

OPTİK FİBER VE OPTİK İLETİŞİM

A. Yeşim DEMİRBURAN,
Doç. Dr. Erdem YAZGAN

H.Ü., Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.

ÖZET

Son yıllarda, optik fiber sistemlerin ve elemanlarının diğer bilinen iletim ortamlarına göre daha düşük güçsüzleşmeye, büyük bandgenişliğine, küçük boyutlara, düşük maliyetlere, yüksek performansa sahip olmaları nedeniyle, üzerlerindeki çalışma ve uygulamalar hızla artmaktadır. Bu yazının başlıca amacı, optik fiber dalga kılavuzları, optik haberleşme sistemleri, bu sistemlerde kullanılan elemanlar, bu elemanların genel özellikleri, birbirleri ile bağlantıları ve optik sistem tasarımı üzerinde okuyucuya bilgi vermektir.

1. GİRİŞ

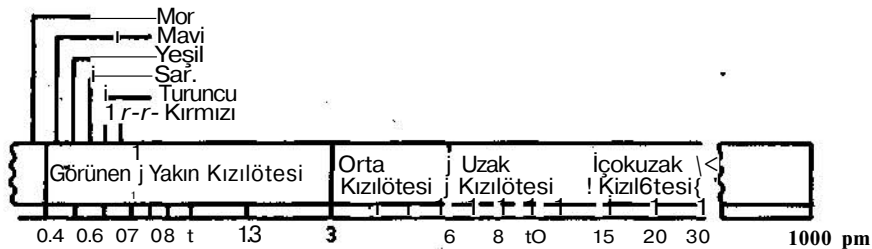
Elektromanyetik spektrumun haberleşme için kullanılan önemli bölgelerinden birisi de optik bölgedir. ^(1,8) Bu bölgede dalga boyu 50 nm (Mor ötesi) ile 100 /im (uzak kızıl ötesi) arasında değişmektedir (Bkz. Şek. 1). Bu bölgede iletim ortamı olarak atmosferik kanal veya dalga kılavuzu kanallarından faydalanılabilir. Atmosferdeki hava koşulları nedeniyle km başına 20-30 dB arasında bir zayıflama meydana gelebilir. Güneş ışınlarının yer küreyi ısıtması ve rüzgârlar sonucu, atmosferdeki tabakalar, bölgeler farklı sıcaklığa ve yoğunluğa sahip olurlar. Bunun sonucunda optik demet pozisyonunda bir belirsizlik ve zayıflama meydana gelir. Bu tür dış etkilerin yok edilebilmesi için optik dalga iletişimde de kılavuzlanmış dalgalar kullanılmasına gidilmiştir. Bunlar birkaç mikron çapında ince bir cam boru çekirdek ile üzeri da-

ha küçük değerlerde kırılma indisine sahip, ince bir cam kılıf ile kaplanmak suretiyle yapılmışlardır. En dışta koruyucu bir plastik tabaka bulunur. Bu konudaki çalışmalar II. Dünya Savaşı sırası ve sonrasında özellikle elektronik kaydedilen hızlı gelişmeler 1959 yılı sonunda laserin gerçekleştirilmesi ile yoğunlaştırılmıştır. İlk zamanlar iletilen ışık dalgaları birkaç metre sonra farkedilemeyecek kadar bir zayıflamaya uğramıştır. Aynı tarihlerde gerekli ışık dalgalarını üretecek ve karşı yönde seçip alabilecek özellikte yarı iletkenler geliştirilmiş değildi.

1960'lı yılların sonunda fiber'in zayıflama karakteristikleri düzeltilmeye başlanmış. 1966*03 yaklaşık 1000 dB kadar olan hat zayıflaması 1970'lerde azaltılarak 10 dB'e kadar indirilmiştir. ^(6,5)

1976'da uzun dalgaboyu olarak 1300 nm'de 0,5 dB/km zayıflamalı ilk fiber elde edildi. O sıralarda 850 nm için birkaç km tekrarlayıcı aralıklı ilk telefon sistemleri denenmekteydi, iki yıl içersinde multimodlu fiber kullanan kablo TV ve trunk telefon sistemleri kuruldu. Bu sırada araştırmalar 0.01 dB/km altında zayıflama gösteren 2-12 Mm dalgaboylarına uygun orta kızıl ötesi cihazlarına yöneldi.

1979'da 850 nm ile yüzlerce multi-mod link kurulurken, 1550 nm ile 0.2 dB/km zayıflama elde edildi.



ŞEKİL 1. Optik spektrum (3)

Ertesi yıl 1300 nm gibi uzun dalgaboyları için InGaAsP kaynaklar ve Ge çığ fotodiyotları ile denemeler yapıldı.

1982 yılına kadar MMF ile 30 km için 90 Mb/s bit hızına erişildi. SMF laboratuvar çalışmalarında birkaç yüz Mb/s hız elde edildi.

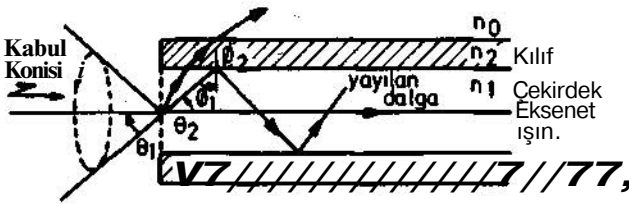
1983 yılında SMF kablo üretimi çok arttı, ilk SMF linkleri İngiltere ve Amerika'da kuruldu.

1984'de 1550 nm için 200 km tekrarlayıcı aralığı ve 420-565 Mb/s bit hızları elde edildi.

Birkaç sene içinde de 1.7 Gb/s ve hatta 2.3 Gb/s bit hızlarına erişilmesi planlanmaktadır.

2. OPTİK FİBERLERDE DALGA YAYILMASI

Şekil 2'deki gibi basit bir fiber kablo kesiti düşünülürse,



n_j = çekirdek kırılma indisi n_j = kılıf kırılma indisi
 n_0 = boşluk kırılma indisi θ_1 = kabul açısı

ŞEKİL 2. Optik Fiber içinde dalga yayılımı

bu kabloda, yayılan ışık dalgasının çekirdek duvarlarında yansımaya uğrayıp ve kılıfa geçmemesi için Shell's kanunu uyarınca

$$\frac{\sin \phi_2}{\sin \phi_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (D)$$

ifadesinden, tam yansıma için $\phi_1 = 90^\circ$ olmalıdır. Bu durumda: Giriş açısı, kritik açıya eşit olur.

$$\phi_1 = \phi_k = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Optik fiberin kılıf ve çekirdeğinin ara yüzlerine gelen dalganın geliş açısı kritik açıya eşit veya büyük ise tam yansıma olur. Yukarıdaki biçimde tekrarlanan yansımalar sonucu, dalga kablonun çekirdek kısmında yayılır³.

3. OPTİK FİBER ÖZELLİKLERİ

Mikrodalga ve radyo dalgaları ile yapılan haberleşme sistemleriyle karşılaştırıldığında ışık dalgası sistemleri bazı ilginç üstünlüklere sahiptir^(6>7)

- X -v 1 fim olan kısa dalga boylan ile, küçük boyutlu, hafif kaynaklar ve detektörler.
- Kullanılan fiber kabloların kesit boyutları ve ağırlıkları bakır kablo hatlara göre çok düşüktür.

- Yüksek band genişliği: Optik fiber kablo diğer hatlara kıyasla daha çok kanal taşıyabilir.
- Elektriksel karışımları yoktur.
- Yüksek güvenilirlik ve dayanıklılık: Patlayıcıların olduğu çevrelerde güvenle kullanılır ve tellerdeki kısa devrelerin oluşturabileceği tehlikelere yol açmaz.
- Yüksek gizlilik kapasitesi: Elektrik veya elektromanyetik gürültü, topraklama, crosstalk veya karışma (jamming) etkilerinden bağımsızdır. Veri iletişimde çok güvenlidir. Bu özelliği askeri iletişim için çok önemlidir.
- Düşük maliyet: Çekirdek ve kılıf tabiatında çok kolaylıkla bulunabilen silikadan yapılmış dielektrik madde dir.
- Düşük kayıp: Optik fiber kablolarında iletim kaybı 4 dB/km'dir. Bu kayıp eşeksenli hatlarda 1GHz de 150 db/0.5 km ve mikroşerit hatlarda ise 10GHz de 150dB/0.4km'dir.
- Uzun tekrarlayıcı aralığı ve yüksek bit hızı: Halen 90-565 Mb/s hız için 50 km tekrarlayıcı aralığı kullanılmaktadır.

4. FİBER KABLO TİPLERİ

Fiber kablonun içinde optik dalganın yayılabilmesi, yayılma biçimi, çekirdek ve kılıfın kırılma indislerine, aynı zamanda çekirdeğe giriş açısı θ_1 (Şek. 2) ile belirlenmektedir. Fiber eksenine θ_1 açısı yaparak giren ışın çekirdek içersinde eksenle θ_2 açısı yaparak yayılır. Işığın giriş açısı θ_1 'den büyük olursa ışık çekirdek içinde yansımaz, kılıf içinde kırılır veya bir diğer olasılıkla eğer giriş açısı yeteri kadar büyük ise, aynı zamanda n_1 ve n_2 yeteri kadar küçükse kılıftan çıkarak ikinci sırada havaya geçer (Bkz. Şekil. 2). Maksimum giriş ve yayılma açıları nümerik açıklıkla (NA) belirlenmiştir.

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2 \quad (3)$$

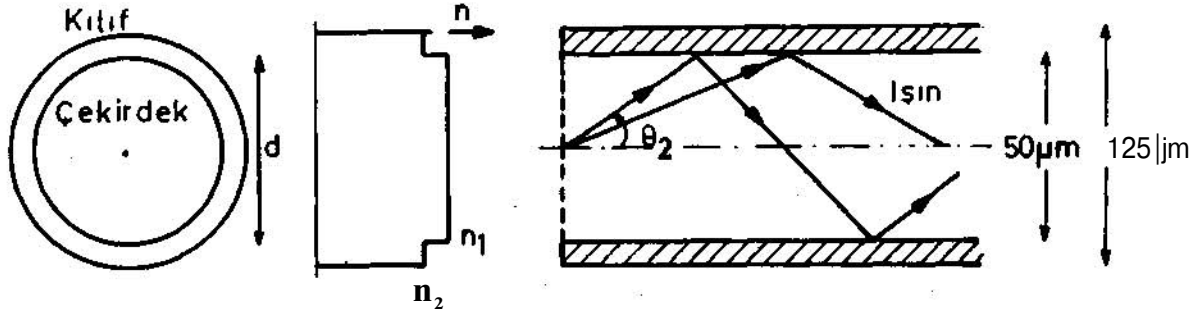
Bu bir elektromanyetik dalgaklavuzu yayılımı olduğu için sadece ışınların θ_2 açısına uygun geldiği bazı modlar yayılabilir.

Işık dalgaboyu X için modların sayısı N şöyle verilir:

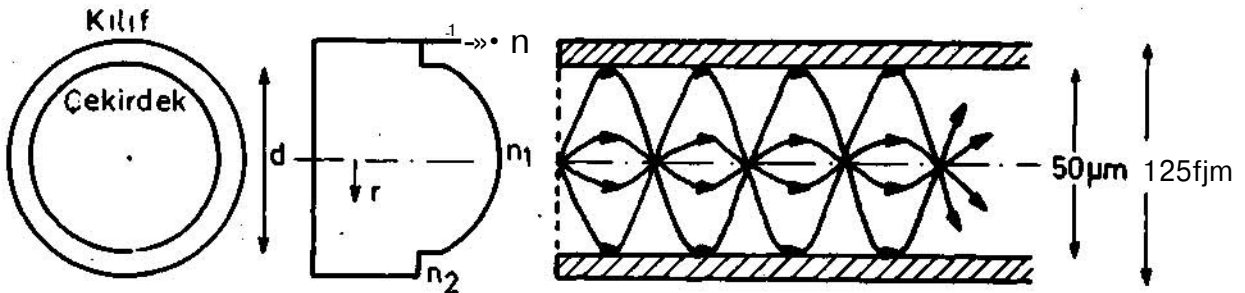
$$N \approx 0.5 \left(\frac{\pi d NA}{\lambda} \right)^2 \quad (4)$$

Böylece kırılma indisleri düzenlenmiş olarak verildiğinde çekirdeğin çapı azaltılırsa daha az sayıda mod yayılır. En sonunda çap ışığın dalgaboyu ile aynı büyüklükte olursa sadece tek-mod yayılır.

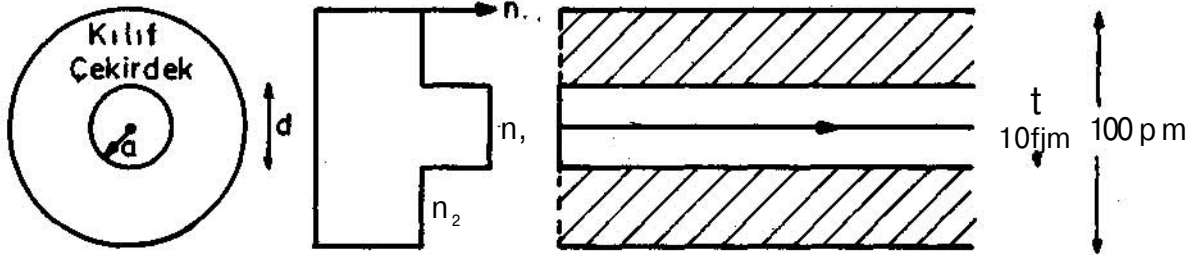
Şek. 3-5'de optik haberleşme için kullanılan fiber tiplerinin en yaygın üçü görülmektedir⁽⁸⁾



ŞEKİL 3. Basamak indisli çok-modlu fiber



ŞEKİL 4. Artan indisli çok-modlu fiber



ŞEKİL 5. Basamak indisli tek-mod fiber

Şek. 4'deki yapı bir tek-modlu ve çok-modlu fiberin en iyi özelliklerine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durumda çekirdek artan indise sahiptir ve artan indis çekirdeğin merkezinde maksimum değer olan $r=0$ 'den ara yüze doğru azalır.

$$(n_1^2 - NA^2 \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha_0})^{1/2}, r \leq a \quad (5)$$

Burada α_0 sabit ve saptanmış nümerik bir değerdir.

Işımların farklı modlarda gösterimi Şek. 4'de belirtilmiştir. Bu fiberler, ışığın uyjun giriş açısı ile girmesi için çok küçük çaplı çekirdek gerekmeksizin veya çok küçük çekirdeklerle fiberlerin bağlanmasının zorluğu olmaksızın basamak indisli fiberlerden daha düşük mod dağılımı verirler. Artan indisli fiberlerde de normal olarak enerji her zaman ki gibi yüksek nitelikli optik kılıf bölgesi ile çevrelenmiş çekirdekte hapsedilmiştir.

Şek. 5'de gösterilmiş tek-modlu fiberde, çekirdeğin çapı sadece birkaç mikrondur, ışığın dalgaboyu ile karşılaştırılabilir ($a \ll \lambda_0$). Burada da enerjinin önemli kısmı kılıf bölgesinde yayılır. Bu durumda çekirdekte olduğu gibi kılıf içinde materyalin aynı yüksek optik nitelikte olması özellikle önemlidir. Bu tip fiberlerde sadece farklı renklerin yayılma hızlarındaki farklılıklardan dağılıma söz konusudur. Tek-mod fiberlerin dezavantajlarından en önemlisi çok küçük çekirdek çapları nedeniyle kaynağa bağlanmaları ve eklenmelerinde doğan büyük problemlerdir.

5. KABLO TASARIMI VE YAPIMI

Basit bir optik fiber kablo, ışık iletim ortamı olarak kullanılan ve dielektrikten (cam) yapılan bir çekirdek, bunu çevreleyen yumuşak bir cam kılıf ve mekanik koruyucu plastik bir dış tabakadan oluşur.

Optik fiber kablo üretiminde başlıca iki yöntem uygula-

nir: Kimyasal Buharlı Tortulama (CVD) ve Çift Potallı Akıtma (DC)⁽⁸⁾

Kullanılışlarına göre yukarıdaki iki yöntemin de dezavantaj ve üstünlükleri vardır. CVD yöntemi, artan kırılma indisli türden fiber kablo üretiminde kullanılır. Bu tip kablolar bir kilometreden daha uzun mesafeler için (uzun mesafe haberleşme kabloları için) tercih edilir. DC yöntemi ise basamak indisli fiber kablo üretiminde kullanılır. Dolayısıyla bir kilometreden kısa mesafeli kablolar için elverişlidir.

Optik fiber kablo boyutlarını seçerken uzun kablo parçalarının iletim özelliklerini gözönüne almak gerekir. Fiber kablonun zayıflama karakteristikleri, kablo yapımı, ekleme ve yerleştirme esnasında bozulur. Bu bozulma yaklaşık 0.2 dB/km kadar olabilmektedir.

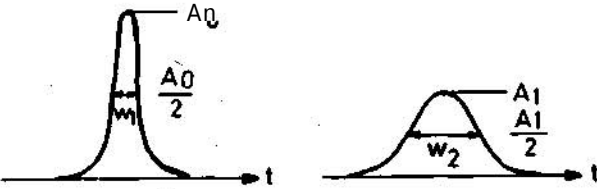
Kablonun içindeki yaydım ve bant genişliği, eklenen kablo uzunluğu ile birlikte, ek yeri kayıplarına ve kullanılan dielektriğin özelliklerine göre hesaplanır.

6. FİBERLERDE BANDGENİŞLİĞİ VE YAYILIM

Fiberlerde enerji bandgenişliği ve ilgili yayılım (dispersion, pulse genişlemesi) iki etken tarafından belirlenir. Bunlar:

a- Çok-mod yayılımı

b- Kullanılan malzeme ve kılavuz yayılımı (spektral yaydım) biçiminde ifade edilirler. Genellikle toplam yayılım etkileri zaman alanında belirlenir ve ölçülerek (ns/km) olarak ifade edilirler. Fiber kabloya giren enerjiyi Gauss dağılımlı darbe biçiminde düşünülürse, 1km sonrada çıkış aynı biçimde, düşük genlikli ve yayılmış bir darbe olacaktır (Şek. 6).



ŞEKİL 6. Fiber kablo giriş ve çıkış darbe biçimleri

w_1 ve w_2 'yi giriş ve çıkış band genişliği olarak düşünülürse, fiberdeki toplam yaydım A_T 'dir.

$$(w_2^2 - w_1^2)^{1/2} \quad (\text{ns}) \quad (6)$$

Toplam yayılım ifadesi, çok-mod yayılımı A_{Tmod} ve spektral yaydım A_{Tsp} değerleri bilinirse aşağıdaki biçimde hesaplanabilir⁽²⁾:

$$(A_{Tmod}^2 + A_{Tsp}^2)^{1/2} > 0.5 \quad (\text{ns}) \quad (7)$$

7. FİBER KABLODA GÜÇSÜZLEŞME

Düşük frekanslarda, cam elyafından yapılmış fiberlerde güçsüzleşmenin üç nedeni vardır. Bunlar Rayleigh saçılma, yutulma ve kırılma kayıplarıdır.

Cam elyafının mikroskopik düzeyde tekbiçimli olmaması ve tek biçimli olmayan kırılma indisli Raleigh saçılmaya neden olur. Böylece ışının birçok yönlerde saçılması enerji kaybına neden olur ve güçsüzleşme X-4 biçimindedir. Fiber içindeki istenmeyen malzeme yutulmaya sebep olur. Genellikle su (OH-iyonları) etkin yutucu olup, optik kayıp eğrisinde 1.25 ve 1.39 μm dalga boylarında büyük zayıflamalara neden olur. 1.7 μm 'nin üzerinde ise, cam içerisindeki SiO_2 moleküllerinin rezonansı nedeniyle, ışık enerjisi yutulmaya başlar. Güçsüzleşme eğrisi haberleşme linklerinde 1.3 μm ve 1.55 μm dalga boyunun tercih edilmesini açıklamaktadır (Şek. 7). Fiber boyunca güç üssel bir biçimde azalır ^

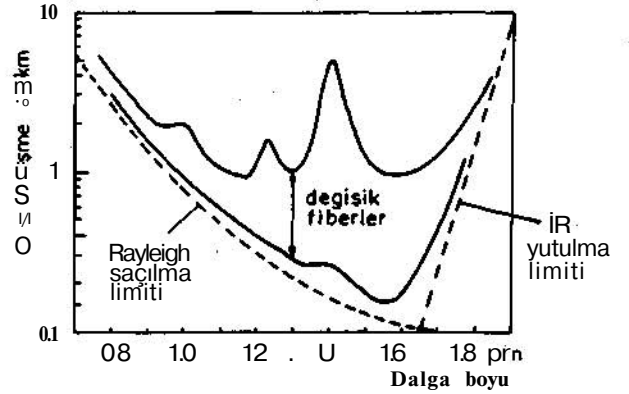
$$P(x) = P_0 \cdot 10^{-ax/10} \quad (8)$$

Burada

a = güçsüzleşme katsayısı (dB/km)

P_0 = girişteki optik güç

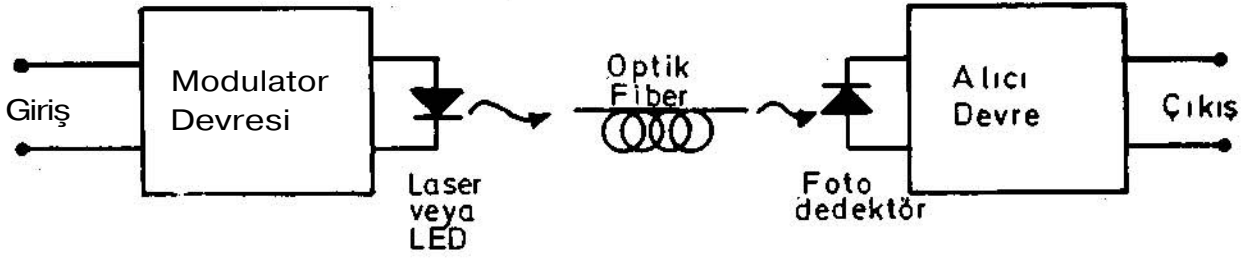
$P(x)$ = girişten x kadar u/aktaki optik güç'ü tanımlamaktadır.



Şekil 7. Fiber - İletim güçsüzleşme sinde dalga boyu etkisi.

8. BASİT BİR OPTİK FİBER SİSTEMİ

Basit bir optik fiber haberleşme sistemi Şek. 8'de görüldüğü gibi ışık kaynaklı bir verici, belli uzunlukta bir fiber hattı ve ışık dedektörlü bir alıcıdan meydana gelmiştir. (3,9-11) $g_0 y |_e$ (jj, s, i temde vericiye uygulanan sinyal analog veya digital olabilir. Giriş sinyali akımındaki değişimler, yine verici içinde bulunan bir optik ışık kaynağı ile modüle edilir. Böylece elektriksel enerjiden optik enerjiye dönüşüm gerçekleşir. Modüle edilmiş ışık fibere gönderilir ve fiberin çekirdek kısmındaki iç yansımalarla alıcıya ulaşır. Alıcıda ise bir dedektör ışık sinyalini karşılar ve onu tekrar elektriksel sinyale çevirir. Bu arada demodülasyon işlemide gerçekleştirilerek sinyal orijinal haline dönüştürülür.



ŞEKİL 8. Optik Fiber haberleşme sistemi

Optik fiber haberleşme sistemleri tasarımı temel olarak:

- a-İstenen bandgenişliğine (BW)
- b-Sinyal-gürültü oranına (SNR)
- c-Terminaller arası uzaklığa
- d-Bilgi kaynağı tipine (dijital veya analog) bağlıdır.

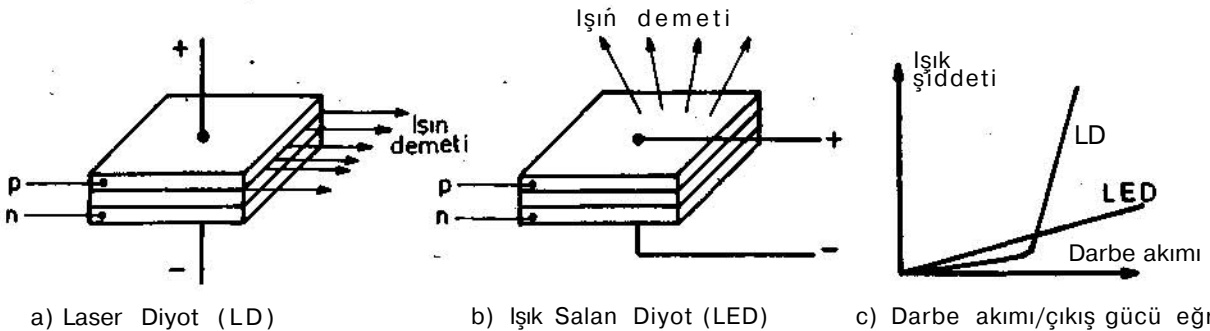
8.1. Işık Kaynakları*¹²⁾

Işık kaynağı olarak ışık salan diyotlar (LED) yâda laser diyotları (LD) kullanılır. Bu kaynaklara gelen elektriksel sinyaller uyumlu ışık demetine dönüştürülürler. Farklı özelliklere sahip LD ve LED'lerin elektrik akımı yönüne göre ışık salma yönleri ve şiddetine göre sağladıkları ışık güçleri Şek. 9'da gösterilmiştir.

LED kullanımında Burrus tipi LED tercih edilir. Çünkü ışık salma oranı diğer LED'lere göre oldukça yüksektir. LED'ler LD'la karşılaştırıldığında daha ucuz, daha kararlı ve ısı değişimlerine daha dayanıklı olduklarından, basit uygulamalarda tercih ediliyorsa, LD'ler daha verimlidir.

Yüksek hızlı mikrodalga uygulamalarında LD'lar kullanılır. GaAlAs ve GaInAsP LD yapılarında yukarıdaki diyotlara benzer biçimdedir. ⁽¹²⁾

Çok küçük boyutları ve yüksek optik kazançları nedeniyle laserler GHz seviyesindeki yüksek frekanslarda doğrudan modüle edilebilirler. Laserin çıkış gücü, enjeksiyon akımının hemen hemen doğrusal bir fonksiyonudur, dolayısıyla laser diyot verilen enjeksiyon akımını modüle edere kolayca optik çıkış modülasyonu sağlanabilir.

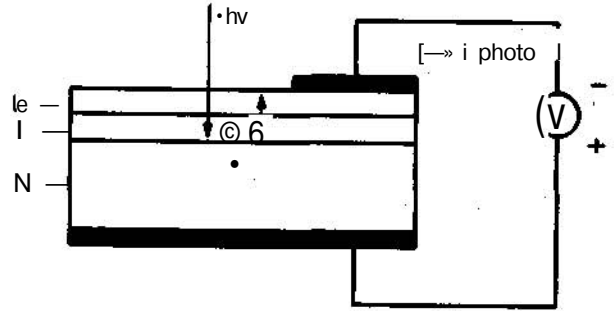


ŞEKİL 9. LD, LED tipi diyot yapısı ve darbe akımı/çıkış gücü eğrileri

8.2. Dedektörler⁽¹²⁾

Fotodedektörler, optik radyasyonun şiddetine orantılı bir akım üreterek optik sinyali demodüle ederler. Bir fotodedektörün en önemli karakteristikleri verim, hız, gürültü ve fiziksel uyumdur. Fotodedektörün hızı bilgi hızını karşılayabilecek kadar yüksek olmalıdır.

Optik fiber sistemlerde kullanılacak en yaygın dedektörler P-N ve APD fotodiyotlardır. P-N, p-i-n ara yüzeyli; APD ise çığ tipi yarı iletkenlerden oluşmuş diyotlardır. Şek. 10'da bir P-N fotodiyot yapısı şematik bir biçimde görülmektedir.



ŞEKİL 10. P-N fotodiyot şematik yapısı

Ters eğilimle durumunda i bölgesi taşıyıcılardan tamamen arındırılır. P-N dedektörler, i bölgesinin tamamen arınması için genelde yalnızca birkaç volt gerekir. Bu durumda i tabakasına gelen bir foton soğurulacak ve bir elektron-hol çifti üretilecektir. Bölgedeki yüksek elektrik alan, elektronları ve holleri N ve P bölgelerine süpürecek, böylece bir akım meydana gelecektir.

8. 3. Bağlantılar, Eklemler ve Bağlaçlar¹³⁾

Her ne kadar oldukça uzun fiberler üretilmekteyse de bağlaçsız ve eklemsiz sistem düşünülemez. Optik kaynaktan, fotodedektörde ve fiberlerin kablo içindeki bitimlerinde bağlantılar gerekir. Kalıcı bağlantılara "eklem", takılıp çıkarılabilir eklemlere ise "bağlaç" denir. Eklemler yapım sırasında ve kablolar hasar gördüğünde veya fiberler kırıldığında gerekir. Bağlaçlar ise terminallerde kullanılır.

Her eklem ve bağlaç zayıflamayı artırıcı bir katkıda bulunur. Bu tür kayıplar izin verilen uyumsuzluk toleransı sınırlarına kadar minimize edilmelidir. Uyumsuzluk giriş gücünün eklem dağılımı, kaynak eklem arasındaki fiber uzunluğu, iki fiberin geometrik ve dalgakılavuz karakteristikleri, NA farklılıkları, çekirdek çapının ve fiberlerin çeşitli, hizalandırılmayışi durumları gibi parametrelere bağlıdır.

9. OPTİK FİBER SİSTEM TASARIMI

öncelikle çalışılacak dalgaboyu belirlenir. Kısa mesafeler için 800-900 nm bölgesi, uzun mesafeler içinse daha düşük zayıflama ve bozulma görülen 1300 nm bölgesi seçilebilir.

Sonra verici, alıcı ve fiber arasındaki performans ilişkileri gözönüne alınarak bu üç blok belirlenir. Genellikle önce ikisi için karakteristikler belirlenip sonra bunlara uygun olarak üçüncüsü için hesap yapılır. Fotodedektör seçilirken en önemli nokta dedektöre düşen minimum güç miktarıdır. PIN daha basit yapılı, sıcaklık değişimleri için daha duyarlı, daha ucuz ve 50 voltun altında beslenmelidir. Halbuki APD daha yüksek gerilim gerektirir ve çok pahalıdır. Ama çok düşük güç seviyeleri algılanabilecekse yüksek duyarlılıkları ve tepkileri nedeniyle APD seçilmelidir.

Kaynak seçerken dikkat edilecek parametreler sinyal bozulması, data hızı, iletim mesafesi ve maliyettir. Laser çıkışının spektral genişliği çok dardır. Bu özellikle kısa dalgaboylarında önemlidir. LED spektral genişliği ve silika fibere ait bozulma karakteristikleri kısa dalgaboylarında data hızı-mesafe değerini 150 (Mb/s) km ile sınırladığıdır. Oysa laserlerle 2500 (Mb/s) km değeri elde edilebilmektedir. Bozulmanın az olduğu 1300 nm bölgesinde ise LED ile 1500 (Mb/s) km ve InGaAsP laser diyotu ile 25 (Gb/s) km değeri aşılabilir.

Laser diyotları LED'e oranla fibere 10-15 dB daha fazla optik güç aktarabilecekleri için tekrarlayıcı aralıkları uzundur. Ama bu avantaj ve düşük bozulma niteliği yüksek maliyet gerektirir. Ayrıca eşik değerini, sıcaklı-

ğın ve eleman yaşlanmasının fonksiyonu olarak kontrol etmeliyiz ve bu durum ek devreler gerektirir.

Fibere gelince, önce tele-modlu veya çok-modlu için karar verilir. Çekirdek profili basamak-indisti veya artan-indisli kimliğinde olmalıdır. Fiber seçimi ışık kaynağının tipine ve izin verilen bozulma miktarına bağlıdır. LED sözkonusu ise çok-modlu fiber kullanılmalıdır. Çünkü tek-modlu fibere daha az güç aktarılabilir. Fibere aktarılan güç, fiberin NA değerine ve çekirdek, kılıf arasındaki kırılma indisi farkına bağlıdır. Fark 0.01 oto NA değeri yaklaşık 0.21'dir. Fark artarsa aktarılan güç de artar, ama bozulma da artar. Halbuki laserle bu sorunlar olmaz, çünkü laser hem tek-modlu hem de çok-modlu fiberle rahatça çalışır. Meselâ laserle ve tek-modlu fiberle 30 (Gb/s) km elde edilmiştir.

Kablolanmış bir fiberin zayıflama karakteristiği incelenirken kablolanma kaybı fiberin kaybına eklenmelidir. Bağlaç, eklem kayıpları ve hatta azda olsa çevreden endüklenen kayıplarda toplam kayba dahil edilmelidir.

10. KAYNAKLAR

- (1) Keiser, G., Optical Fiber Communication», Mc-Graw Hill Int. Book Comp. 1983.
- (2) Henschel, C, Fiber Optics Handbook, Hewlett Packard, 1983.
- (3) liao, S. Y. Microwave Devices and Circuits, Pientice-Hall, 1985.
- (4) Kapron, F. P., "The Evolution of Optical Fiber»" Microwave Journal, s. 111-112, Nisan 1985.
- (5) Dixon, F. W., Montgomery, J. D., "Microwave Fiber Optics Forecast" Microwave Journal, s. 44-58, Nisan 1985.
- (6) Ury, L, "Optical Communication", Microwave Journal, S. 24-34, Nisan 1985.
- (7) Lazay, P. D., Pearson, A. D., "Developments in Single-Mode Fiber Design, Materials and Performance at Bell Laboratories", IEEE Trans. on MTT-30 No; 4, s. 350-357, Nisan 1982.
- (8) Cherin, A. H., An Introduction to Optical Fiber», Mc*GrSw Hill.1985.
- (9) Amnon, Y., Introduction to Optical Electronics, Hblt, Rinehart and Winston, 1976.
- (10) Gowar, J., Optical Communication Systems, Prentice Hall International 1984.
- (11) Heinzmann, P., Meier, T., "Low-cost 2-way Optical Transmission" Comm. Intr. s. 56-63, Andık 1986.
- (12) Lau, K. Y., "Semiconductor Sources and Detectors in Fiber-Optic Systems", Microwave Journal s. 97-107, Nisan 1985.
- (13) Lujendijk, A. I., Khoe G-D, "Single-Mode Fiber Connector Using Core Centered Ferrules", IEEE Trans. on MTT Vol30 No. 10 s. 1561-1568, Kasım 1982.