

# GaAs TEKNOLOJİSİ

**Mustafa TEMİZ**

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli

## ÖZET

Bu çalışmanın amacı galyum-arsenit'in karakteristik özelliklerinin geleceğe ilişkin önemini gözden geçirilmesidir. Çalışmada galyum-arsenit teknolojisinin halihazırdaki durumunun gerçek bir ifadesi arzedilmekte ve bu geleceğe ait düşünülen büyük ihtimalleri realize etmeye yardımcı olmaktadır. Galyum-arsenit entegre devre teknolojisi tarihi bakımdan geleceğin teknolojisi olarak görülmektedir. Şu anda henüz tam anlamıyla geniş bir uygulanabilirliğe kavuşmamışsa da gittikçe benimsenmekte ve mevcut yüksek-hızlı entegre devrelerin ticari kaynağını oluşturmaktadır.

Galyum-arsenit'ten yapılan yüksek-hızlı lojik devreler, hesaplama ve işaret işleme gibi sahalarda ümit vermektedir. Geçen onbeş-yirmi yıl, galyum arsenit teknolojisinin laboratuvarından piyasaya çıkışını sergilemektedir. Bu yenilikler, ilk zamanlarda dijital ve analog uygulamaların her ikisine ait tek bir cihazdan başlayarak zamanla daha kompleks entegre devre cihazlarına geçişteki karmaşıklığın korkunç gelişimini bir arada götürmektedir. Galyum-arsenit devrelerinin karmaşıklık seviyesi ve hızının her ikisinde birden ileriye dönük çalışmalara ait ana prensipleri ortaya koyan hedefler, yeni yayın teknolojisi, münferit haberleşme ve oldukça hızlı bilgisayarlar gibi sahalardaki müşterek gereklilikleri artırmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Galyum-Arsenit, Fotonik, Optoelektronik.

## GaAs TECHNOLOGY

### ABSTRACT

The object of this work is to review the important for the future and the characteristic properties of gallium - arsenide. On this work, a realistic statement of current status of gallium-arsenide technology will provide and for future this will help to realise the enormous possibilities which we believe lie ahead. Gallium-arsenide integrated circuit technology has historically been portrayed as the technology of future. Now although it has not attained the wide complete applicability, it has gradually becoming an accepted and commercially available source of high-speed integrated circuits.

High-speed logic circuits fabricated in gallium arsenide have shown promise for applications such as computing and signal processing. The past fifteen-twenty years have seen the emergence of gallium-arsenide technology from laboratory to the market place. This innovations have been accompanied by dramatic increases in complexity from early single devices to the integrated circuits of considerable complexity for both digital and analogue applications. The aims to lay down sound principles of forthcoming developments in which both the speed and level of the complexity of gallium-arsenide circuits will increase dramatically meeting needs in such as areas as ultra fast computers, personnel communications and new broadcasting technology.

**Key Words:** Gallium-Arsenide, Photonics, Optoelectronics.

## 1. GİRİŞ

Periyodik tablonun III. ve V. grup elemanlarından Galyum (Ga) ve Arsenit (As) gibi malzemeler katıhal cihazlarında bir dönüm noktası meydana getirmiştir.

Günümüzde silisyum teknolojisi yerini galyum-arsenit (GaAs), teknolojisine terketmektedir. Bu teknoloji, yarıiletken laser'lerin ilk günlerinden beri, yeni bir kavram olan kuantum çukuru ve süper kafes yapılarına kadar, optoelektronik gelişiminde önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Şimdiye kadar tıpkı elektronik teknolojisinde silisyumun sağladığı hakimiyet gibi, GaAs de yeniden şekillenmeye başlayan optoelektronik teknolojisinde kendi ağırlığını hissettirmeye başlamış bulunmaktadır.

GaAs'in kullanılmasında onu özellikle önemli kılan üç özellik vardır: Bunlar, onun bir yarıiletken oluşu, kafes yapısının AlGaAs (Aluminium-Gallium-Arsenide)'e, epitaksiyel büyümeye ve mevcut elektronik cihazlara uygun düşmesidir (Temiz, 1993).

Malzeme ve litografi (lithography) tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak, InP (Indium-Phosphide) üzerinde AlGaAs/ GaAs, AlGaAs/ InGaAs, ve InAlGa/ InGaAs gibi üçlü bileşiklere dayanan farklı yapıları jonksiyon (heterojunction) cihazların kullanılmaya başlanmasıyla yeni ufuklar açılmış bulunmaktadır.

## 2. GaAs'İN ELEKTRONİK TEKNOLOJİSİNDEKİ ÖNEMİ

GaAs üzerine ilk yapılan çalışma, Prestley tarafından 1974 yılında hazırlanan raporda geçmektedir. Bu, 5 dB/8-12GHz. kapasitesinde bir x-bandı kuvvetlendiricisidir. Bu alandaki çalışmalar, 1984 ile 1989 yılları arasında hızlanmış, gözle görülür bir seviyeye gelmiştir. Uygulamalar, daha çok yüksek hız ve düşük gürültü seviyesinde digital devrelerde başarılı olmuştur.

İyi bir optik ve elektrik karakteristiğe sahip olan GaAs malzemesi, bu gün bir çok laboratuvarında üretilmekte, işlenmesi ve fabrikasyonu üzerinde kullanılan çeşitli tekniklerle malzeme üzerinde iyi bir kontrol sağlanmış bulunmaktadır.

Memleketimizde GaAs üzerinde Bilkent Üniversitesi'nde araştırmalar yapılmaktadır. Bilkent

Üniversitesi Fizik Bölümü'nde öncelikle mikro ve optoelektronik konularında araştırma ve geliştirme yapmak üzere GaAs üzerine kurulan ilk laboratuvarında MESFET (Metal Schottky Field Effect Transistor) teknolojisi ile başlayarak tümleşik mikrodalga devrelerin (MMIC-Monolithic Microwave Integrated Circuit) geliştirilmesi ve laser diyotlar gibi ışık kaynakları ve foto-algılayıcıların gerçekleştirilmesi gibi konularda çalışmalar sürdürülmektedir.

Laboratuvarlar 110m<sup>2</sup> 10 000 sınıfı ve 55m<sup>2</sup> 100 sınıfı temiz odalarda kurulmuştur. Bu odalarda sıcaklık 21±1°C, nisbi nem oranı ise %45± %5 olarak düzenlenmiş olup sistem kesintisiz 24 saat çalışan soğutma, ısıtma ve filitreli havalandırma birimleriyle desteklenmektedir (Aydın, 1991).

Düşük gürültü ve yüksek data-hızlı optik kominikasyon sistemleri için InP'te dayalı malzemelerden yapılan laser ve dedektörlerde kullanılan kavramların çoğunun ilkin GaAs'te demostasyonu yapılmaktadır. Bu bakımdan, GaAs'in ilk seçim teknolojisi olduğu bir çok uygulamada hala onun önemli bir yeri vardır. Optik hafıza sistemlerinde daha uzun dalga boyuna sahip olan InP-bazlı cihazlara karşı GaAs laser'ler tercih edilmektedir.

GaAs'i önemli kılan asıl nokta, onun dijital optoelektronik cihazların tasarımında kullanılmasıdır. Elde edilen GaAs-bazlı bu cihazlar, dijital işaret işleme ve anahtarlama sistemlerinin performansını artırmaktadır. Bu tür GaAs/GaAlAs cihaz sistemlerinde kuantum çukuru ve optik-elektrik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Onun için GaAs optik işaret işleme, dijital anahtarlama ve nöral sistemlerde çekici bir rol oynamaya başlamıştır.

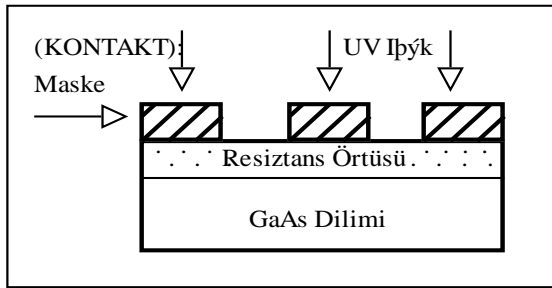
Optiğin getirdiği bir üstünlük de, paralel olarak kesişen iç bağlantıların birbirini etkilememesi ve bu özelliğin optiğin sağladığı avantajın anahtarını oluşturmasıdır.

GaAs'in elektronik devrelerine ait optik giriş ve çıkışları temin eden bir özelliğe sahip olması, optik ve elektronik sağladığı avantajlarla birlikte yeni bir teknolojiyi doğurmuştur.

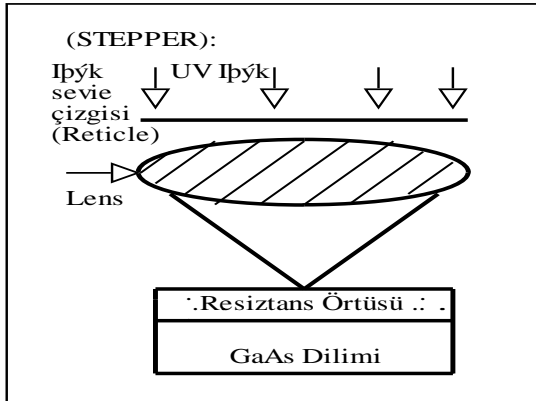
Hem gecikmesi ve hem de gücü en düşük transistor teknolojisi GaAs HEMT(High Electron Mobility Transistor) teknolojisidir (Temiz, 1995).

### 3. GaAs-BAZLI PROSES TEKNİKLERİ

Malzeme geliştirilmesinde kullanılan esas teknikler MESFET cihazının imalatına dayanmaktadır. Bu gün malzeme temininde kullanılan temel üç yaklaşım vardır: Bunlar, VPE (Vapour Phase Epitaxy), MBE (Molecular Beam Epitaxy), II(İon Implantation) teknikleridir.



(a)



(b)

Şekil 1 Litografi konfigürasyonları (a) Kontakt litografisi, (b) DSW(Direct Substrate Write)

MMIC bazlı MESFET için tercih edilen malzeme şekillendirme tekniği II'dır. Fakat HEMT ve HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) gibi farklı yapıları jonksiyon (heterojunction) cihazları için II'nu kullanılmaz. Bunlar için VPE ve MBE teknolojileri faydalıdır.

Bir kere aktif n-katmanı oluşturulduktan sonra entegre devre fabrikasyonu için, litografi (litography), çöktürme (deposition) ve dağlama (etching) teknikleri kullanılır.

Litografi, dağlama veya metalik bir çöktürmeye ait şablonu (pattern) tanımlayan bütün proses katlarına

ait herhangi bir proses teknolojisinin hayati bir parçasıdır. Esas olarak litografik bir proses, ışığa maruz bırakılan bir fotografik maske ile ışığa duyarlı ince bir film tabakada oluşturulması gereken şablonların tanımlı bir şeklini içerir. Bu teknik kontakt litografisi ve direkt taban maddesinin işlenmesi (direct substrate write-DSW, Stepper), EBL (electron beam lithography) gibi yöntemlere sahiptir (Şekil 1).

Kontakt litografisi, 0.5µm'lik çözünürlüklere (resolution) uygundur. Maske gerektirmeyen EBL(Electron Beam Litogaphy)'de 0.2 µm'nin altına inmek mümkündür. Bunun tek dezavantajı donanımın pahalı oluşu ve işlemin uzun sürmesidir. 2001 yılında litografi ile 180nm'lik çözünürlükler hedeflenmektedir (Lagston, 1995). Bununla beraber, bir araştırma grubu, daha şimdiden, AT & Bell Laboratuvarlarında gerçekleştirdikleri bir IC'de 0.1 µm çözünürlüğe ulaştıklarını bildirmektedirler (News, 1995).

Çöktürmenin de bir takım çeşitleri bulunur. Bir MMIC imalatı, metal ve dielektrik filmlerin her ikisinin birden çöktürülmesini gerektirir.

GaAs teknolojisinde bir kaç dağlama tekniği bulunur. Bunların en önemlileri arasında IBM (Ion Beam Milling) (Spencer, 1971), RIEPE (Reactive Ion Etching and Plasma Etching) ve WCE (Wet Chemical Etching) bulunur. Bunlardan WCE kuru bir işlem değildir. Bu teknik, GaAs teknolojisi için çok önemlidir.

GaAs-bazlı dijital (sayısal) optoelektronik teknolojisini dört grupta toplamak mümkündür:

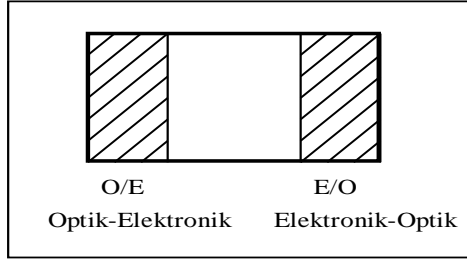
1. Arayüzey (interface) Teknolojisi
2. Digital Optoelectronic Logic Cihazlar
3. İç Bağlantı Teknolojisi (Goodman,1984; Feldman, 1987)
4. Sistem Tasarımı (Midwinter, 1987; Stone, 1971).

Bu yazıda yalnızca 1 ve 2. gruplar üzerinde durulacaktır.

### 4. ARAYÜZEY CİHAZLARI

Optik iç bağlantıya sahip olan her hangi bir devre (Haugen, 1986; Psaltis, 1985), bir tane elektronik-optik arasında, (E/O), ve bir tane de optik-elektronik arasında, (O/E), olmak üzere iki adet arayüzey'e sahip olmak zorundadır. Şekil 2'de şematik olarak

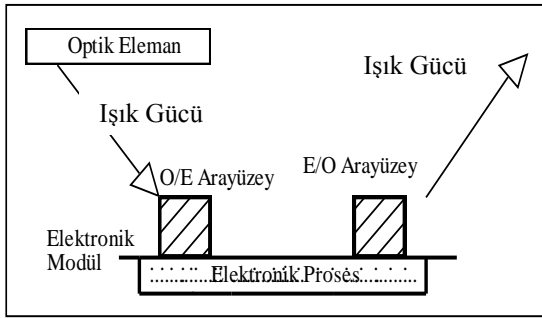
gösterilen bu optik iç bağlantıya **Elektronik Modül** veya **Ada** denir.



Şekil 2 Elektronik modül (Ada)

Her bir modülde optikten elektroniğe ve elektrondan optiğe geçişi sağlayan optik arayüzler mevcuttur. Modül ve sistemler arasında ise optik fiber içbağlantılar bulunur. Adalar dilim (wafer) veya ana-board'lar üzerine yerleştirilmişlerdir.

Bir modülün daha açık bir şekli Şekil 3'deki gibi düşünülebilir.



Şekil 3 Bir modülün detayı

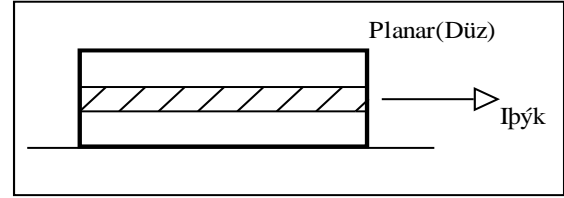
Her bir arayüzde düşünülen iki faktör göz önünde bulundurulur: Bunlardan biri malzeme seçimi diğeri ise cihaz seçimidir.

Eğer elektronik devre GaAs-bazlı ise, o zaman optoelektronik düzenler sadece aynı malzeme sistemini kullanarak yapılabilir; fakat elektronik devre silisyumdan yapılmış bulunuyorsa, adaptasyonu sağlamak için ya hibrit bir yaklaşım gerekir ya da silisyum üzerine doğrudan doğruya GaAs düzeni yerleştirilir.

E/O arayüzü için üç seçenek vardır: Bunlar Modülatör, Yüzeysel Emisyonlu Laser ve Geleneksel Laser'dir.

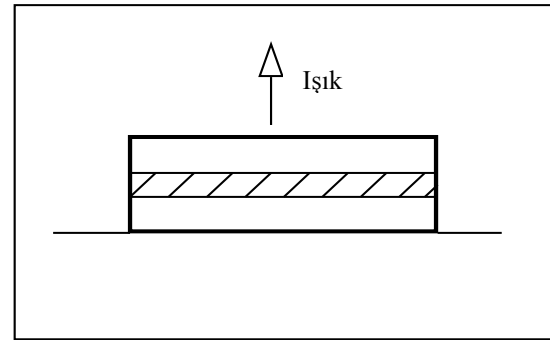
Bir chip üzerine bir laser yapılabilir ve bu telekomünikasyon devrelerinde olduğu gibi .bir çok

şekillerde data akışını temin etmek üzere elektrik olarak modüle edilebilir. Bunların bir çokları sadece planar iletişimlere ve iç bağlantılara uygundur (Şekil 4).



Şekil 4 Geleneksel laser

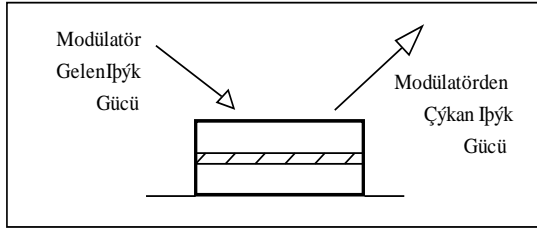
Yüzeysel emisyonlu laser'ler (Uchiyama, 1986) taban maddesi yüzeyinden transmisyona imkan verir (Şekil 5). Bu gün bu sahadaki çalışmalar da hız kazanmıştır (Schneider, 1994; Member, 1994; Egawa, 1994; Lu, 1994).



Şekil 5 Yüzeysel emisyonlu laser

Bu iki tip laser'in en önemli dezavantajlarından bir tanesi, chip üzerinde meydana gelen büyük bir dissipasyon gücünün lokal sıcaklık değişmelerine sebep olmasıdır. Bundan dolayı, silisyum üzerinde GaAs'in olması, iki yarıiletkenin farklı termal özelliklerinin büyük uyumsuzluklarına ve bu uyumsuzluklar sonunda farklı genleşmelerin meydana getirdiği gerilim indüklemelerine sebep olur.

Modülatörde chip üzerinde bir modülasyon cihazı bulunur (Wood, 1984). Bu dışarıya yerleştirilmiş başka bir laser tarafından sürülür. Chip üzerindeki düşük dissipasyon gücü ve taban yüzeyi üzerinden optik içbağlantı imkanı, modülatöre dayanan yaklaşımı cazip bir hale getirmiştir (Şekil 6).



Şekil 6 Modülâtör

GaAs ile optiğin meydana getirdiği teknolojik uyum dijital optoelektronik lojik cihazların (Self Electro-Optik Effect Device, SEED) cazibe kazanmasına yol açmıştır.

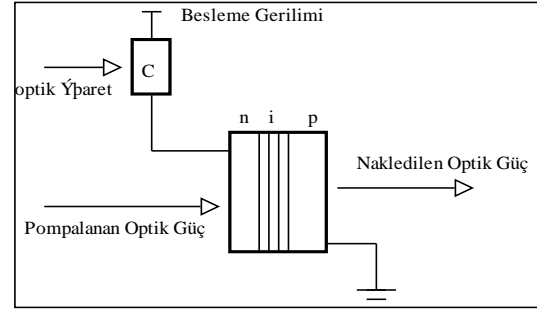
SEED'lerde optik giriş ve çıkışlar kuantum çukurlu düzenlere dayanır. Kuantum çukurlu yapılar, iki farklı yarıiletken malzemenin pek çok ince film katmanlarından oluşur. Her bir katmanın kalınlığı yaklaşık olarak 10 nm kadardır. Toplam kalınlığı 1  $\mu$  m kadar olan bir cihaz içinde bunlardan 100 kadar bulunur. Bu katmanların uçları arasında bir gerilim uygulandığında, kuantum çukurlarının optik transmisyonu şiddetli bir şekilde değişir. Bu olay optik modülâtörün çalışma prensibini oluşturur.

İki boyutlu düzenlerde yapılan SEED'ler, basit sistemleri demostre etmek için kullanılmaktadır. Birim fiatları düşük olduğundan bunlar fabrikasyon olarak da imal edilmektedir (Hinton, 1991).

## 5. DİJİTAL OPTOELEKTRONİK LOJİK CİHAZLAR

Bir SEED'i şematik olarak Şekil 7'deki gibi göstermek mümkündür (Miller, 1984; Miller 1985). Burada C ile şunlardan bir tanesi temsil edilmektedir: Bir direnç, bir fotodiyot (D-SEED), bir fototransistor (T-SEED), başka bir kuantum çukurlu p-i-n diotu (S-SEED), bir FET (F-SEED) olabilir (Miller, 1989; Hinterlong, 1995).

Bu gün S-SEED'ler kullanılarak optik flip-flop'lar, differansiyel lojik kapılar, differansiyel modülâtör



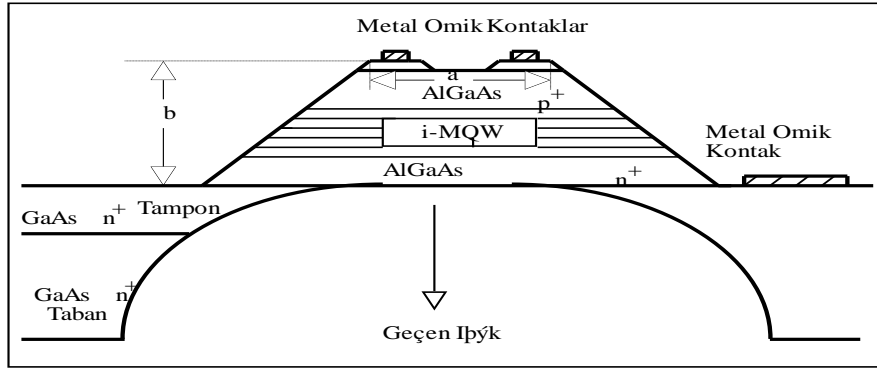
Şekil 7 SEED'in blok diyagramı

ve differansiyel dedektörler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Lentine, 1988; Lentine, 1989).

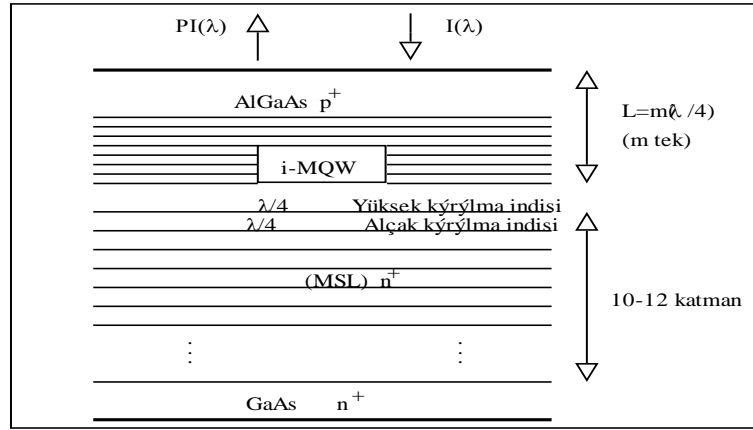
## 6. MODÜLATÖR

Modülâtör 1985'lerden beri yapılmasına rağmen, GaAs çoklu kuantum çukurlu elektro-soğurma modülâtörü olarak büyük bir gelecek vadetmektedir. Bunun temel yapısı Şekil 8'de gösterilmiştir (Whitehead, et al. 1988; Whitehead, 1989).

Modülâtör cihazı, kuantum çukurunun soğurma kenarının değişen elektrik alanı tarafından indüklenmesi esasına göre çalışır. Öyle ki absorpsiyon kenarının uzunluğuna yakın seçilmiş bir optik frekanstaki absorpsiyon, uygulanan gerilim ile azaltılır, ya da çoğaltılır. p-i-n yapısına ters yönde bir gerilim uygulanırsa, yapı içinde büyük bir elektrik alanı meydana gelir. p-i-n yapılarının ölçüleri küçük tutularak yüksek frekanslarda çalışma imkanı sağlanır (Boyd, 1989). İçinde reflektör belleğine sahip olan çok katlı bir katmanın yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu reflektif geometri, taban maddesi üzerinde epitaksiyel olarak meydana getirilir. Bu konuda GaAs'in diğer III-V valanslı maddelere karşı üstünlüğü vardır. Her şeyden evvel, oda sıcaklığında GaAs/AlGaAs kuantum çukurları, örneğin kullanılmakta olan, GaInAs/InP kuantum yapılarındaki kuantum çukurlarından daha büyüktür. Bunun anlamı şudur: Elektrik olarak indüklenebilen soğurmadaki değişme GaAs'te InGaAs'tekinden oldukça daha büyük olur.



Şekil 8 Modülâtörün temel yapısı.  $a=200-400 \mu\text{m}$  ve  $b=2-3 \mu\text{m}$  civarındadır (şekil ölçeksizdir)



Şekil 9 Reflektörlü modülâtörün yapısı

## 7. SONUÇ

Bir devre teknolojisi olarak kullanılan HEMT ve HBT gelecekte en büyük avantajı sağlayabilir. Nitekim, bir çok Japon firması bu gün çalışmalarını bu iki teknoloji üzerine yoğunlaştırmış bulunmaktadır. Bu seçimde GaAs'in güç dissipasyonu, çok yüksek hız, sıcaklık ve radyasyon problemleri bakımından, daha az karmaşık devreler için, silisyuma karşı kazanmış olduğu önemin rolü bulunmaktadır.

Serbest-uzay dijital optik teknolojisi henüz yenidir. Bu, bağlantı başına daha düşük işaret enerjisi, chip üzerinde daha düşük bir güç kaybı, daha düşük bir ses karışması, daha düşük çapraz iç bağlantı, daha yüksek bir bağlantı kapasitesi ve daha büyük bir paralel bağlanma imkanı açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Bu teknoloji sadece bağlama yoğunluğunun önemli olduğu yüksek performanslı dijital sistemlere ait bir çözüm arzetmez fakat, aynı zamanda, bu teknoloji öyle bir çıkır açmaktadır ki, burada kullanılan optik kavramlar sistem mimari ve performansını esaslı bir şekilde değiştirme eğilimindedir.

## 8. KAYNAKLAR

- Anonymous. 1995. News&Analysis, Photonics Spectra, April, p.28.
- Aydınlı, A. 1991. Mikroelektronikte Yeni Bir Adım, TMMOB Elektrik Mühendisliği Dergisi, Ankara.
- Boyd, G. D. et al., 1989. 55 GHz. Multipole Quantum Well Opticalm Modulator, Elect. Lett. 25, 558.
- Egawa, T., et al., 1994. Room-Temperature Pulsed Operation of AlGaAs/GaAs Vertical-Cavity Surface-

- Emitting Laser Diode on Si Substrate, IEEE Photonics Technology Lett., 6 (6).
- Feldman, M. R. and Guest, C. C., 1987. Computer Generated Holographic Optical Elements for Optical Interconnection of VLSI Circuit, Appl. Optics, 26, 4377.
- Goodman, J. W. et al., 1984. "Optical Interconnections for VLSI Systems", **Proc. IEEE**, 72, 850.
- Haugen, P. R., Rychnovsky, S and Husein, A. 1986. Optical Interconnection for High Speed Computing, Optical Engineering, 25, 1076.
- Hinterlong, S. J. 1995. When Electrons Can't Keep Up It's Time to Switch to Photonics, Photonics Spectra, February.
- Hinton, H.S. 1991. Free-Space Digital Optics and Photonic Switching, Photonics Spectra, p.123, December.
- Langston, C. et al. 1995. Extending Optical Litography to 0.25 $\mu$ m and Below, Solid State Technology, A PennWell Publishing Company, Tulsa, March, p.57.
- Lentine, A. L. and Hinton, H.S. 1988. Symmetric Self-Electro-Optic Effect Device: Optical Set-Reset Latch, Appl. Phys. Lett. 52 (17).
- Lentine, A. L., et al. 1989. Symmetric Self-Electrooptic Effect Device: Differential Logic Gate, and Differential Modulator/Dedector, IEEE Journal of Quantum Electronics. 25 (8).
- Lu, B. and et al. 1994. Reconfigurable Binary Optical Routing Switches with Fan-out Based on the Integration of GaAs/AlGaAs Surface-Emitting Lasers and Heterojunction Phototransistors, IEEE Photonics Technology Letters, 6 (2).
- Midwinter, J. E. 1987. "Novel Aproach to the Design of Optical Activated Wideband Switching Matrices", **Proc. IEEE**. 134, Pt. J, 261.
- Miller, D.A.B. et al. 1984. Novel Hybrid Optically Bistable Switch: The Quantum Well Self Electro-Optic Effect Device, APL, 45 (13).
- Miller, D.A.B. et al. 1985. The Quantum Well Self-Electro-Optic Effect Device: Optoelectronic Bistability and Ocillation and Self Linearised Modulation, IEEE J. Quant. Elect., QE-21, 1462.
- Miller, D.A.B. et al. 1985. Electric Field of Absorption Near the Band Gap of Quantum Well Structure, Phys. Rev. B 32, 1043.
- Miller, D.A.B. et al. 1989. Field Effect Transistor Self-Electro-Optic Effect Device: Integrated Quantum Well Modulator and Transistor, IEEE Photonics Tech. Lett, 1 (62).
- Psaltis, D. and Farhat, N. H. 1985. "Optical Implementation of the Hopfield Model in Incline Willage" **IEEE/OSA Topical Meeting on Optical Computing**, 18-20 March 1985, Nevada, USA.
- Schneider, et al. 1994. Efficient Room-Temperature Continuous-Wave AlGaInP/AlGaAs Visible (670 nm) Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diodes, IEEE Photonics Technology Lett., 6 (3).
- Spencer, E. G. and Schmidt P. H. 1971. Vac. Sci. Technol. 8, S52.
- Stone, H.S. 1971. Parallel Processing with the Perfect Shuffle, IEEE Trans. C-20, 153-161.
- Temiz, M. ve Sayın A. R. 1993. "Geleceğin Yarıiletkeni GaAs", **5. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler**, S. 286, 7-8-9 Nisan 1993, Denizli.
- Temiz, M., İplikçi, S. ve Sayın, A.R. 1995. "GaAs Teknolojilerinin Üstünlükleri", **6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler**, S. 311, 12-13-14 Nisan 1995.
- Uchiyama S. U. and Iga, K. 1986. Consideration of Thresold Current Density of GaInAsP/InP Surface Emitting Lasers, IEEE J. Quant. Elect. QE-22, 302.
- Wood, C. A., et al. 1984. Appl. Phys. Lett. 44, 16.
- Whitehead, M. et al. 1988. Effects of Well Width on the Characteristic of GaAs/AlGaAs Multipole Quantum Well Electroabsorption Modulators, Appl. Phys. Lett. 53, 956.
- Whitehead, M and Parry, G. 1989. High Contrast Reflection Modulation at Normal Incidence in Asymmetric Multiple Quantum Well Fabry-Perot Structure, Elect. Lett. 25, 566.
- Whitehead, M, A. et al. 1989. A Low Voltage Multiple Quantum Well Reflection Modulator with 100:1 on:off Ratio, Elect. Lett.
- Wu, C.C., and et al. 1994. Reliability Studies of Gain-Guided 0.85 $\mu$ m GaAs/AlGaAs Quantum Well Surface Emitting Lasers, IEEE Photoelectronics Technology Lett., 6 (1).