



S, c, l dalga boylu fotonik uwb sisteminde soa besleme akımının sistem performansına etkisinin analizi

Analysis of the effect of soa supply current on system performance in s, c, l wavelength photonic uwb system

Meryem Filiz^{1*} , Ömer Galip Saraçoğlu²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye.

meryemfiliz1@hotmail.com

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye.

saracog@erciyes.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 16.09.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 12.12.2025

doi: 10.65206/pajes.98047

Kabul Tarihi/Accepted: 23.02.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, fotonik devrelerle elde edilen ultra geniş bant sistemin S, C, L fiber dalga boylarında farklı yarı iletken optik yükselteç besleme akımı değerlerinin sistem performansına etkisi incelenmiştir. S, C, L dalga boylarında yarı iletken optik yükselteç besleme akımı 60, 150, 180 mA iken maksimum kalite faktörü değişimi, bit hata oranı, darbe şekli analiz edilmiştir. En yüksek kalite faktörü değeri ve en düşük bit hata oranı L bandında 180 mA durumunda elde edilmiştir. Yarı iletken optik yükselteç besleme akımına bağlı olarak darbe şeklinin iki farklı rejime geçtiği gözlemlenmiştir. 60 mA'de üçlü darbe elde edilirken, 150 ve 180 mA'de ikili Gauss darbe üretilmiştir. Frekans analizinde Federal Haberleşmeler Komisyonu maskesiyle yüksek oranda uyumluluk sağlanmıştır. Kalite faktörü, bit hata oranı, zaman ve frekans analizleri sonucunda L bandında nispeten daha iyi başarımlar elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, L-bandında yoğunlukla daha iyi performans sağlandığını ve yarı iletken optik yükselteçlerin (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) besleme akımının yalnızca sistem performansını değil, aynı zamanda ultra geniş bant (Ultrawideband, UWB) darbe şeklini de doğrudan belirlediğini ortaya koyarak, üçlü Gauss darbe üretimiyle özgün katkı sunulduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Fotonik, Fiber, Ultra geniş bant, Yarı iletken optik yükselteç, Maksimum kalite faktörü.

Abstract

This study investigates the effect of different semiconductor optical amplifier supply current values on the performance of an ultrawideband system obtained with photonic circuits at S, C, and L fiber wavelengths. The maximum quality factor variation, bit error rate, and pulse shape were analyzed at semiconductor optical amplifier supply currents of 60, 150, and 180 mA for S, C, and L wavelengths. The highest quality factor and the lowest bit error rate were obtained in the L band at 180 mA. It was observed that the pulse shape changed into two different regimes depending on the semiconductor optical amplifier supply current. A triple pulse was obtained at 60 mA, while a double Gaussian pulse was generated at 150 and 180 mA. Frequency analysis demonstrated high compatibility with the Federal Communications Commission mask. The quality factor, bit error rate, time, and frequency analyses revealed relatively better performance in the L band. The findings reveal that better performance is mostly achieved in the L-band, and that the Semiconductor Optical Amplifier (SOA) supply current directly determines not only the system performance but also the Ultrawideband (UWB) pulse shape, demonstrating a unique contribution through triple Gaussian pulse generation.

Keywords: Photonic, fiber, Ultra wide band, Semiconductor optical amplifier, Maximum quality factor.

1 Giriş

İnsanlar arasında en önemli konulardan biri tüm çağlar boyunca iletişim olmuştur. Gelişen dünya ile teknoloji de hızlı bir evrim ve uyum sürecine girmiştir. Haberleşmenin yüksek kapasiteli, hızlı, verimli, senkron olması son derece önemlidir. Fotonik, mikro-elektronik mekanik sistemler (MEMS) ve ultra geniş bant (Ultrawideband, UWB) sistem alanları birbirleriyle bütünleşerek teknolojiyi ileriye taşımıştır. UWB, yüksek bant genişliği, düşük güç tüketimi, yüksek doğruluk, hassasiyet, düşük girişim, yüksek güvenlik, çoklu kullanım alanları, yüksek hız, düşük gecikme, uzun menzil, düşük güç tüketimi avantajları nedeniyle ev ağlarında tercih edilmektedir. UWB sinyallerinin kısa mesafelerde iletim sınırlamasını aşmak amacıyla, kablolu sinyallerin yayılma mesafesini artırmak üzere fiber üzerinden UWB (UWB-over-fiber, UWBoF) teknolojisi geliştirilmiştir [1],[2]. UWB sinyalleri, çok geniş spektrum 3.1-10.6 GHz arası 7.5 GHz bant genişliğine, -41.3 dBm/MHz maksimum etkin yayın gücüne ve çok düşük enerji içeriğine sahiptir [3]. Federal

Haberleşmeler Komisyonu (FCC) maskesine oldukça uygun ve bant genişliğini maksimize eden darbe şekilleri kolaylıkla elde edilebilmektedir [4]. UWBoF sisteminde, UWB sinyalin optik alanda üretilmesi ve fiber üzerinden iletilmesi amaçlanmaktadır [4],[5].

Fotonik devreler ile UWB darbe üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan yöntem, faz modülasyonun yoğunluk modülasyonuna (PM-IM) dönüştürülmesi tekniğidir [6]. Diğer bir yaklaşımda ise yarı iletken optik yükselteçlerin (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) doğrusal olmayan etkilerinden yararlanılmaktadır. PM-IM dönüşümü ve SOA'lar birlikte de kullanılabilir. SOA'lar, erbiyum katkılı fiber yükselteçler (EDFA) ve Raman yükselteçlerine göre daha az olgunlaşmış olmalarına rağmen fazla güç verimliliğine sahiptir. Ayrıca modülatörler, anahtarlama elemanları gibi diğer optik bileşenlerle kolaylıkla entegre edilebilmektedirler [7].

UWB darbe üretimi için SOA kullanılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Taki, Dong ve arkadaşları, SOA'nın besleme akımını

*Yazışılan yazar/Corresponding author

değiştirerek ve çarpaz kazanç modülasyonu (XGM) yöntemiyle [8],[9]; dördü, beşli [8] ve tekli [9] Gauss UWB darbeler üretmişlerdir. Zahari ve arkadaşları, SOA besleme akımını değiştirerek doğrusal olmayan optik döngü aynası (NOLM) [10], Yu ve diğ. Mach-Zehnder modülatörü (MZM) [11] kullanarak fotonik devrede tekli UWB darbe üretimi gerçekleştirmişlerdir. Wang ve arkadaşları, PM-IM dönüşümü ile SOA kullanılarak çarpaz faz modülasyonuna (XPM) dayalı [12] UWB darbe üretimini incelemişlerdir. Lv ve diğ. ise SOA entegre ızgara örneklemeli dağıtımli Bragg reflektörlü (SGDBR) lazer kullanarak C bandında UWB darbe üretmişlerdir [13]. Bu çalışmalarda Gauss tekli ve ikili [12] ile yüksek dereceli Gaussa benzer UWB darbeleri [13] elde edilmiştir. Renaudier, Demirtzioglou ve diğ. dalga boyu bölmeli çoğullama (Wavelength Division Multiplexing, WDM) teknolojisinde SOA kullanarak kısa (S), geleneksel (C), uzun (L) dalga boylarında iletim başarımını incelemiştir [7],[14]-[16]. Dalga boyları için sinyal gürültü oranı (SNR) kıyaslaması yapmışlardır. SNR açısından dalga boyu sıralaması C>L>S olarak raporlanmıştır [7],[14],[16]. Pei ve diğ.ise PM-IM dönüşümüne dayalı WDM sisteminde biri ikili Gauss darbesi olmak üzere çift sinyalin iletim başarımını incelemişlerdir [17]. Hamaoka ve arkadaşları, WDM sisteminde Raman [18], DFA [19] ve SOA [7] yükselteçleri kullanarak S, C, L dalga boylarında iletim başarımını ele almışlardır. Dalga boyları için maksimum kalite faktörünü karşılaştırmışlar ve sıralamayı C>L>S olarak bulmuşlardır [7], [18]-[19]. Buglia ise Raman ve EDFA yükselteçleri kullanarak S, C, L dalga boylarında SNR, zayıflama, güç karşılaştırmalarını gerçekleştirmiştir [20]. Literatür kıyaslama tablosu, benzetim sonuçları ve değerlendirmeler başlığı altında verilmiştir.

Fotonik devrelerle UWB sinyali elde etmek için, faz modülatörü, MZM, iletim hattı, filtre, foto dedektör gibi devre elemanları yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Haberleşme sistemlerinin performansı açısından kalite faktörünün maksimum (yüksek) ve bit hata oranının (Bit Error Rate, BER) minimum (düşük) olması beklenmektedir. Bu çalışmada, fotonik UWB devresi için PM-IM dönüşümü uygulanarak Gauss darbesi üretimi gerçekleştirilmiş ve farklı SOA besleme akımlarının sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir. İletim hattı olarak kullanılan fiber için S, C ve L dalga boylarında sistemin maksimum kalite faktörü, BER değerleri analiz edilmiş UWB darbeler üretilmiştir. Üretilen darbelerin zaman ve frekans analiz grafiklerine yer verilmiştir. Kalite faktörü değeri arttıkça, BER değerinin ters orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Çalışmamızda bit hızı 20 Gbps olarak kullanılmıştır. Maksimum kalite faktörüne göre büyükten küçüğe 60 mA'de L, S, C; 180 mA'de L, C, S; 150 mA için ise S, L, C şeklindedir. Nispeten en iyi maksimum kalite faktörü değeri L dalga boyunda elde edilmiştir. Benzetim ve geliştirimi yapılan [17]'de üretilen ikili Gauss darbesine ilave olarak, bu çalışmada üçlü UWB Gauss darbesi de elde edilmiştir.

2 Sistem modeli

2.1 Fiber ve dalga boyları

Fiber için farklı dalga boyları mevcuttur. Bir optik fiberin bant genişliği, silikanın düşük zayıflama penceresiyle tanımlanır. Bu pencere, fiberin minimum zayıflamaya sahip olduğu ve sinyalleri verimli bir şekilde iletebildiği dalga boyu aralığını ifade eder. Tablo 1'de dalga boyları, bant genişlikleri verilmiştir. Bu pencere genellikle orijinal- ultra uzun (O-U) bandında, yani sırasıyla O, genişletilmiş (E), S (1460-1530 nm (nanometre)), C (1530-1565 nm), L (1565-1625 nm), U bantlarında yer almaktadır.

Mevcut optik iletim sistemlerinin çoğu, toplam kullanılabilir bant genişliğinin yaklaşık %20'sine karşılık gelen C ve L bantlarında 11.5 THz ile sınırlı nispeten dar bir bant genişliğinde çalışmaktadır. Deneysel saha denemeleri, artan veri trafiği taleplerini karşılamak amacıyla daha yüksek bantların ve alternatif yükselteç teknolojilerinin kullanımına yönelik stratejilerin araştırıldığını göstermektedir [22],[23].

Tablo 1. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından atanan tek modlu fiberdeki spektral bantlar [22].

Table 1. Spectral bands in single-mode fiber assigned by the International Telecommunication Union (ITU) [22].

	Tanımı	Dalga boyu (nm)	Bant genişliği [THz]
O bandı	Orijinal	1260-1360	17.5
E bandı	Genişletilmiş	1360-1460	15.1
S bandı	Kısa Dalga boyu	1460-1530	9.4
C bandı	Geleneksel	1530-1565	4.4
L bandı	Uzun Dalga boyu	1565-1625	7.1
U bandı	Ultra Uzun	1625-1675	5.5

Optik iletim sistemlerinde en düşük kayıplı bant; C bandı daha sonra L bandıdır. C bandı WDM sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. C bandının kullanımı, bant genişliği talebini karşılamaya yeterli olmadığından L bandı tercih edilmektedir. S bandı ise gelecekteki bir araştırma-geliştirme (Ar-Ge) konusu olarak dikkat çekmektedir. Son zamanlarda S+C, C+L ve S+C+L bant uygulamaları yaygınlaşmaya başlamıştır [24].

2.2 Gauss darbesi tanımı

İşaretleri dar bant, geniş bant veya ultra geniş bant olarak sınıflandırmak için kesirli bant genişliği (KBG) kullanılmaktadır. KBG ifadesi Denklem (1)'de yer almaktadır, burada BW bant genişliğini, f_h ve f_l alt ve üst kesim frekanslarını, f_c merkez frekansını ifade etmektedir [25].

$$B_f = \frac{BW}{f_c} = \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)/2} \quad (1)$$

Gauss darbe $x(t)$ denklemi genel olarak aşağıdaki şekilde Denklem (2)'deki gibi ifade edilir. σ^2 ve A sırasıyla darbe varyansı ve genlik olarak tanımlanmaktadır.

$$x(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Yukarıdaki denkleme göre, üst simge (n) olarak ifade edilirse Gauss darbesinin n. türevi Denklem (3)'teki gibi elde edilir.

$$x^{(n)}(t) = -\frac{n-1}{\sigma^2} x^{(n-2)}(t) - \frac{t}{\sigma^2} x^{(n-1)}(t) \quad (3)$$

Gauss darbesinin n. türevinin Fourier dönüşümü Denklem (4)'te yer almaktadır:

$$x_n(f) = A(j2\pi f)^n e^{-\frac{(2\pi f\sigma)^2}{2}} \quad (4)$$

Buradan hareketle n. türevin genlik spektrumu aşağıda gösterilmektedir. Darbenin güç spektral yoğunluğunun (PSD)'sinin genel ifadesi $PSD_n(f)$ Denklem (5)'te verilmektedir.

$$|PSD_n(f)| = \frac{|x_n(f)|^2}{|x_n(f_M)|^2} = \frac{(2\pi f\sigma)^{2n} e^{-(2\pi f\sigma)^2}}{n^n e^{(-n)}} \quad (5)$$

FCC maskesine oldukça uygun, bant genişliğini maksimize eden darbe şekli elde edilebilmesi için Gauss darbesinin varyansı ve türev derecesi değiştirilebilmektedir. Böylece darbe PSD'si FCC maskesine uygun şekilde yapılandırılabilir.

2.3 Pm-im dönüşüm prensibi

PM-IM dönüşümünde, Gauss sinyali, faz modülatöründeki optik taşıyıcıya modüle eder. Bu işlem sonucunda elde edilen faz modülasyonlu optik sinyal, faz modülasyonundan geçişle yoğunluk modülasyonuna dönüştürülür ve foto dedektör tarafından elektrik alan UWB sinyaline çevrilir. Şekil 1'de benzetimi yapılan fotonik haberleşme devresi verilmiştir [17]. Şekil 1'de verilen temel devrede, faz modülasyonu dönüştürme sistemine, optik filtre uygulanmaktadır. Faz modülatörüne uygulanan Gauss darbesinin $x(t)$ olduğu varsayıldığında, faz modülasyonu sinyali Denklem (6) ile ifade edilebilir:

$$A(t) = \exp[jw_c t + j\beta_{PM} x(t)] \quad (6)$$

Burada, β_{PM} faz modülasyonu katsayısı, w_c optik taşıyıcının açısal frekansıdır. Bu işaret optik filtreye girer ve filtrenin frekans cevabı Denklem (7)'deki şekilde tanımlanır.

$$H_d(w) = K(w - w_0) \quad (7)$$

Burada, K, optik filtrenin aşağı kenar eğimini, w_0 ise frekans cevabının sıfıra karşılık geldiği açısal frekansını ifade eder. Bir ışık filtresinin bu çıkış sinyali Denklem (8)'de verilmiştir:

$$A_{out}(t) = K(w_r - w_n)A(t) \quad (8)$$

(8) numaralı denklemin Fourier dönüşümü Denklem (9)'da ifade edilmektedir.

$$A_{out}(t) = [K(w_c - w_0) + K\beta_{PM}x'(t)]A(t) \quad (9)$$

(9) ve (6) denklemlerinin tersine, optik filtreden sonra modülasyon sinyalinin fazı yoğunluğa dönüşür, sinyalin birinci türevi $x'(t)$ elde edilerek optik alanda UWB sinyal üretimi gerçekleştirilir. Bu ultra bantlı sinyal foto dedektör tarafından algılanır ve elektriksel sinyal Denklem (10) ile ifade edilir:

$$i_{PD}(t) = K^2(w_c - w_0)^2 + K^2\beta_{PM}^2[x'(t)]^2 + 2K^2(w_c - w_0)\beta_{PM}x'(t) \quad (10)$$

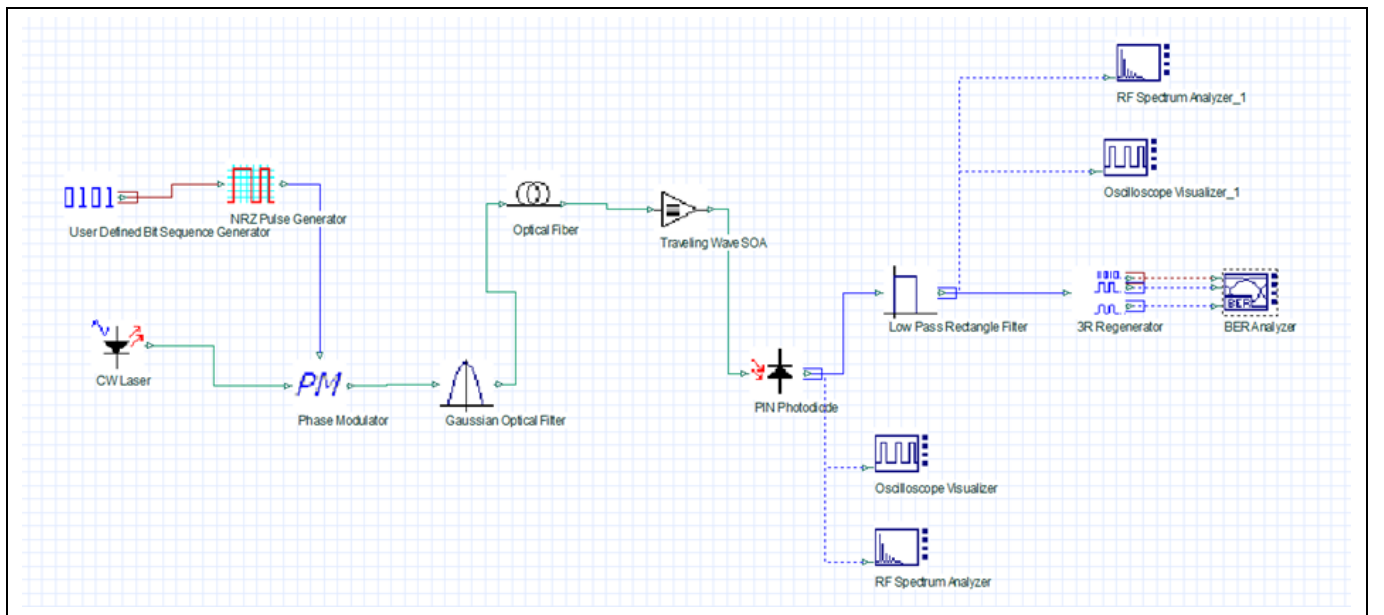
Denklem (10)'un sağ tarafındaki ilk terim doğrudan akım (DC) bileşenidir. Küçük sinyal varsayımı altında sağ taraftaki üçüncü terim ikinci terimden çok daha büyük olduğundan ikinci terim göz ardı edilebilir. Bu durumda optik filtrenin çıkışı Denklem (11)'deki gibi yazılabilir.

$$i_{sig}(t) = 2K^2(w_c - w_0)\beta_{PM}x'(t) \quad (11)$$

Denklem (11)'den görüldüğü üzere, optik filtre çıkış sinyali Gauss sinyal formunun birinci türevidir. Böylece optik alanda UWB sinyal üretilmiş olur. UWB sinyallerinin dik yükselen ve alçalan kenarlara sahip olması, sinyalin DC bileşeni içermemesini ve enerjisinin RF bölgesinde yoğunlaşmasını sağlar. Şekil 1'de gösterildiği gibi, optik taşıyıcı geniş bantlı bir Gauss sinyali ile faz modüle edilir, ardından faz modüle edilmiş sinyalin kenar bantlarının bir kısmı, PM-IM dönüşümünü gerçekleştirmek amacıyla optik bir filtre ile süzülür. Faz modülasyonundan sonra optik taşıyıcının fotoelektrik alanı Denklem (12)'deki gibi ifade edilir.

$$E(t) = \sqrt{P_0} \{ \exp(jw_0 t + w_m t) \} \quad (12)$$

Burada, P_0 ışık kaynağının çıkış gücünü, w_0 taşıyıcının açısal frekansını, w_m ise giriş sinyalinin açısal frekansını göstermektedir. Bu formülde elektrik alan genişliği sabit olduğundan, kesim frekansı doğrudan fotoelektrik dedektörden geçirildiğinde yalnızca DC bileşeni elde edilir. Tek frekanslı bir sinyal elde edebilmek için, faz modülasyon spektrumunun simetrik hâle getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla optik filtre kullanılarak faz modülasyon sinyalinin bir kısmı süzülür. Optik filtreden sonra bazı düşük frekanslı yan bantlar simetrik kaldığından, bu bantlar foto dedektör tarafından bastırılır ve son sinyalde ortaya çıkmaz. Yüksek frekanslı sinyal, son sinyalde kalabilmesi için simetri yan bantlardan filtrelenir. Böylece optik alandan UWB sinyal üretimi gerçekleştirilmiş olur [17]



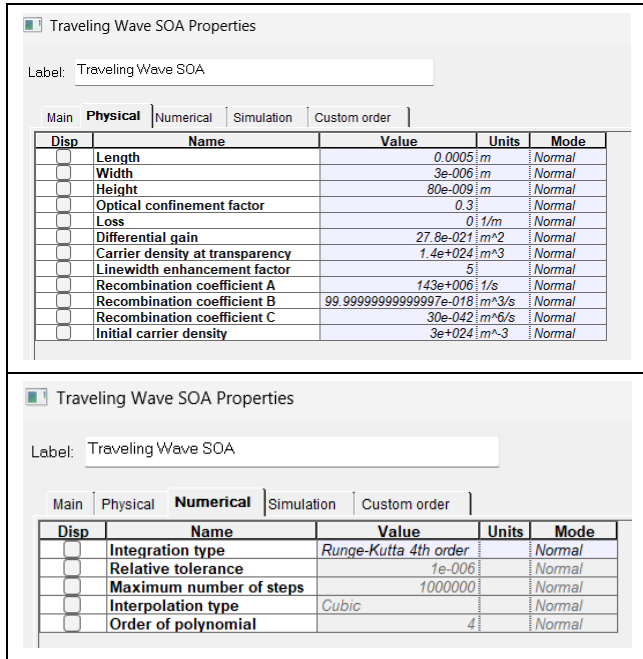
Şekil 1. Uygulanması yapılan fotonik haberleşme devre şeması [17].

Figure 1. Implemented photonic communication circuit diagram [17].

2.4 Benzetimi yapılan devre

Bu çalışmada, fotonik UWB darbe üretim devresinin benzetimi gerçekleştirilmiştir. [17]'de sunulan devreye SOA eklenmiştir. Doğrusal olmayan yükselteç olan SOA'nın besleme akımının 60, 150, 180 mA değerlerinde olması durumunda, sistemin frekans ve zaman analizleri ile kalite faktörü ve BER etkisi incelenmiştir. BER değeri, iletilen bitlerin hatalı alınan bitlere oranı olarak tanımlanmaktadır. BER, maksimum kalite faktörü, optik iletim sistemleri için temel performans metriklerindendir. Benzetim yazılımları olarak OptiSystem ve MATLAB programları kullanılmıştır [26],[27]. Optisystem 22.0 yazılımında yer alan temel parametreler, çoğu devre elemanında varsayılan değerleriyle kullanılmış, bazı devre elemanlarının değerleri ise uygulamaya yönelik olarak değiştirilmiştir. Kullanıcı tanımlı bit dizisi ve sıfıra dönüşüz (NRZ) sinyal jeneratörü, PM, Gauss optik filtresi, foto diyot ve alçak bant geçiren filtre (AGF) devrede kullanılmıştır. Sürekli dalga lazeri (CW lazer) C bantında (193.1 THz) çalıştırılmıştır. Yükselteç olarak SOA kullanılmıştır. Fiber dalga boyları S, C, L sınıflarında incelenmiştir. Bit jeneratörü için "10000000" bit dizisi ve 20 Gb/sn bit hızı seçilmiştir. Fiber uzunluğu 20 km olarak alınmıştır.

Kalite faktörünün daha iyi gözlemlenebilmesi ve dalga boyları arasında daha sağlıklı karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, bit dizisi ve fiber uzunluğu küçük seçilmiştir. SOA'nın 60, 150, 180 mA besleme akımlarında, S, C, L dalga boylarında sistem başarımları ile işaret frekans ve zaman analizleri gerçekleştirilerek karşılaştırılmıştır. Devrede kullanılan SOA'nın özellikleri Şekil 2'de verilmiştir.



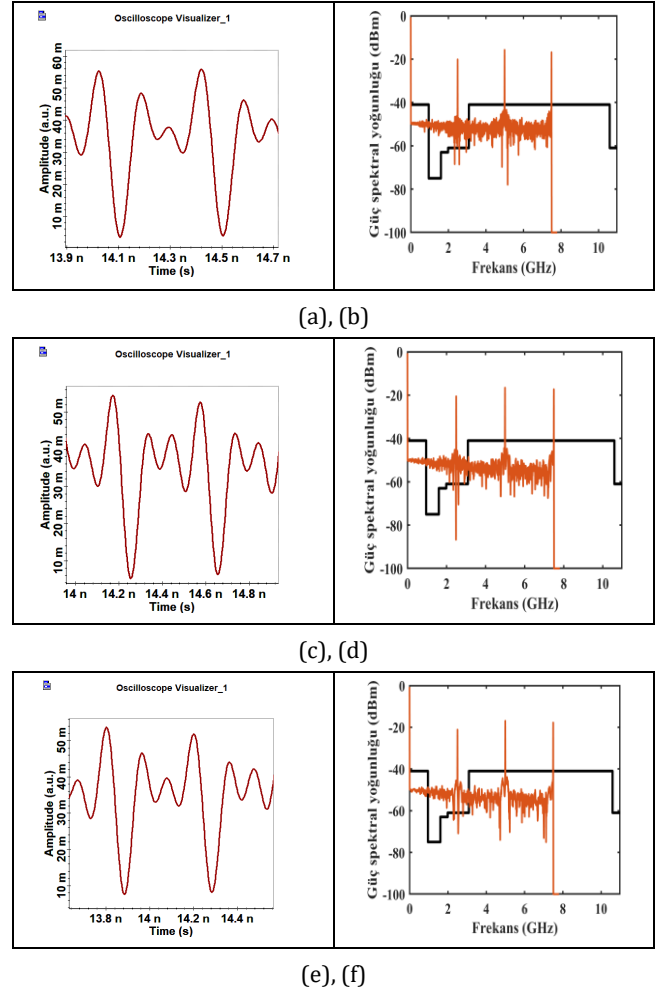
Şekil 2. Benzetim devresinde kullanılan SOA'nın özellikleri.

Figure 2. Properties of SOA used in the simulation circuit.

3 Benzetim sonuçları ve değerlendirmeler

Fotonik UWB devresinde 60, 150 ve 180 mA SOA besleme akımları kullanıldığı durumlarda elde edilen UWB darbelerin zaman, frekans analizleri ile sistem başarımları değerlendirilmiştir. S, C, L sınıfları için kullanılan fiber ile fotonik haberleşme devresinin zaman, frekans ve BER başarımları

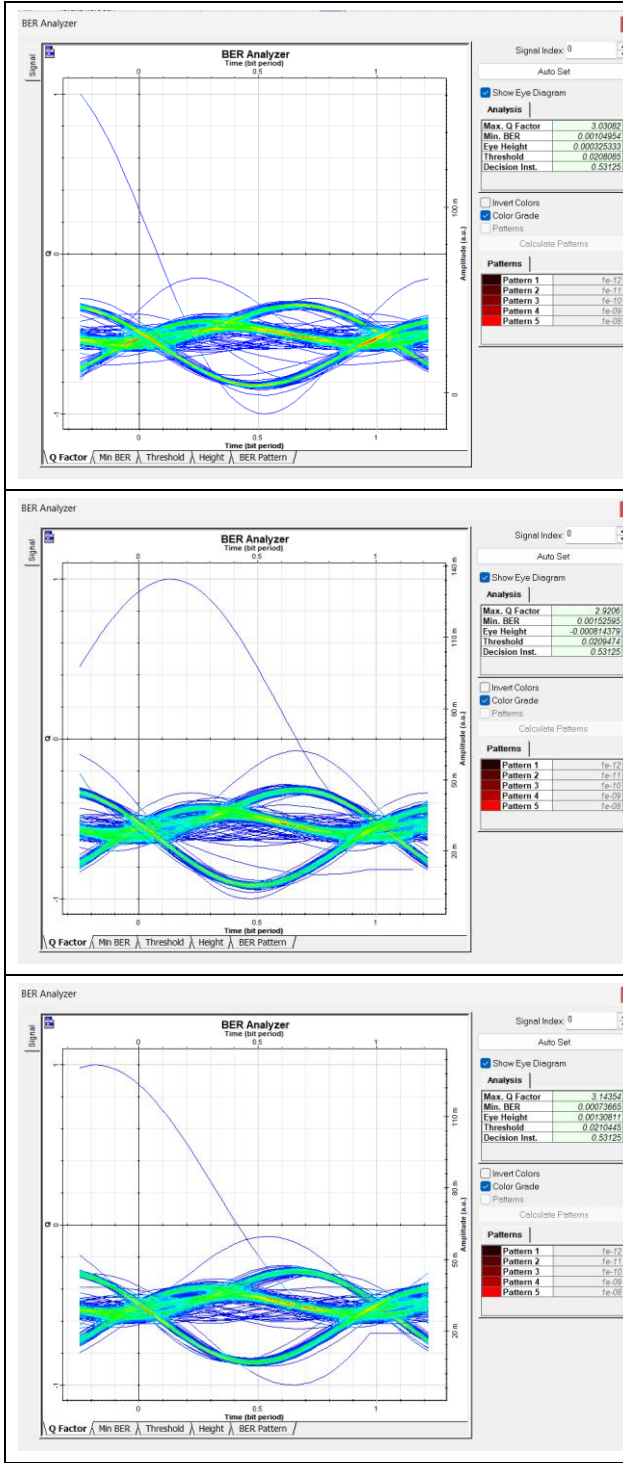
analizlerin uyumlu olduğu görülmüştür. İlâveten kalite faktörü değerleri de ayrıntılı olarak incelenmiştir. BER analiz grafiklerinde göz açıklığının yeterli olduğu tespit edilmiştir. Zaman analizlerinde 60 mA SOA kullanıldığında Gauss üçlü, 150 ve 180 mA SOA kullanıldığında ise Gauss ikili darbe üretildiği gözlemlenmiştir. Tüm durumlarda elde edilen Gauss darbelerinin yüzde KBG değeri 100' dür. SOA besleme akımı ilk olarak 60 mA seçilmiştir. Şekil 3'te 60 mA SOA için S, C, L dalga boyu zaman ve frekans analizleri verilmiştir. Bu durumda S, C, L dalga boyları için sonuçlar incelenmiştir. Her üç dalga boyunda da zaman domeninde nanosaniye (ns) mertebesinde Gauss UWB darbeler elde edilmiştir. Frekans analizlerinde, her üç dalga boyunun FCC maskesi ile uyumlu olduğu, ancak yer yer ihmal edilebilir düzeyde sınır aşımalarının bulunduğu görülmüştür.



Şekil 3. 60 mA SOA akımı için fotonik UWB darbe üreten haberleşme devresi (a, c, e) S, C, L dalga boylarında zaman ve (b, d, f) frekans analizleri.

Figure 3. (a, c, e) Time and (b, d, f) frequency analysis of the photonic UWB pulse generating communication circuit for 60 mA SOA current at S, C, and L wavelengths.

Şekil 4'te SOA besleme akımı 60 mA için maksimum kalite faktörü, BER diyagramları verilmiştir. Kalite faktörü ve BER değerlerinin makul aralıklarda olduğu ve göz açıklığının iyi olduğu tespit edilmiştir. SOA besleme akımı 60 mA iken Gauss üçlü darbe üretilmiştir.



Şekil 4. (a), (b), (c): 60 mA SOA akımı için sırasıyla; S, C, L dalga boyunda fotonik UWB darbe üreten haberleşme devresi BER analizi grafikleri.

Figure 4. (a), (b), (c): BER analysis graphs of the communication circuit generating photonic UWB pulses at wavelengths S, C, and L, respectively, for 60 mA SOA current.

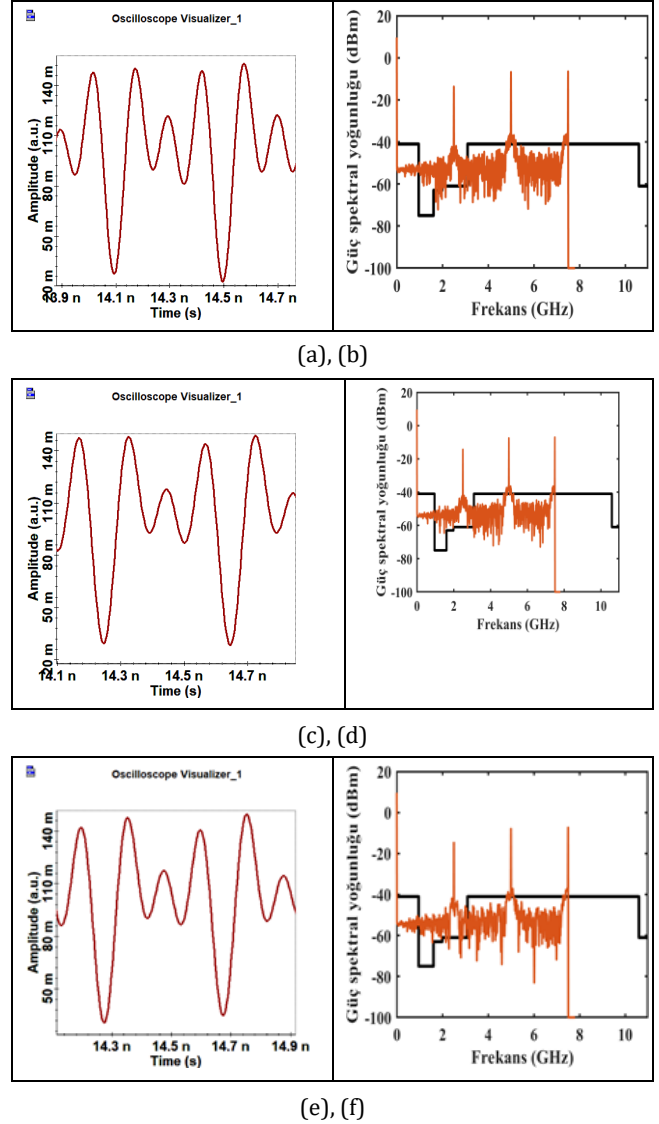
Maksimum kalite faktörü ve BER değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. Buna göre, 60 mA SOA besleme akımı kullanıldığında maksimum kalite faktörü büyüken küçüğe L, S, C şeklindedir. BER açısından en iyi değer yani küçüken büyüğe L, S, C sıralamasındadır.

Tablo 2. 60 mA SOA akım değerleri için S, C, L sistem başarımları değerleri.

Table 2. S, C, L system performance values for 60 mA SOA current values.

SOA Akımı (60 mA)	S	C	L
Max. Kalite Faktörü	3.03082	2.9206	3.14354
Min. BER	0.00104954	0.00152595	0.00073665

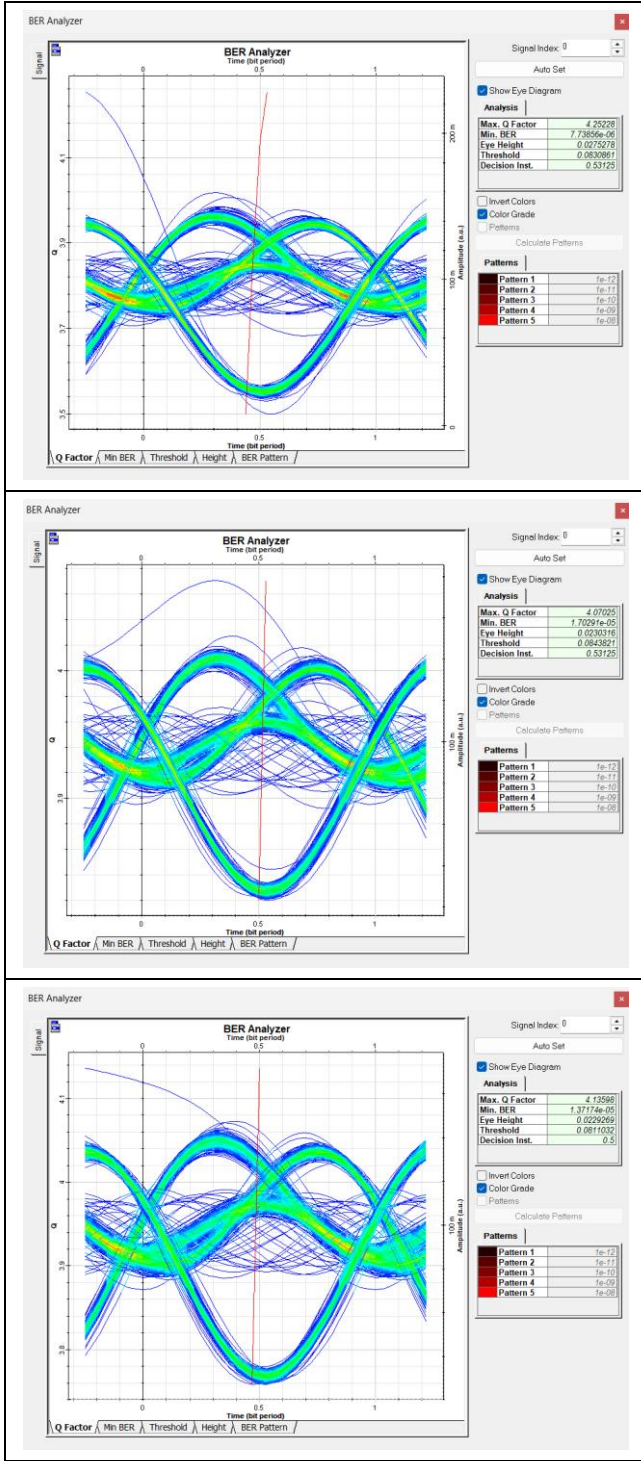
SOA besleme akımı ikinci olarak 150 mA seçilmiştir. Bu durumda S, C ve L dalga boylarında Gauss ikili darbe elde edilmiştir. SOA 150 mA iken S, C, L dalga boyu için zaman ve frekans analiz grafikleri Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. 150 mA SOA akımı için fotonik UWB darbe üreten haberleşme devresi (a, c, e) S, C, L dalga boylarında zaman ve (b, d, f) frekans analizleri.

Figure 5. (a, c, e) Time and (b, d, f) frequency analysis of the photonic UWB pulse generating communication circuit for 150 mA SOA current at S, C, and L wavelengths.

SOA besleme akımı 150 mA iken fotonik UWB devresinin S, C, L dalga boylarındaki maksimum kalite faktörü ve BER grafikleri Şekil 6’da yer almaktadır.



Şekil 6. (a), (b), (c): 150 mA SOA akımı için sırasıyla; S, C, L dalga boyunda, SOA kullanılan fotonik UWB darbe üreten haberleşme devresi BER analizi grafikleri.

Figure 6. (a), (b), (c): BER analysis graphs of the photonic UWB pulse generating communication circuit using SOA at wavelengths S, C, and L, respectively, for 150 mA SOA current.

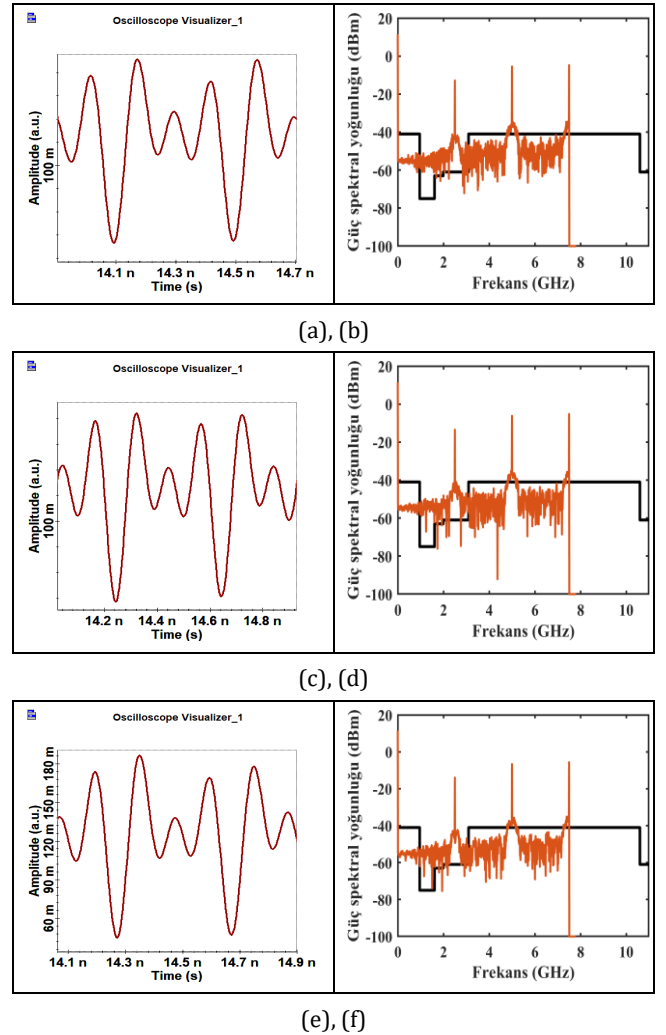
Sayısal değerler ise Tablo 3'te sunulmuştur. Buna göre, maksimum kalite faktörü sıralaması büyükten küçüğe S, L ve C şeklindedir. Ayrıca 150 mA besleme akımı için elde edilen maksimum kalite faktörü ve BER değerlerinin, 60 mA durumuna göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. 150 mA SOA akım değerleri için S, C, L sistem başarımları değerleri.

Table 3. S, C, L system performance values for 150 mA SOA current values.

SOA Akımı (150 mA)	S	C	L
Max. Kalite Faktörü	4.25228	4.07025	4.13598
Min. BER	7.73856e-06	1.70291e-05	1.37174e-05

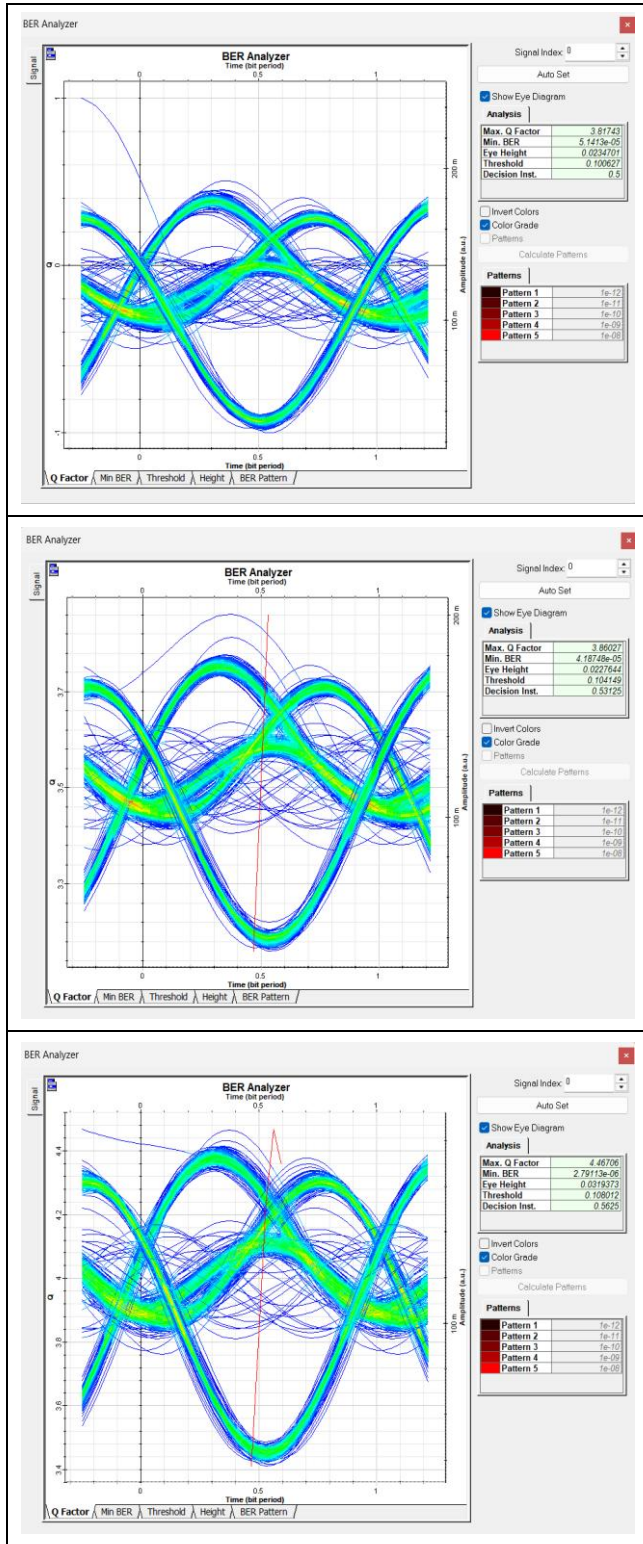
Üçüncü durumda SOA besleme akımı 180 mA olarak seçilmiştir. Bu durumda da zaman ekseninde Gauss ikili darbe elde edilmiştir. Frekans ekseninde ise FCC maskesi ile uyumluluğun oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7'de SOA besleme akımı 180 mA için fotonik UWB devresinin S, C, L dalga boylarında zaman ve frekans analizleri verilmiştir.



Şekil 7. 180 mA SOA akımı için fotonik UWB darbe üreten haberleşme devresi (a, c, e) S, C, L dalga boylarında zaman ve (b, d, f) frekans analizleri.

Figure 7. (a, c, e) Time and (b, d, f) frequency analysis of the photonic UWB pulse generating communication circuit for 180 mA SOA current at S, C, and L wavelengths.

Şekil 8'de ise SOA 180 mA besleme akımına sahipken maksimum kalite faktörü ve BER grafikleri S, C, L dalga boyunda yer almaktadır. Sayısal değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.



Şekil 8. (a), (b), (c): 180 mA SOA akımı için sırasıyla; S, C, L dalga boyunda, SOA kullanılan fotonik UWB darbe üreten haberleşme devresi BER analizi grafikleri.

Figure 8. (a), (b), (c): BER analysis graphs of the photonic UWB pulse generating communication circuit using SOA at wavelengths S, C, and L, respectively, for 180 mA SOA current.

Tablo 4. 180 mA SOA akım değerleri için S, C, L sistem başarımları değerleri.

Table 4. S, C, L system performance values for 180 mA SOA current values.

SOA Akımı (180 mA)	S	C	L
Max. Kalite Faktörü	3.81743	3.86027	4.6706
Min. BER	5.1413e-05	4.18748e-05	2.79113e-06

Maksimum kalite faktörü büyükten küçüğe L, C, S şeklindedir. SOA besleme akımı 180 mA iken L bandında 60 mA ve 150 mA göre daha iyi maksimum kalite faktörü ve BER değeri elde edilmiştir. BER değerleri maksimum kalite faktörü ile ters orantılıdır. BER en düşük, maksimum kalite faktörünün yüksek olması haberleşme kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, maksimum kalite faktörü ve BER değerleri için en iyi değer SOA besleme akımı 180 mA iken L bandında elde edilmiştir.

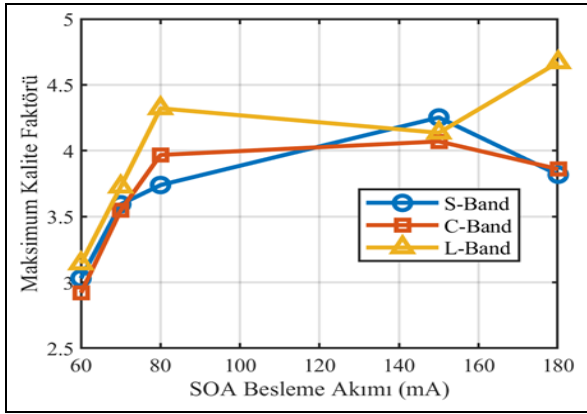
Her üç besleme akımı durumunda da en iyi değerler L bandı için 180 mA de, S ve C bandı için 150 mA de elde edilmiştir. Ayrıyeten S, L, C dalga boylarında en iyi maksimum kalite faktörü ve BER değerleri nispeten L bandında elde edildiği görülmüştür.

SOA besleme akımına bağlı olarak darbe şeklinde gözlemlenen değişimlerin temelinde yarı iletken optik yükseltecin doğrusal olmayan kazanç dinamikleri yer almaktadır. 60 mA düşük besleme akımı seviyelerinde, SOA'nın kazanç doygunluğuna daha erken girmesi ve taşıyıcı yoğunluğundaki zamana bağlı dalgalanmalar, optik sinyal üzerinde daha belirgin kazanç modülasyonuna neden olmaktadır. Bu durum üçlü Gauss darbe oluşumunu etkilemektedir. SOA'nın taşıyıcı yeniden dolun süresinin, giriş UWB darbesinin zaman ölçeğiyle karşılaştırılabilir olması, darbe üzerinde ek yan lobların oluşmasına sebep olmaktadır.

SOA besleme akımı daha yüksek 150 ve 180 mA seviyelerine çıkarılmasıyla, SOA aktif bölgesindeki taşıyıcı yoğunluğu artmakta, doygunluk etkisi görece azalmakta ve kazanç cevabı daha kararlı bir rejime geçmektedir. Bu durumda sistem, daha baskın iki loblu enerji dağılımına sahip Gauss ikili darbeler üretmektedir. Yüksek akım değerlerinde ayrıca çapraz XPM, kazanç doygunluğu ve optik chirp etkileri birlikte oluşan birleşkesi, darbe şeklini üçlü yapıdan ikili yapıya dönüştürmektedir.

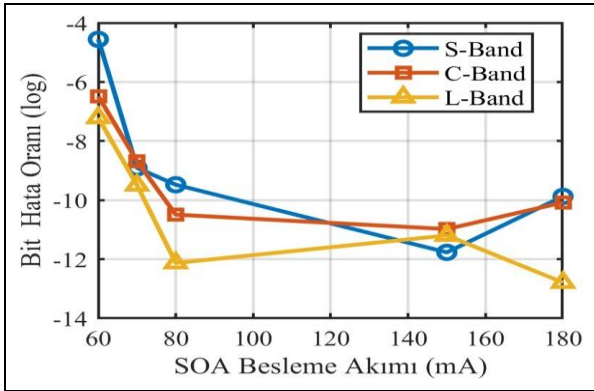
PM-IM dönüşüm sürecinde kullanılan optik filtrenin eğimi ve SOA'nın besleme akımına bağlı kazanç spektrumu birlikte değerlendirildiğinde, düşük SOA akımında spektral yan bantların daha fazla vurgulandığı, yüksek akımlarda ise spektral dağılımın daha dar ve simetrik hâle geldiği görülmektedir. Bu durum, darbe zaman alanındaki lob sayısının doğrudan akıma bağlı olarak değişmesine neden olmaktadır.

Fotonik devrelerde UWB darbe üretimi ve iletimi, transmisyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, fotonik UWB darbe üreten haberleşme devresi için S, C, L fiber dalga boylarında farklı SOA besleme akımlarının (60, 150, 180 mA) BER ve kalite faktörü etkileri değerlendirilmiştir. SOA akımının 60, 150 ve 180 mA olması durumunda maksimum kalite faktörü değişimi, BER değişimleri Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir.



Şekil.9. S, C, L dalga boyunda SOA akımına göre maksimum kalite faktörü değerleri.

Figure 9. Maximum quality factor values according to SOA current at S, C, L wavelengths.

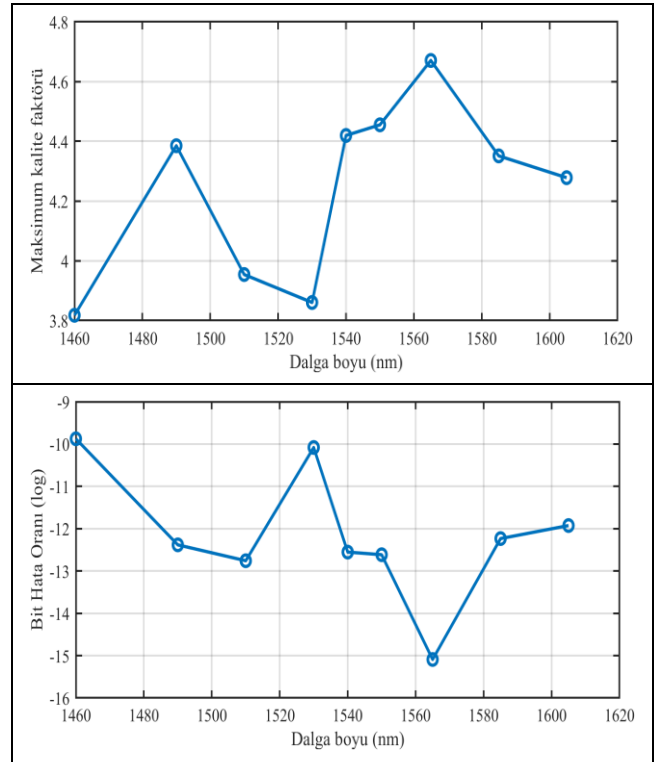


Şekil 10. S, C, L dalga boyunda SOA akımına göre BER değerleri.

Figure 10. BER values according to SOA current at S, C, L wavelengths.

Üretilen darbelerin frekans ve zaman eksenlerindeki grafikleri incelenmiş, tasarımı elde edilen sonuçlarda minimum BER ve maksimum kalite faktörü değerleri karşılaştırılmıştır. SOA akımı 60 mA iken S, C, L dalga boylarının tamamında kalite faktörünün en düşük olduğu belirlenmiştir. L dalga boyunda nispeten en iyi kalite faktörü ve minimum BER değeri elde edilmiştir. 180 mA SOA akım durumunda en iyi kalite faktörü sırasıyla L, C, S şeklindedir. Ayrıca 70, 80 mA SOA besleme akımına sahip S, C ve L dalga boylarında da arka planda ek analizler yapılarak grafiklerde yer verilmiştir. Tüm durumlarda en kötü performansın SOA akımının 60 mA olduğu C bandında elde edildiği görülmüştür. Frekans analizlerinde genel olarak FCC maskesi ile uyumluluk sağlandığı, ancak yer yer ihmal edilebilir düzeyde sınır aşımalarının bulunduğu tespit edilmiştir. SOA akımı 60 mA iken zaman ekseninde UWB Gauss üçlü, SOA akımı 150 ve 180 mA iken zaman ekseninde UWB Gauss ikili darbe elde edilmiştir. Tüm durumlarda elde edilen UWB Gauss darbelerinin yüzde KBG değeri 100'dür. SOA akım değişiminin, üretilen UWB Gauss darbesinin şeklini doğrudan etkilediği görülmüştür.

SOA 180 mA iken S, C ve L dalga boylarında daha fazla örnek alınarak elde edilen maksimum kalite faktörü ve BER değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Elde edilen bulguların genel çalışma sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. En yüksek kalite değeri ve en düşük BER değerine L bandında erişilmiştir.



Şekil 11. SOA akımı 180 mA iken S, C, L dalga boyunda SOA akımına göre maksimum kalite faktörü ve BER değerleri.

Figure 11. Maximum quality factor and BER values according to SOA current at S, C, L wavelengths when SOA current is 180 mA.

Tablo 5'te literatür kıyaslama tablosu verilmiştir. Çalışmalarda UWB darbe üretimi [9]-[13] ve iletim başarımı [7], [14]-[19],[5]'te ayrı ayrı hedeflenmiştir. Bu çalışmada [*] ise her ikisi hedeflenmiştir. Taki, Dong ve diğ. [8],[9], Zahari ve diğ.[10], Yu ve diğ. [11], SOA'nın besleme akımını değiştirerek XGM, NOLM, MZM ile Gauss dördü, beşli [8] ve tekli [9]-[11] UWB darbeler üretmişlerdir. Wang ve diğ. [12], PM-IM dönüşümü ile SOA kullanarak XPM tabanlı C bandında Gauss tekli ve ikili UWB darbe üretimini gerçekleştirmiştir. Lv arkadaşları [13] ise SOA ve SGDBR lazer kullanarak C bandında yüksek dereceli Gauss darbelerine benzer UWB darbeler [13] elde etmişlerdir.

Renaudier, Demirtzioglou ve diğ. [7],[14]-[16], WDM teknolojisi SOA kullanarak S, C ve L dalga boylarında SNR kıyaslaması yapmış ve sıralamayı C> L> S olarak vermişlerdir [7],[14],[16]. Pei ve diğ.[17], PM-IM dönüşümüne dayalı WDM sisteminde çift darbe için iletim başarımını incelemiştir. Hamaoka ve diğ.[18]-[19], WDM sisteminde Raman [18], DFA [19] yükselteç kullanarak S, C, L dalga boyları için maksimum kalite faktörü kıyaslaması yapmış sıralamayı C> L> S olarak raporlamışlardır.

Bu çalışmada ise darbe üretim ve iletimi amaçlanmıştır. Diğer çalışmalara göre daha basit bir devrenin benzetimi/geliştirimi yapılmıştır. Maksimum kalite faktörüne büyükten küçüğe; SOA akımı 60 mA iken sıralaması L>S>C, SOA akımı 150 mA iken sıralaması S>L>C, SOA akımı 180 mA iken sıralaması L>C>S şeklindedir. Nispeten L dalga boyunda daha büyüktür. En iyi değer 180 mA L dalga boyunda ve en kötü değerler 60 mA C dalga boyunda elde edilmiştir. Çalışmamızda benzetim ve geliştirimini yaptığımız [17]'de üretilen ikili darbeye ilave üçlü darbe de elde edilmiştir. Elde ettiğimiz üçlü ve ikili darbelerin yüzde KBG'si 100' dür.

Tablo 5. Literatür kıyaslama tablosu.

Table 5. Literature comparison table.

Çalışma	Dalga Boyu	Yükselteç	Yükselteç Besleme Akımı (mA)	UWB darbe üretim methodu	Üretilen UWB darbe dçesi	Dalga boyu kıyaslama çesi	Amaç	KBG değeri %	Dalga boyu kıyaslaması
[9]	C	SOA	170 240 100	XGM	Tekli	KBG	Darbe Üretimi	175	-
[12]	C	SOA	20	XPM, PM-IM	Tekli, İkili	KBG	Darbe Üretimi	160 155	-
[13]	C	SOA	20 90 110	SGDBR, PM-IM	Yüksek dereceli Gauss darbelerine benzer darbeler	KBG	Darbe Üretimi	51 60 42	-
[11]	C	SOA	120 180 240	MZM	Tekli	KBG	Darbe Üretimi	-	-
[8]	-	SOA	100 150 200	XGM	Dörtlü Beşli	KBG	Darbe Üretimi	86	-
[16]	S, C, L	SOA	-	WDM	-	SNR	İletim	-	C>L>S
[17]	-	-	-	PM-IM, WDM	İkili	KBG	İletim	166	-
[19]	S, C, L	DFA	-	WDM	-	Maksimum kalite faktörü	İletim	-	C>L>S
[10]	-	SOA	270 470 670	NOLM, XPM, PM- IM	Tekli	Yarı maksimumda tam genişlik (Fwhm)	Darbe üretimi	-	-
[18]	S, C, L	Raman	-	WDM	-	Maksimum kalite faktörü	İletim	-	C>L>S
[7]	S, C, L	SOA	-	WDM	-	Kanal bit oranı	İletim	-	C>L>S
[14]	S, C, L	SOA, EDFA	-	WDM	-	SNR	İletim	-	C>L>S
[15]	S, C, L	SOA	-	WDM	-	SNR	İletim	-	-
Bu çalışma (*)	S, C, L	SOA	60 150 180	PM-IM	Üçlü İkili İkili	Maksimum kalite faktörü	Darbe Üretimi ve iletim	100	L>S>C S>L>C L>C>S

4 Sonuçlar

ITU-T G.652.D fiber standardına göre, O'dan U'ya doğru dalga boyu lineer olmayan parametresi azalırken etkin alanı artmaktadır. Buglia, Raman ve DFA yükselteçleri kullanarak farklı koşullar altında S, C ve L dalga boyları için SNR, güç analizleri elde etmiştir [20]. Benzetim ve geliştirimi yapılan [17]'ye göre bu çalışmada ilave olarak üçlü UWB Gauss darbe de elde edilmiştir. Farklı akım seviyelerinde gözlenen darbe şekli dönüşümleri, yalnızca benzetim parametrelerine özgü olmayıp, SOA'nın evrensel doğrusal olmayan taşıyıcı dinamiklerinin doğal bir sonucudur. Hamaoka ve arkadaşları, dalga boyları için kalite faktörünün büyükten küçüğe göre sıralamasını C, L, S olarak raporlamıştır [7],[18],[19].

Bu çalışmada 60 mA besleme akımlı SOA'nın etkisiyle sıralama büyükten küçüğe L, S, C; 180 mA'de L, C, S; 150 mA iken S, L, C şeklinde bulunmuştur. Kalite faktör değerleri literatürdeki bazı çalışmalara göre daha düşük olmakla birlikte, tüm dalga boylarında en düşük kalite faktörü 60 mA, en yüksek kalite faktörü ise 180 mA SOA besleme akımında elde edilmiştir. Ayrıca 60 mA için Gauss üçlü, 150 ve 180 mA için ise Gauss ikili darbe üretilmiştir. Frekans analizlerinde yer yer küçük sınır aşımaları görülmesine rağmen FCC maskesi ile genel uyum sağlanmıştır. Sonuç olarak, fotonik UWB devresi için S, C ve L dalga boylarında SOA akım değişiminin sistem performansına etkisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve özellikle L dalga boyunda

uygulamaların artırılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir. SOA tabanlı UWB darbe üretim çalışmalarının büyük çoğunluğunda, darbe özellikleri tek bir dalga boyu bandında (çoğunlukla C bandı) incelenmiş ve SOA besleme akımının darbe şekli üzerindeki etkisi sistem performans metrikleri (kalite faktörü, BER) ile birlikte S, C ve L bantlarını kapsayacak şekilde karşılaştırmalı olarak ele alınmamaktadır. Bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurarak, S, C ve L fiber dalga boylarında SOA besleme akımına bağlı olarak hem darbe şeklindeki dönüşümü (üçlü-ikili) hem de buna karşılık gelen kalite faktörü ve BER değişimlerini aynı sistem çatısı altında ve karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Özellikle basit bir devre tasarımıyla 60 mA'de elde edilen üçlü UWB Gauss darbe üretimi, bu çalışmanın literatüre sunduğu özgün katkılardan biridir. Ayrıca, en yüksek sistem performansının 180 mA'de L bandında elde edilmesi, UWB iletim sistemleri açısından pratik uygulamalara yönelik önemli bir çıkarım sunulmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, SOA'nın doğrusal olmayan etkilerinin bant geçiren filtre (BGF) ile birlikte kullanımı farklı dalga boylarında detaylı olarak karakterize edilerek, darbe şeklinin daha hassas biçimde kontrol edilebildiği yeniden yapılandırılabilir fotonik UWB üreteçlerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bununla birlikte, önerilen yapının deneysel olarak gerçekleştirilmesi ve S+C+L bantlarını kapsayan WDM tabanlı çok kanallı yapılar incelenecektir.

5 Conclusions

According to the ITU-T G.652.D fiber standard, the effective area increases as the wavelength nonlinear parameter decreases from O to U. Buglia obtained SNR and power analyses for the S, C, and L wavelengths under different conditions using Raman and DFA amplifiers [20]. In this study, a triple UWB Gaussian pulse was also obtained in accordance with the simulation and development reported in [17]. The pulse shape transformations observed at different current levels are not only specific to the simulation parameters but are a natural consequence of the universal nonlinear carrier dynamics of SOA. Hamaoka et al. reported the ranking of the quality factor from largest to smallest for the wavelengths as C, L, S [7],[18],[19]. In this study, under the effect of an SOA supply current of 60 mA, the ranking from largest to smallest was found to be L, S, C; at 180 mA, L, C, S; and at 150 mA, S, L, C. Although the quality factor values are lower than those reported in some studies in the literature, the lowest quality factor was obtained at 60 mA and the highest quality factor at 180 mA SOA supply current across all wavelengths. Furthermore, Gaussian triple pulses were generated for 60 mA, and Gaussian double pulses for 150 and 180 mA. Despite occasional minor overshoots in frequency analyses, overall agreement with the FCC mask was achieved.

Consequently, the effect of SOA current variation on system performance at wavelengths S, C, and L for the photonic UWB circuit was investigated in detail, and it was deemed appropriate to increase applications, particularly in the L band. In the vast majority of SOA-based UWB pulse generation studies, pulse characteristics have been investigated in a single wavelength band (mostly C-band), and the effect of the SOA supply current on the pulse shape, along with system performance metrics (quality factor, BER), has not been comparatively addressed across the S, C, and L bands. Furthermore, while single and double Gaussian pulses are predominantly reported in existing studies, triple UWB Gaussian pulse generation is covered in fewer studies. This study fills this gap in the literature by presenting both the pulse shape transformation (triple-double) and the corresponding quality factor and BER changes in S, C, and L fiber wavelengths, depending on the SOA supply current, under the same system framework and comparatively. In particular, the triple UWB Gaussian pulse generation achieved at 60 mA with a simple circuit design is one of the unique contributions of this study to the literature. Additionally, the achievement of the highest system performance at 180 mA in the L band offers a significant implication for practical applications in UWB transmission systems.

Future studies will aim to develop reconfigurable photonic UWB generators with more precise pulse shape control by characterizing the nonlinear effects of SOA in combination with a band-pass filter (BGF) at different wavelengths. Furthermore, the proposed structure will be experimentally implemented, and WDM-based multichannel structures encompassing the S+C+L bands will be investigated.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada; Meryem Filiz fikrin oluşması, literatür taraması, sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, makale yazımı; Ömer Galip Saraçoğlu makale ve başlıkların denetimi, makalenin geliştirilmesi /

iyileştirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan sonuçlar başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

8 Kaynaklar

- [1] Arnould A, Ghazisaeidi A, Le Gac D, Brindel P, Makhsian M, Mekhazni K, Blache F, Achouche M, Renaudier J. "Experimental characterization of nonlinear distortions of semiconductor optical amplifiers in the WDM regime". *Journal of Lightwave Technology*, 38(2), 509-513, 2020.
- [2] Shao J, Sun J. "Photonic ultrawideband impulse radio shape modulation based on dual-filter tuning". *Optics Letters*, 38(2), 232-234, 2013.
- [3] U.S. Federal Communications Commission. "Revision of Part 15 of the Commissions Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems". First Report and Order, ET Docket 98-153, Washington, USA, 2002.
- [4] Wang Z. "UWB signal generation and transmission technology". *2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science*, Changchun, China, 22-24 September 2023.
- [5] Wu T, Tian F, Wu Y, Yue X, Gu Y, Cui Y, Zhang Q, Ullah R. "Performance analysis and power tilt mitigation of ultra-wideband WDM transmission systems". *Photonics*, 10(5), 530, 2023.
- [6] Li C, Han X, Fu S, Gu Y, Wu Z, Zhao M. "Experimental generation of reconfigurable ultra-wideband signal based on the pulse difference by using optical polarization Synthesis". *IEEE Photonics Journal*, 14(3), 1-9, 2022.
- [7] Renaudier J, Napoli A, Ionescu M, Calo C, Fiol G, Mikhailov V, Forsyia W, Fontaine N, Poletti F, Poggiolini P. "Devices and Fibers for Ultrawideband Optical Communications". *Proceedings of the IEEE*, 110(11), 1742-1759, 2022.
- [8] Taki H, Azou S, Hamie A, Al Housseini A, Alaeddine A, Sharaiha A. "Improving the power efficiency of SOA-based UWB over fiber systems via pulse shape randomization". *Optical Fiber Technology*, 31, 161-167, 2016.
- [9] Dong J, Fu S, Shum P, Zhang X, Huang D. "Filter-free all-optical UWB monocycle generation based on the semiconductor optical amplifier (SOA) nonlinearities". *In 2007 6th International Conference on Information*, Singapore, 10-13 December 2007.
- [10] Zahari SM, Wahid MHA, Hambali NA, Juhari N, Shahimin MM. "Injection current and optical delay effects in all-optical UWB signal generation employs SOA-NOLM". *4th Electronic and Green Materials International Conference*, Bandung, Indonesia, 27-28 July 2018.
- [11] Yu Y, Dong J, Li X, Zhang X. "UWB monocycle generation and bi-phase Modulation based on Mach-Zehnder modulator and Semiconductor optical Amplifier". *IEEE Photonics Journal*, 4(2), 327-339, 2012.
- [12] Wang F, Dong J, Xu E, Zhang X. "All-optical UWB generation and modulation using SOA-XPM effect and DWDM-based multi-channel frequency discrimination". *Optics Express*, 18(24), 24588-24594, 2010.
- [13] Lv H, Yu Y, Shu T, Huang D, Jiang S, Barry LP. "Photonic generation of ultra-wideband signals by direct current modulation on SOA section of an SOA-integrated SGDBR laser". *Optics Express*, 18(7), 7219-7227, 2010.

- [14] Renaudier J, Arnould A, Ghazisaeidi A, Le Gac D, Brindel P, Awwad E, Achouche M. "Recent advances in 100+ nm ultra-wideband fiber-optic transmission systems using semiconductor optical amplifiers". *Journal of Lightwave Technology*, 38(5), 1071-1079, 2020.
- [15] Demirtzioglou I, Lorences-Riesg A, El Dahdah N, Gallet A, Yu S, Azouigui S, Charlet G. "C+ L ultra-wideband semiconductor optical amplifier for WDM systems". *49th European Conference on Optical Communications*, Stevenage, UK, 1-5 October 2023.
- [16] Renaudier J, Meseguer AC, Ghazisaeidi A, Tran P, Muller RR, Brenot R, Charlet G. "First 100-nm continuous-band WDM transmission system with 115Tb/s transport over 100km using novel ultra-wideband semiconductor optical amplifiers". *2017 European Conference on Optical Communication*, Gothenburg, Sweden, 17-21 Sept. 2017.
- [17] Pei W, Yalin G, Wen L. "Simultaneous generation and transmission of ultra-wideband wireless signals and baseband wired signals". *2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology*, 27-30 October 2017.
- [18] Hamaoka F, Nakamura M, Okamoto S, Minoguchi K, Sasai T, Matsushita A, Kisaka Y. "Ultra-wideband WDM transmission in S-, C-, and L-bands using signal power optimization scheme". *Journal of Lightwave Technology*, 37(8), 1764-1771, 2019.
- [19] Hamaoka F, Minoguchi K, Sasai T, Matsushita A, Nakamura M, Okamoto S, Kisaka Y. "150.3-tb/s ultra-wideband (s, c, and l bands) single-mode fibre transmission over 40-km using 519 gb/s/a pdm-128qam signals". *2018 European Conference on Optical Communication*, Rome, Italy, 23-27 September 2018.
- [20] Buglia H. "Modelling and Optimisation of Ultra-wideband Optical Fibre Communication Systems". Doctoral Thesis, University College London, London, England, 2025.
- [21] Filiz M, Saraçoğlu ÖG. "Analysis of photonic UWB pulse generation in S, C, L wavelengths". *2025 33rd Signal Processing and Communications Applications Conference*, İstanbul, Türkiye, 1-4, 25-28 June 2025.
- [22] Recommendation G. Sup 39: "Optical System Design And Engineering Considerations", Version 39. Geneva, Switzerland, 2016.
- [23] Tang H, Zhang M, Yang C, Liang L, Qin L, Lei Y, Jia P, Chen Y, Wang Y, Song Y, Qiu C, Cao Y, Li D, Wang L. "Semiconductor optical amplifiers with Wide gain bandwidth and enhanced polarization insensitivity based on tensile-strained quantum wells". *Sensors*, 24(11), 3285, 2024.
- [24] Van den Hout M. "Ultra-Wideband and Space-Division Multiplexed Optical Transmission Systems". Phd Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands, 2024.
- [25] Kshetrimayum RS. "An introduction to UWB communication systems". *IEEE Potentials*, 28(2), 9-13, 2009.
- [26] Optiwave Programı. "Optiwave". <https://optiwave.com> (07.09.2024).
- [27] Matlab Programı. "Matlab". <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (10.10.2024).