

# Heterojonksiyon Bipolar Transistörler ve Yeni Tip Yarıiletkenlerin Karşılaştırılması

Serkan TOPALOĞLU, Jörn DRIESEN, Artur POLOCZEK,  
Stefan NEUMANN, F.J.TEGUDE

Solid State Electronics Department  
Faculty of Engineering  
University Duisburg - Essen, 47057, Duisburg, Germany  
e-posta: [topaloglu@hlt.uni-duisburg.de](mailto:topaloglu@hlt.uni-duisburg.de)

Anahtar sözcükler: Heterojonksiyon, HBT, GaAsSb, InGaAs, InP

## ABSTRACT

*This paper presents basics about Heterojunction Bipolar Transistors (HBTs), and also compares the material systems for InP HBTs. On the other hand, this work presents the first results belonging to the popular InP HBTs realized with popular material system called GaAsSb (Gallium Arsenide Antimonide) as base layer.*

## 1. GİRİŞ

Bundan yaklaşık 60 yıl kadar önce Bardeen ve Brattain adlı iki bilim adamı Bell Laboratuvarlarında ilk yarı iletken transistörü gerçekleştirdiler. 1950'li yılların başlarında ise Texas Instruments'da görev yapan Jack Kilby ilk tümleşik devreyi gerçekleştirdi [1]. Yine bu yıllarda, Shockley ve Kroemer heterojonksiyon yapısını teorik olarak önerdiler. Bu yapıların epitaksiyel olarak büyütülmesi oldukça zordu, bu sebeple 20 yıl sonra, modern epitaksiyel büyütme metodlarının ( III/V Grubu yarı iletkenler için) geliştirilmesi ile bu tip yapılar pratik olarak da gerçekleştirildi [2].

## 2. FET(Field Effect Transistor)'lerin HBT'ler ile karşılaştırılması

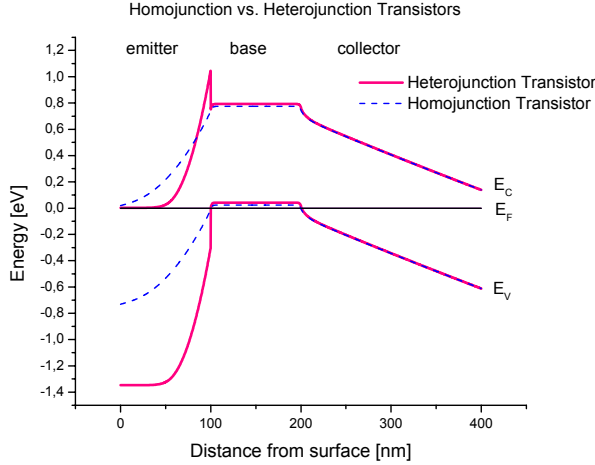
HBT'ler FET'lere kıyasla daha yüksek geçiş iletkenliği, akım yoğunluğu, ve daha düşük 1/f gürültüsü sunarlar ve yüksek hızlar için mikron altı yapılar gerektirmezler. HBT'lerin bir olumsuz tarafı ise, çok masraflı ve karmaşık epitaksiyel büyütme gerektirmeleridir[3].

## 3. HBT'lerin Çalışma Prensibi

İncelendiğinde bilinen npn tipi Si(Silisyum) bipolar transistörler ve HBT'lerin çalışma prensibi çok benzerdir. Bu bağlamda önemli olan, elektronları emetör ucundan ileri yönde kutuplanmış baz emetör jonksiyonundan, baz katmanını da geçerek ters yönde kutuplanmış baz kollektör jonksiyonuna ulaştırmak ve kollektör ucuna iletmektir. Burada dikkat edilmesi gereken noktalardan biri, elektronların bu hareketlerinde minimum rekombinasyon ile kollektöre ulaştırılmasıdır. Diğer bir husus ise, baz tarafından emetöre doğru olan delik gönderiminin (enjeksiyon) engellenmesi ve dolayısıyla, yüksek akım kazancının sağlanmasıdır. (1) bağıntısından da görülebileceği gibi heterojonksiyon yapılar ile katkılama miktarlarını akım kazancını etkilemeden değiştirmek mümkündür [4].

$$\beta_{\max} \cong \frac{N_e}{N_B} \exp\left(\frac{\Delta E_V}{kT}\right) \quad (1)$$

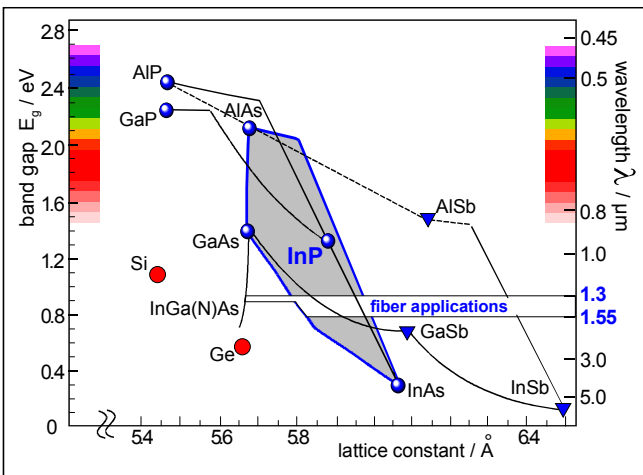
Heterojonksiyon yapılar, homojonksiyon yapılar ile kıyaslandığında, heterojonksiyon yapılar ile elektron ve delikler üzerindeki kuvvetin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebileceği görülür. (Şekil1.)



Şekil 1 Homojonksiyon ve Heterojonksiyon yapılarının bant diyagramı yardımı ile karşılaştırılması

Kısaca, heterojonksiyon ile valans bandı farkının daha fazla olması ve deliklerin emetöre gitmesinin engellenmesi sebebi ile daha yüksek emetör verimi sağlanabilmektedir. Bunun yanında, katkılamının bu verimliliği etkilememesi sebebi ile baz direnci fazla katkılama yapılarak azaltılabilir ve daha iyi yüksek frekans değerleri elde edilebilir.

Heterojonksiyon yapılar ilk olarak GaAs (Galyum Arsenit) üzerinde gerçekleştirildi [5]. Ancak daha sonraları, daha iyi özellikleri sebebi ile InP (İndiyum Fosfit) altlıklar popüler oldu. Şekil 2’ den de görülebileceği gibi InP üzerine InGaAs (İndiyum Galyum Arsenit) baz malzemesi olarak oluşturulabilir.



Şekil 2 Band aralığı mühendisliği

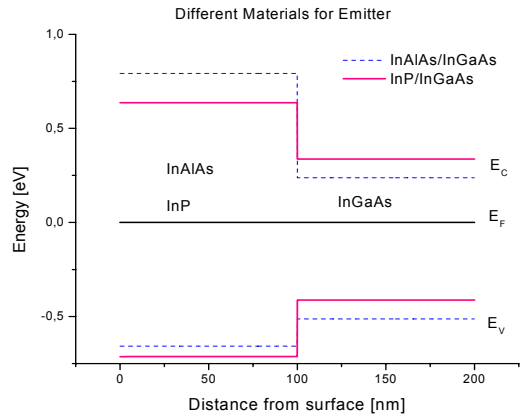
GaAs malzeme InGaAs ile kıyaslandığında görülür ki, InGaAs malzemenin elektron mobilitesi yaklaşık 1.6 kat daha iyidir. Ayrıca, InGaAs’ın daha düşük bant aralığı sebebi ile daha düşük eşik gerilimine

sahip olur, bu da daha düşük güç harcanmasını sağlar. InGaAs için olan yüzey rekombinasyon hızı GaAs’ne kıyasla 1000 kat daha yavaştır, bu sayede InGaAs ile daha yüksek akım kazancı elde edilebilir. InP malzemenin en önemli özelliklerinden biri de ısı iletkenliklerinin daha iyi olması sebebi ile mikrodalga güç aygıtları için uygun olmalarıdır.

Yukarıda belirtilen elektriksel özelliklerin yanı sıra, InP malzemeler, Şekil 2’den de görülebileceği gibi, optik zayıflamanın minimum olduğu 1.3 - 1.55μm dalga boyuna denk düşmektedir. GaAs ve Si bu dalga boyunda verimli olarak çalışmamaktadır.

#### 4. HBT’ler için kullanılan bazı epitaksiyel katmanlar

InP malzeme üzerine örgü yapısını bozmadan büyütülebilecek malzemelerin başında  $In_{0.52}Al_{0.48}As$ ,  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  ve  $GaAs_{0.55}Sb_{0.45}$  gelir. Şekil 3’ten de görülebileceği gibi emetör malzemeleri karşılaştırılırsa, görülür ki InP, InAlAs (İndiyum alüminyum arsenit) malzemeden daha iyi özellik gösterir.



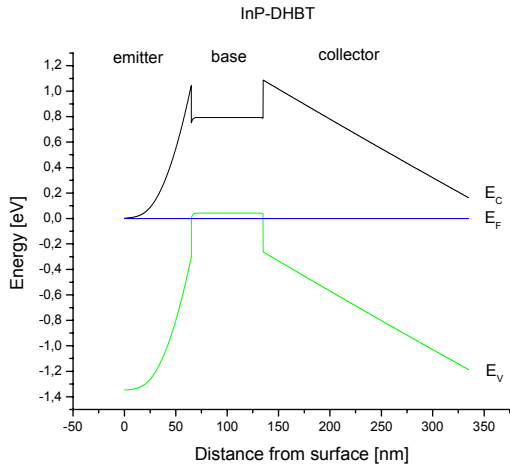
Şekil 3 InAlAs ve InP’in emetör malzemesi olarak karşılaştırılması

Her iki malzeme de geniş bant aralıklı malzeme olmasına rağmen, valans bandı süreksizliği InGaAs’ta daha fazladır ve dolayısı ile deliklerin karşılaşacağı bariyer daha büyüktür ki, bu da akım kazancını arttıran bir etkidir.

#### 5. SHBT’lerin (Single Heterojunction Bipolar Transistor) DHBT’ler (Double Heterojunction Bipolar Transistor) ile karşılaştırılması

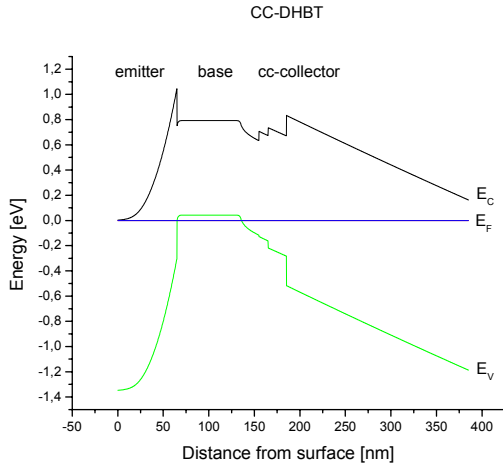
SHBT’ler ( sadece baz emetör jonksiyonunda heterojonksiyon yapısı olan) DHBT’lere (baz emetör ve baz kollektör jonksiyonlarında heterojonksiyon bulunan yapılar) kıyasla daha iyi yüksek frekans özellikleri gösterirler. Bunun en önemli sebeplerinden biri Şekil 4’ten de

görülebileceği gibi, DHBT'lerin baz kolektör jonksiyonlarında bariyer olmasıdır.



Sekil 4 InP DHBT'nin bant yapısı

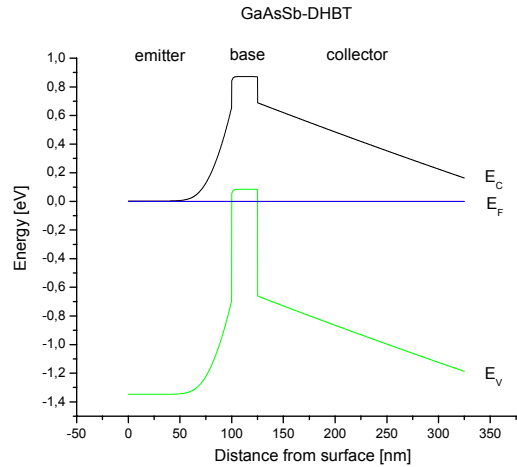
SHBT'lerin en büyük dezavantajı düşük bel verme gerilimleri olmasıdır. DHBT'lerde ise böyle bir sorun yoktur ve bu değer yaklaşık 10V mertebesindedir. Bu özellikten faydalanmak adına, DHBT'lerin baz kolektör jonksiyonundaki bloğu azaltmak için Şekil 5'ten de görüleceği gibi boşluk ve kompozit yapılar büyütülmüştür.



Sekil 5 Kompozit kolektör InP DHBT bant yapısı

Bu tip DHBT'lerin en büyük sorunu ise karmaşık büyütme tekniklerine ve işlemlere (proses) gereksinim duymasındır.

Bunun yanında GaAsSb baz malzemesi olarak kullanıldığında, bu malzemenin özelliği gereği baz kolektör jonksiyonunda böyle bir bloğa rastlanmamaktadır.



Sekil 6 GaAsSb DHBT bant yapısı

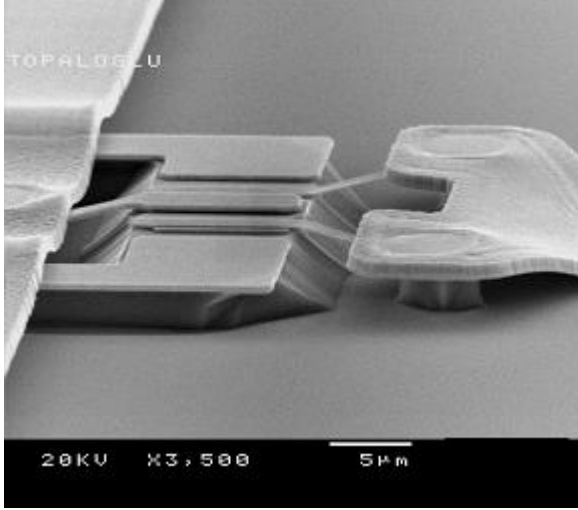
## 6. Transistörlerin üretimi ve ölçümler

GaAsSb DHBT'lerin özelliklerinin belirlenmesi için Tablo 1'deki HBT yapısı kullanılmıştır.

Tablo 1 Transistör yapısı

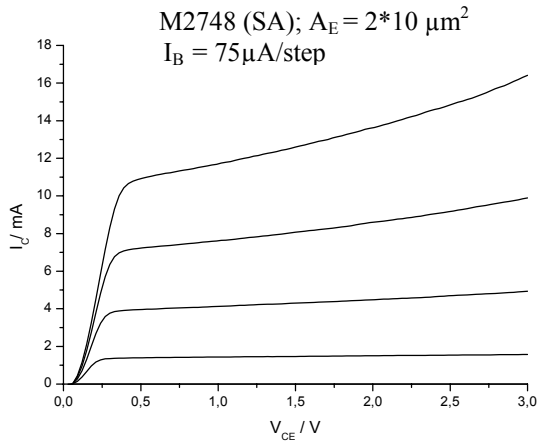
E-cap	$n^+-\text{In}_{x_2}\text{Ga}_{y_2}\text{As}$	100 nm
E	n-InP	60 nm
B	$p^+-\text{GaAs}_{0.50}\text{Sb}_{0.50}$	20 nm
C	nid-InP	300 nm
sub-C	$n^+-\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{As}$	300 nm
	$\text{InP}_{0.99}\text{Sb}_{0.01}$	41 nm
substrate	InP, s.i., exact (100)	

Epitaksiyel büyütme, AIX200 adlı MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) reaktöründe gerçekleştirilmiştir. Transistörün işlenmesinde basitçe kimyasal aşındırma (wet chemical etching) kullanılmış ve uç uç için kontak malzemesi olarak Ti/Pt/Au (Titan/Platin/Altın) tercih edilmiştir. Sonuç olarak, Şekil 7'de, işlenen transistörün tarama elektron mikroskopu (SEM-Scanning Electron Microscope) ile elde edilmiş fotoğrafı gösterilmektedir.

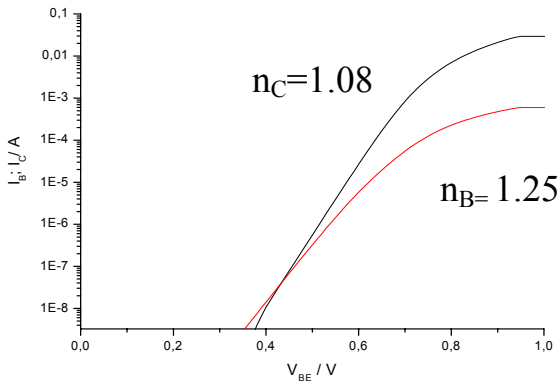


Şekil 7 İşlenmiş GaAsSb DHB T'ye ait tarama elektron mikroskobu resmi

Bu transistör , DC ölçüm sistemi ile ölçülmüş ve Şekil 8 ve Şekil 9'da sırası ile elde edilen ortak emetörlü çıkış özegrileri ve Gummel Plot eğrileri gösterilmiştir.



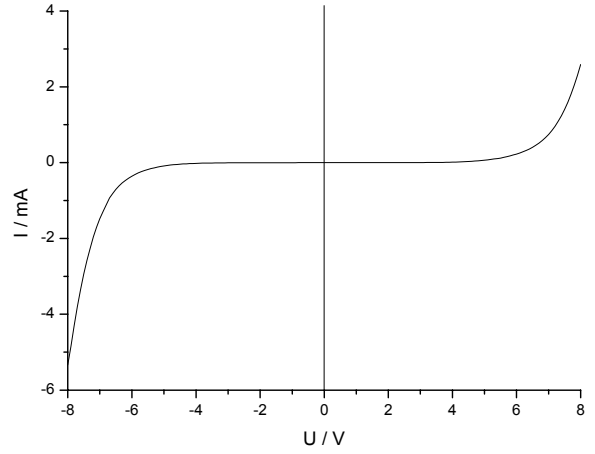
Şekil 8 Elde edilen Ortak emetör çıkış özegrileri



Şekil 9 Gumel –Plot eğrileri

Diğer bir yandan, yüksek frekans özelliklerinin belirlenmesi açısından, HP8510C (45MHz – 40GHz) network analizörü kullanılmış ve s-parametreleri aracılığı ile  $f_T = 100\text{GHz}$  (transition frequency) ve  $f_{max} = 45\text{GHz}$  (maximum oscillation frequency) olarak bulunmuştur.

Burada  $f_{max}/f_T$  oranına bakıldığında bu değerin 1'den küçük olduğu görülmektedir. Maksimum osilasyon frekansını etkileyen parametreler (2) nolu bağıttan da görülebileceği üzere, baz kollektör kapasitesi ve baz direncidir. Maksimum osilasyon frekans değerinin beklenenden düşük olmasının nedenini araştırmak için, baz katmanında yapılan transmisyon hat ölçümleri (TLM) sonucu, baz kantağının non-lineer davranış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 10 Baz için TLM

Bu eğri yardımı ile görülmüştür ki, baz katmanında yüksek katkılanmış ve ohmik olması beklenen baz malzemesinden başka bir katman oluşmuştur. Ara katman (interlayer) diye adlandırılan bu katman, ohmik kontakların gerçekleşmesini engellemiş ve baz kantağının kalitesini önemli ölçüde azaltmış ve bu da yüksek frekans değerlerine yansımıştır. Bu arada InP üzerine tek katman olarak GaAsSb büyütülmüş ve p-GaAsSb üzerine olan kontakların kalitesine bakılmıştır ve görülmüştür ki  $R_{cont} = 400\text{Ohm} \cdot \mu\text{m}$  (kontak direnci) ve  $R_{Sh} = 335\text{W/sq}$  (katman direnci). Bu değerler p-InGaAs katman üzerine oluşturulan kontaklardan ~3 kat daha iyidir [6].

## 7. SONUC

GaAsSb DHB Tler, baz malzemesinin özelliği gereği, optik ve mikrodalga uygulamaları için oldukça uygundur. Ancak Sb (antimon) elementinin yapısı gereği bu tip bazın oluşturulması oldukça zahmetlidir ki, yukarıda da bahsedildiği üzere bazı

sorunlar oluşmaktadır. Bu sorunlar epitaksiyel büyütme metodunun optimizasyonu ile düzeltilebilir. Bunun yanında baz kontağı problemi için proses esnasında ek çözümler bulunabilir ve daha iyi kontaklar elde edilebilir. Bu sorunlar çözüldükten sonra normal prosesin yanında çeşitli yüksek frekans uygulamalarına yönelik metotlar uygulanarak (baz altı aşındırma –base undercut, altlık transferi-transferred substrate-. vs.) maksimum osilasyon frekansı önemli ölçüde artırılabilir. Baz ve kollektör katmanının kalınlıklarının değiştirilmesi ile de  $f_T$  değeri artırılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Wiliam F. Brinkman, et.al, A history of the invention of the Transistor and where It will lead us,, IEEE JOURNAL of SOLID STATE CIRCUITS; Vol 32, No 12, pp 18581865-742, Dec. 1997.
- [2] Herbert Kroemer., Heterostructure bipolar transistors : What should we build?, JOURNAL of VACUUM SCINCE TECHNOLOGY B1(12), Apr-juna 1983
- [3] Jalali Bahram, InP HBTs, Growth, Processing and Applications, Pearton Editors, 1995
- [4] Herbert Kroemer., Theory of wide-gap emitter for transistors, Proc. IRE, 1957, pp 1535 – 1538
- [5] P. Asbeck Kroemer., AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors: issues and prospects for application', Proc. IRE, 1957, pp 1535 – 1538
- [6] S. Neumann, S. Topaloglu, J. Driesen, Z. Jin, W. Prost, F.-J Tegude, Study of ohmic contacts and interface layers of carbon doped GaAsSb/InP heterostructures for DHBT applications, 12th Metal organic vapor phase epitaxy (ICMOVPEXII), May30-June 4 2004', Proc. IRE, 1957, pp 1535 – 1538