

# HARİCİ OPTİK GERİBESLEMELİ YARIİLETKEN LAZER DİYOD'UN DİNAMİK KARARLILIĞI İÇİN KRİTİK DEĞERİN BELİRLENMESİ

**Remzi YILDIRIM**

Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Bölümü, Ankara

## ÖZET

Bu çalışmada optik haberleşme sistemlerinde kullanılan optik geribeslemeli yarıiletken lazer diyodun modülasyon altındaki dinamik kararlılık analizi yapılmıştır. Analizde küçük işaret oran eşitliklerinden elde edilen, lazer diyod (LD) transfer fonksiyonu  $H(j\omega_m)$ , optik geribeslemeli LD transfer fonksiyonu  $TF(j\omega_m)$  ve optik geribesleme transfer fonksiyonu  $K(j\omega_m)$ 'nin frekans cevapları, Nyquist kararlılık kriterine göre kompleks düzlemde analiz edilmiştir. Optik geribeslemenin, sistemin kararlılığına olan etkisi ortaya konularak, LD'un kararlı hale getirmek için sönüm (damping) frekansı ve güç yansıtma sabiti (R)'nin kritik değeri belirlenmiştir. Çalışmada güç yansıtma oranı ( $f_{ext} \leq 10^{-4}$ ) olarak alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Lazer diyod, Kararlılık, Geribesleme

## THE DETERMINATION OF A CRITICAL VALUE FOR DYNAMIC STABILITY OF SEMICONDUCTOR LASER DIODE WITH EXTERNAL OPTICAL FEEDBACK

### ABSTRACT

In this study, dynamic stability analysis of semiconductor laser diodes with external optical feedback has been realized. In the analysis the frequency response of the transfer function of laser diode  $H(j\omega_m)$ , the transfer function of laser diode with external optical feedback  $TF(j\omega_m)$ , and optical feedback transfer function  $K(j\omega_m)$  obtained from small signal equations has been accomplished using Nyquist stability analysis in complex domain. The effect of optical feedback on the stability of the system has been introduced and to bring the laser diode to stable condition the working critical boundary range of dampig frequency and reflection power constant (R) has been determined. In the study the reflection power has been taken as ( $f_{ext} \leq 10^{-4}$ ).

**Key Words :** Laser diod, Stability, Feedback

### 1. GİRİŞ

Yarıiletken lazer diyodlar, fiber optik haberleşme, kablolu TV (CATV), optik hissediciler, optik ölçüm sistemleri gibi bir çok uygulamalarda verici kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin güvenilirliği lazer diyodun (LD) kararlılığına bağlıdır. Lazer diyodların karekteristikleri LD dışından LD'ye doğru yansıyan ışımaya karşı duyarlıdır. Bundan

dolayı optik geribeslemeden dolayı oluşan gürültü artışı özellikle fiber optik haberleşme sistemlerinde ve diğer uygulamalarda ciddi problemler oluşturmaktadır.

Lazer diyodun dinamik kararlılık analizi üzerinde bir çok araştırmacı çalışmıştır. Bu çalışmalarda çeşitli düşünceler ortaya çıkmıştır. Lazer diyodun dinamik kararlılığı incelenirken, modülasyon

durumundaki transfer fonksiyonu çıkarılarak analizi yapılır. Glasser (1982), optik geribeslemeli LD'un kararlılık analizini, karakteristik transfer fonksiyonunun Routh kararlılık kriterine göre  $s$  (Laplace) düzleminde tanımlayarak, bu transfer fonksiyonunun sistemi kararsız hale getiren pozitif değerli bir kökün varlığını tesbit etmiştir. Lau et al., (1980) çalışmalarında ise Nyquist C kararlılık kriterine göre karakteristik denklemin köklerini incelememişlerdir. Bu incelemede karakteristik denklemin köklerinin yerine göre karar vererek dinamik yapı altında sistemin kararsız olduğunu sebepleriyle birlikte açıklamışlardır. Bu her iki çalışmada da frekans düzleminde çalışılmamıştır.

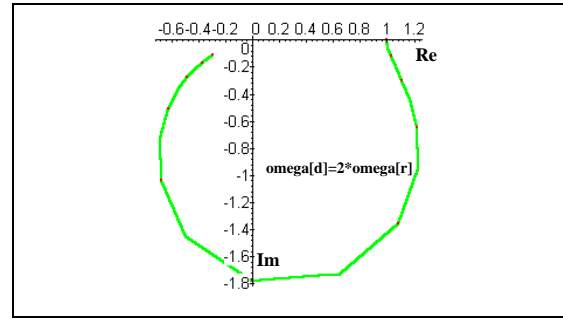
Osmundsen et al. (1983) dinamik kararlılık analizini, harici optik geribeslemeden dolayı oluşan artan kazanç ve faz kaymasına bağlı olarak incelemişlerdir. Bu incelemede artan kazançla bağlı olarak fazın değiştiğini ve faz kaymasının artan kazançtan dolayı oluşan frekans kaymasına neden olduğunu açıklamaktadırlar. Artan kazançtan dolayı taşıyıcı, foton yoğunluğu ve genlikteki değişime sistemi kararsızlığa sürüklemektedir (Dziura and Hall, 1983; Tromborg et al., 1984). Henry and Kazanirov (1986) ve Temkin et al. (1986), LD'un, optik çıkış gücü artırıldığında sistemin kararlılığını kaybettiğini kaos durumunun olabileceğini açıklamışlardır. Mork et al., (1988) lazerin eşik akımı civarında kararlı olduğunu, ancak optik çıkış gücü artırıldığında kararsız hale geldiğini açıklamışlardır. Helms and Peterman (1990) ise küçük işaret analizinde harici optik geribeslemeli düzenin geribesleme durumunu ve harici boşluğun uzunluğuna bağlı olarak, geribeslemenin etkisini incelemişlerdir. Zorabedian (1994) ise kararlılık analizini lazerin elektrik alanının fazına bağlı olarak incelemiştir. Fazın değişmesine neden olan harici boşluk uzunluğu, optik geribesleme yapan aynanın güç yansıtma oran ilişkisini ortaya koymuş ve kararlılık durumunu detaylı incelemiştir.

## 2. ANALİZ

Bu çalışmada lazer diyod transfer fonksiyonu  $H(j\omega_m)$ , harici boşluklu lazer diyod transfer fonksiyonu  $TF(j\omega_m)$  ve geribesleme transfer fonksiyonu  $K(j\omega_m)$  olarak tanımlanmıştır. Analiz için kullanılan lazer diyodun karakteristik özellikleri Helms and Peterman, (1990) tarafından verilmiştir. Lazer diyod transfer fonksiyonu;

$$H(j\omega_m) = \frac{1}{\left(j\frac{\omega_m}{\omega_r}\right)^2 + \frac{j\omega_m}{\omega_d} + 1} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmiştir (Peterman, 1991). İfadedeki  $\omega_m$  modülasyon,  $\omega_r$  gevşeme ve  $\omega_d$  sönüm frekansını temsil etmektedirler. Şekil 1'de  $H(j\omega_m)$  transfer fonksiyonunun Nyquist eğrisi görülmektedir. Bu eğriden de görüldüğü gibi dinamik durumda lazer diyod, Nyquist kararlılık kriterine göre, kararlılık sınır değerinden başlamakta ve modülasyon frekansı arttıkça sınır değeri aşmakta ve kararlılık azalmaktadır. Bu durumda sistemin kararsız olduğu görülmektedir (Yıldırım, 1997a)

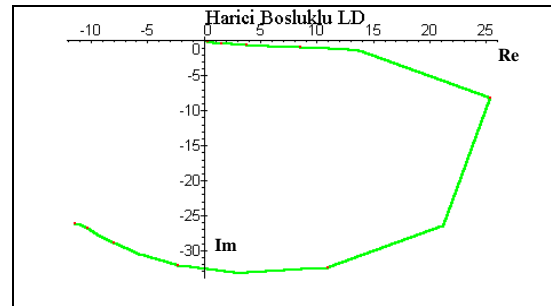


Şekil 1.  $H(j\omega_m)$ 'nin Nyquist eğrisi

Harici boşluklu lazer diyodun küçük işaret eşitliklerinden çıkarılmış transfer fonksiyonu,

$$TF(j\omega_m) = (1 - K(j\omega_m)) \frac{H(j\omega_m)}{1 - K(j\omega_m)H(j\omega_m)} \quad (2)$$

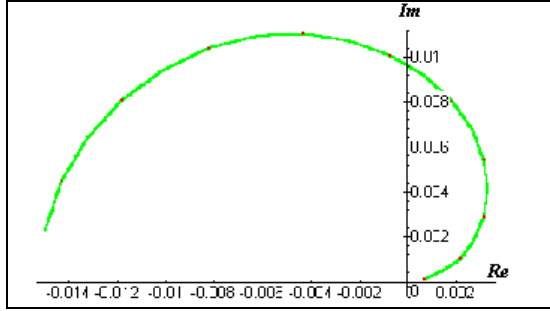
şeklinde verilmiştir (Helms and Peterman 1990). Şekil 2'de  $TF(j\omega_m)$  transfer fonksiyonunun Nyquist kararlılık kriterine göre kompleks düzlemindeki  $f_m \rightarrow \infty$  durumu için eğrisi görülmektedir. Eğriden geribeslemenin kararsızlığı artırdığı görülmektedir. Denklem (2)'de optik geribesleme transfer fonksiyonu;



Şekil 2.  $TF(j\omega_m)$ 'nin Nyquist eğrisi cevabı

$$K(j\omega_m) = j \frac{K_c \sqrt{1+\alpha^2}}{\omega_m} (1 - \exp(-j\omega_m \tau)) \quad (3)$$

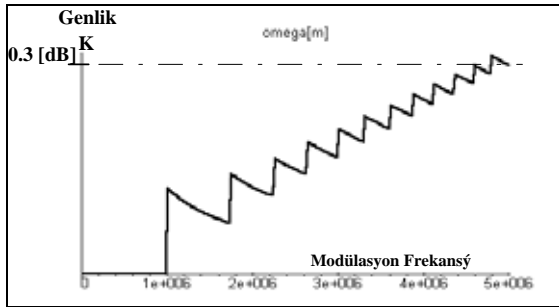
ile ifade edilmiştir. Geribesleme transfer fonksiyonunun Şekil 3'de Nyquist eğrisi görülmektedir. Bu eğriden geribesleme transfer fonksiyonunun Nyquist kararlılık kriterine göre  $(-1 + j0, 1 + j0)$  sınırları içinde olduğu görülür. Bu duruma göre geribesleme kararlıdır (Yıldırım, 1997a).



Şekil 3.  $K(j\omega_m)$  transfer fonksiyonunun Nyquist cevabı

Şekil 4'de ise  $K(j\omega_m)$  transfer fonksiyonunun modülasyon frekansına bağlı olarak genliğinin değişimi verilmiştir. Bu eğriden de görüldüğü gibi, alçak frekanslarda genlik dalgalanmasının büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise optik çıkış gücünün düşük değerinde olmasından dolayı genlik dalgalanmasına sebep olmaktadır. Modülasyon frekansının değeri artırıldığında genlik dalgalanması azalmaktadır (Yıldırım, 1997a).

Şekil 4'de  $K(j\omega_m)$  optik geribesleme transfer fonksiyonundaki üssel ifadeden dolayı yansıyan dalganın, genlik ve fazında Gibbs osilasyon olayları oluşmaktadır. Fazda ve genlikte oluşan Gibbs osilasyonu,  $E(t)$  alan genliğinde faz kaymasına ve yıkıcı girişime neden olmakta ve alan fazının sabit kalmasını engellemektedir (Yıldırım, 1997b).



Şekil 4.  $K(j\omega_m)$  transfer fonksiyonunun modülasyon altındaki değişimi

$K(j\omega_m)$  transfer fonksiyonunun, geribesleme sabitleri,

$$k_c = \frac{2|C|}{\tau_L} \sqrt{f_{ext}} \quad |C| = \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \quad (4)$$

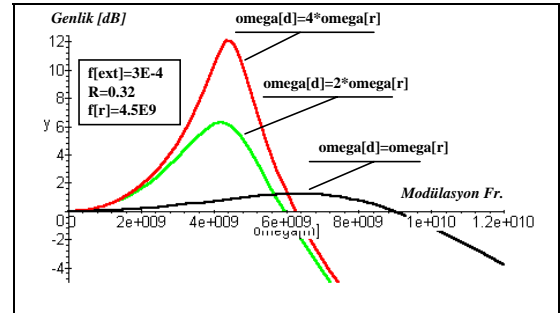
şeklinde (Tager and Peterman, 1994). DFB lazer diyod için  $C$  değeri verilmiştir. Harici aynadan yansıyan optik güç oranı ise

$$f_{ext} = \frac{P_{ext}}{P_o} \quad (5)$$

ile verilebilir. İfadelerde geçen açılal sönüm frekansı

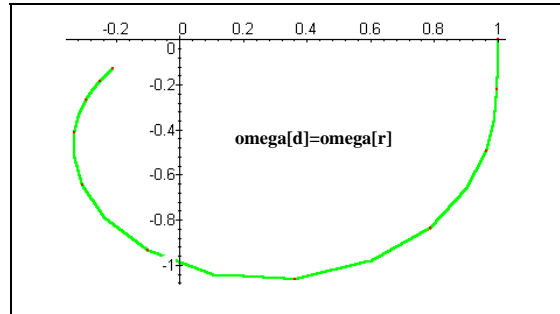
$$\omega_d = \frac{\omega_r^2}{\frac{\gamma}{\tau_{ph}} + \frac{1}{\tau_n}} \cong \frac{\omega_r^2 \tau_{ph}}{\gamma} \quad (6)$$

ile ifade edilmiştir (Peterman, 1991). Şekil 5'de sönüm frekansına bağlı olarak modülasyon tepkisi görülmektedir.



Şekil 5.  $TF(j\omega_m)$ 'nin modülasyon tepkisi (Yıldırım, 1997c)

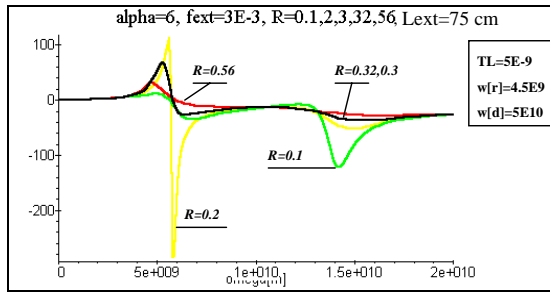
Şekil 6'da görülen Nyquist eğrisinde, sistemi kararlı hale getirmek için kritik sınır değeri görülmektedir.



Şekil 6.  $TF(j\omega_m)$  nin Nyquist eğrisi

$w_d = w_r$  durumunda sistem kritik kararlılık sınır değeri içerisinde kalmaktadır. Bu durumda modülasyon frekansı kararlılığı etkilememektedir. Bu durum, sönüm frekansı ile gevşeme frekansının eşit olduğu şartlarda elde edilmiştir. Sönüm frekansının gevşeme frekansından küçük olduğu bütün durumlarda kararlılık kritik sınır değeri içerisinde kalmakta ve çıkış genliğinde ise büyük miktarda azalma olmasına karşılık modülasyon frekansında ise büyük artışa karşı gelmektedir.

Bunun yanında Şekil 7'de görüldüğü gibi değişik güç yansıtma (R) değerlerine göre çıkışta farklı genlik ve kaos durumu da oluşmaktadır.



Şekil 7. TF(jw<sub>m</sub>) 'nin modülasyon cevabı

Kritik geribesleme, kuvvetli geribesleme ( $f_{ext} \geq 10^{-3}$ ) ile zayıf geribesleme ( $f_{ext} \leq 10^{-4}$ ) arasında kalan durumun tanımlanmasıdır. Kritik geribesleme durumunda  $K_c$ ,

$$K_c \Big|_{\text{kritik}} = \frac{w_r^2}{2w_d} \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2}} \quad (7)$$

ile tanımlanmıştır. İfade çizgi iyileştirme sabitine ( $\alpha$ ) bağlı olarak

$$K_c = \frac{\sqrt{1+\alpha^2}}{\alpha^2} \quad (8)$$

şeklinde düzenlenebilir. Kritik durumdaki optik güç yansıtması ise,

$$f_{ext} \Big|_{\text{kritik}} = \frac{\tau_L w_r^4}{16|C|^2 w_d^2 (1+\alpha^2)} \quad (9)$$

ile ifade edilebilir. Çizgi iyileştirme sabitine bağlı olarak yapılan düzenleme sonucu ise

$$f_{ext} \Big|_{\text{kritik}} = \frac{\tau_L w_r^4}{16|C|^2 w_d^2 (1+\alpha^2)} \left( \frac{1+\alpha^2}{\alpha^2} \right) \quad (10)$$

ile verilmiştir (Helmsand Peterman, 1990; Kakiuchida and Ohtsubo, 1994; Reed, 1996).

### 3. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Bu çalışmada harici optik geribeslemeli lazer diyodun transfer fonksiyonu oluşturan kısımların, Nyquist kararlılık kriterine göre kararlılığı incelenmiştir. Bu incelemede transfer fonksiyonunun değişkenleri frekansa bağlı olarak simülasyonu yapılarak kararlılığa etki eden sebepler ortaya konmuştur. Yapılan analiz sonuçları;

1. Harici optik geribesleme, lazer diyodun taşıyıcı ve foton yoğunluğuna artırıcı yönde etki ederek kararsızlığa neden olmaktadır. Ancak, sistem kararsız duruma doğru kayarken optik çıkış gücünde, modülasyon frekansında ve band genişliğinde artışa neden olmaktadır.
2. Geribesleme transfer fonksiyonu kararlılık sınırları içerisinde. Bu fonksiyonunda Şekil 4'de görüldüğü gibi genlik dalgalanması oluşmaktadır. Dalgalanmayı önlemek için harici ayna, AR malzemeye kaplansa bile genlik dalgalanması yine de oluşacaktır.
3. Harici yansıtıcıdan geri yansıyan (LD'ye doğru) dalgada Gibbs osilasyonları oluşmaktadır. Bu osilasyonlar, yansıyan E(t) alanının genlik ve fazının sabit kalmasını engellemektedir. Bu durum çok-modlu ışımaya yapan LD'larda farklı genlikten dolayı yıkıcı girişime sebep olmaktadır. Ancak yüksek frekanslarda Gibbs osilasyonunun genliği azalmaktadır.
4. Optik çıkış gücü Şekil 6 ve Şekil 7'de görüldüğü gibi doğrudan sönüm frekansı ve güç yansıtma sabiti (R)'ye bağlıdır. Sönüm frekansının artmasıyla rezonans frekansının genliği de artmaktadır. Bu durumda rezonans eğrisi çok daralarak sistem kararsız hale gelmekte ve kaos oluşmaktadır. Sönüm frekansına bağlı olarak kararlılık sınır değer şartı ise  $\omega_d \geq \omega_r$  olarak bulunmuştur. Bu durumda sistem kararlı hale gelmekte ve modülasyon frekansı sistemin kararlılığını etkilememektedir. Çalışmada kritik güç yansıtma sabiti R = 0.2 değerinde lazerde kaos durumu görülmüştür.

#### 4. KAYNAKLAR

Dziura, T. G., and Hall, D. G. 1983. Bistable Operation Two Semiconductor Lasers in an External Cavity: Rate Equation Analysis, IEEE. QE. 19 (3).

Glasser, L. A. 1982. A Linearized Theory for the Diode Laser an External Cavity, IEEE. J. QE. 18 (7).

Helms, J. and Peterman, K. 1990. A Simple Analytic Expression for the Stable Operation Range of Laser Diodes With Optical Feedback, IEEE., J. QE. 26, (5), 833-836.

Henry, C. H., and Kazanirrov, R. F. 1986. Instability of Semiconductor Lasers due to Optical Feedback From Distant Reflectors, IEEE. J. QE. 22, 294.

Kakiuchida, H. and Ohtsubo, J., 1994. Characteristics of a Semiconductor Laser with External Feedback, IEEE. J. QE. 30 (9).

Lau, K. Y., Figueroa, L. and Yariv, A. 1980. Generation and Quenching of Intensity Pulsations in Semiconductor Lasers Coupled to External Cavities, IEEE. J. QE. 16 (12).

Mork, J., Tromborg, B., and Christantiansen, P. L. 1988. Bistability and Low-Frequency Fluctuations in Semiconductor Lasers with Optical Feedback: A Theoretical Analysis, IEEE. J. QE. 24 (2).

Osmundsen, J. H., Tromborg, B., and Olesen, H. 1983. Experimental Investigation of Stability Properties for a Semiconductor Laser With Optical Feedback, Electron. Lett. 19 (25-26).

Peterman, K. 1991. Laser Diode Modulation and Noise, Kluwer, Tokyo.

Reed, M., Benson, T. M., Kendall, P. C., and Sewell, P. 1996. Antireflection-coated Angled Facet Design, IEE.Proc-Optoelectron. 143 (4), 214.-218.

Tager, A. A., and Peterman, K. 1994. High-Frequency Oscillations and Self-Mmode Locking in Short External-Cavity Laser Diodes, IEEE. J. QE. 30 (7), 1553-1561.

Temkin, H., Olsson, N. A., Abeles, J. H., Logan, R. A., and Panish, M. B., 1986. Reflection Noise in Index-Guided InGaAsP Lasers, IEEE J. QE. 22 (2), 286-293.

Tromborg, B., Osmunden, J. H. and Olesen, H. 1984. Stability Analysis for Semiconductor Laser in an External Cavity, IEEE. QE. 20 (9).

Yıldırım, R. 1997a. Optik Geribeslemeli Yarıiletken Lazer Diyod Transfer Fonksiyonunun Analizi, Süleyman Demirel Üniv. Fen Bil. Ens. Dergisi. (2).

Yıldırım, R. 1997b. An Analytic Examination of External Optical Feedback Transfer Function to Determine Factors Effecting The Stability, Gazi.Üni. Fen Bil. Enst. Dergisi (Basımda).

Yıldırım, R. 1997c. Harici Optik Geribeslemeli Yarıiletken Lazer Diyod'un Dinamik Kararlılığı için Sınır Değerinin Belirlenmesi, Gazi Üni. Fen Bil. Enst. Dergisi (Basımda).

Zorabedian, P. 1994. Axial Mode Instability Tunable External Cavity Semiconductor Lasers, IEEE. J. QE. 30 (7).