

DERLEME/REVIEW

YARIİLETKEN DİYOT LAZERLERİNİN GELİŞİMİNDE AKIM YOĞUNLUĞUNUN ÖNEM VE SEYRİ

Mustafa TEMİZ¹

ÖZ

İlk yarıiletken diyot lazerler, çoğunlukla galyum arsenit kristal bloklarından yapılmış p-n jonksiyonlarıdır. Enjekte edilen akım yoğunluğunda p-n homojonksiyon düzleminde elektron-delik birleşmesinden meydana gelen zorlanmış emisyon, malzemenin yasak bant genişliğine tekabül eden enerjilerin frekanslarında yeterli optik kazanç sağlar. Bu prensipten hareketle, tek heterojonksiyonlu, çift heterojonksiyonlu ve müteakiben kuantum çukurlu ve kuantum noktalı lazerler dizayn edilerek yarıiletken lazerlere ait akım yoğunlukları oldukça küçültülmüştür. Kuantum noktalı lazerlerde keskin lüminesans spektrum ve oldukça düşük eşik akımları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Homojonksiyonlu lazerler, Heterojonksiyonlu lazerler, Kuantum çukurlu lazerler, Kuantum noktalı lazerler.

IMPORTANCE OF CURENT DENSITY IN DEVELOPMENT OF SEMI-CONDUCTOR DIODS

ABSTRACT

The earliest semiconductor diode lasers are p-n junctions formed almost in cyristalline blocks of gallium arsenide. At injected current density the stimulated emission from the electron-hole recombination in the p-n homojunction plane creates the optical gain sufficiently. The current densities for the semiconductor lasers are more reduced by designing single-heterojunction, double-heterojunction, and then the quantum-well and the quantum-dot lasers, starting from this principle. In the quantum dot lasers a sharp luminescence spectrum and very low threshold currents have been obtained.

Key Words: Homojunction lasers, Heterojunction lasers, Quantum well lasers, Quantum point lasers.

1. GİRİŞ

Yarıiletken diyot lazerler, optik osilatörlerin son merhalesi olup kontrol uygulamaları ve kominikasyon için hayati bir öneme sahiptir. Yapısı basittir. Dışarıdan bağlanan bir gerilimle enjekte edilen akım, optik bir kazanç meydana getirir. h Planck sabitini, f frekansı, e elektronu, d_l deliği (hole-delik), E_G malzemenin yasak bant genişliğini göstermek üzere, $e+dl \rightarrow (hf)+E_G$ ile sembolleştirilen kimyasal denkleme göre foton üreten elektron ve deliklerin birleşmelerinden meydana gelen zorlanmış emisyon, lazerin çalışma prensibini oluşturur (Verdeyen, 1989). Bir yarıiletken lazerin çalışabilmesi için taşıyıcı konsantrasyonu jonksiyonlu lazerlerde

10^{18} cm^{-3} civarında ve kuantum çukurlu lazerlerde 10^9 - 10^{12} cm^{-2} civarında olmalıdır (Yariv, 1991). Bu reaksiyonu sadece direk bant yapılı ya da direk geçişli (direct band-gap) yarıiletkenler sağlar. Bu malzemeler, birbirini takip eden müsaade edilmiş en düşük kuantum enerji seviyeleri arasındaki geçişlere ait yüksek bir işgal edilme ihtimaline sahiptirler. İşgal edilmiş enerji durumları, taşıyıcıların momentumlarının bir fonksiyonu olarak ortaya çıkarlar ve malzemelerin direk bant yapılı veya indirek bant yapılı olmaları ile yakından ilgilidirler. Elektronlar iletim bandının kenarında veya biraz üzerinde bulunabilirler ve valans bandının kenarı üzerine veya biraz altına geçiş yapabilirler. Geçiş esnasında

¹ Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli.
Faks: 0258 2125538; E-posta: mtemiz@pamukkale.edu.tr
Geliş: 16 Ekim 2001; Kabul: 23 Mayıs 2002.

partiküllere ait her hangi bir reaksiyonda enerji ve momentum korunumu sağlanmalıdır (Verdeyen, 1989).

İlk yarıiletken jonksiyonlu lazerlerde 10^5 A/cm² (Adams vd., 1987) gibi büyük bir değerde olan akım yoğunluğu, araştırmalar yapıldıkça küçülmüş, günümüzde daha küçük değerlere ulaşmıştır. Akım yoğunluğunun küçülmesi ısınmayı, kaybı, fiyat ve bakım masraflarını azalttığı gibi, verimin artmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla ürünün ucuzlayıp yaygınlaşması, üretimini artırmaktadır. Akım yoğunluğunun azaltılması bu açıdan çok önemlidir.

Yarıiletken jonksiyonlu lazerleri sırasıyla kuantum çukurlu lazerler, çoklu kuantum çukurlu lazerler ve kuantum noktali lazerler izlemiştir (Bhattacharya, 1998). Kuantum noktali lazerlerde akım yoğunluğu, 1999 yılında 90 A/cm²'ye kadar düşmüş (Park vd., 1999), 2000 yılında 19 A/cm²'ye (Park, Schekin vd., 2000), aynı yıl içinde başka bir çalışmada (Diana vd., 2000) InGaAs/GaAs lazerinde 1.3 µm dalga boyunda 6 A/cm²'ye kadar küçülmüştür. 25 000-30 000 A/cm² arasındaki bir akım yoğunluğu diyot lazerlerinde kabaca 10 A'lık bir besleme akımına karşı gelir. Buna göre, 6 A/cm²'lik akım yoğunluğuna sahip olan diyot lazerinin besleme akımı 1.2 mA'dir (Diana vd., 2000).

Bu çalışmada, yarıiletken lazerlerin ve akım yoğunluğunun gelişimi incelenmiştir.

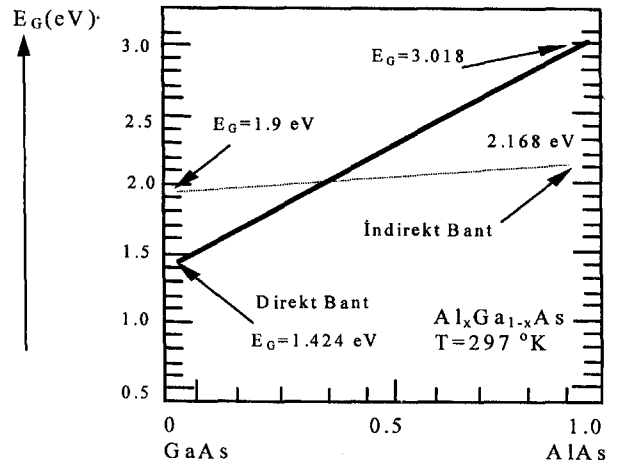
2. DİYOT LAZERLERİNDE MALZEME ÖZELLİKLERİ

Taşıyıcıların iyi bir şekilde hapsedilebilmeleri için $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesinin yasak bant genişliği galyum arsenit (GaAs) malzemesinin yasak bant genişliğinden yaklaşık 0.5 eV daha fazladır. Burada x, GaAs içine katılan alüminyum (Al) malzemesinin yüzdesini gösterir. Yani, x GaAs malzemesinde Al ile yer değiştiren galyum (Ga) miktarıdır. x mol oranı sabit tutulabildiği (Keskin Geçişli Jonksiyonlar) gibi, derece derece değiştirilebilir (Yumuşak Geçişli Jonksiyonlar).

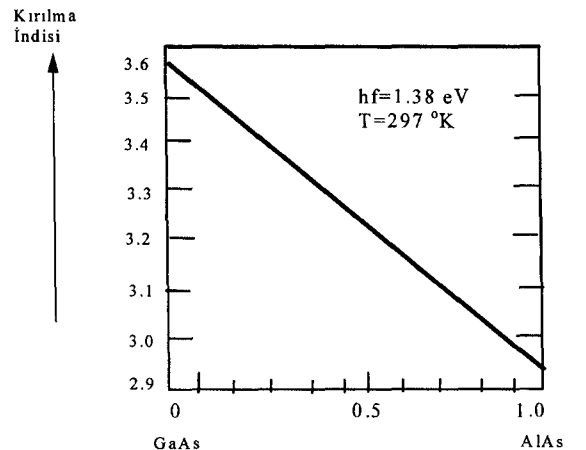
Burada GaAs ile alüminyum-arsenit (AlAs) yarıiletkenleri hemen hemen birbirinin aynı olan kafes sabitlerine sahiptirler. Meselâ, GaAs'ın kafes sabiti 5.6605 angström (Å) ve AlAs'inki ise 5.6533 Å'dür. Bundan dolayı, GaAs malzemesinde belli miktardaki Ga atomlarının Al atomlarıyla yer değiştirmesi, kafes yapısında önemli bir değişiklik meydana getirmez. Bu sebepten, GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ malzeme sistemi, bilinen üçlü atom içerenlerin en iyisidir. Bununla beraber, az da olsa bunların her birinde bir gerilme meydana gelmekte ve arayüzeyinde çok az miktarda bir tuzak yoğunluğu bulunmaktadır. GaAs içinde alüminyumun oranı arttıkça yasak bant genişliği artmakta (Şekil 1) ve kırılma indisi azalmaktadır (Şekil 2). Alüminyum atomları tamamen galyum atomlarının yerine geçtiği zaman yasak banttaki artma ve kırılma indisindeki azalma da maksimuma varmaktadır. Al'un GaAs malzemesine katılma-

sıyla elde edilen yasak bant ve kırılma indisine ait özellikler bir lütf olarak algılanmalıdır.

Malzeme teknolojisinde diğer dörtlü kafes yapısının uygunluğu, galyum-indiyum/arsenit-fosfor (GaIn) (AsP) ve galyum-indiyum/arsenit-antimon (GaIn) (AsSb) gibi materyallerle elde edilmektedir. Bu malzemeler, başarılı jonksiyonların yapılmasında kritik metalürjik malzemelerin önemlilerindedir (Verdeyen 1989). $Al_xGa_{1-x}As$, x=0.35 için n=3.33 kırılma indisine ve $E_G=1.86$ eV yasak banda ve x=0.6 için n=3.2 kırılma indisine ve $E_G=2.0$ eV yasak banda sahip olur (Li vd., 1991). GaAs malzemesi içine %37 Al katıldığında bu durum yasak bant genişliğini 1.43 eV'tan 1.92 eV'ta çıkarır. Buna karşılık kırılma indisi %5 azalır. GaAs için dalga boyu $\lambda=0.90$ mm olduğu halde Al katılınca bu $\lambda=0.64$ µm olur. Dolayısıyla, dalga boyu kırılma indisine bağlıdır. Bu özellik malzeme dispersiyonuna sebep olur (Verdeyen 1989). Uzun dalga boylu lazerler (1.1-1.6 µm) InGaAsP 4-lü alaşımı ile temin edilebilmektedir.



Şekil 1. GaAs İçine Katılan x Yüzdesine Göre $Al_xGa_{1-x}As$ 'in Yasak Bandının Değişimi.



Şekil 2. GaAs İçine Katılan x Yüzdesine Göre $Al_xGa_{1-x}As$ 'in Kırılma İndisinin Değişimi.

3. HOMOJONKSİYONLU DİYOT LAZERLER VE AKIM YOĞUNLUĞU

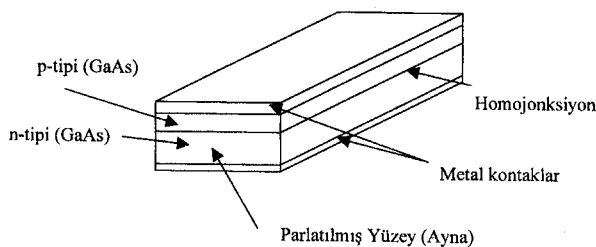
Yarıiletken lazerlerin gelişiminde en az üç dönüm noktası vardır. Bunların ilki, 1962 yılında IBM'de (Nathan vd., 1962), General Elektrik'te (Hall vd., 1962) ve MIT Lincoln Laboratuvarı'nda (Quist vd., 1962) çalışan üç araştırma grubu tarafından yarıiletkenlerde gözlenen osilasyon (lasing) olayının rapor edilmesidir.

Yarıiletken lazerlerin esası, 3 valanslı galyum (Ga) ve 5 valanslı arsenik (As) elementlerinin meydana getirdiği galyum-arsenit (GaAs) malzemesinden yapılan ve bir p-n jonksiyonunu oluşturan bir paralelkenar yüzeyden ibarettir (Şekil 3). Cihazın karşılıklı iki yüzü, yansıtıcı ayna yerine kullanılması için, kısmen parlatılır ve bir Fabry-Perot boşluğu meydana getirilir (Bhattacharya, 1998). Kâfi derecede büyük ve doğru yönlü bir gerilimin uygulanmasıyla jonksiyon civarında dar bantlı zorlanmış bir radyasyon emisyonu meydana gelir.

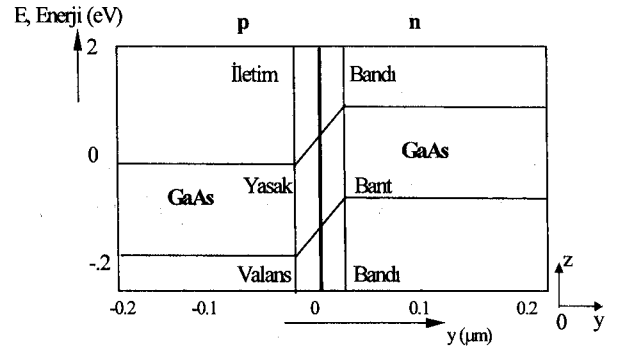
Cihazın çalışması (lasing action), boşluk modunun bir veya birden fazlasının seçici amplifikasyonu ile elde edilir. Bu ilk diyotlarda, çalışmanın elde edilmesi için, gerekli akım yoğunluğu 10^5 A/cm² mertebesinde olmuştur (Adams vd., 1987). Bu da ancak 77 K derecesindeki likit nitrojen şartlarında elde edilmiştir. Şekil 3'de GaAs malzemesinden yapılmış homojonksiyonlu bir lazer ve Şekil 4'te bunun enerji-bant modeli görülmektedir. Burada n ve p tipi yarıiletkenler GaAs'ten yapılmıştır.

Lazer fabrikasyonunda diğer bir ilerleme de lazer çalışmasının gözlemlenmesinden bir süre sonra, p-n jonksiyonunun yapılmasında epitaksiyel büyüme metodunun (Liquid-Phase Epitaxy-LPE) kullanılmasıdır (Nelson, 1963). Bundan kısa bir süre sonra 1964 yılında Dousmanis ve arkadaşlarının çalışmaları sonunda eşik akım yoğunluğu oda sıcaklığında 3×10^4 A/cm²'ye düşürülmüştür (Dousmanis vd., 1964).

Şekil 5'de yarıiletken homojonksiyonlu bir lazerin aktif bölgesinde oluşan radyasyon alanının deseni görülmektedir. Burada θ_{\perp} , desenin jonksiyona dik doğrultuda yaptığı açığı, θ_{\parallel} ise desenin jonksiyona paralel doğrultuda yaptığı açığı gösterir. Lazerin aktif bölgesinin x doğrultusundaki daha küçük boyutuna ait desen



Şekil 3. Homojonksiyonlu Bir Lazer.



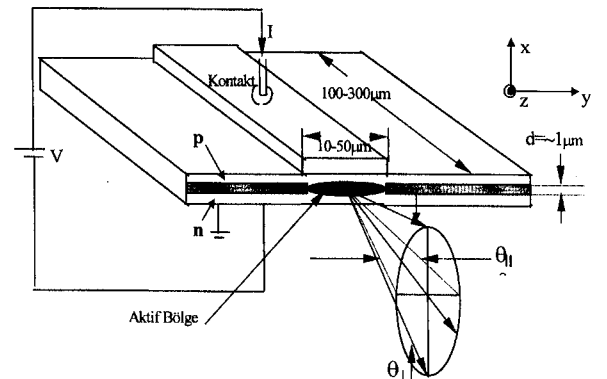
Şekil 4. GaAs p-n Homojonksiyonunun Enerji-Bant Modeli.

açısının, y doğrultusundaki desen açısından daha büyük olduğuna dikkat edilmelidir (Verdeyen, 1989). Burada kontak genişliği (~ 10 µm) ile kontrol edilen y doğrultusundaki alanın uzaysal mesafesi, genel olarak difüzyonla kontrol edilen x doğrultusundaki uzaysal mesafeden biraz daha büyüktür. Bu husus, lazerin serbest uzaydaki radyasyon alanının şekli (deseni, şablonu) üzerinde etkin bir tesire sahiptir.

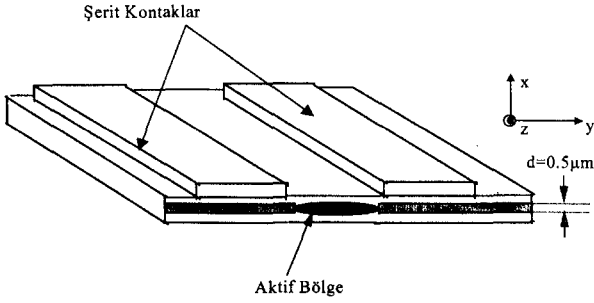
Bu gün yarıiletken lazerlerde eşik akımı oldukça küçültülmüş durumdadır. Şekil 5'deki lazerin, meselâ 10×250 µm²'lik aktif bölgesinde, 100 mA'lık bir akım için akım yoğunluğu 4 kA/cm² olarak bulunur. Eğer aktif bölgenin alanı 4 kat artırılırsa akım yoğunluğu 1 kA/cm²'ye düşer (Verdeyen, 1989).

1967 yılında yapılan şerit-geometrilili homo-yapılı lazerler, toplam akım yayılım alanının küçülmesini ve bu teknikte ışık emisyonunun yanıl (lateral) olabileceğinin tanımlamasını gerçekleştiren bir bölgenin dizaynını getirmiştir (Dyment, 1967). Şekil 6'da şerit kontaklı bir lazer geometrisi görülmektedir.

Jonksiyonlu lazerlerin çalışması için iletim ve valans bantlarındaki elektron ve delik yoğunlukları 10^{18} cm⁻³ civarında olmalıdır. Geleneksel p-n jonksiyonlarında bu değere ulaşmak kolay değildir. Çünkü tek bir tip malzemeden yapılan homojonksiyonlarda taşıyıcılar



Şekil 5. p-n Jonksiyonunda Radyasyon Alanı.



Şekil 6. Şerit Kontaklı Lazer.

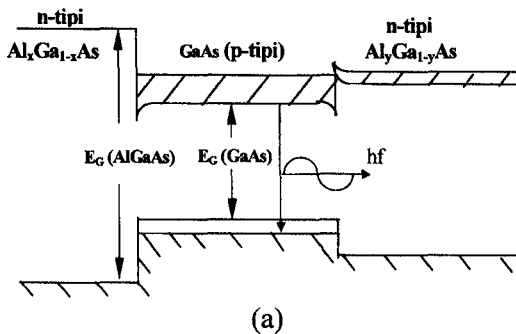
difüzyonla hızla jonksiyon dışına kaçarlar. Bu taşıyıcı eksikliğini akımla beslenerek karşılanması gerekir. Bu ise verimi düşürür. Geliştirilen çift heterojonksiyonlar, kaçak difüzyonu azaltarak akımın artmasını ve böylece verimin düşmesini önler.

4. TEK HETEROJONKSİYONLU DİYOT LAZERLER VE AKIM YOĞUNLUĞU

Yarıiletken heterojonksiyonlu lazerlerin bu önemli hamlesi, üç tabakadan oluşur. Orta tabaka daha incedir. Ayrıca yan tabakaların malzemelerinin yasak bantları, orta tabakanınkinden biraz fazla; kırılma indisleri ise orta tabakanın kırılma indisinden biraz küçüktür (Kroemer, 1963). Bu adımda GaAs taban maddesi üzerine alüminyum-galyum-arsenit (AlGaAs) malzemesinin epitaksiyel büyümesi için kullanılan LPE teknolojisi, teknolojik fizibilite açısından, başarılı olmuştur (Alferov vd., 1968).

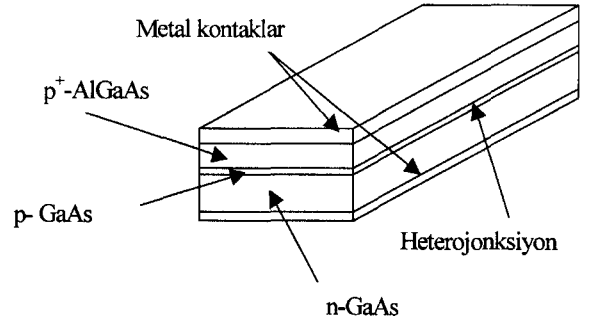
Heterojonksiyonlu yapılar, lazer gelişiminde bir dönüm noktasıdır. Bu sayede, iletim bandındaki elektronlarla valans bandındaki deliklerin ve enjekte edilmiş taşıyıcıların, radyatif birleşmelerinin meydana geldiği çok iyi dizayn edilmiş dar bir tabaka içinde hapsedilmeleri sağlanmıştır.

Şekil 7'de $Al_xGa_{1-x}As$ ile GaAs'ten yapılan doğru yönde kutuplanmış bir çift heterojonksiyonlu yapının enerji-bant modeli ve kırılma indisinin değişimi görülmüştür.

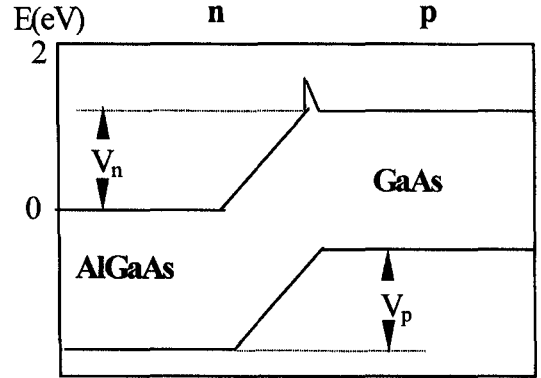


(a)

(b)

Şekil 7. GaAs İçine Katılan Al'un Etkisi (a) $Al_xGa_{1-x}As$ ile GaAs'ten Yapılan Doğru Yönde Kutuplanmış Bir Heterojonksiyonlu Yapının

Şekil 8. Tek Heterojonksiyonlu Lazer



Şekil 9. AlGaAs/GaAs Tek Hetero-Jonksiyon Enerji-Bant Diyagramı.

mektedir. Şekil aynı zamanda jonksiyona dik bir düzlem içinde ışık şiddetinin değişimini de göstermektedir. n-tipi $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesinden enjekte edilen elektronların yasak bandı daha dar olan GaAs malzemesi içinde hapsedilip birleştiklerine dikkat edilmelidir.

Şekil 8'de tek heterojonksiyonlu bir lazer ve Şekil 9'da bunun enerji-bant modeli görülmektedir (Verdeyen, 1989). Tek heterojonksiyonlu bu lazer RCA ve Bell Laboratuvarı'nda birbirinden bağımsız olarak yapılan çalışmaların sonunda meydana gelmiştir.

Tek-heteroyapılı lazerlerde heterojonksiyon GaAs malzemesi p-n homojonksiyonundan itibaren yaklaşık

2 μm 'lik dar bir şeritten sonra gelir. Doğru yöndeki bir kutuplama, enjekte edilmiş p-n jonksiyonunun iki yakasındaki elektronların hetero-duvardan geçerek dağılmasını önler. Lazerin çalışma işlemi iki jonksiyon arasındaki bu dar bölgede meydana gelir.

GaAs'in kırılma indisinin AlGaAs'in kırılma indisinden biraz büyük olması, iç tam yansıma sebebiyle, lazer modunun hapsedilmesine yol açar. Yapı içinde bir dalga kılavuzu oluşur. Bu asimetrik dalga kılavuzu büyük bir optik genişliğin, kazancın meydana geldiği bölgenin içine hapsedilmesine sebep olur.

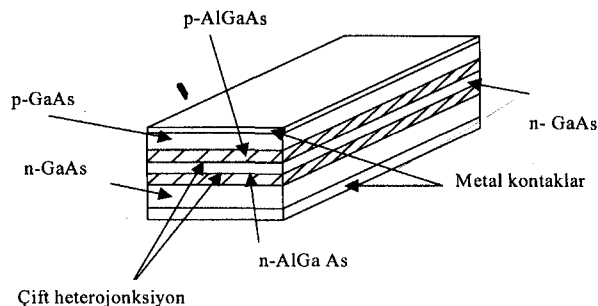
Farklı yapıları lazerlerin bir avantajı daha vardır: AlGaAs bölgesinde yayılan modun meydana getirdiği kaçak (evanescent tail) alanın sebep olduğu optik kayıp, yasak bant aralığının bir sonucu olarak, ve dolayısıyla iç bant absorpsiyonu yüzünden, homo-yapılı cihazın p-tipi bölgesindeki kayıp alana tekabül eden optik kayıptan bir derece daha azdır.

Tek heterojonksiyonlu cihazda oda sıcaklığında en düşük akım yoğunluğu 8600 A/cm^2 olarak elde edilmiştir (Hayashi vd., 1969). Görüldüğü gibi akım yoğunluğu biraz daha küçülmüştür.

5. ÇİFT HETEROJONKSİYONLU DİYOT LAZERLER VE AKIM YOĞUNLUĞU

Bilim adamlarının hedeflerinden bir tanesi de akım yoğunluğunun mümkün olduğu kadar küçültülmesidir. Bunun için, kısa bir zaman sonra Bell Laboratuvarı ve Leningrad'ın Joffe Enstitüsü tarafından hemen hemen aynı sıralarda birbirlerinden habersiz olarak çift heterojonksiyonlu lazer elde edilmiştir. Şekil 10'da çift heterojonksiyonlu bir lazer görülmektedir.

Bu yapı iki tip taşıyıcıyı hapsedmek için tesis edilen bir simetri özelliğine sahiptir. p-AlGaAs tabakasından enjekte edilen delikler ilerleyerek ikinci heterojonksiyona girerler. Optik hapsediciliği temin eden çift farklı yapı ve simetrik bir dalga kılavuzu oluşur. Böylece, aktif bölgede dalga tek heterojonksiyonlu bir yapıya göre daha sıkı bir şekilde hapsedilebilir. Akım yo-



Şekil 10. Çift Heterojonksiyonlu Lazer.

ğunluğu 1000 A/cm^2 mertebelerine kadar düşürülmüştür (Ripper vd., 1971).

Geleneksel heterojonksiyonlu lazerlerde aktif bölgenin x doğrultusundaki kalınlığı (d) $1 \mu\text{m}$ civarındadır. Akım yoğunluğu, d ile dikkate değer bir şekilde değişir. Çift heterojonksiyonlu bir lazerin aktif bölgesine enjekte edilen taşıyıcılar $J/e=Nd/\tau$ dinamik ilişkisini sağladığı için $J/d=eN/\tau$ olarak tanımlanan normalize akım yoğunluğu lazer kristalinin kalitesinin standart bir ölçümü olarak kabul edilebilir. Burada e, elektronun yükünü; N, yük konsantrasyonunu gösterir ve τ , yaklaşık $3-4 \times 10^{-9}$ s alınır (Yariv,1991). Minimum eşik akım yoğunluğu $d=0.1-0.2 \mu\text{m}$ halinde meydana gelir ve buna karşılık gelen akım yoğunluğu $J=1-2 \text{ kA/cm}^2$ civarında oluşur. Buna göre ($1.1-1.6 \mu\text{m}$) arasında çalışan InGaAs/InGaP lazerlerinde ortalama akım yoğunluğu 5 kA/cm^2 dir (Iga, 1994).

Akım yoğunluğunun doğrudan doğruya aktif bölgenin kalınlığı ile orantılı olması (Bhattacharya, 1998), kuantum çukurlu (Li vd., 1991) ve kuantum noktalı lazerlerin yolunu açmıştır.

6. KUANTUM ÇUKURLU VE KUANTUM NOKTALI LAZERLER

Geleneksel cihazların boyut büyüklüğü genel olarak elektronun dalga boyundan büyüktürler. Bu, elektron enerjisinin sürekliliği ile şekillendirilmiş ayrık enerji durumları meydana getirir. Heterojonksiyonlu bir lazerin aktif bölge genişliği, 20 nm ve özellikle daha küçük boyutlara kadar küçüldüğü zaman, kuantum boyut etkisi meydana gelir (Schiff, 1982, Batey vd., 1986). Bu durumda iletim ve valans bantlarındaki enerji seviyeleri kuantize olur. Elektronların dar bir bölgeye hapsedilmelerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan bu etki, kuantum çukurlu ve kuantum noktalı lazerin esasını oluşturur. Kuantize olmuş elektronların kuantum seviyelerine ait enerji öz değerleri tek bir boyut için $E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / 8m^* a^2$, $n=1,2,3,\dots$ ile verilir (Schiff, 1982). Burada a, Şekil 11'de görüldüğü gibi, kuantum çukuru-nun yarı genişliğini; $\hbar = h / 2\pi$ ifadesindeki h, Planck sabitini; m^* , iletim bandında elektronun veya valans bandında deliğin efektif kütesini gösterir (Verdeyen, 1989).

Kuantum çukurlu lazerlerde Şekil 11'de görüldüğü gibi, kuantum çukuru içindeki taşıyıcı hareketi, çukur duvarlarına dik olacak şekilde kuantize olur. Bu durum, Şekil 12'de görüldüğü gibi, merdiven basamaklarını andıran değişik bir enerji seviye karakteristiği doğurur.

Şekil 11'deki enerji seviyeleri, 3 elektron ve 5 ağır delik için çizilmiştir. İletim ve valans bantlarının enerji seviyeleri arasında görülen bu sayı farkı, elektron ve

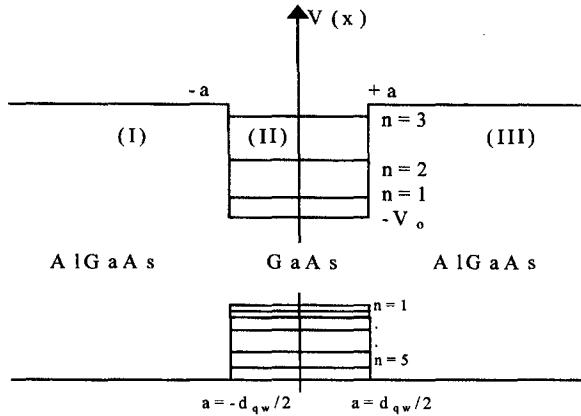
deliklerin kütlelerinin farklılığından meydana gelmektedir (Verdeyen, 1989; Holonyak vd., 1980).

Kuantum çukurlu lazerlerde, sıfır kayıp için eşik akım yoğunluğu (şeffaf akım yoğunluğu) $J \cong Ne / \tau$ olarak alınabilir. $\tau=4 \times 10^{-9}$ s, $N=1.5 \times 10^{12}$ cm⁻² için $J=60$ A/cm² elde edilir (Yariv, 1991).

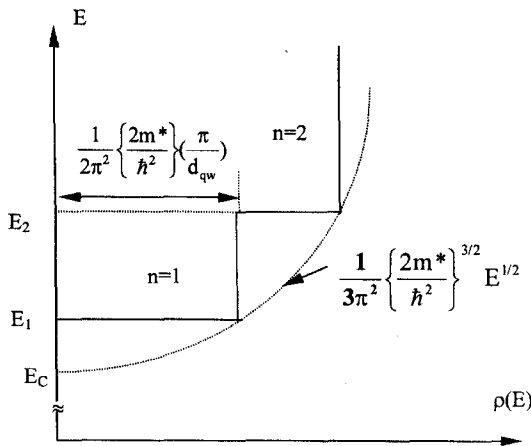
Heterojonksiyonlu yarıiletken lazerlerin aktif bölgelerinin her üç boyutu yeter derecede küçülürse, kuantum boyut etkisi her üç boyutta tezahür eder. Bu durumda kuantize olmuş bir partikül öz değeri enerjisi,

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m^*} \left[\frac{n_x^2}{a_x^2} + \frac{n_y^2}{a_y^2} + \frac{n_z^2}{a_z^2} \right], \quad n_{x,y,z} = 1,2,3,\dots$$

büyüklüğü ile bellidir (Nikolai vd., 2000). Kuantum noktali lazerler, keskin lüminesans ve çok düşük eşik akımlarının elde edilmesi beklentisini kuvvetlendirmiştir. (Arakawa, 1982). Böylece elde edilen kuantum noktali lazerlerde son yıllarda oda sıcaklığında 5-6 GHz bant genişliği elde edilmiş ve akım yoğunluğu oldukça küçültülmüş, 2000 yılında 1.2 mA eşik akımı ve 19 A/cm² eşik akım yoğunluğuna ulaşılmıştır (Park, Schekin vd., 2000).



Şekil 11. AlGaAs/GaAs/AlGaAs Kuantum Çukuruna Ait Enerji-Bant Diyagramı.



Şekil 12. $d_{qw}=2a$ Genişlikli Bir Kuantum Çukurlu Lazerde Enerji Durum Yoğunluğu.

7. SONUÇ

3 ve 5 valanslı elementlere dayanan yarıiletken lazerler, iki önemli malzeme sistemini ortaya çıkarmıştır. Birinci sistem, GaAs/Al_xGa_{1-x}As olarak bilinmektedir. Bunların aktif bölgeleri GaAs veya Al_xGa_{1-x}As malzemesinden olabilir. GaAs/Al_xGa_{1-x}As çift heterojonksiyonlu lazerlerde kırılma indisleri $n_{GaAs} - n_{Al_xGa_{1-x}As} = 0.62x$ ve yasak bant $E_G(x < 0.37) = (1.424 + 1.247x)$ yaklaşımlarını sağlamaktadır (Yariv, 1991).

İkinci tip malzeme sistemi, aktif bölgesi Ga_{1-x}In_x-Ga_{1-x}As_{1-y}P_y ile tanımlanan malzeme sistemidir. Lazerler, x ve y yüzdeleri ile işaret edilen malzemelere bağlı olarak dalga boyu 1.1 < λ < 1.6 μm aralığında emisyon yapar (Yariv, 1991). Bu lazerlerde çoğu kere kayıpların minimum olduğu λ=1.55 μm dalga boyu kullanılır.

Yarıiletken lazerler çok geniş olarak kullanılan teknolojik ürünler ailesi içinde kritik rol oynayan anahtar elemanlar durumundadırlar. Son yıllarda CD okuyucu ve yazıcılarında, optik iletişiminde, lazer yazıcılarında ve laboratuvarlarda kullanımı inanılmaz derecede bir hızla artan ve yukarıda bahsedilen iki sınıf malzemeleri kullanan diyot lazerlerinin, gaz lazerlere göre, daha fazla bir cazibeye sahip olmasının ana sebeplerinden bir tanesi, besleme akımının düşük olması sebebiyle, ısınması, kaybı, fiyat ve bakım masraflarının azlığı ve verimlerinin yüksek olmasıdır. Bu yüzden, bu diyot lazerleri ucuz ve yaygındır; üretimi gittikçe artmaktadır. Kullanılan malzemeye oldukça bağlı olan akım yoğunluğu, bütün bu iyileştirici faktörler içinde rol oynayan en önemli etkenlerden birini oluşturur.

10 mW'lık bir diyot lazeri 100 mW civarında bir elektrik gücü ile çalışabilir. Bu güç pillerle kolayca sağlanabilir. Halbuki, meselâ en verimli lazerlerden bir tanesi olan 40 W'lık bakır buharlı bir lazerin çalışması 5 kW civarında bir güç ister ki bu durum ayrı bir güç kaynağı dizayn ve bakım külfetini getirir, ısınma problemleri ortaya çıkar. Bu karşılaştırma da düşük güçlü diyot lazerlerinin yaygın hale gelişlerinin sebebini açıkça göstermektedir. Yarıiletken diyot lazerlerinin cazibesi, akım yoğunluğunun küçülmesi oranında daha da artacaktır.

KAYNAKÇA

- Adams, M.J., Steventon, A.G., Devlin, W.J. ve Henning, I.D. (1987). *Semiconductor Lasers for Long-Wavelength Optical-Fibre Communication Systems*, Peter Peregrinus Ltd., London.
- Alferov, Zh. I., Andreev, V.M., Korolkov, V.I., Portnov, E.L. ve Tretyakov, D.N. (1968). *Fiz. Tekh. Poluprov.*, 2, 1016-1017.

- Arakawa, Y. ve Sakaki, H. (1982). Multidimensional quantum well lasers and temperature dependence of its threshold current. *Appl. Phys. Lett.* 40, 939.
- Batey, J. ve Wright, S.L. (1986). Energy band alignment in GaAs: (Al,Ga)As heterostructure: The dependence on alloy composition. *J. Appl. Phys.* 59(1), 200.
- Bhattacharya, P. (1998). *Semiconductor Optoelectronic Devices*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Diana, L., Park, H., Zou, Z., Schekin, O.B. ve Dennis, G.D. (2000). Continuous-wave low-threshold performance of 1.3 μm InGaAs-GaAs quantum-dot lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 6(3), 452-461.
- Dousmanis, G.C. Nelson, H., ve Staebler, D.L. (1964). *Appl. Phys. Lett.* 5, 174-176.
- Dyment., J.C. ve D'asaro, L.A. (1967). *Appl. Phys. Lett.* 11, 292-294.
- Hall, R.N., Fenner, G.E., Kingsley, J.D., Soltys, T.J. ve Carlson, R.O. (1962). Coherent light emission from GaAs junctions. *Phys. Rev., Lett.* 9, 366-368.
- Hayashi, I., Panish, M.B. ve Foy, P.W. (1969). A Low Threshold Room-Temperature Injection Laser. *IEEE J. Quantum Electron.* QE-5, 211-212.
- Holonyak, N. Jr, Kolbas, R.M., Dupuis, R.D. ve Dapkus, P.D. (1980). Quantum-well heterostructure lasers. *IEEE J. Quantum Electron.* QE-16, 170-185.
- Iga, K. (1994). *Fundamental of Laser Optics*. Plenum Press, New York.
- Kroemer, H. (1963). A proposed class of heterojunction injection lasers. *Proc. IEEE* 51, 1782-1783.
- Li, E.H. ve Weiss, B.L. (1991). Bandgap engineering and quantum wells in the optoelectronic devices. *Electronics and Communication Engineering Journal* April, 63-79.
- Nathan, M.I., Dumke, W.P., Burns, G. F.H., Dill, Jr. ve Lasher, G. (1962). Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions. *Appl. Phys.* 1, 62-64.
- Nelson, H. (1963). *RCA Rev.*, 24, 603-626.
- Nikolai, N., L., Grundmann, M., Heinrichsdorff, F., Bimberg, D., Ustinov, V.M., Zhunkov, A. E., Maximov, M.V., Alferov, Zh.I. ve Lott, J.A. (2000). Quantum-dot heterostructure lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 6(3), 439-451.
- Park, G., Huffaker, D.L., Zou, Z., Shekekin, O.B. ve Deppe, D.G. (1999). Temperature dependence of lasing characteristics for long-wavelength (1.3 μm) GaAs-based quantum-dot lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 11, 301-303.
- Park, G., Shchekin, O.B., Huffaker, D.L. ve Deppe, D.G. (2000). Low threshold oxide-confined quantum dot laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 13, 230-232.
- Quist., T.M., Rediker, R.H., Keyes, R.J., Krag, W.E., Lax, B., Mcwhorter, A.L. ve Zeiger H.J. (1962). Semiconductor maser of GaAs. *Appl. Phys.* 1, 91-92.
- Ripper, J.E., Dymont, J.C., D'asaro, L.A. ve Poole, T.L. (1971). Stripe geometry double heterostructure junction lasers: mode structure and CW operation above room temperature. *Appl. Phys. Lett.* 18, 155-167.
- Verdeyen, J.T. (1989). *Laser Electronics*. Prentice Hall, New Jersey.
- Schiff, L. I. (1982). *Quantum Mechanics*, McGraw-Hill Book Comp., Tokyo.
- Yariv, A. (1991). *Optical Electronics*, 4e. Saunders College Publishing, Philadelphia, USA.



Mustafa Temiz, 1948 yılında Gümüşhane'de doğmuştur. Ortaöğrenimini Samsun'da yapmış, 1967 yılında Ondokuzmayıs Lisesi'ni Lise Birincisi olarak bitirmiştir. Lise ve Üniversite'de TÜBİTAK'ın Bursiyeri olmuştur. Yüksek öğrenimini İ.T.Ü.'de yapan Mustafa TEMİZ, 1973 yılında İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi'nin Zayıf Akım (Elektronik) kolundan Elektrik Yük. Mühendisi olarak mezun olmuştur. Bir müddet Azot Sanayii Samsun Fabrikalarında İşletme Kontrol Mühendisi olarak çalıştıktan sonra, askerlik hizmetini müteakip Sakarya Mühendislik Fakültesi'ne asistan olarak giren, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde 1984 yılında Doktora'sını tamamlayan ve 1985 yılında Yrd.Doç. olarak Dokuz Eylül Üniversitesi Denizli Mühendislik Fakültesi'ne atanan ve 14.10.1993 tarihinde doçent olan Mustafa Temiz'in teknik, bilimsel ve sosyal konulardaki bir çok yazıları yanında Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Programlama, Lazer ve Elektromagnetik ve Mikrodalga alanlarına ait yayınları vardır. Doç.Dr. Mustafa Temiz, Sakarya Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün kuruluşunda, Laboratuvar'larının hazırlanmasında da çalışmalar yapmış ve ilk öğrencilerinin mezuniyetlerine

kadar, eğitim ve öğretim faaliyetlerinde tek kadrolu Dr. öğretim görevlisi olarak çalışmış, Denizli'ye Yrd.Doç olarak tayin olduktan sonra Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün açılışına kadar uzunca bir süre Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü'nde ve daha sonra Pamukkale Üniversitesi'nin çeşitli birimlerinde Otomatik Kontrol, Sistem Analizi, Elektrik Makineleri, Elektroteknik ve Bilgisayar Programlama gibi dersleri yürütmüş, Elektrik ve Elektronik Bölümü'nün kuruluşunda da etkin rol oynamış ve aktif faaliyetlerde bulunmuştur. Mustafa Temiz, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalları'nın hemen hepsine ilişkin olmak üzere, çok çeşitli dersleri vermiş ve yürütmüş bulunmaktadır. 1986-1988 yılları arasında Denizli Mühendislik Fakültesi Yönetim Kurulu üyeliği de yapmış bulunan Mustafa Temiz, Elektrik ve Elektronik Bölümü'nün kuruluşundan beri Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'nı yürütmektedir. Halen Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yönetim kurulu üyesi ve Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Kurulu üyesi olan Mustafa Temiz, 1995-1998 yılları arasında Pamukkale Üniversitesi'ne bağlı Meslek Yüksek Okulu ile İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Yönetim kurulları üyesi olarak da hizmet yapmıştır.