

Dağıtılmış Alt Bragg Dielektrik Yansıtıcı Işık Yayan DiyotFahrettin SARCAN^{1*}

ÖZET: Bu çalışmada alt Bragg yansıtıcısına sahip yakın kızılötesi bölgede ışımaya yapan p-i-n diyotun tasarımı, fabrikasyon detayları ve elektro-optik özellikleri incelenmektedir. İncelenen ışık yayan aygıtın aktif ışımaya bölgesi 20 adet GaInNAs/GaNAs (7 nm /13 nm) kuantum kuyusu sisteminden oluşmaktadır. Alt dielektrik aynası ise 15 adet GaAs/AlAs Bragg yansıtıcı çiftlerinin üst üste tabakasal olarak büyütülmesinden oluşmaktadır. Aygıtın ışımaya merkez dalgaboyu 1310 nm olup, spektral yarı genişliği 14.4 nm'dir. Işıma eşik akımı 20 nA olan aygıtın, 200 mA sürülen akım varlığında maksimum ışımaya gücü 38 mW'dır. Bu çalışmada, yakın kızılötesi bölgede ışımaya yapan aygıt üretilmesinin ve karakterize edilmesinin yanı sıra sadece alt Bragg yansıtıcı kullanılarak bile geleneksel ışık yayan diyotlara göre ışımaya spektral genişliğinin ve ışımaya profilinin iyileştirilebileceğini gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dağıtılmış Bragg Yansıtıcısı, kızılötesi, ışık yayan diyot, dielektrik ayna.

A quasi-cavity enhanced Light Emitting Diode

ABSTRACT: In this letter, design details and electro-optical properties of an infrared light emitting diode enhanced with a quasi-cavity structure have been reported. The quasi-cavity structure was formed with a bottom dielectric film stack. The investigated light emitting diode consists of 7 nm 20 GaInNAs/GaNAs quantum wells with 15 pairs of GaAs/AlAs Bragg Reflectors to form a quasi-cavity. The emission wavelength of the device is in between 1295 and 1325 nm with a centre wavelength of 1310 nm. The spectral linewidth is 14.4 nm. The threshold operation current of the device is 20 nA, and the maximum emission power of 38 mW is obtained under the injection current of 200 mA. It is demonstrated that using a quasi-cavity design formed by only a bottom reflector structure improve the directionality of the emission and decreases the linewidth of the infrared light emitting diode, compared with an ordinary infrared light emitting diode structure.

Anahtar Kelimeler: Distributed Bragg reflectors, infrared, light emitting diode, dielectric mirror.

¹ Fahrettin Sarcan (**Orcid ID:** 0000-0002-8860-4321), İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Vezneciler, 34134, İstanbul, Türkiye.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Fahrettin Sarcan, e-mail: fahrettin.sarcan@istanbul.edu.tr

GİRİŞ

Kompakt boyutları, teknolojik aygıtlara kolay entegrasyonu, dairesel emisyon profili ve fiber optik kablolarla bağlantı veriminin yüksek olması sayesinde dikey kaviteli optoelektronik aygıtlar hem araştırma laboratuvarlarında hem de günümüz teknolojisinde oldukça talep görmektedir (Yamada ve ark., 2005; Reichert ve ark., 2007; Chaqmaqchee ve ark., 2012; Balkan ve ark., 2015; Sarcan ve ark., 2017). Dikey kaviteli optoelektronik aygıtlar ailesinden dikey kaviteli ışık yayan diyotlar (RC-LED); spektral seçicilikleri ve güçlendirilmiş ışımaya şiddetleri sayesinde kısa erimli fiber optik iletişim sistemlerinden spesifik kızılötesi uygulamalara kadar geniş bir yelpazede geleneksel ışık yayan diyotlara bir alternatiftir. Dikey kavite sayesinde LED'nin ışımaya doğrusallığı artar ve spektral genişliği daralır (Schubert ve ark., 1992; Dorsaz ve ark., 2004; Sarcan ve ark., 2020). Dikey kaviteli optoelektronik aygıtlar, absorpsiyon/ışımaya tabakasının üst ve alt Bragg yansıtıcısı (Distributed Bragg Reflector, DBRs) ile sandviç halinde üretilmelerinin yanı sıra üst tarafında Bragg yansıtıcı alt tarafında ise kontak metalinin ayna olarak kullanılmasıyla da üretilmektedir (Song ve ark., 2000; Horng ve ark., 2006; Sarcan ve ark., 2020). Bu çalışmada ilk olarak Bragg yansıtıcısının altta olduğu ve üst yansımanın GaAs-hava ara yüzeyiyle sağlandığı dikey kaviteli LED üretilmiştir.

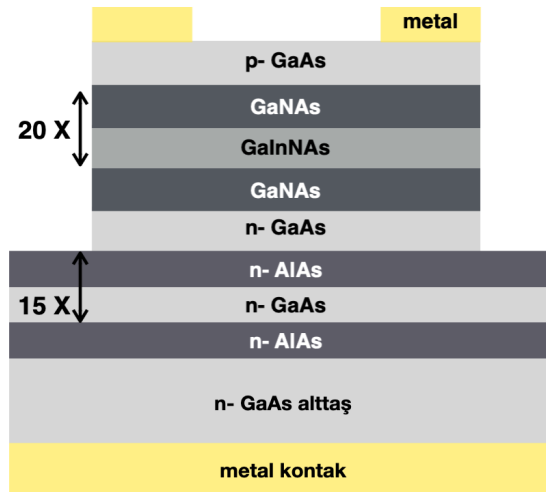
Seyreltik azotlu GaInNAs dörtlü alaşım yarıiletkeni, elemental kompozisyona bağlı olarak, absorpsiyon/ışımaya dalga boyunun $1.3 \mu\text{m}$ 'ye set edilebilmesi sayesinde, fiber optik iletişimin O-bandında kullanılmak üzere; dikey kaviteli fotodedektörler, optik yükselteçler ve ışık yayan aygıtlarda aktif materyal olarak kullanılmaktadır. Literatürde GaInNAs-tabanlı dikey kaviteli yüzey ışıması yapan laserlerle (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) alakalı pek çok çalışma olmasına rağmen (Larson ve ark., 1998; Rutz ve ark., 2007; Chaqmaqchee ve ark., 2011), dikey kaviteli LED ile alakalı sadece iki çalışma bulunmaktadır. Montes ve ark. (2009) fiber optik iletişimin O-bandı için ilk kez GaInNAs/GaAs kuantum kuyu tabanlı dikey kaviteli LED üreterek sıcaklığa bağlı karakterizasyonunu yapmışlardır. Aktif bölgesi tek kuantum kuyusundan oluşan aygıtın dikey kavitesi 8 çift n+ GaAs/AlAs üst dielektrik tabaka yığınlarından ve alt metal aynadan oluşmaktadır. Montes ve ark. (2009) bu çalışmalarında aygıtın optik gücü veya ışımaya eşik akımı gibi parametrelerini paylaşmamışlar sadece elektro-ışımaya ve akım-voltaj ölçüm sonuçlarını büyütme şartlarına ve sıcaklığa bağlı olarak rapor etmişlerdir. GaInNAs-tabanlı dikey kaviteli LED ile alakalı diğer çalışma ise; aygıtın tasarım/üretim detaylarıyla birlikte ışımaya optik gücü, eşik akım yoğunluğu gibi parametrelerini de paylaştığımız çalışmamızdır (Sarcan ve ark., 2020). Üretilen aygıt 9 adet GaInNAs/GaAs kuantum kuyusundan ve 10 üst, 15 alt GaAs/AlAs yarıiletken tabaka çiftinin üst üste büyütülmesiyle elde edilen Bragg yansıtıcılarından oluşmaktadır. Bu tasarım sayesinde 5.2 nm ışımaya spektral genişliği, %20 kuantum verimi ve 45 A/cm^2 akım yoğunluğu altında 0.5 mW ışımaya gücü elde edildiği rapor edilmiştir.

Bu çalışmada, bilindiği kadarıyla literatürde ilk kez, 20 adet GaInNAs-GaNAs kuantum kuyu tabanlı, 15 adet GaAs/AlAs (%99 yansıma) yarıiletken tabaka çiftiyle elde edilen Bragg yansıtıcısı ve GaAs-hava ara yüzeyinin (%34 yansıma) üst yansıtıcı olarak kullanıldığı dikey kaviteli LED'nin tasarımı, fabrikasyonu ve çalışma parametreleri rapor edilmektedir. Elde edilen sonuçların ışığında, daha az maliyet ve daha az tasarım/üretim detayı gerektiren, sadece alt Bragg yansıtıcı ve GaAs-hava ara yüzeyiyle oluşturulan dikey kavitenin kullanılmasıyla bile aygıtın spektral ışımaya dalga boyu seçiciliğinin ve ışımaya şiddetinin güçlendirilebileceği gösterilmiştir. Aygıtın tasarım ve büyütme parametreleri ile ölçüm yöntemleri Materyal ve Yöntem bölümünde, elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirmesi Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Yarıiletken tabanlı ışık yayan aygıtlarda ışınım dalga boyu yarıiletkenin bant aralığı enerjisine bağlıdır. Çalışmada incelenen aygıtın aktif bölgesinin ışınım dalga boyu 1.3 μm olması için yarıiletkenin bant aralığı 0.95 eV olacak şekilde alaşımdaki kompozisyon miktarları belirlenmiştir. Bant Anti Crossing modeli kullanılarak, alaşımdaki In ve N konsantrasyonu sırasıyla 0.27 ve 0.025 olarak belirlenmiştir. Kavite dalga boyu 1.3 μm 'ye set edilerek Bragg kırınım yasası yardımıyla dielektrik yansıtıcıları oluşturan GaAs/AlAs tabaka çiftlerinin sayısı ve kalınlıkları belirlenmiştir. Moleküler Işın Epitaksisi kullanılarak n-tipi GaAs (100) üzerine sırasıyla büyütülen aygıt; 15 adet GaAs/AlAs yarıiletken çiftinden oluşan Bragg yansıtıcısı, 20 adet asal GaInNAs/GaNAs kuantum kuyusu ve koruyucu tabaka olarak da p-tipi GaAs tabakasından oluşmaktadır (Şekil 1). Aygıtın fabrikasyonu fotolitografi tekniği kullanılarak 400 μm çapında dairesel mesa yapısı şeklinde yapılmıştır. H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O (1: 8: 80) kimyasal solüsyonu kullanılarak Bragg yansıtıcısına kadar aşındırılarak şekillendirilen aygıtın metal kontaktları (Au/Ti) termal buharlaştırma sistemi ile oluşturulmuştur.

Spektral elektro-ışınım ölçümleri 0.5 m yüksek çözünürlüklü monokromatör (Acton) ve azot soğutmalı InGaAs fotodedektör (Hamamatsu) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Işınım gücü ölçümlerin için sistem 1.3 μm dalga boyunda ışınım yapan ışık kaynağı (Amonics ASLD130-200-B-FA) ve Ge (Thorlabs, PDA30B-EC) fotodedektör kullanılarak kalibre edilmiştir.

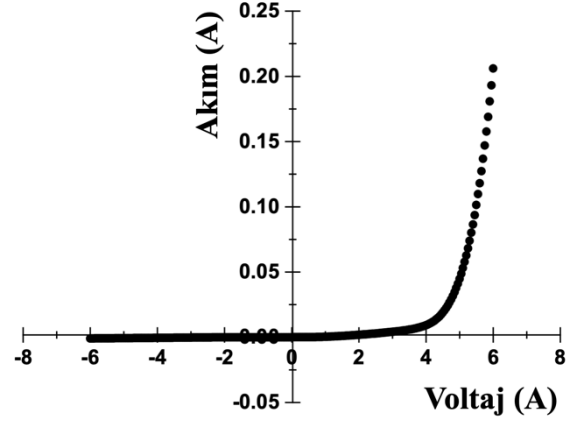


Şekil 1. Aygıtın şematik diyagramı

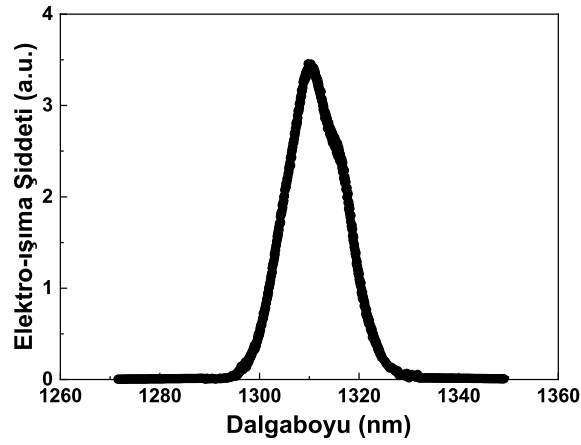
BULGULAR VE TARTIŞMA

Aygıtın oda sıcaklığı akım-voltaj (I-V) grafiği Şekil 2’de verilmektedir. 6 V geri ve ileri besleme altında ölçülen akım değerleri sırasıyla 1.3 mA ve 200 mA’dır. Şekil 2’de görüldüğü gibi geri ve ileri besleme arasındaki iki mertebeden daha büyük fark aygıtın geleneksel diyot karakteristiğine sahip olduğunu göstermektedir.

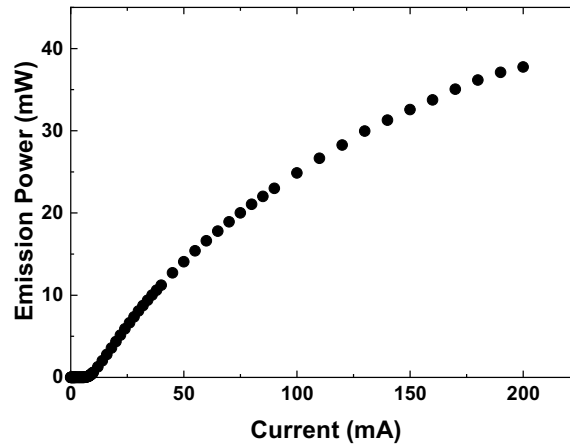
Dalgaboyuna bağlı elektro-ışınım spektrumu Şekil 3’te verilmektedir. Aygıtın spektral elektro-ışınım dalga boyu 1295 ve 1325 nm arasında olup ışınım merkez dalga boyu 1310 nm ve spektral genişliği 14.4 nm’dir. Literatürde GaInNAs-tabanlı LED’lerin alaşımdaki N konsantrasyonuna bağlı olarak elektro-ışınım spektral genişlikleri 30 ve 100 nm arasında değişmektedir (Kaschner ve ark., 2002; Murel ve ark., 2005; Erol ve ark., 2012). Bu çalışmada elde edilen 14.4 nm spektral ışınım genişliğiyle sadece alt dielektrik aynası kullanılarak bile ışınım dalga boyu seçiciliğinin iyileştirilebileceği gösterilmiştir.



Şekil 2. Aygıtın akım-voltaj karakteristiği



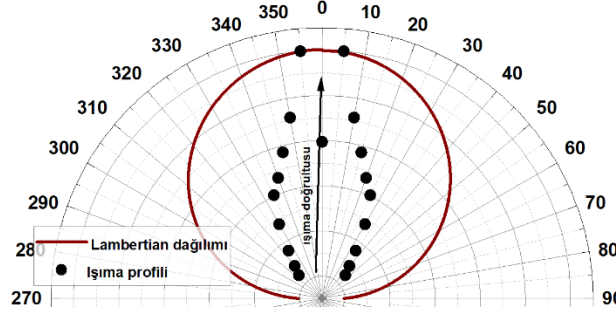
Şekil 3. Dalgaboyuna bağlı elektro-ışınma spektrumu



Şekil 4. Uygulanan akıma bir fonksiyonu olarak aygıtın ışıma gücü

Uygulanan akımın bir fonksiyonu olarak aygıtın ışıma gücü Şekil 4'te verilmektedir. Işıma eşik akımı 20 mA'dır. 200 mA uygulanan akım varlığında 38 mW ışıma gücü elde edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi aygıtın ışıma gücü, 50 mA besleme akımına kadar akımın bir doğrusal fonksiyonu olarak artmaktadır. 12 mW ışıma gücünden sonra eğim azalmaktadır. Bu durum, GaInNAs ve GaNAs

tabakaları arasındaki düşük bant süreksizliğinden kaynaklanmaktadır. Uygulanan akımın bir fonksiyonu olarak enerji kazanan taşıyıcılar kuantum kuyusu ve bariyer arasındaki düşük potansiyeli aşar ve kuantum kuyusundaki serbest taşıyıcı ve ışımalı geçiş sayısı azalır (Sarcan ve ark., 2020). Aygıtın 12 mW'ın altında optik güce ihtiyaç duyulan uygulamalarda ışık kaynağı olarak kullanılma potansiyelin yanında, uygulanan akıma bağlı olarak optik gücün değişim fonksiyonun önemli olmadığı uygulamalarda 38 mW'a kadar kullanılabilir.



Şekil 5. Aygıtın açığa bağlı ışınma profili.

Son olarak da açılı örnek tutucu yardımıyla, -45° den 45° 'ye kadar aygıtın ışınma şiddeti ölçülerek ışınma profili belirlendi. Aygıtın açığa bağlı ışınma profili geleneksel paketlenmemiş LED'in sahip olduğu Lambertian dağılımı ile birlikte Şekil 5'te verilmektedir. Işınma profilinin özellikle geleneksel LED'lerin ışınma profili ile kıyaslandığında oldukça doğrusaldır. Ayrıca açığa bağlı ışınma profilinin literatürde kelebek kanadı (butterfly wing) ışınma profili olarak bilinen şekilde olduğu gözlenmiştir. Yukarıda da bahsedildiği gibi aygıt mesa yapısı şeklinde olup yüzeyde ortası boş yüzük kontak bulunmaktadır. Alt kontak ve üst yüzük kontak arasındaki elektrik alan merkeze doğru göreceli olarak azaldığı için yüzey normalindeki (0°) ışınma şiddeti 5° ve 10° 'kinden daha düşüktür.

SONUÇ

Bu çalışmada, alt Bragg yansıtıcısına sahip yakın kızılötesi bölgede ışınma yapan p-i-n diyotun tasarım, fabrikasyon detayları ve elektro-optik özellikleri incelenmiştir. Aygıtın ışınma merkez dalgaboyu 1310 nm ve spektral yarı genişliği 14.4 nm'dir. Işınma eşik akımı 20 nA ve 200 mA sürülen akım varlığında ulaşılan maksimum ışınma gücü 38 mW'dır. Elde edilen sonuçların ışığında, daha az maliyet ve daha az tasarım/üretim detayı gerektiren, sadece alt Bragg yansıtıcı ve GaAs-hava ara yüzeyiyle oluşturulan dikey kavitenin kullanılmasıyla bile aygıtın spektral ışınma dalgaboyu seçiciliğinin ve ışınma şiddetinin iyileştirilebileceği gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje Kodu: FBA-2018-32506) tarafından desteklenmiştir. Değerli yorumları için Prof. Dr. Ayşe Erol'a ve ışınma gücü ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için laboratuvarının olanaklarını kullanmamı sağlayan York Üniversitesi'nden Dr. Yue Wang'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Balkan N, Erol A, Sarcan F, Al-Ghuraibawi LFF, Nordin MS, 2015. Dilute nitride resonant cavity enhanced photodetector with internal gain for the $\lambda \sim 1.3 \mu\text{m}$ optical communications window. Superlattices and Microstructures, 86: 467–471.

- Chaqmaqchee FAI, Balkan N, Herrero JMU, 2012. Top-Hat HELLISH-VC SOA for optical amplification and wavelength conversion for 0.85 to 1.3 μm operation. *Nanoscale Research Letters*, 7(1): 1–6.
- Chaqmaqchee FAI, Mazzucato S, Oduncu M, Balkan N, Su Y, Gunes, M, Hugues M, Hopkinson M, 2011. GaInNAs-based Hellish-vertical cavity semiconductor optical amplifier for 1.3 μm operation. *Nanoscale Research Letters*, 6: 104.
- Dorsaz J, Carlin JF, Zellweger CM, Gradecak S, Ilegems M, 2004. InGaN/GaN resonant-cavity LED including an AlInN/GaN Bragg mirror. *Physica Status Solidi Applied Research* 201(12): 2675–2678.
- Erol, A, Akalin, E, Sarcan, F, Donmez, O, Akyuz, S, Arikan, CM, Puustinen, J, Guina, M, 2012. Excitation energy-dependent nature of Raman scattering spectra in GaInNAs/GaAs quantum well structures. *Nanoscale Research Letters*, 7: 656.
- Horng RH, Wang WK, Huang SY, Wu DS, 2006. Effect of resonant cavity in wafer-bonded Green InGaN LED with dielectric and silver mirrors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(3): 457-459.
- Kaschner A, Lüttgert T, Born H, Hoffmann A, Egoro AY, Riechert H, 2002. Recombination mechanisms in GaInNAs/GaAs multiple quantum wells. *Applied Physics Letters*, 78(10): 1391-1393.
- Larson MC, Kondow M, Kitatani T, Nakahara K, Tamura K, Inoue H, Uomi K, 1998. GaInNAs-GaAs long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser diodes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(2): 188-190.
- Montes M, Guzmán A, Trampert A, Hierro A, Calleja E, 2009. 1.3 μm emitting GaInNAs/GaAs quantum well resonant cavity LEDs. *Solid State Electronics* 54: 492–496.
- Murel AV, Danil VM, Drozdov YN, Gaponova DM, Shashkin VI, Shmagin VB, Khrykin OI, 2005. Electroluminescent Properties of Heterostructures with GaInNAs Quantum Wells. *Semiconductors* 39(1): 30-32.
- Riechert H, Ramakrishnan A, Steinle G, 2007. Development of InGaAsN-based 1.3 μm VCSELs. *Semiconductor Science and Technology*, 17: 892-897.
- Rutz A, Liverini V, Müller E, Schön S, Keller U, 2007. All-GaInNAs ultrafast lasers: Material development for emitters and absorbers. *Journal of Crystal Growth*, 301: 525-528.
- Sarcan F, Nordin MS, Kuruoğlu F, Erol A, Vickers AJ, 2017. Characterization of temperature dependent operation of a GaInNAs-based RCEPD designed for 1.3 μm . *Superlattices and Microstructures*, 102: 27–34.
- Sarcan F, Nutku N, Nordin MS, Vickers AJ, Erol A, 2018. A study on the voltage-dependent response of a GaInNAs-based pin photodetector with a quasi-cavity. *Semiconductor Science and Technology*, 33: 114006.
- Sarcan F, Wang Y, Krauss TF, Erucar T, Erol A, 2020. Dilute nitride resonant-cavity light emitting diode. *Optics and Laser Technology*, 122: 105888.
- Schubert EF, Wang YH, Cho AY, Tu LW, Zydzik GJ, 1992. Resonant cavity light-emitting diode. *Applied Physics Letters*, 60(8): 921–923.
- Song YK, Diagne M, Zhou H, Nurmikko AV, Schneider RP, Takeuchi T, 2000. Resonant-cavity InGaN quantum-well blue light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 77(12): 1744-1746.
- Yamada M, Anan T, Hatakeyama H, Tokutome K, Suzuki N, Nakamura T, Nishi K, 2005. Low-Threshold Operation of 1.34 μm GaInNAs VCSEL Grown by MOVPE. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(5): 950-952.