

Fiber Optik Kabloda Meydana Gelen Raman Saçılmasının Analizi

Selim BOYDAK¹, Murat YÜCEL^{2*}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06500, Teknikokullar, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 06500 Teknikokullar-Ankara, TÜRKİYE
(Geliş/Received : 31.05.2016 ; Kabul/Accepted : 15.06.2016)

ÖZ

Fiber optik kablo içerisinde ışık dalgaları ilerlerken, bir fotonun daha düşük enerjili fotona elastik olmayan saçılmasından dolayı, yayılan ışığın dalga boyundan farklı dalga boylarında, geri veya ileri yönlü, yeni ışık dalgaları oluşmaktadır. Bu ışık dalgaları bazı uygulamalarda istenmezken, bazı uygulamalarda ise yeni oluşan ışık dalgalarından faydalanılmaktadır. Bilinen en yaygın saçılma uygulamaları ise Brillouin ve Raman saçılmalarıdır. Bu saçılmalar kullanılarak fiber yükselteçler, fiber lazerler ve fiber sensörler üretilmektedir. Bu çalışmada, Raman saçılması teorik olarak incelenerek, tek ve çok kanallı Raman düzeneklerinde fiber boyuna bağlı olarak oluşan doğrusal olmayan Raman saçılmasının etkileri analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optik Fiber, Lineer Olmayan Saçılmalar, Raman Saçılması.

The Analysis of Raman Scattering in the Fiber Optic Cable

ABSTRACT

The light waves travel in fiber optic cable, due to the inelastic scattering of a photon to a lower energy photon, new light waves consists which have different wavelengths from the emitted light waves wavelength, back or forward directions. The emerging light waves are utilized in some applications although these light waves are undesirable in some applications. The most widely known applications are the Raman scattering and Brillouin scattering. This scattering using fiber amplifiers, fiber lasers and fiber sensors are produced. In this study, examining the Raman scattering theory, the analyzed effects of non-linear Raman scattering which occurs due to length of the fiber at the single and multi-channel Raman configurations.

Keywords: Optic Fiber, Nonlinear Scattering, Raman Scattering.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber optik kablo içindeki doğrusal olmayan saçılma etkileri, bir fotonun daha düşük enerjili fotona elastik olmayan saçılmasından kaynaklanmaktadır. Enerji farkı, ortamdaki moleküler titreşimler veya fononlar tarafından emilir. Başka bir deyişle, bir ışık dalgasının enerjisinin, daha yüksek dalga boylu başka bir dalgayla transfer olduğu söylenebilir. Öyle ki enerji farkı fononlar şeklinde görünür [1]. Diğer dalga Stokes dalgası olarak bilinir ve pompa dalgası olarak kabul edilebilir. Anti-Stokes olarak bilinen frekanstaki yüksek enerjili foton, doğru enerjinin ve momentumun fononu varsa oluşturulabilir. Fiber optik kablodaki saçılmalar doğrusal ve doğrusal olmayan saçılmalar olmak üzere iki çeşittir. Doğrusal saçılmalarda kendi arasında Rayleigh ve Mie saçılması olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Fiberde iki doğrusal olmayan saçılma olayı vardır ve ikisi de silikanın titreşimli uyarma modlarıyla ilgilidir [2-9]. Bu olay, uyarılmış Raman saçılması (URS) ve uyarılmış Brillouin saçılması (UBS) olarak bilinir. Temel fark, UBS akustik fononlardan geçerken, optik fononlar URS'ye katılır. Bu farkın bir sonucu olarak;

URS ileriye ve geriye doğru her iki yönde de oluşabilirken, UBS tek bir yönde meydana gelir. Doğrusal olmayan saçılma süreçleri, yüksek optik güç seviyelerinde orantısız zayıflamaya neden olur. Bu ayrıca, farklı bir frekansta ileri veya geri doğrultuda bir moddan diğer modlara optik güç transferine yol açar. Aslında uyarılan saçılma mekanizmaları (UBS veya URS) optik kazanç da sağlar fakat frekanstaki bir kayma ile gerçekleşir.

Literatürde saçılmalar ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, yüzeyi artırılmış Raman saçılması algılayıcısı için tek kanal fotonik kristal fiber tasarlamışlardır [10]. Tian ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, süper iletken NdO_{1-x}FxBiS₂ kristallerde Raman saçılması konusunu incelemişlerdir [11]. Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Gelişmiş yüzeyli Raman saçılması için Au:Ag kompozit oranının Nanokap dizisini oluşturmuşlardır [12]. Zhou ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, bir içecek içerisindeki zehirli molekül tespiti için yüzeyi artırılmış Raman saçılması fesleğen tohumu destekli nano parçacıkları incelemişlerdir [13]. Garrido ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Değiştirilmiş gümüş kolloidden olumsuz yüklenmiş bio analitlerin Raman saçılması uygulamasını tasarlamışlardır [14]. Jamil ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Raman saçılması

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: muyucel@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 257-265

sensörü ve 6-amino heksanetiol tarafından 2,4,6 trinitrotoluenin moleküler tanımını yapmışlardır [15]. Qi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, süt ürünlerinde penisilloik asitin hızlı tespiti için Raman saçılması stratejisini incelemişlerdir [16]. Chang yapmış olduğu çalışma da, Raman saçılması özellikleri ve geliştirilmiş optikle ZnO nun düşük sıcaklık ve büyük ölçek gelişimiyle nano enjektör sıralamasını yapmışlardır [17]. Wang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, İnce su tabakasına hapsedilmiş Raman saçılması tarafından dimetil metilfosfonatı incelemişlerdir [18]. Sharma ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Platin kaplama kontrollü altın nano çubukların yüzeyi gelişmiş Raman saçılması ve katalitik aktiviteleri ayarlamasını incelemişlerdir [19]. Akintola ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Toplu 2H-WSe2 nin Raman ve Brillouin saçılması incelemelerini gerçekleştirmişlerdir [20].

Sharma yapmış olduğu çalışma da, Relativistik plazma da ultra yoğun delikli Gaussian ışınının uyarılmış Raman saçılmasını tasarlamıştır [21]. Golasa ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Au/MoS2 hetero yapılarında düzensiz indüklenmiş Raman saçılması konusunu araştırmışlardır [22]. Motochi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, CVD Elması İyon nakliyle sertleştirilme yüzey Brillouin Saçılmasını incelemişlerdir [23]. Zalamai ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Rezonans Raman saçılması ve TlInS2 kristallerde eksitonik spektrumları araştırmışlardır [24]. Gong ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Raman pompasıyla 50 kmlik tek mod fiberde anlık Brillouin Saçılmasının kazanç karakteristiğini çıkarmışlardır [25]. Ramani ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Hava stabil koloidal bakır nanopartiküller: Sentezi, Karakterizasyonu ve Raman saçılması özelliklerini incelemişlerdir [26]. Grima ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Cu3TaSe4 ve Cu3NbSe4 :X-ray ışınlarının kırılarak yayılması, difraksiyonel sıcaklık analizi, optik emilim ve Raman Saçılmasını incelemişlerdir [27]. Meng ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Plasmonik altın nano yapıların etrafındaki Brillouin saçılmasını araştırmışlardır [28]. Lin ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Raman saçılmasıyla Cu/Cu2S/ZnO nano yapıların aktive edilmesi konusunu araştırmışlardır [29]. Feng ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Uyarılmış Raman saçılmasının uyarılmış Brillouin saçılması tarafından halka şeklinde geriye doğru sürülmesi olayını incelemişlerdir [30].

Bu makale çalışmasının, ikinci bölümünde fiber optik kablo içerisindeki Raman saçılması teorik olarak analiz edilerek, üçüncü bölümde Raman saçılmasının benzetimi yapılmıştır. Son bölümde ise meydana gelen lineer olmayan saçılmalar ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

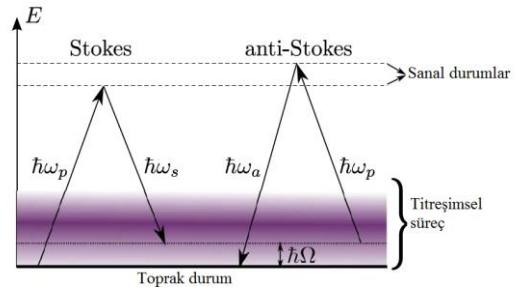
2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Raman saçılması, bir akustik fonondan ziyade yüksek frekanslı bir optik fonon üretilmesi dışında Brillouin saçılmasına benzer. Raman saçılması ileri yönde meydana gelir ve özel bir fiberdeki Brillouin eşiğinden üç kat kadar büyük bir optik güç eşiğine sahip olabilir. Tek modlu

uzun bir fiberde Raman saçılması için eşik optik güç P_R , $P_R = 5,9 \times 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB}$ (1)

ile verilir. Doğrusal olmayan saçılma tarafından işe sokulan kayıplar, uygun bir optik sinyal seviyesinin kullanımıyla ortadan kaldırılabilir. Tek modlu fiberlerde 10 mW kadar düşük optik güçlerde Brillouin eşiğinin meydana gelmesine rağmen, bu seviye optik haberleşmeler için yine de yüksek bir güç seviyesidir ve kolayca korunabilir. Büyük öz çapları ve dolayısıyla yüksek eşik optik güç seviyeleri nedeni ile Brillouin ve Raman saçılması genellikle çok modlu fiberlerde gözlenmez.

Fiber optik kabloda ω_p frekansında ilerleyen eden ışık dalgası titreşim durumunda topraktan fiber moleküllerini harekete geçirebilir. Silika fiber de titreşimsel durumda 0-40 THz aralığında $\hbar|\Omega|$ ile $|\Omega|/(2\pi)$ enerjiye sahiptir. Bu enerji foton enerjisinden $\hbar\omega_p$ daha küçüktür, titreşim durumunda doğrudan uyarma mümkün değildir. Fakat bu durum Şekil 1'de gösterilen ω_s frekansında ikinci foton içeren ikinci dereceden Raman geçişi aracılığıyla olabilir. Kendiliğinden inelastik saçılma $\omega_s = \omega_p - |\Omega|$ fotonu ω_p titreşimsel uyarımla $|\Omega|$ frekansında kendiliğinden Stokes işlemi olarak fiber isimlendirilebilir. Titreşimsel durumda ki $|\Omega|$ frekansı başlangıçta yerleşim bölgesi haline gelmişse, tamamlayıcı süreç $\omega_a = \omega_p + |\Omega|$ fotonu olmasına olanak sağlar ki bu da kendiliğinden anti-Stokes işlemi olarak isimlendirilebilir [31].



Şekil 1. Silika fiberlerde Stokes ve anti-Stokes işlemleri (The Stokes and anti-Stokes process in the silica fiber)

Moleküler titreşimler fononlar gibi davranır. Bu titreşimsel dalgaların momentumu anti-Stokes dalgalar ve pompanın uyuşmazlık momentumuna karşılık gelir ve $|\Omega|$ ya bağlı değildir. Bu sebeple Raman saçılması tercih edilebilir bir yöne sahip değildir. Bu ileri doğru aynı zaman da geriye doğru olabilir. Bir fonon dalgasının sönümlenmesi dalga sayısına bağlıdır ve daha kısa dalga boyunda daha kuvvetlidir. Fiberler de sönümlenme silikanın amorf doğasından dolayı çok güçlüdür. Bu yüzden moleküler titreşim yerel olarak kabul edildiğinde daha iyi bir yaklaşım olabilir. Buna ek olarak Stokes ve anti-Stokes işlemlerinde pompa fotonları diğer dalga boylarına dönüşebilir. Ayrıca Raman saçılması Stokes ve anti-Stokes saçılma sayesinde pompa modu fotonlar tekrar dönüştürülebilir.

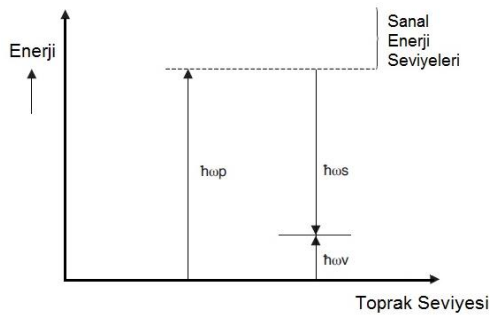
2.1. Uyarılmış Raman Saçılması (Stimulated Raman Scattering)

Raman saçılması etkisi, optik fotonla bir fotonun elastik olmayan saçılmasıdır [1] ki malzemenin üçüncü dereceden doğrusal olmayan sonlu tepki süresinden kaynaklanır

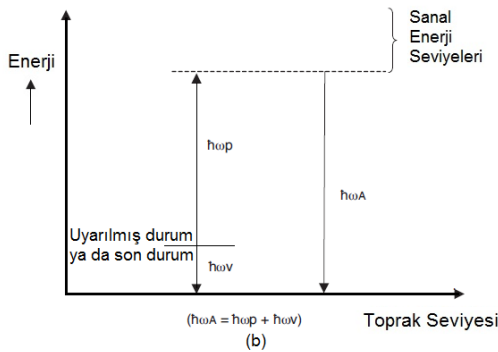
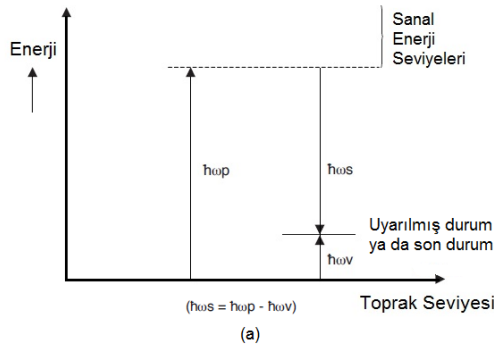
[32-33]. Optik fiber de tek renkli ışık ışını ilerlediğinde, anlık Raman saçılımı meydana gelir. Fotonların bazıları yeni frekanslara aktarılır. Saçılmış fotonlar enerji kaybeder (Stokes kayması) ya da enerji elde edebilir (anti-Stokes kayması). Pompa ışın doğrusal kutuplu ise, saçılmış fotonun polarizasyonu aynı veya dikey olabilir. Diğer frekanslarda mevcut olan fotonlar ise, bu frekanslardaki saçılma ihtimalinden dolayı artar. Bu işlem, uyarılmış Raman saçılması olarak bilinir.

Şekil 2'de Raman Saçılımının şematik gösterimi görülmektedir. Raman Saçılması Rayleigh saçılmasıyla karşılaştırıldığında daha zayıftır. Materyalin moleküler titreşim yoluyla kırılma indisinin hafif modülasyonundan dolayı oluşur. Bir malzeme boyunca enerjisi $\hbar\omega_P$ olan bir foton enerjisi $\hbar\omega_V$ ve biraz daha az enerji $\hbar\omega_S$ bir foton ile optik fonon oluşturan malzemenin bir titreşim geçişini uyarabilir öyle ki;

$$\hbar\omega_S = \hbar\omega_P - \hbar\omega_V \quad (2)$$



Şekil 2. Raman saçılımının şematik gösterimi (Schematic representation of the Raman scattering)



Şekil 3. (a) Stokes saçılma işlemi (Stokes scattering process) (b) Anti-Stokes saçılma işlemi (Anti-Stokes scattering process)

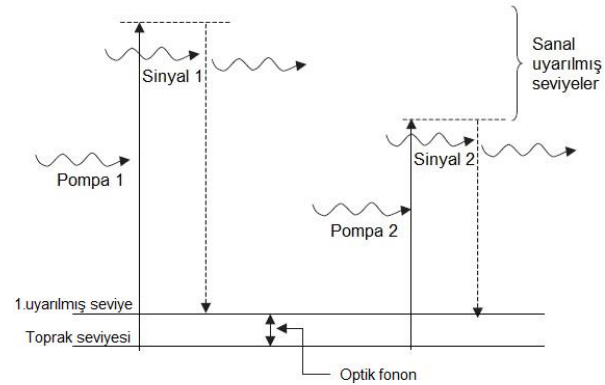
Şekil 3'de Stokes saçılma işlemi görülmektedir. Düşük enerjiyle yayılan ışık ($\hbar\omega_S < \hbar\omega_P$) Stokes saçılımına tekabül eder (Şekil 3.a). Şekil 3.b'de ise yüksek enerjiyle ($\hbar\omega_A > \hbar\omega_P$) anti Stokes saçılım olayını gösterir. Isıl denge durumunda, titreşim durumuna göre toprak seviyesinde büyük iyon sayısı nedeniyle, Stokes saçılması baskındır. Düşük enerjili yayılma seviyelerinde, anlık Raman saçılımı meydana gelir. Bu durumda moleküller titreşime katkıda bulunur ve bu yüzden saçılan ışığın yönü doğrusal değildir. Yoğunluk düzeyi yüksek olduğunda titreşim bir osilatör olarak kabul edilir, fotonlar fazda uyumlu ve tutarlıdır. Bunun neticesinde Raman saçılması meydana gelir.

Kuantum mekaniğinde, Raman etkisi çift kuantum moleküler geçişini içeren bir süreçtir. En sık Stokes saçılımı sürecinde, olay fotonun ($\hbar\omega_P$) enerjisi daha düşük bir seviyeye ($\hbar\omega_S$) indirilir ve bu fark, kinetik enerji şeklinde silis molekülüne transfer edilir. Raman değişimi ($\omega_R = \omega_P - \omega_S$) silika titreşim enerji seviyeleri ile belirlenir. Stokes Raman süreci de ileri Raman süreci olarak bilinir ve işlemin enerji korunması şu şekildedir;

$$E_g + \hbar\omega_P = E_f + \hbar\omega_S \quad (3)$$

E_g ve E_f toprak durumu ve en son durum enerjilerini ayrı ayrı hesaplar. Olay fotonun emilimi, dağılık foton ve uyarılmış durumuna molekülün geçiş emisyonu tek adımda aynı anda gerçekleşir. Bu nedenle, Raman işlemi; yeterli sayıda Stokes fotonu oluşturulan, her zaman uyarılmış Raman etkisini mümkün kılan, tek aşamalı bir süreç olarak kabul edilebilir.

Şekil 4 kompozit uyarılmış Raman saçılmasını açıklamaktadır. Doğrusal olmayan polarizasyon, bir elektronun bir üst sanal seviyeye uyarılmasına neden olur. Farklı pompa frekanslarının seçimi birçok frekanslarda uyarılmış yayılma ile sonuçlanır [33].



Şekil 4. İki pompa dalga boyu için uyarılmış Raman saçılması (Stimulated Raman scattering for two pump wavelength)

Klasik elektromanyetik konsept ile, uyarılmış Raman saçılımı (URS) sinyal yoğunluğu artışı pompa üretimi ve sinyal yoğunluğuyla orantılıdır. Örneğin,

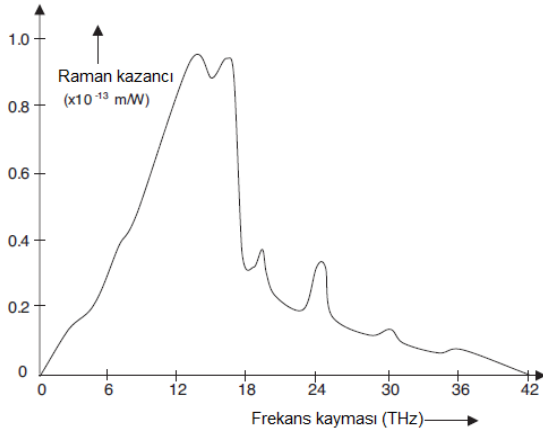
$$\frac{dI_S}{dz} = g_R I_P I_S \quad (4)$$

Burada g_R Raman-kazanç katsayısıdır.

Uyarılmış salınım üretmek için, Stokes ve pompa dalgaları mekânsal ve geçici olarak örtüşmelidir. Raman-kazanç katsayısı g_R kendiliğinden Raman saçılımı ile alakalıdır. Raman saçılımı ihtimali her kesitteki pompa dalgasında bulunan fotonların sayısı ve Raman kesitiyle orantılıdır. Raman kesitinin frekans spektrumunu neredeyse tamamen malzeme özellikleri belirler çünkü Raman süreci moleküllerin titreşim durumuyla ilgilidir. Kristal malzemelerde Raman saçılım ışığı dar bir bant genişliğine sahiptir. Optik fiberlerin ana bileşeni olan silika, doğada biçimsiz halde bulunur. Bu tip malzemelerin titreşimsel enerji seviyeleri açık değildir fakat birleşerek bant biçimini alırlar [35]. Bu tip durumlarda Stokes frekansı (ω_S) pompa frekansından (ω_P) geniş bir aralık boyunca ayrılabilir. Raman kayması için 13 THz ve 15 THz de iki tepe nokta ortaya çıkar ($\omega_R = \omega_P - \omega_S$). Ayrıca bu kayma için spektrum da daha düşük tepe noktaları da mevcuttur (Şekil 5) [36]. Stokes dalgalarının ilk artışı Eşitlik 5’de verilmiştir. Fiber kayıplarını dikkate alarak, Stokes dalgalarındaki net artış aşağıdaki şekilde yazılır;

$$\frac{dI_S}{dz} = g_R I_P I_S - \alpha_S I_S \quad (5)$$

Burada α_S güçyitirim katsayısıdır.



Şekil 5. 1µm pompa dalga boyundaki silika için Raman kazanç spektrumu (Raman gain spectrum for silica in 1µm pump wavelength)

Pompa dalgası için birleştirilmiş eşitlik aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{dI_P}{dz} = -\frac{\omega_P}{\omega_S} g_R I_P I_S - \alpha_P I_P \quad (6)$$

Eşitlik 5 ve 6 ileri Raman saçılım süreci için birleştirilmiş dalga denklemi olarak bilinir [6]. Geriye doğru URS süreci durumunda, Eşitlik 6 aynı kalır fakat Eşitlik 5’de dI_S/dz ’nin başına eksi getirilir. Bu denklem kurulumu URS süreciyle benzerdir. İleri ve geri doğru URS süreci birleştirilmiş denklemleri, fotonların her bir ışında ortaya çıkması ve gözden kaybolması dikkate alınarak görüngenel şekilde anlaşılabilir. Fiber yüzünden oluşan kayıplar çıkarıldığında Eşitlik 5 ve 6 yeniden yazılabilir;

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{I_S}{\omega_S} + \frac{I_P}{\omega_P} \right) = \quad (7)$$

Bu denklem pompadaki fotonların ve URS süreci boyunca Stokes dalgalarının toplam sayısının korunumu kanununu açıklar. Pompa gücü, eşik gücü olarak bilinen belirli bir güç seviyesini aştığı zaman Raman sürecinde uyarılma ortaya çıkar. Uyarılmış saçılımının büyümesi için uyarılmış artış lineer kayıpları geçmelidir.

URS her iki yönde de meydana gelebilir, örneğin optik fiberlerde hem ileri hem de geri doğrultudadır. İleri URS süreci durumunda pompa tükenmesi Raman eşiğini [36] hesaplamak için ihmal edilebilir. Bu nedenle Eşitlik 6’nın sağ tarafındaki ilk terim ihmal edilebilir.

$$\frac{dI_P}{dz} = -\alpha_P I_P \quad (8)$$

Bu denklemin çözümü şu şekilde yazılabilir;

$$I_P(z) = I_0 \exp[-\alpha_P z] \quad (9)$$

$$I_S(L) = I_S(0) \exp[g_R I_0 L_{eff} - \alpha_P L] \quad (10)$$

Burada efektif uzunluk $L_{eff} = \frac{1 - \exp[-\alpha_P L]}{\alpha_P}$ olup, URS; fiber uzunluğu boyunca kendiliğinden gelişen Raman saçılmasından meydana gelmektedir. Stokes gücü, eşitliğe ve tüm Raman kazanç spektrumuna göre $\hbar\omega$ enerjisinindeki her frekansın yükseltilmesi göz önüne alınarak hesaplanır.

$$P_S(L) = \int_{-\infty}^{\infty} \hbar\omega \exp[g_R(\omega_P - \omega)I_0 L_{eff} - \alpha_S L] d\omega \quad (11)$$

$\omega = \omega_S$ kabul edilerek, Eşitlik 11 aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$P_S(L) = \int_{-\infty}^{\infty} \hbar\omega_S \exp[g_R(\omega_P - \omega)I_0 L_{eff} - \alpha_S L] d\omega_S \quad (12)$$

Güç açısından ise, Eşitlik 9 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_P(L) = P_0 \exp[-\alpha_P L] \quad (13)$$

$P_0 = I_0 A_{eff}$ eşitliğindeki pompa gücü girdi olarak belirtilmiştir ve A_{eff} etkin alandır. Raman eşiği aynı zamanda pompa gücü girdisi (Stokes gücü fiber çıkışında pompa gücüne eşit olduğu an) olarak da ifade edilir. Yani;

$$P_S(L) = P_P(L) = P_0 \exp[-\alpha_P L] \quad (14)$$

$\alpha = \alpha_S$ varsayımıyla, Eşik durumu aşağıdaki gibi tahmin edilebilir:

$$P_{th} \approx \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (15)$$

Benzeri analiz ters URS için de gerçekleştirilebilir ve eşik gücü yaklaşık olarak:

$$P_{th} \approx \frac{20A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (16)$$

İleri URS için eşik gücüne, verilen ilk pompa gücünde ulaşılır. Geri URS ise genellikle fiberlerde gözlemlenmez. Eşitlik 16 bir çok yaklaşımlar kullanılarak elde edilmiştir, ama Raman eşiği oldukça doğru ve kesin olarak elde edilebilmektedir. 1550 nm’deki tipik optik haberleşme sisteminde $A_{eff} \approx 50 \mu\text{m}^2$, $L_{eff} \approx 20 \text{ km}$ ve $g_R = 6 \times 10^{-14} \text{ m/W}$ ’dir. Bu değerler eşliğinde Eşitlik 16’da yerine konulduğunda $P_{th} \approx 570 \text{ mW}$ olarak bulunabilir. Optik haberleşme sisteminde kanal güçleri genellikle 10 mW altındadır, URS süreci tek kanallı optik

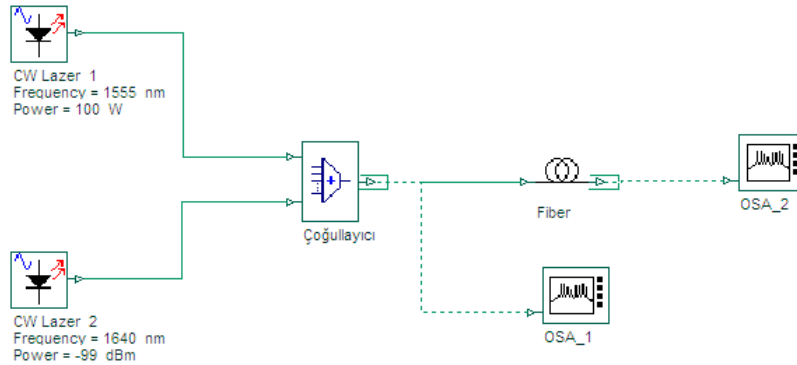
dalga sistemleri için sınırlayıcı bir faktör değildir. Buna rağmen büyük ölçüde çok kanallı dalga boyu bölmeli çoğullama (DBÇ) sistemlerinin performansını etkiler.

3. RAMAN SAÇILMASININ BENZETİMİ (SIMULATION OF RAMAN SCATTERING)

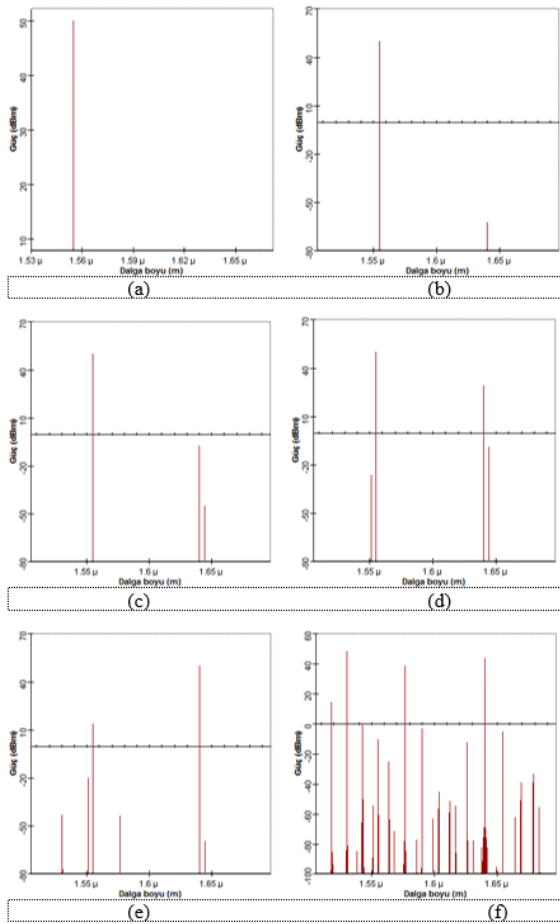
Bu makale de giriş sinyallerinin fiber optik kabloda oluşturduğu Raman saçılması OptiSys 12.0 yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak yüksek güçlü ve

düşük güçlü iki kanal tek modlu fibere uygulanarak fiber boyuna bağlı olarak oluşan Raman saçılmaları analiz edilmiştir. Tek bir zayıf güçlü kanal kullanıldığı için bu düzenek tek kanallı düzenek olarak adlandırılmıştır.

Şekil 6'da Raman saçılmasının tek kanallı analiz düzeneği şematik olarak görülmektedir. 2 adet sürekli dalga (CW) lazer sinyali sırasıyla 1555 nm ve 1640 nm dalga boyu ve 50dBm ve -99 dBm güç değerlerine sahip olarak seçilmiştir. Daha sonra bu sinyaller DBÇ'den ge-



Şekil 6. Raman saçılmasının tek kanallı analiz düzeneği (Single channel analyzed configuration of Raman Scattering)



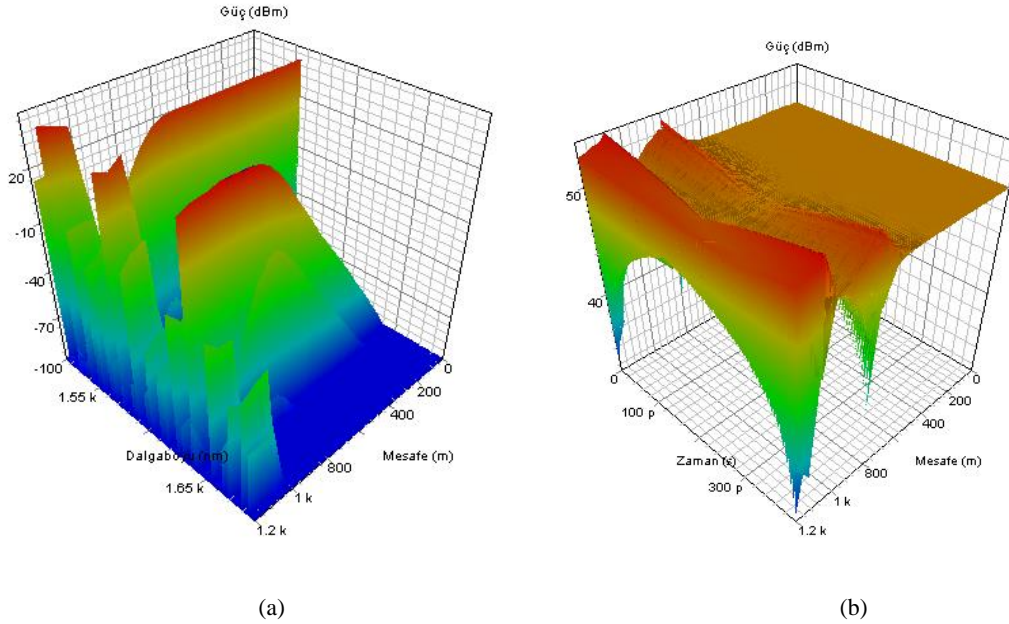
Şekil 7. (a) Giriş sinyallerinin optik spektrumu (Optical spectrum of the input signals), (b) 200 m için (for 200 m), (c) 500 m için (for 500 m), (d) 700 m için (for 700 m), (e) 1000 m için (for 1000 m), (f) 1200 m için (for 1200 m)

çirilerek 200 m, 500 m, 700 m, 1000 m ve 1200 m uzunluklardaki tek modlu fibere uygulanmıştır. DBÇ çıkışındaki optik spektrumlar OSA_1 ile, fiberin sonundaki optik sinyal spektrumları ise OSA_2 ile görülmüştür.

Şekil 7(a)'da, 1555 nm'lik giriş sinyali görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi sinyal gücü 50 dBm dir. -99 dBm'lik ikinci kanal çok zayıf olduğu için spektrumda görülmemiştir. Öncelikle 200 m fiber boyu için yapılan simülasyonlarda, Şekil 7(b) incelendiğinde fiber çıkışında 2. kanaldan uygulanan sinyal gücünün değiştiği görülmektedir. İlk kanal için elde edilen dalgaboyu ve güç değerleri aynı iken, ikinci kanal çıkışında -62 dBm'lik güç ölçülmüştür. Şekil 7(c)'de 500 m'lik fiber optik kablo için simülasyon tekrarlanmıştır. Fiber hattın uzunluğu arttıkça ilk kanalın güç değerinin sabit kaldığı, 2. kanaldan uygulanan sinyallerin çıkış gücünün ise yükseldiği (1640 nm için -5 dBm), bunun yanısıra 1644 nm dalgaboyu ve -48 dBm güçte yeni bir saçılmanın meydana geldiği görülmektedir. Şekil 7(d)'de ise 700 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Bu fiber boyu için yapılan simülasyonlarda, ilk kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun sabit kaldığı, diğer kanaldan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumlarının yükseldiği, bunun yanısıra bir önceki fiber boyu ile kıyaslandığında 1551 nm dalga boyu ve -28 dBm güçte yeni bir saçılmanın meydana geldiği görülmektedir. Şekil 7(e)'de 1000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. İlk kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun azaldığı, diğer kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun ise yükseldiği gözlemlenmiştir. 700 m'lik boyda gözlemlenen 1644 nm'lik saçılmanın güç değeri ise bu boyda azalmıştır. Aynı fiber boyundaki

1551 nm'lik saçılmada ise yükselme gözlemlenmiştir. Ayrıca iki yeni lazer saçılması meydana gelmiştir. Meydana gelen yeni saçılmaların dalgaboyu ve güç değerleri sırasıyla 1529 nm ve -40 dBm ile 1575 nm ve -40 dBm dir. Bu saçılmalar Stokes ve anti-Stokes saçılmaları olarak açıklanabilir. Şekil 7.(f)'de 1200 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Bu şekilde de ilk kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun düştüğü diğer kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun ise azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çeşitli dalgaboyu ve güçler de bir çok yeni saçılma meydana gelmiştir.

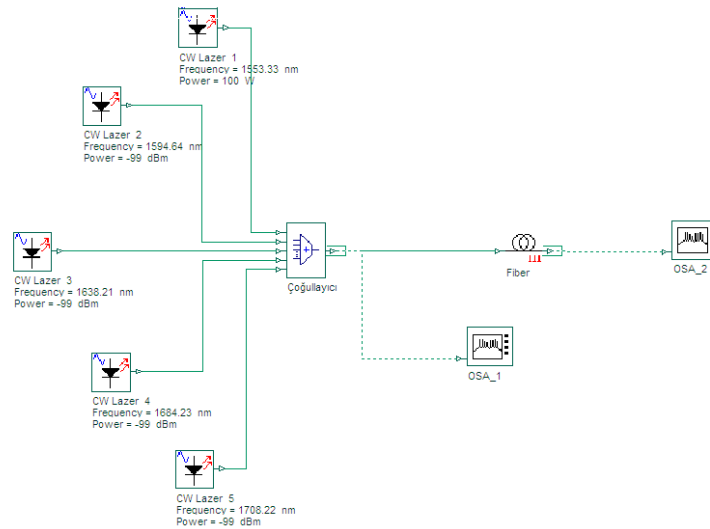
şekillere mesafe eksenini eklenerek üç boyutlu spektrum oluşturulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere fiberin başında olmayan veya az olan Raman saçılmaları fiber boyu uzadıkça artmakta ve özellikle 1200 m'ye ulaştığında maksimum sayıda yeni saçılma oluşmaktadır. Simülasyon süresi ve yeni saçılma sayısı arttığı için daha uzun mesafelerde ölçüm yapılmamıştır. Şekil 8.(b)'de ise zamana bağlı 1200 m'lik fiber optik kablunun üç boyutlu çıkış spektrumu görülmektedir. Zamana bağlı üç boyutlu şekil incelendiğinde, 600 m ve 1200 m civarında çıkış güç değerinde zayıflamalar gözlemlenmiştir. Bu zamana bağlı zayıflamalar yaklaşık 300 ps'lik zaman



Şekil 8. 1200 m'lik fiber optik kablo için (for 1200 m fiber optic cable), (a) Dalga boyuna bağlı çıkış spektrumu (The output spectrum depend on the wavelength), (b) Zamana bağlı çıkış spektrumu (the output spectrum depend on the time)

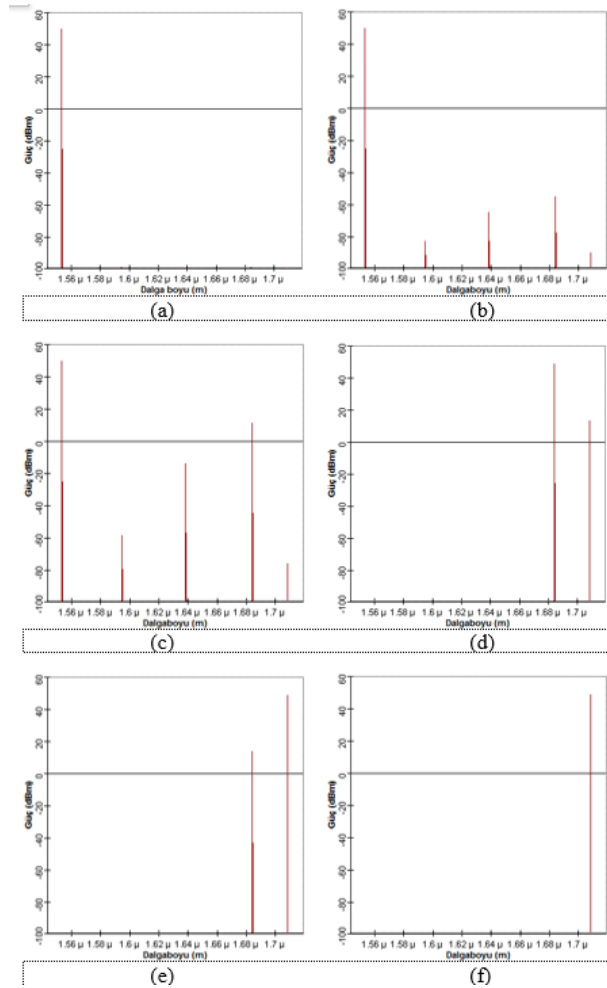
Şekil 8(a)'da dalga boyuna bağlı 1200 m'lik fiber optik kablunun üç boyutlu çıkış spektrumu görülmektedir. Bu şekilde, saçılmaların daha net görülebilmesi için önceki

aralığında gerçekleşmekte olup, rastgele oluşan yeni saçılmaların etkisi olarak açıklanabilir.



Şekil 9. Çok kanallı Raman saçılmasının şematik düzeneği (Multi-channel schematic layout of the Raman scattering)

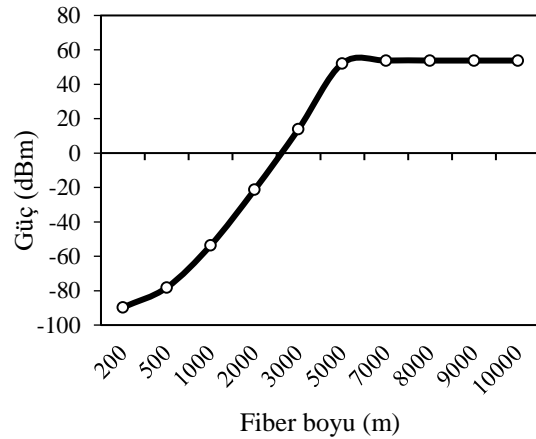
Şekil 9'da birden fazla zayıf güçteki sinyaller için Raman saçılmasının şematik düzeneği görülmektedir. Beş adet sürekli dalga (CW) lazer sinyali sırasıyla 1553.33 nm ve 100 W, 1594.64 nm ve -99 dBm, 1638.21 nm ve -99 dBm, 1684.23 nm ve -99 dBm, 1708.22 nm ve -99 dBm dalgaboyu ve güç değerlerine sahip olarak seçilmiştir. Daha sonra bu sinyaller DBÇ'den geçirilerek farklı uzunluklardaki fiberlere uygulanmıştır. DBÇ çıkışındaki optik spektrumlar OSA_1 ile, fiberin sonundaki optik sinyal spektrumları ise OSA_2 ile görüntülenmiştir.



Şekil 10. (a) Giriş sinyallerinin optik spektrumu (Optical spectrum of the input signals), (b) 200 m için (for 200 m), (c) 500 m için (for 500 m), (d) 3000 m için (for 3000 m), (e) 5000 m için (for 5000 m), (f) 10000 m için (for 10000 m)

Şekil 10(a)'da OSA_1'den elde edilen optik sinyal spektrumu görülmektedir. Beş ayrı kanaldan uygulanan sinyaller incelendiğinde fiber hattın başında sadece 1553 nm

dalgaboyu ve 50 dBm güce sahip lazer sinyali görülmekte olup, diğer kanallar ise zayıf optik güçleri nedeni ile gözlemlenmemektedir. Şekil 10(b)'de 200 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Şekil incelendiğinde fiber çıkışında beş kanaldan uygulanan lazer sinyalleri farklı güçlerde oluşmuştur. Fiber başındaki spektrum ile bu spektrum karşılaştırıldığında diğer kanallardaki sinyallerin güçlendiği ve optik spektrum çıktısında görülmeye başladığı anlaşılmaktadır. Şekil 10(c)'de 500 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Fiber hattın uzunluğu arttıkça zayıf güçteki kanallardan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumlarının daha da yükseldiği görülmektedir. Şekil 10(d)'de 3000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Fiber hat uzunluğu 3000 m olarak değiştirilerek simülasyon tekrarlandığında 1, 2 ve 3. kanaldan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumlarının yok olduğu diğer kanallardan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumunun ise arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 10(e)'de 5000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Fiber hat uzunluğu 5000 m olarak değiştirilerek simülasyon tekrarlandığında 4. kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun düştüğü 5. kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun ise arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 10(f) 10000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Daha uzun fiber kullanıldığında son kanal gücünün doyuma ulaştığı görülmüştür. Bu nedenle 10000 m'de benzetim sonlandırılmıştır. Ancak 8 km'lik fiber boyunda doyuma girdiği için bu fiber boyu yeterlidir. Her kanal ve fiber boyu için elde edilen dalgaboyu ve güç değerleri aşağıdaki Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 11. Son kanal için fiber boyuna göre güç değişimi (1708.22 nm) (The power change via to the fiber length for the last channel)

Çizelge 1. Herbir fiber optik kablo için kanal güç değerleri (Power values of channel for each optical fiber cable)

	200 m	500 m	3000 m	5000 m	10000 m
Dalgaboyu (nm)	Güç (dBm)	Güç (dBm)	Güç (dBm)	Güç (dBm)	Güç (dBm)
1553.33	50.25	51.37	-	-	-
1594.64	-81.19	-59.12	-	-	-
1638.21	-61.32	-11.37	-	-	-
1684.23	-51.45	12.49	55.13	18.29	-
1708.22	-89.73	-78.18	13.86	52.13	52.50

Şekil 11'da ise son kanal için fiber boyuna göre güç değişimi görülmektedir. Fiber boyu arttıkça kanal gücü yükselmiş ve yaklaşık 5000 m'de ise doyuma girdiğinden sabit kalmıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu makale çalışmasında, Raman saçılması teorik olarak analiz edilerek, tek kanallı ve çok kanallı Raman saçılmasının benzetimleri yapılmıştır. Bu benzetimler sonucunda, tek kanallı düzeneğe fiber boyu artırılarak giriş kanallarının güç değerleri incelenmiştir. Fiber boyu arttıkça gücün değiştiği ve farklı dalga boylarında yeni saçılmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Daha sonra girişe birden çok kanal eklenerek simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Fiber başında sadece güçlü kanal gözlemlenirken, fiber boyu arttırıldıkça diğer kanalların fiber çıkışın da gözlemlenmeye başlamış ancak 5000 m gibi daha uzun bir mesafeye çıkarıldığında bir kanalın güçlendiği diğer kanalların ise zayıfladığı görülmüştür. 10000 m'ye kadar tekrarlanan simülasyonlarda güçlenen kanalın doyuma ulaşarak aynı güç de seyrettiği gözlemlenmiştir. Diğer kanallar ise tamamen kaybolmuştur. Analiz sonuçlarından hareket edilerek birinci analizde farklı pompa dalga boylarının seçimi ile birçok dalga boyunda uyarılmış Raman yayılması ile sonuçlandırıldığı ve bunun fiber boyu ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. İkinci analizde ise çok kanallı sistemde uygulanan her kanal fiber boyuna bağlı olarak güç yükseltici olarak izlenmiştir.

Fiber boyu arttıkça farklı dalga boylarında oluşan Raman saçılmaları bu dalga boyuna aktarılmakta ve bu kanalın gücü yükselmektedir. Fiber boyu ile dalga boyu doğru orantılı olarak değişmiş ve uzun fiber boylarında en uzun dalga boyu olan 1708.22 nm'lik son kanal kalmıştır. Kısa dalga boyları ise kısa mesafelerde yüksek güce ulaşırken fiber boyu uzadıkça bu güç fiber tarafından soğurulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Boyd, R. W., "Nonlinear Optics", *Academic Press*, SanDiego, CA, (1992).
2. Shen, Y. R., Bloembergen, N., "Theory of stimulated Brillouin and Raman scattering", *Phys. Rev. A*, 137: 1787–1805, (1965).
3. Singh, S. P. and N. Singh, "Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications", *Progress In Electromagnetics Research*, 73: 249–275, (2007).
4. Buckland, E. L., Boyd, R. W., "Electrostrictive contribution to the intensity-dependent refractive index of optical fiber", *Opt. Lett.*, 21: 1117–1119, (1996).
5. Buckland, E. L., Boyd, R. W., "Measurement of the frequency response of the electrostrictive nonlinearity in optical fiber", *Opt. Lett.*, 22: 676–678, (1997).
6. Agrawal, G. P., "Nonlinear Fiber Optics", 3rd edition, *Academic Press*, SanDiego, CA, (2001).
7. Bars, F. and L. Resnic, "On the theory of the electromagnetic wave-propagation through inhomogeneous dispersive

- media", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 19: 925–931, (2005).
8. Wang, S., X. Guan, D. Wang, X. Ma, and Y. Su, "Electromagnetic scattering by mixed conducting/dielectric objects using high-order MOM", *Progress In Electromagnetics Research*, 66: 51–63, (2006).
9. Anupam, R., M. Chandran, C. K. Anandan, P. Mohanan, and K. Vasudevan, "Scattering behavior of fractal based metallodielectric structures", *Progress In Electromagnetics Research*, 69: 323–339, (2007).
10. Gong, Y., Zhang, B., Notake, T., Minamide, H., Olivo, M., Sugii, S., "Investigations on Polarimetric Terahertz Frequency Domain Spectroscopy", *Applied Physics A*, 115: 83–86, (2014).
11. Yong, T., Anmin, Z., Kai, L., "Raman Scattering in superconducting crystals", *Superconductor Science & Technology*, 29: 1–6, (2016).
12. Zhang, Y., Wang, C., Wang, J., "Nanoparticle array of Au:Ag composite for surface-enhanced Raman scattering", *Spectrochimica Acta Part A-Molecular And Biomolecular Spectroscopy*, 152: 461–467, (2016).
13. Zhou, Q., Meng, G., Wu, N., "Review of microfluidic approaches for surface-enhanced Raman scattering", *Sensors And Actuators B-Chemical*, 223: 447–452, (2016).
14. Garrido, C., Weiss-Lopez, Boris E., Campos Vallette, M. M. "Surface-enhanced Raman scattering activity of negatively charged bio-analytes from a modified silver colloid", *Spectroscopy Letters*, 49: 11–18, (2015).
15. Jamil, Arniza K. M., Sivanesan, A., Izake, Emad L., "Molecular recognition of 2,4,6-trinitrotoluene by 6-aminohexanethiol and surface-enhanced Raman scattering sensor", *Sensors And Actuators B-Chemical*, 221: 273–280, (2015).
16. Qi, M., Huang, X., Zhou, Yujie., "Label-free surface-enhanced Raman scattering strategy for rapid detection of penicilloic acid in milk products", *Food Chemistry*, 197: 723–729, (2016).
17. Chang, Y., "Low temperature and large-scale growth of ZnO nanoneedle arrays with enhanced optical and surface-enhanced Raman scattering properties", *Sensors And Actuators B-Chemical*, 225: 498–503, (2016).
18. Wang, J., Duan, G., Liu, G., "Detection of dimethyl methylphosphonate by thin water film confined surface-enhanced Raman scattering method", *Journal Of Hazardous Materials*, 303: 94–100, (2016).
19. Sharma, V., Sinha, N., Dutt, S., "Tuning the surface enhanced Raman scattering and catalytic activities of gold nanorods by controlled coating of platinum", *Journal Of Colloid And Interface Science*, 463: 180–187, (2016).
20. Akintola, K., Andrews, G. T., Curnoe, S. H., "Raman and Brillouin scattering studies of bulk 2H-WSe₂", *Journal Of Physics-Condensed Matter*, 27: 395–401, (2015).
21. Sharma, P., "Stimulated Raman scattering of ultra intense hollow Gaussian beam in relativistic plasma", *Laser And Particle Beams*, 33: 489–498 (2015).
22. Golasa, K., Grzeszczyk, M., Binder, J., "The disorder-induced Raman scattering in Au/MoS₂ heterostructures", *Aip Advances*, 5: 1–7, (2015).
23. Motochi, I., Naidoo, S. R., Mathe, B. A., "Surface Brillouin scattering on annealed ion-implanted CVD diamond", *Diamond And Related Materials*, 56: 6–12, (2015).

24. Zalamai, V. V., Stamov, I. G., Syrbu, N. N., "Resonance Raman scattering and excitonic spectra in crystals", *Journal Of Luminescence*, 160: 195-201, (2015).
25. Gong, H., Yang, P., Wuliji, H., "Gain characteristic of spontaneous Brillouin scattering in 50 km single-mode fiber with a Raman pump", *Optik*, 126: 2731-2734, (2015).
26. Ramani, T., Prasanth, K., Sreedhar, B., "Air stable colloidal copper nanoparticles: Synthesis, characterization and their surface-enhanced Raman scattering properties", *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures*, 77: 65-71, (2016).
27. Grima-Gallardo, P., Salas, M., Contreras, O., "X-ray diffraction, differential thermal analysis, optical absorption and Raman scattering", *Journal Of Alloys And Compounds*, 658: 749-756, (2016).
28. Meng, Z., Yakovlev, V., Utegulov, Z., "Surface-enhanced Brillouin scattering in a vicinity of plasmonic gold nanostructures", *Conference on Plasmonics in Biology and Medicine XII*, San Francisco, (2015).
29. Lin, Y., Hsu, Y., Chuang, C., "Thermally activated Cu/Cu₂S/ZnO nanoarchitectures with surface-plasmon-enhanced Raman scattering", *Journal Of Colloid And Interface Science*, 464: 66-72, (2016).
30. Feng, C., Diels, J., Xu, X., "Ring-shaped backward stimulated Raman scattering driven by stimulated Brillouin scattering", *Optics Express*, 23: 17035-17045 (2015).
31. Bloembergen, N. & Shen, Y. R., "Coupling between vibrations and light waves in , Raman laser media", *Phys. Rev. Lett.*, 12: 504-507, (1964).
32. Lan, G.-L., P. K. Banerjee, and S. S. Mitra, "Raman scattering in optical fibers", *Journal of Raman Spectroscopy*, 11: 416-423, (1981).
33. Singh, S.P. R. Gangwar, and Singh, N., "Nonlinear scattering effects in optical fibers", *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 74: 379-405 (2007).
34. Lewis, S. A. E., S. V. Chernikov, and J. R. Taylor, "Temperature dependent gain and noise in fiber Raman amplifier", *Opt. Lett.*, 24: 1823-1825, (1999).
35. Stolen, R. H., E. P. Ippen, and A. R. Tynes, "Raman oscillation in glass optical waveguide", *Appl. Phys. Lett.* 20: 62-64, (1972).
36. Stolen, R. H. and E. P. Ippen, "Raman gain in glass optical waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, 22: 276-278, (1973).