate alınmamıştır.

Tasarlanan sistem darbeli modda çalıştığından bir elektronik anahtara ihtiyaç vardır. Anahtar elemanı olarak bipolar tranzistör, FET veya MOSFET kullanılabilir. Bu tez çalışmasında bipolar tranzistör kullanılmıştır. Kullanılan tranzistör doyumda ( anahtar rejiminde ) çalıştırılmaktadır. Şekil 4.6'da verici devresinin ışın verici kısmı gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Verici devresinin ışın veren kısmı.

Bu devrede akım belirleyici direncin değeri,

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{LED}}{I_{LED}}$$

şeklindedir.

Hesaplanan akımı sağlayan ve gerekli hızda açılıp kapanan tranzistör seçilir. Katalogdan bu tranzistörün  $h_{fe}$  ve  $h_{ie}$  değerleri bulunur. Daha sonra baz direncinin değeri hesaplanır. Tranzistörün kazancı,

$$K_T = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

şeklinde alınırsa tranzistörü doyuma götüreceğ baz direncinin değeri hesaplanır.

$$I_B = \frac{I_C}{K_T}$$

Bir önceki kontrol devrenin çıkışında elde edilen işaretin genliği  $V_{\max K}$  olarak alınırsa, baz direncinin değeri,

$$R_B = \frac{U_{\max K}}{I_B}$$

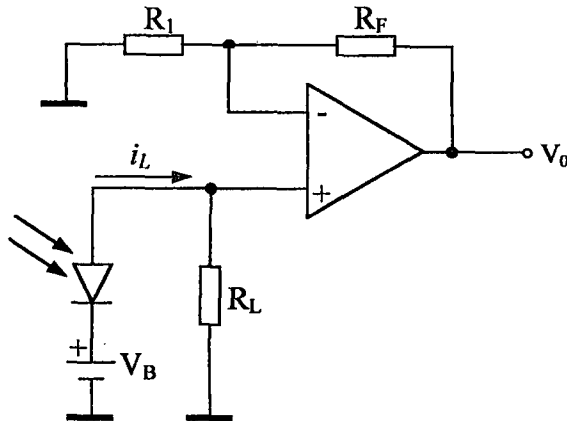
olarak bulunur. Tranzistör doyma rejiminde çalıştığından dolayı baz gerilimini hesaba katmıyoruz.

Verici devresinin tamamı Şekil 4.7'de gösterilmiştir. R1 ve C1 değerleri devrede kullanılan fotoalıcının zaman sabitinin üç katı olacak şekilde seçilir.

#### 4.3. Fotoalıcı devresinin tasarımı

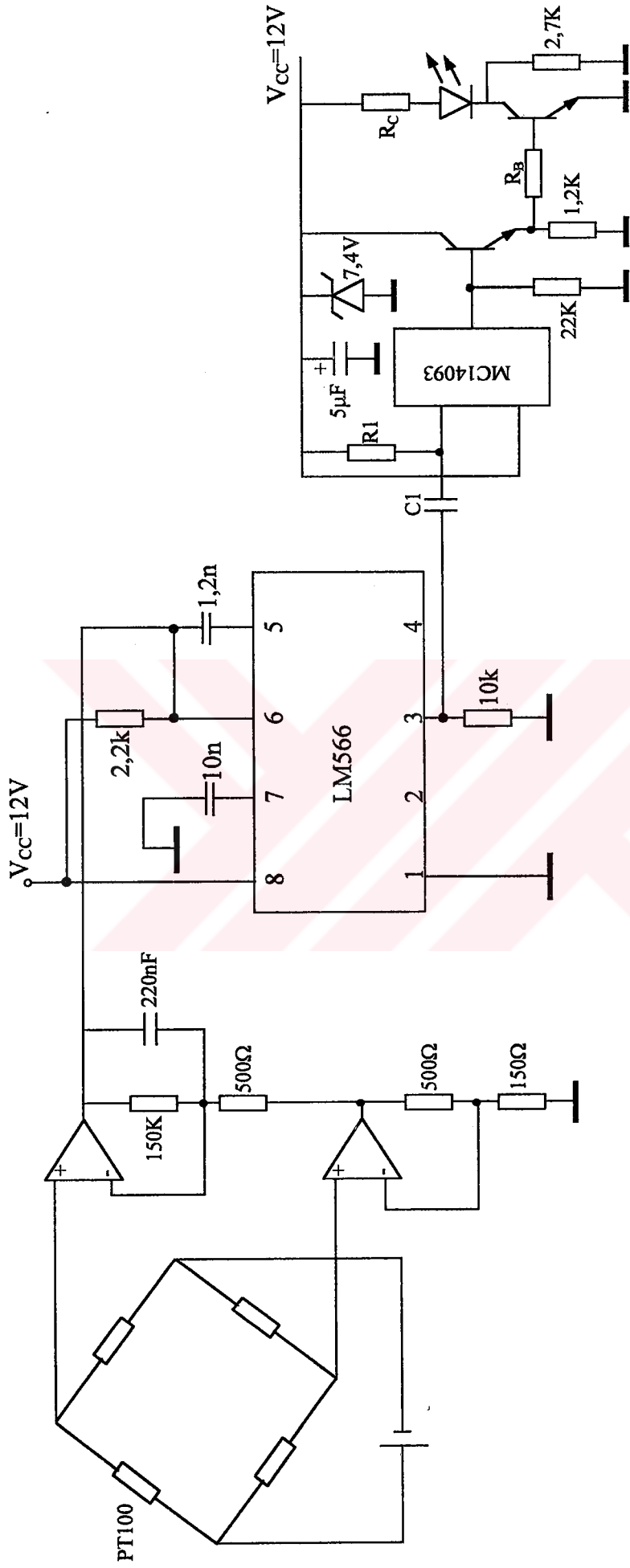
Fotoalıcı devresinin tasarımında ilk olarak sisteme uygun fotoalıcının seçilmesi gerekir. Çok çeşitli sayıda fotoalıcı vardır. Bunların içinden sisteme uygun fotoalıcı seçilmelidir. Bu tez çalışmasında fotoalıcı olarak fotodiyot kullanılmıştır. Fotodiyot, fotoalıcı olarak en çok kullanılan elemandır. Hız ve sıcaklık katsayısı bakımından oldukça uygun bir elemandır. Bu çalışmada kullanılan fotodiyodun karakteristik özellikleri ek2'de verilmiştir

Şekil 4.8'de sistemde kullanılan fotoalıcı devresi gösterilmiştir. Bu devre fotoalıcı devresi olarak çok kullanılan klasik bir devredir.



Şekil 4.8 Sistemde kullanılan fotoalıcı devresi.





Şekil 4.7 verici devresi.

Devrenin ıkış işaretinin ifadesi,

$$V_0 = i_L \cdot R_L \frac{R_F + R_1}{R_1}$$

şeklindedir.



## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında kısa mesafeli iletişim sisteminin geliştirilmesi ve tasarımı verilmiştir. Optoelektronik sistemin genel blok şeması geliştirilmiş ve iletişimi gerçekleştirmek için gerekli işlemler belirlenmiştir.

Optoelektronik iletişim sisteminin geliştirilmesi için sistemi oluşturan elemanların seçilmesine ve analizine ihtiyaç vardır. Bunun için ışın vericiler ve fotoalıcılar araştırılmıştır. Optoelektronik sistemlerde ışın verici olarak LED'ler ve lazerler, fotoalıcı olarak da genellikle fotodiyotlar kullanılmaktadır. Işın vericilerin ve fotoalıcıların yapıları ve çalışma prensipleri incelenmiştir.

Tasarlanan sistemde analog işaret iletilmiştir. Analog işaret kaynağı olarak sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Dolayısıyla sıcaklık sensörleri de incelenmiştir. Sıcaklık sensörlerinden PT100, termokuplör ve optoelektronik osilatör araştırılmıştır. Optoelektronik osilatör bir sıcaklık sensörü olarak kullanılabilir. Sıcaklığı direkt darbe / boşluk oranına çevirmektedir. Bu da devreyi basitleştirmektedir. Optoelektronik osilatörün devresi geliştirilmiş ve gerekli denemeler yapılmıştır.

Işın verici olarak LED seçilmiştir. Işın verici devresi geliştirilmiş ve devrenin analizi yapılmıştır. Işın verici darbeleri rejimde çalıştırılmıştır. LED sürücü olarak bipolar tranzistör kullanılmıştır.

Fotoalıcı olarak Silisyum fotodiyot seçilmiştir. Işın verici ile fotoalıcının spektrumları uygun olacak şekilde seçim yapılmıştır. Fotosinyalin kuvvetlendirilmesi için opamp kullanılmıştır.

Kısa mesafeli optoelektronik sistemin şeması geliştirilmiş ve tasarımı yapılmıştır. Devrenin analizi yapılmıştır.

Işın verici ile fotoalıcı arasındaki mesafenin belirlenmesi için gerekli denklemler çıkartılmıştır. Bu mesafeyi artırma yolları araştırılmıştır.

Tasarlanan devre denenmiştir.

**KAYNAKLAR**

- HAWKES, J. ve LATİMER, I. 1995. Lasers Theory and practice. Prentice Hall, UK, 520 p.
- HECHT J. April 1992. Semiconductor lasers shine out. Electronics World, 302 – 305.
- HİCKMAN I. November 1995. Reflections on optoelectronics. Electronics World, 970 – 974.
- LİNES R. February 98. Sensing temperature. ElectronicsWorld, 165 – 171.
- LİU K. ve Chou Y. November 1995. RF interference effects on PIN photodiodes. IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility Vol. 37, No:4, 589 –592.
- MUSAYEV, E., TEKİN, İ., 1999. Darbenin Yükselen ve Düşen Kenarlarından Optik İşaret Oluşturma Prensipleri. 1999 IEEE Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı. Ankara, 16 – 19 Haziran 1999,
- MUSAYEV, E., TEKİN, İ., 1999. Optoelektronik Transmitter – Receiver Sistemi. Elektrik – Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi 6 – 12 Eylül 1999.
- MUSAYEV, E., TEKİN, İ., 1999. LED – Fotodirenç Çifti İle Tasarlanmış Optoelektronik Osilatör. Fen ve Mühendislik Dergisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, cilt:1 sayı:2, Mayıs 1999, 59 – 69.
- MUSAYEV, E., ADIŞEN, Ö., TEKİN, İ., 1998. Lazer Işının Ulaşım Mesafesinin Belirlenmesi. Bursa V. Bilgisayar – Haberleşme Sempozyumu. Bursa, 18 – 22 Kasım 1998,
- MUSAYEV, E., ÖZÜTÜRK, E., TEKİN, İ., 1998. Açık Optik Kanallı Optoelektronik Sistemler. Çukurova Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği 10. Kuruluş Yıldönümü Sempozyumu.
- MUSAYEV, E., ADIŞEN, Ö., TAN, C. Z., Kızılötesi Kablosuz Haberleşme Sistemi. 4. Bilgisayar – Haberleşme Sempozyumu. 11 – 15 1996, Bursa, 109 – 112.
- MUSAYEV, E., 1996. Optoelektronik. Uludağ Üniversitesi Basımevi.
- SİNGH, J. 1996. Optoelectronics. The McGraw-Hill, Singapore, 537 p.
- UIGA, E. 1995. Optoelectronics. Prentice Hall, New Jersey, 367 p.
- ZORY, P. S. 1993. Quantum Well Lasers. Academic Press, San Diego, 505p.
- WOOD, D. 1994. Optoelectronics Semiconductor Devices. Prentice Hall, UK, 564 p.

EK1

## GaAs-IR-Lumineszenzdiode

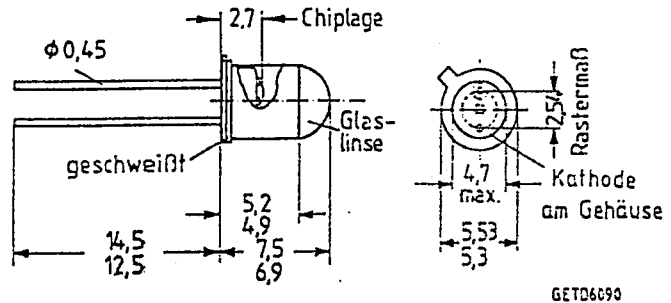
### Wesentliche Merkmale

- SFH 400, SFH 401 und SFH 402 unterscheiden sich durch die Abstrahlcharakteristiken (Halbwinkel SFH 400:  $\pm 6$  Grad, SFH 401:  $\pm 15$  Grad, SFH 402:  $\pm 40$  Grad)
- GaAs-IR-LED, hergestellt im Schmelz-epitaxieverfahren
- Abgegebene Strahlung liegt im nahen Infrarotbereich
- Kathode galvanisch mit dem Gehäuseboden verbunden
- Hoher Wirkungsgrad
- Hohe Zuverlässigkeit
- Lange Lebensdauer
- SFH 400/401: hohe Strahlstärke durch enge Bündelung
- SFH 402: großer Öffnungskegel
- Hohe Impulsbelastbarkeit
- Gruppiert lieferbar
- SFH 400: Gehäusegleich mit SFH 216, SFH 480
- SFH 401: Gehäusegleich mit SFH 481, SFH 212, BPX 43, BPY 62
- SFH 402: Gehäusegleich mit SFH 482, BPX 38, BPX 65, BPX 66

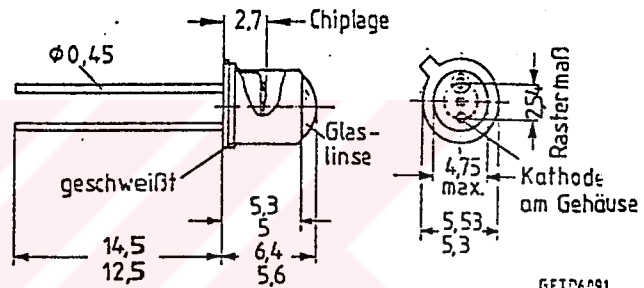
### Anwendungen

- Lichtschranken für Gleich- und Wechsellichtbetrieb
- IR-Fernsteuerungen
- Industrieelektronik
- »Messen/Steuern/Regeln«

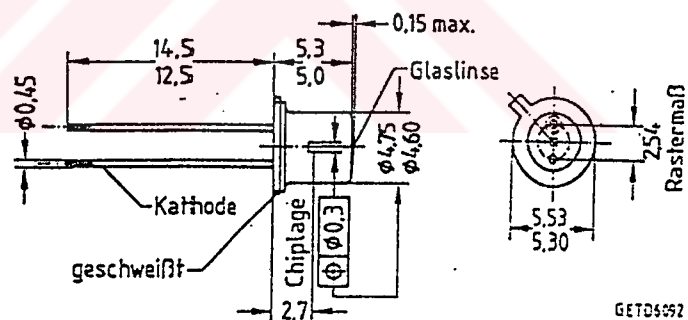
SFH 400  
SFH 401  
SFH 402



GETD6690



GETD6691



GETD6692

Gehäusebauform: 18 A3 DIN 41 876 (TO 18), Glaslinse, hermetisch dichtes Gehäuse, Anschluß im 2,54-mm-Raster ( $\frac{1}{10}$ " )

Typ	Bestellnummer
SFH 400-2	Q62702-P783
SFH 400-3*	Q62702-P784
SFH 401-2	Q62702-P786
SFH 401-3	Q62702-P787

Typ	Bestellnummer
SFH 401-4*	Q62702-P2014
SFH 402-2	Q62702-P789
SFH 402-3*	Q62702-P790

\*) Eine Lieferung in dieser Gruppe kann nicht immer sichergestellt werden, da Ausbeuteschwankungen nicht vorhersehbar sind. Wir behalten uns in diesem Fall die Lieferung einer Ersatzgruppe vor.

Grenzwerte ( $T_C = 25^\circ$ )

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebs- und Lagertemperatur	$T_{op}; T_{stg}$	-55...+100	$^\circ\text{C}$
Sperrschichttemperatur	$T_j$	100	$^\circ\text{C}$
Sperrspannung	$V_R$	5	V
Durchlaßstrom	$I_F$	300	mA
Stoßstrom, $t_p = 10 \mu\text{s}$ , $D = 0$	$I_{FSM}$	3	A
Verlustleistung	$P_{tot}$	470	mW
Wärmewiderstand	$R_{thJA}$ $R_{thJC}$	450 160	K/W K/W

Kennwerte ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Wellenlänge der Strahlung, $I_F = 100 \text{ mA}$ , $t_p = 20 \text{ ms}$	$\lambda_{peak}$	$950 \pm 20$	nm
Spektrale Bandbreite bei 50% von $I_{max}$ , $I_F = 100 \text{ mA}$ , $t_p = 20 \text{ ms}$	$\Delta\lambda$	55	nm
Abstrahlwinkel			
SFH 400	$\varphi$	$\pm 6$	Grad
SFH 401	$\varphi$	$\pm 15$	Grad
SFH 402	$\varphi$	$\pm 40$	Grad
Aktive Chipfläche	$A$	0,25	$\text{mm}^2$
Abmessungen der aktiven Chipfläche	$L \times B$	$0,5 \times 0,5$	mm
Abstand Chipoberfläche bis Gehäuseoberfläche			
SFH 400	$H$	4,0...4,8	mm
SFH 401	$H$	2,8...3,7	mm
SFH 402	$H$	2,1...2,7	mm
Schaltzeiten, $I_e$ von 10% auf 90% und von 90% auf 10%, bei $I_F = 100 \text{ mA}$ , $R_L = 50 \Omega$	$t_r, t_f$	1	$\mu\text{s}$
Kapazität, $V_R = 0 \text{ V}$ , $f = 1 \text{ MHz}$	$C_O$	40	pF
Durchlaßspannung			
$I_F = 100 \text{ mA}$ , $t_p = 20 \text{ ms}$	$V_F$	1,30 ( $\leq 1,5$ )	V
$I_F = 1 \text{ A}$ , $t_p = 100 \mu\text{s}$	$V_F$	1,90 ( $\leq 2,5$ )	V
Sperrstrom, $V_R = 5 \text{ V}$	$I_R$	0,01 ( $\leq 1$ )	$\mu\text{A}$
Gesamtstrahlungsfluß, $I_F = 100 \text{ mA}$ , $t_p = 20 \text{ ms}$	$\Phi_e$	8	mW
Temperaturkoeffizient von $I_e$ bzw. $\Phi_e$ , $I_F = 100 \text{ mA}$	$TK_I$	-0,55	%/K
Temperaturkoeffizient von $V_F$ , $I_F = 100 \text{ mA}$	$TK_V$	-1,5	mV/K
Temperaturkoeffizient von $\lambda$ , $I_F = 100 \text{ mA}$	$TK_\lambda$	+0,3	nm/K

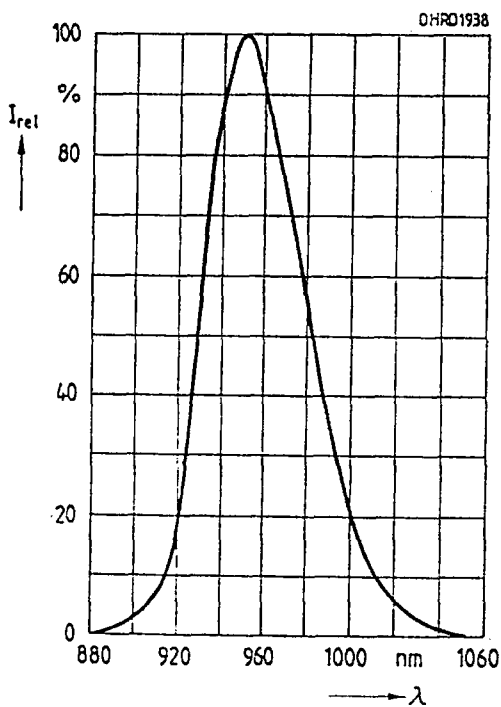
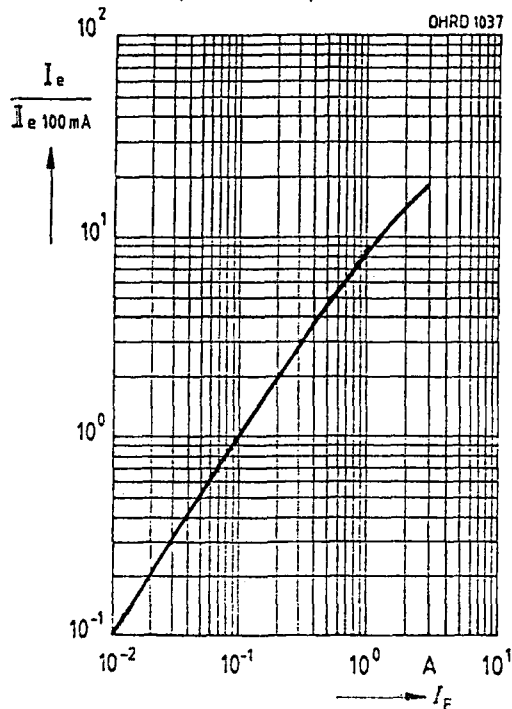
## SFH 400, SFH 401, SFH 402

Strahlstärke  $I_e$  in Achsrichtunggemessen bei einem Raumwinkel  $\Omega = 0,01$  sr

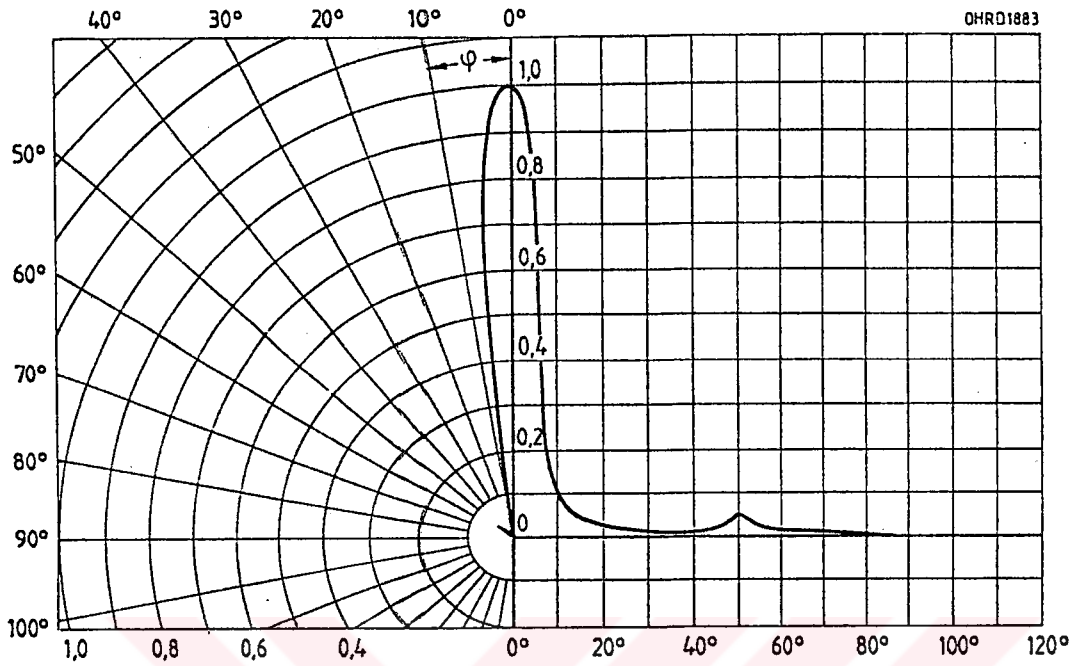
Bezeichnung	Symbol	Werte							Einheit
		SFH 400-2	SFH 400-3	SFH 401-2	SFH 401-3	SFH 401-4	SFH 402-2	SFH 402-3	
Strahlstärke $I_F = 100$ mA, $t_p = 20$ ms	$I_{e\min}$	20	32	10	16	25	2,5	4	mW/sr
	$I_{e\max}$	40	—	20	32	—	5	—	mW/sr
Strahlstärke $I_F = 1$ A, $t_p = 100$ $\mu$ s	$I_{e\text{typ.}}$	250	320	120	190	250	30	40	mW/sr

## Relative spektrale Emission

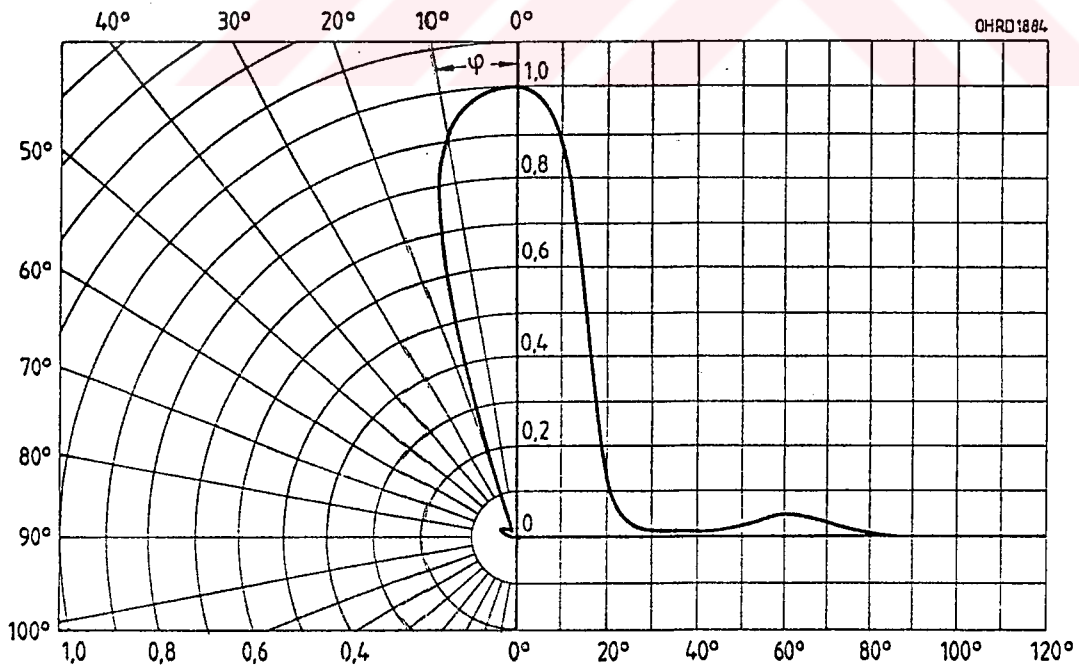
$I_{\text{rel}} = f(\lambda)$

Rel. Strahlstärke  $\frac{I_e}{I_{e 100 \text{ mA}}} = f(I_F)$ Einzelpuls,  $\tau = 20$   $\mu$ s

Abstrahlcharakteristik  $I_{rel} = f(\varphi)$   
SFH 400



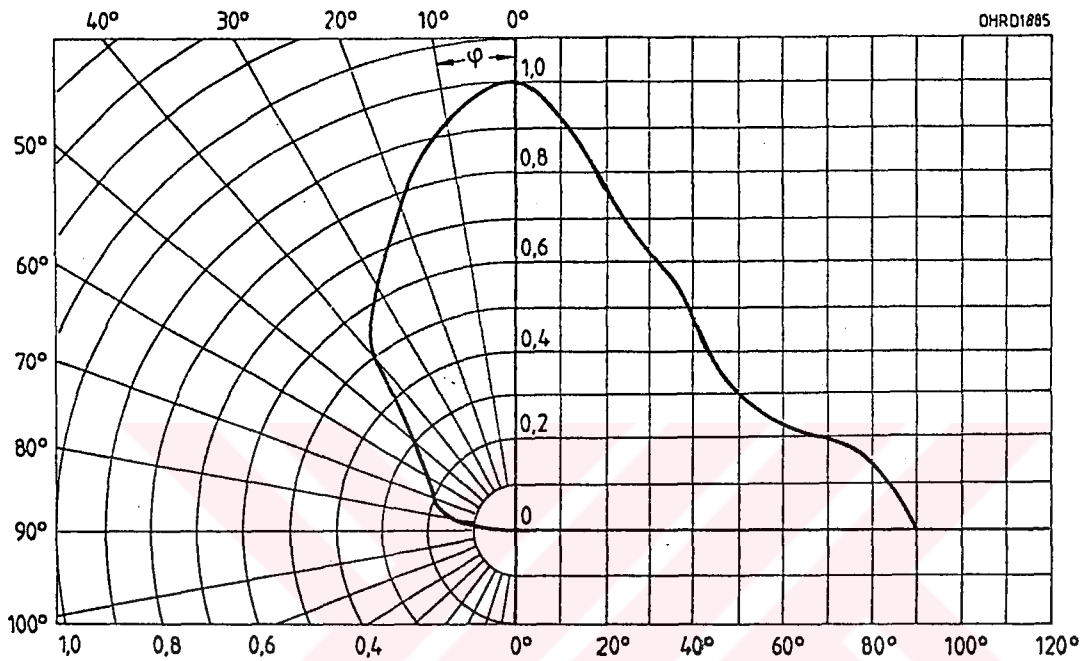
Abstrahlcharakteristik  $I_{rel} = f(\varphi)$   
SFH 401



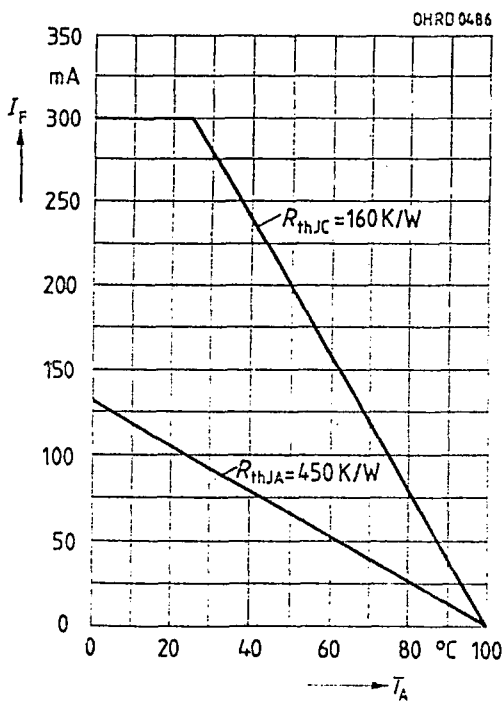


SFH 400, SFH 401, SFH 402

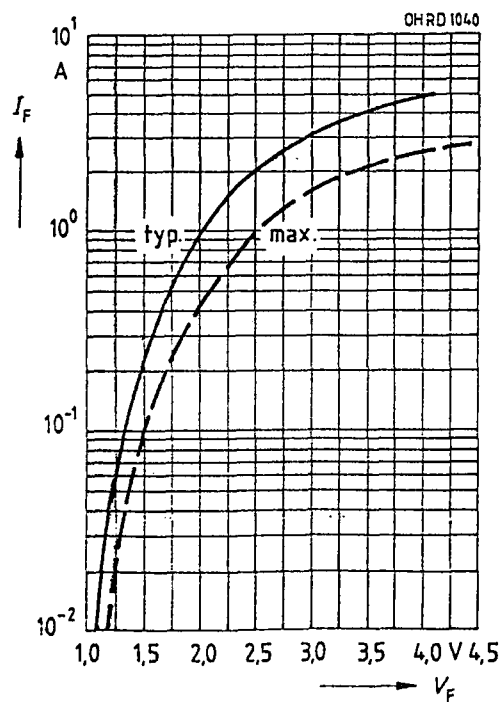
Abstrahlcharakteristik  $I_{rel} = f(\varphi)$   
SFH 402



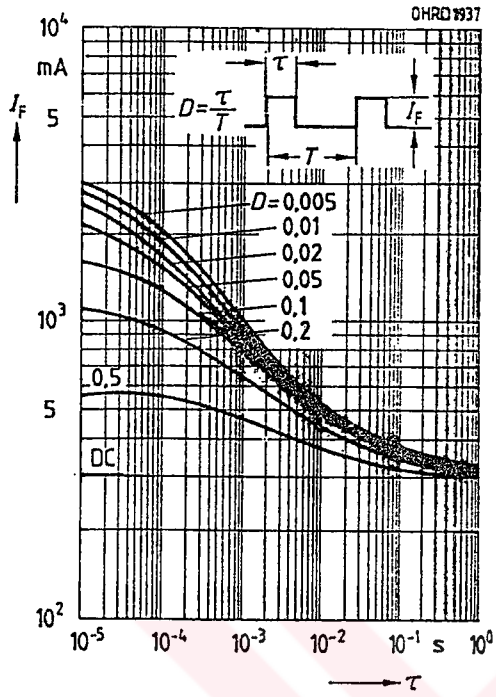
Maximal zulässiger Durchlaßstrom  
 $I_F = f(T_A)$



Durchlaßstrom  $I_F = f(V_F)$



## Zulässige Impulsbelastbarkeit

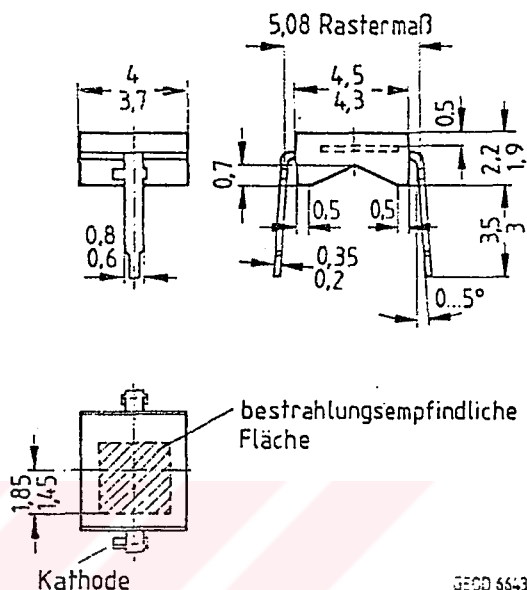
 $I_F = f(t)$ ,  $T_C = 25^\circ\text{C}$ ,Tastgrad  $D = \text{Parameter}$ 

## Silizium-PIN-Fotodiode mit Tageslichtsperrfilter, speziell für den Wellenlängenbereich 830–880 nm

BPW 34 FA

### Wesentliche Merkmale

- Silizium-PIN-Fotodiode in Planartechnik
- N-Si-Substrat: Anode = Chipoberseite, Kathode = Chipunterseite
- Für Diodenbetrieb (mit Sperrspannung) und Elementbetrieb geeignet
- Hohe Zuverlässigkeit
- Keine meßbare Alterung
- Geringes Rauschen
- Hohe Leerlaufspannung bei Elementbetrieb
- Hohe Packungsdichte
- Hohe Grenzfrequenz
- Kurze Schaltzeit
- Geringe Kapazität
- Hohe Fotoempfindlichkeit
- Weiter Temperaturbereich
- Geeignet im Bereich des nahen Infrarots



9500 6643

Gewicht etwa 0,1 g

### Anwendungen

- IR-Fernsteuerung von Fernseh- und Rundfunkgeräten, Videorecordern, Gerätefernsteuerung
- Lichtschranken für Gleich- und Wechsellichtbetrieb

**Gehäusebauform:** Leiterbandgehäuse, schwarzes Epoxy-Gießharz, Lötspieße im 5,08-mm-Raster ( $\frac{2}{10}$ " )

**Kathodenkennzeichnung:** Nase am Lötspieß

Typ	Bestellnummer
BPW 34 FA	Q62702-P1129

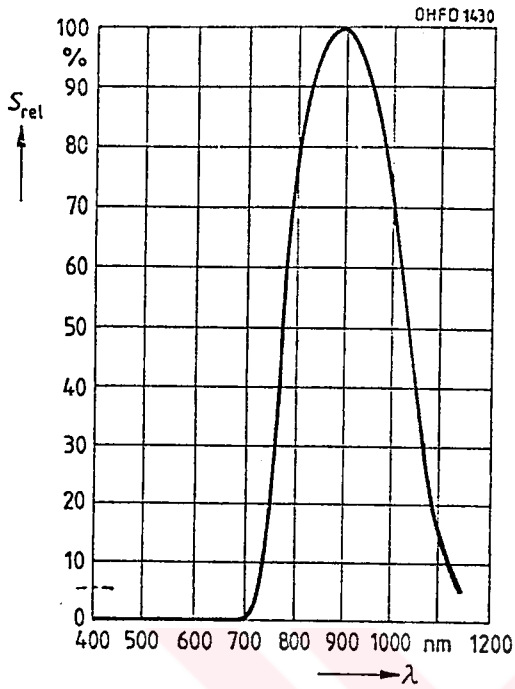
### Grenzwerte

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Betriebs- und Lagertemperatur	$T_{op}; T_{stg}$	-40...+80	°C
Löttemperatur (Lötstelle 2 mm vom Gehäuse entfernt bei Lötzeit $t \leq 3$ s)	$T_s$	230	°C
Sperrspannung	$V_R$	32	V
Verlustleistung	$P_{tot}$	150	mW

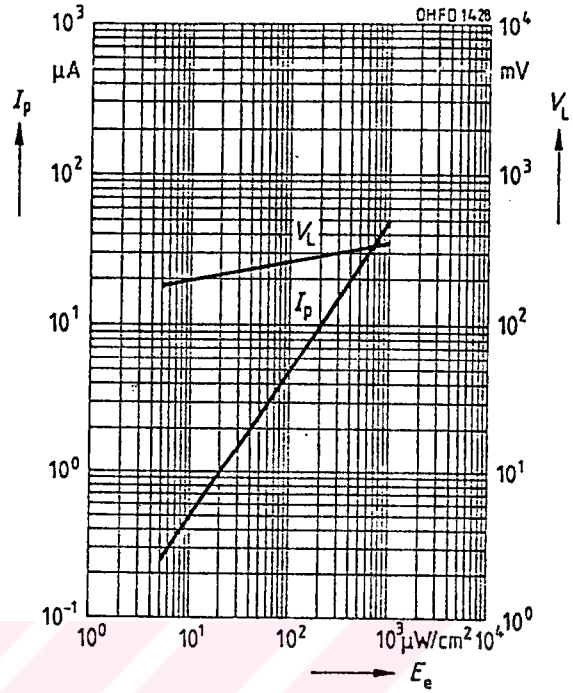
Kennwerte ( $T_A = 25\text{ °C}$ ,  $\lambda = 870\text{ nm}$ )

Bezeichnung	Symbol	Werte	Einheit
Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5\text{ V}$ , $E_e = 0,5\text{ mW/cm}^2$	$S$	25 ( $\geq 20$ )	$\mu\text{A}$
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit	$\lambda_{S\text{max}}$	880	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von $S_{\text{max}}$	$\lambda$	730...1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche	$A$	7,00	$\text{mm}^2$
Abmessungen der bestrahlungsempfindlichen Fläche	$L \times B$	2,65 $\times$ 2,65	mm
Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche	$H$	0,5	mm
Halbwinkel	$\varphi$	$\pm 60$	Grad
Dunkelstrom, $V_R = 10\text{ V}$	$I_R$	2 ( $\leq 30$ )	nA
Spektrale Fotoempfindlichkeit	$S_\lambda$	0,65	A/W
Quantenausbeute	$\eta$	0,93	<u>Elektronen</u> Photon
Leerlaufspannung, $E_e = 0,5\text{ mW/cm}^2$	$V_L$	320 ( $\geq 250$ )	mV
Kurzschlußstrom, $E_e = 0,5\text{ mW/cm}^2$	$I_K$	23	$\mu\text{A}$
Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes $R_L = 50\ \Omega$ , $V_R = 5\text{ V}$ , $\lambda = 850\text{ nm}$ , $I_P = 800\ \mu\text{A}$	$t_r$ , $t_f$	20	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$ , $E = 0$	$V_F$	1,3	V
Kapazität, $V_R = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $E = 0$	$C_0$	72	pF
Temperaturkoeffizient von $V_L$	$TK_V$	-2,6	mV/K
Temperaturkoeffizient von $I_K$	$TK_I$	0,03	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung $V_R = 10\text{ V}$	$NEP$	$3,9 \times 10^{-14}$	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 10\text{ V}$	$D^*$	$6,8 \times 10^{12}$	$\frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

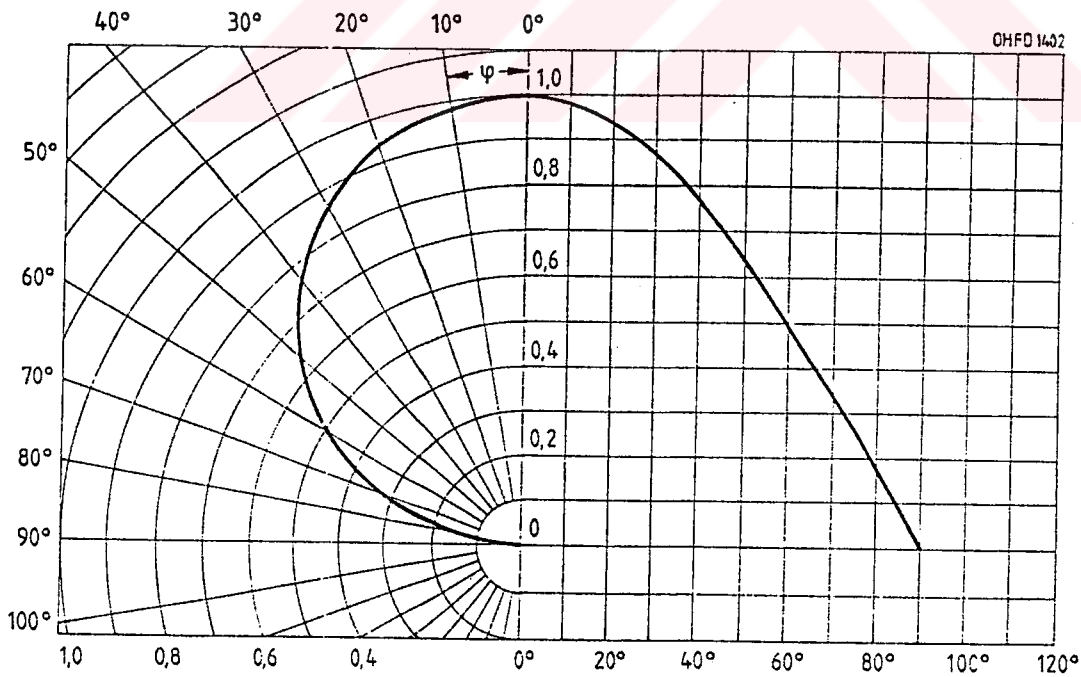
Relative spektrale Empfindlichkeit  
 $S_{rel} = f(\lambda)$



Fotostrom  $I_p = f(E_e)$ ,  $V_R = 5 V$   
 Leerlaufspannung  $V_L = f(E_e)$

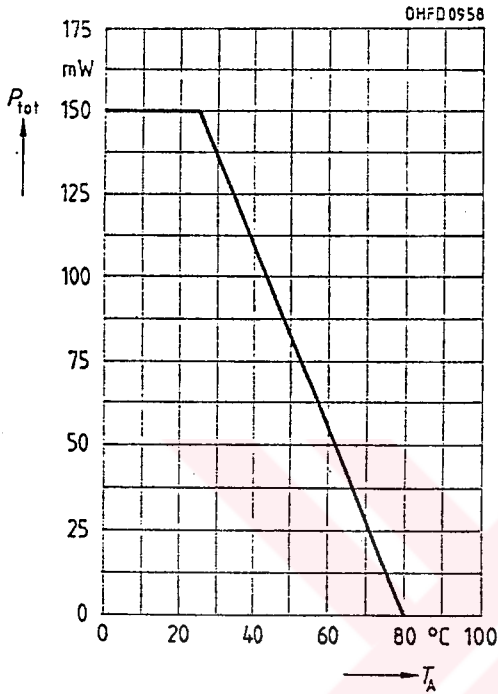


Richtcharakteristik  $S_{rel} = f(\varphi)$

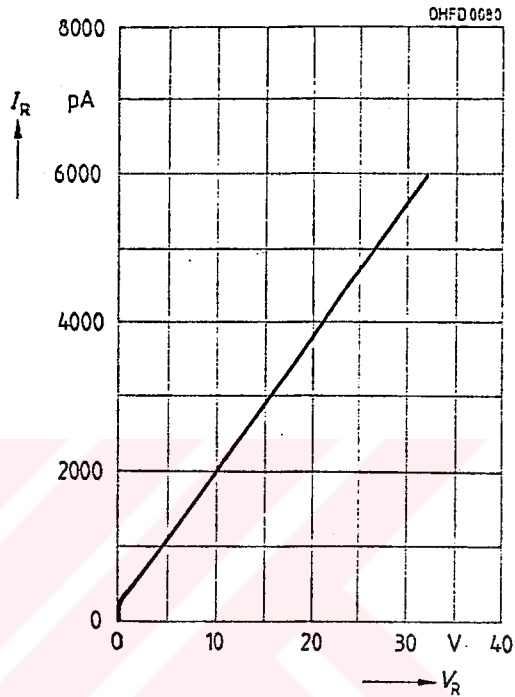


BPW 34 FA

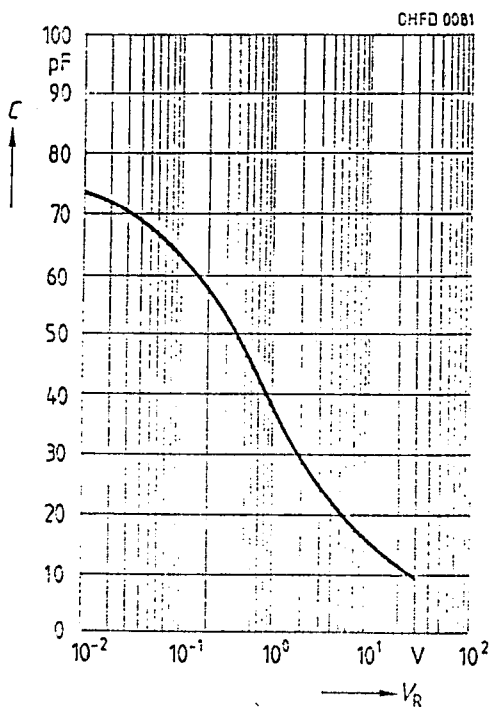
Verlustleistung  $P_{tot} = f(T_A)$



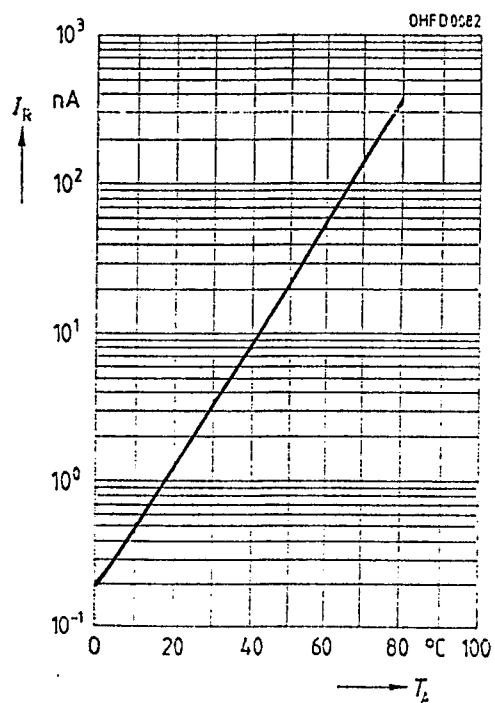
Dunkelstrom  $I_R = f(V_R)$   
 $E = 0$



Kapazität  $C = f(V_R)$   
 $f = 1 \text{ MHz}, E = 0$



Dunkelstrom  $I_R = f(T_A)$   
 $V_R = 10 \text{ V}, E = 0$



## TEŐEKKÖR

Tez alıŐması sırasında her tÖrlÖ yardımcı esirgemiyen değerli hocam Doç. Dr. Eldar MUSAYEV'e çok teŐekkÖr ederim. Ayrıca yardımlarından dolayı oda arkadaŐım ArŐ. GÖr. ŐÖkrÖ ÇOLAK'a da çok teŐekkÖr ederim.



## ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Aydın ilinin Bozdoğan ilçesinde doğmuştur. İlk, orta ve lise eğitimini 1991 yılında Bozdoğan'da tamamlamıştır. 1997 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Kısa bir süre özel sektörde çalıştıktan sonra Uludağ Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine ve aynı zamanda araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Halen bu görevini sürdürmektedir.



**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**DOKÜMANTASYON VE ARŞİV**